

# BRUNO GUZZO DA SILVA

# MODELAGEM E SIMULAÇÃO DO PROCESSO DE SECAGEM DOS FRUTOS DE AROEIRA-VERMELHA (Schinus terebinthifolius Raddi)

CAMPINAS 2013



## UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: SISTEMAS DE PROCESSOS QUÍMICOS E INFORMÁTICA.

## **BRUNO GUZZO DA SILVA**

# MODELAGEM E SIMULAÇÃO DO PROCESSO DE SECAGEM DOS FRUTOS DE AROEIRA-VERMELHA (Schinus terebinthifolius Raddi)

Orientador(a): Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Ana Maria Frattini Fileti.

Dissertação de Mestrado apresentada à Faculdade de Engenharia Química da Universidade Estadual de Campinas como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Química.

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO DEFENDIDA POR BRUNO GUZZO DA SILVA E APROVADA PELA BANCA EXAMINADORA EM 17 DE MAIO DE 2013.

nutal

Prof. Dr<sup>a</sup>. Ana Maria Frattini Fileti

CAMPINAS 2013

### Ficha catalográfica Universidade Estadual de Campinas Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura Rose Meire da Silva - CRB 8/5974

Silva, Bruno Guzzo da, 1988-Modelagem e simulação do processo de secagem dos frutos de aroeiravermelha (Schinus terebinthifolius Raddi) / Bruno Guzzo da Silva. – Campinas, SP : [s.n.], 2013.
Orientador: Ana Maria Frattini Fileti. Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Química.
1. Secagem. 2. Frutas - Secagem. 3. Aroeira - Vermelha - Secagem. 4. Frutas -Conservação - Secagem. 5. Redes neurais (Computação). I. Frattini Fileti, Ana Maria, 1965-. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Química. III. Título.

### Informações para Biblioteca Digital

Título em inglês: Modeling and simulation of the drying process of Brazilian pepper tree fruits (Schinus terebinthifolius Raddi) Palavras-chave em inglês: Drying Fruit - Drying Brazilian pepper tree - Drying Fruit - Preservation - Drying Neural networks (Computer) Área de concentração: Sistemas de Processos Químicos e Informática Titulação: Mestre em Engenharia Química Banca examinadora: Ana Maria Frattini Fileti [Orientador] Antônio Carlos Luz Lisbôa Paulo Sérgio da Silva Porto Data de defesa: 17-05-2013 Programa de Pós-Graduação: Engenharia Química

Dissertação de Mestrado defendida por Bruno Guzzo da Silva e aprovada em 17 de maio de 2013 pela banca examinadora constituída pelos doutores:

Anautan

Prof. Dr<sup>a</sup>. Ana Maria Frattini Fileti - (Orientador)

DESQ/ FEQ-UNICAMP

Prof. Dr. Antonio Carlos Luz Lisbôa (titular)

DEPRO/ FEQ-UNICAMP

Prof. Dr. Paulo Sérgio da Silva Porto (titular)

DECOM/ UFES

"A Deus, razão de minha vida.

À minha famíla."

#### AGRADECIMENTOS

São muitas as pessoas que eu gostaria de agradecer, pois de uma forma ou outra contribuíram para a concretização deste trabalho. Alguns foram gestos pequenos, mas que fizeram diferença na subida de mais um degrau em minha carreira profissional.

Agradeço primeiramente a Deus por ter me instruído nesta jornada, por ter colocado em minha vida pessoas que muito contribuíram para a minha formação e também pela proteção e saúde, sem as quais não poderia realizar este trabalho.

Aos meus pais e demais familiares pelo apoio, amor, compreensão e credibilidade.

À minha querida orientadora Ana Maria Frattini Fileti pelos momentos de confiança e apoio, pelo lado humano de ser e exemplo de profissionalismo.

Ao professor Antonio Carlos Luz Lisbôa pelas valiosas sugestões na dissertação e pelos bons valores humanos transmitidos durante o período de mestrado.

Aos professores Marcelo Guilherme Guida Mazza, José Vicente Hallak d'Angelo e Paulo Sérgio da Silva Porto pelas contribuições ao longo deste trabalho. Ao professor Osvaldir Pereira Taranto e à professora Miriam Dupas Hubinger pelas contribuições na parte experimental deste trabalho.

Ao senhor Welington Secundino pela ajuda na obtenção da matéria-prima e à empresa AgroRosa pela disposição em dividir sua experiência no processamento dos frutos de aroeiravermelha.

Ao CNPq pelo apoio finaceiro. Aos professores, funcionários e colegas da FEQ/UNICAMP e aqueles que me deram à oportunidade de apreender ao seu lado.

Aos queridos amigos pelos momentos de descontração, em especial à Dayana, Roniérik, Liliane, Thiago, Monise, todos os amigos do "Grode Exílio" e aos amigos do LESQ (Rejane, Raphael, Saulo e Brunno).

A todos muito obrigado!

vii

" O professor medíocre conta. O bom professor explica. O professor superior demonstra. O grande professor inspira." (William Arthur Ward)

#### RESUMO

A pimenta-rosa, produzida a partir dos frutos da aroeira-vermelha (Schinus terebinthifolius Raddi), é um dos mais sofisticados condimentos da culinária internacional e que vem apresentando um aumento na sua demanda. No entanto, na literatura encontram-se poucos estudos sobre o seu processamento, em que a secagem é uma etapa indispensável e que ainda é realizada de forma empírica. Nas empresas beneficiadoras, a etapa de secagem tem por finalidade aumentar a vida de prateleira do produto, além de agregar valor aos frutos da aroeira-vermelha. Neste contexto, este trabalho teve por objetivo realizar investigações no processo de secagem de frutos de aroeira-vermelha, focando principalmente no estudo de modelos matemáticos para a simulação do processo. As amostras de frutos de aroeira-vermelha, utilizadas nos ensaios de caracterização e secagem, foram classificadas manualmente e reumidificadas artificialmente. Para a caracterização do sistema particulado, os seguintes parâmetros foram determinados: teor de umidade em base seca; diâmetro médio e massa específica aparente dos frutos; e massa específica e porosidade do leito de frutos. Também foram determinadas, através do método estático, as isotermas de dessorção de umidade dos frutos em temperaturas de 30, 50 e 70 °C. Um Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR) com 11 experimentos foi desenvolvido e foram investigadas as influências da temperatura (40 a 70 °C) e da velocidade do ar de secagem (0,4 a 0,8 m/s) no processo. Em cada um dos ensaios do DCCR foram analisadas a cinética de secagem e a curva de taxas de secagem dos frutos de aroeira-vermelha. Os modelos de difusão, de Lewis, de Henderson e Pabis, de Page modificado e de Henderson foram ajustados aos dados experimentais da cinética de secagem, sendo realizada a comparação destes modelos com um modelo fundamentado na Inteligência Artificial. Os resultados revelaram que, para as condições operacionais estudadas neste trabalho, a temperatura do ar de secagem apresenta uma influência maior no processo. A cinética de secagem ocorre principalmente no período de taxa decrescente. Isto indica que a secagem ocorre pela remoção da umidade interna do sólido. O modelo via Redes Neurais Artificiais (RNA's) e o modelo de Henderson apresentaram os resultados mais satisfatórios no ajuste aos dados da cinética de secagem dos frutos de aroeira-vermelha. No entanto, observou-se que a principal vantagem do modelo de RNA, em relação aos modelos clássicos, foi a sua generalidade. O modelo de RNA foi capaz de descrever uma série de experiências com precisão, enquanto que a aplicação de modelos clássicos foi limitada a uma experiência específica. Para o modelo neural, esta gama de condições experimentais pode ser expandida através da adição de novos conjuntos de experimentos de treinamento. Deste modo, os resultados satisfatórios da utilização de um modelo baseado em RNA's em processos de secagem indicam a potencialidade da aplicação desta ferramenta na modelagem de processos industriais de secagem.

**PALAVRAS-CHAVE:** Modelagem de secagem; aroeira-vermelha; redes neurais artificiais; planejamento de experimentos.

#### ABSTRACT

The pink pepper, produced from the Brazilian pepper-tree fruits (Schinus terebinthifolius Raddi), is one of the most sophisticated condiments of the international cuisine. The demand for pink pepper is increasing because it adds taste and refinement to international cuisine. Until now, rare are the studies that investigated the drying of Brazilian pepper-tree fruits. In the processing companies, the process is carried out empirically and the drying operation is an important step. The Brazilian pepper-tree fruits are dried to inhibit microbial development and quality decay. Another benefit of drying is a reduction in weight. In this context, this study aimed to perform investigations in the drying process of Brazilian pepper-tree fruits, focusing mainly in the study of mathematical models to simulate drying kinetics. Before each test, the fruits were sorted manually and humidified artificially. In this study, physical characterization of Brazilian pepper-tree fruits was obtained by evaluating the moisture content on dry basis; mean diameter and apparent density; bulk density and porosity. The moisture sorption isotherm, at temperatures of 30, 50 and 70 °C, were determined by the static method. A Central Composite Rotable Design (CCRD) with 11 experiments was developed. In each experiment, the drying kinetics and the drying rate were investigated, as well as the influence of input variables on the drying process. Classical models were fitted to the drying data, as well as a model based on Artificial Intelligence. In the operating conditions of this study, the results revealed that the air temperature has a greater influence on the thin layer drying process of Brazilian pepper-tree fruits. The drying kinetics occurs mainly in the falling-rate period of drying. This indicates that drying occurs mainly by removal of internal moisture of the solid. The artificial neural network model and the Henderson model fitted to the experimental data more accurately in comparison to the various mathematical models. However, it was observed that the main advantage of the artificial neural network model over classical models was their generality. The ANN model was able to describe a range of experiments accurately, while the application of classical models is limited to a specific experiment. For the neural model, this range of experimental conditions may be expanded by addition of new sets of experiments in training.

**KEYWORDS:** Drying modeling; Brazilian pepper-tree; artificial neural network; design of experiments.

# LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Árvore da aroeira-vermelha em São Mateus-ES.	5
Figura 2 - Frutos de aroeira-vermelha	7
Figura 3 - Processamento dos frutos de aroeira-vermelha	3
Figura 4 - Secadores da empresa AgroRosa9	)
Figura 5 - Isotermas de dessorção de umidade dos frutos de aroeira-vermelha15	5
Figura 6 - Curva típica de secagem convectiva16	5
Figura 7 - Curva típica da taxa de secagem convectiva	7
Figura 8 - Dados experimentais e simulação da cinética em temperaturas de 40, 50 e 60 °C 19	)
Figura 9 - Neurônio artificial	5
Figura 10 - <i>Perceptron</i> com três camadas	7
Figura 11- Modelos utilizados na secagem de diferentes produtos	2
Figura 12 - Fluxograma das etapas realizadas no presente trabalho	5
Figura 13 - Amostra de aroeira-vermelha <i>in natura</i>	7
Figura 14 - Equipamento experimental de secagem em leito fixo	)
Figura 15 - Diagrama esquemático do secador de bandeja	)
Figura 16 - Fluxograma básico dos procedimentos utilizados no pré-processamento	ł
Figura 17 - Etapas realizadas nas análises estatísticas realizadas neste trabalho	7
Figura 18 – Fluxograma das etapas utilizadas para a modelagem e simulação via RNA's 53	3
Figura 19 - Ajuste do modelo de Caurie aos dados experimentais	3
Figura 20 - Comparação entre isotermas de sorção de 50 °C (Literatura versus Presente trabalho	)
para o modelo de Caurie	1
Figura 21 - Diagrama de pareto para o tempo de operação de 4 horas	5
Figura 22 - Diagrama de pareto para o tempo de operação de 6 horas	5

Figura 23 - Superfície de resposta (a) e Curva de contorno (b) para a razão de umidade dos frutos
de aroeira-vermelha (adm) em função da Temperatura e da Velocidade do ar de secagem para o
tempo operacional de 1 hora
Figura 24 - Superfície de resposta (a) e Curva de contorno (b) para a razão de umidade dos frutos
de aroeira-vermelha (adm) em função da Temperatura e da Velocidade do ar de secagem para o
tempo operacional de 2 horas
Figura 25 - Superfície de resposta (a) e Curva de contorno (b) para a razão de umidade dos frutos
de aroeira-vermelha (adm) em função da Temperatura e da Velocidade do ar de secagem para o
tempo operacional de 3 horas
Figura 26 - Superfície de resposta (a) e Curva de contorno (b) para a razão de umidade dos frutos
de aroeira-vermelha (adm) em função da Temperatura e da Velocidade do ar de secagem para o
tempo operacional de 4 horas
Figura 27 - Valores experimentais versus valores previstos pelo modelo codificado para a razão
de umidade em 4 horas de operação71
Figura 28 - Erro <i>versus</i> experimentos do DCCR para o tempo operacional de 4 horas
Figura 29 - Resultados experimentais da cinética de secagem para os ensaios de 1 a 473
Figura 30 - Resultados experimentais da cinética de secagem para os ensaios de 5 a 874
Figura 31 - Resultados experimentais da cinética de secagem para os ensaios de 9 a 11
Figura 32 - Resultados experimentais das taxas de secagem para os ensaios de 1 a 4
Figura 33 - Resultados experimentais das taxas de secagem para os ensaios de 5 a 8
Figura 34 - Resultados experimentais das taxas de secagem para os ensaios de 9 a 11
Figura 35 - Esquema da topologia da RNA obtida na modelagem 3
Figura 36 - Dados reais de verificação versus dados preditos pela modelagem 3
Figura 37 - Erro de ajuste <i>versus</i> experimentos de verificação na modelagem 3
Figura 38 - Ajuste da modelagem 3 aos experimentos de verificação
Figura 39 - Dados reais versus dados preditos pelo modelo de difusão

rigara 10° Erro de ajaste do modero de anasao versas pontos experimentaris
Figura 41 - Ajuste dos modelos de difusão e de RNA aos dados do experimento 4
Figura 42 - Dados reais versus dados preditos pelo modelo de Lewis
Figura 43 - Erro de ajuste do modelo de Lewis <i>versus</i> pontos experimentais
Figura 44 - Ajuste dos modelos de Lewis, RNA e difusão aos dados do experimento 9
Figura 45 - Dados reais versus dados preditos pelo modelo de Henderson e Pabis
Figura 46 - Erro de ajuste do modelo de Henderson e Pabis versus pontos experimentais
Figura 47 - Ajuste dos modelos de Henderson e Pabis, Lewis e difusão aos dados do experimento 1
Figura 48 - Dados reais versus dados preditos pelo modelo de Page modificado
Figura 49 - Erro de ajuste do modelo de Page modificado versus pontos experimentais
Figura 50 - Ajuste dos modelos de Page modificado, de Henderson e Pabis, de Lewis e de difusão aos dados do experimento 1
Figura 51 - Dados reais versus dados preditos pelo modelo de Henderson
Figura 52 - Erro de ajuste do modelo de Henderson versus pontos experimentais 102
<ul><li>Figura 52 - Erro de ajuste do modelo de Henderson <i>versus</i> pontos experimentais</li></ul>
<ul> <li>Figura 52 - Erro de ajuste do modelo de Henderson <i>versus</i> pontos experimentais</li></ul>
<ul> <li>Figura 52 - Erro de ajuste do modelo de Henderson <i>versus</i> pontos experimentais</li></ul>
<ul> <li>Figura 52 - Erro de ajuste do modelo de Henderson <i>versus</i> pontos experimentais</li></ul>
Figura 52 - Erro de ajuste do modelo de Henderson versus pontos experimentais.       102         Figura 53 - Ajuste dos modelos de Henderson, Lewis, Henderson e Pabis e Page modificado aos dados do experimento 4.       103         Figura 54 - Ajuste dos modelos de Henderson e de RNA aos dados do experimento 4.       104         Figura 55 - Vazão mássica do ar em função da queda de pressão na placa de orifício.       113         Figura 56 - Curva de calibração para o termopar do sistema de controle do equipamento de secagem.       114         Figura 57 - Diagrama de pareto para o tempo de operação de 1 hora.       118
Figura 52 - Erro de ajuste do modelo de Henderson versus pontos experimentais.       102         Figura 53 - Ajuste dos modelos de Henderson, Lewis, Henderson e Pabis e Page modificado aos dados do experimento 4.       103         Figura 54 - Ajuste dos modelos de Henderson e de RNA aos dados do experimento 4.       104         Figura 55 - Vazão mássica do ar em função da queda de pressão na placa de orifício.       113         Figura 56 - Curva de calibração para o termopar do sistema de controle do equipamento de secagem.       114         Figura 57 - Diagrama de pareto para o tempo de operação de 1 hora.       118         Figura 58 - Diagrama de pareto para o tempo de operação de 2 horas.       119
Figura 52 - Erro de ajuste do modelo de Henderson versus pontos experimentais.       102         Figura 53 - Ajuste dos modelos de Henderson, Lewis, Henderson e Pabis e Page modificado aos dados do experimento 4.       103         Figura 54 - Ajuste dos modelos de Henderson e de RNA aos dados do experimento 4.       104         Figura 55 - Vazão mássica do ar em função da queda de pressão na placa de orifício.       113         Figura 56 - Curva de calibração para o termopar do sistema de controle do equipamento de secagem.       114         Figura 57 - Diagrama de pareto para o tempo de operação de 1 hora.       118         Figura 58 - Diagrama de pareto para o tempo de operação de 3 horas.       119         Figura 59 - Diagrama de pareto para o tempo de operação de 3 horas.       119

# LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - MODELOS MATEMÁTICOS PARA AJUSTE DE ISOTERMAS DE SORÇÃO EM ALIMENTOS
TABELA 2 - UMIDADE RELATIVA DAS SOLUÇÕES SALINAS SATURADAS EM FUNÇÃO DAS TEMPERATURAS ESTUDADAS
TABELA 3 - VALORES UTILIZADOS NO DELINEAMENTO
TABELA 4 - MATRIZ DO DELINEAMENTO
TABELA 5 - ORGANIZAÇÃO DOS BANCOS DE DADOS UTILIZADOS PARA AS MODELAGENS
TABELA 6 - CARACTERÍSTICAS DAS MODELAGENS INVESTIGADAS 54
TABELA 7 - MODELOS SEMI-EMPÍRICOS PARA A CINÉTICA DE SECAGEM 59
TABELA 8 - CARACTERIZAÇÃO DOS FRUTOS DE AROEIRA-VERMELHA 60
TABELA 9 - RESULTADOS DO LEVANTAMENTO DAS ISOTERMAS DE EQUILÍBRIO. 
TABELA 10 - RESULTADOS DA SIMULAÇÃO COM OS MODELOS DE ISOTERMAS DE SORÇÃO
TABELA 11 - PARÂMETROS AJUSTÁVEIS DO MODELO DE CAURIE PARA CADA TEMPERATURA
TABELA 12 - CONDIÇÕES MEDIDAS E RESPOSTAS DO PROCESSO EM TODOS OS ENSAIOS DO DCCR
TABELA 13 - MODELOS CODIFICADOS PARA A RAZÃO DE UMIDADE EM CERTOS TEMPOS OPERACIONAIS
TABELA 14 - RESULTADOS DAS ANOVA'S PARA OS MODELOS CODIFICADOS 68
TABELA 15 - NÚMERO DE VETORES UTILIZADOS NAS MODELAGENS VIA RNA's 79
TABELA 16 - RESULTADOS DOS TREINAMENTOS DAS RNA'S ESCOLHIDAS

TABELA 17 - RESULTADOS DA SIMULAÇÃO VIA RNA COM OS DADOS DE
VERIFICAÇAO
TABELA 18 - VIÉS E PESOS ENTRE OS NEURÔNIOS (RNA 3).       81
TABELA 19 - RESULTADOS DA MODELAGEM E SIMULAÇÃO DO MODELO DE DIFUSÃO
TABELA 20 - RESULTADOS DA MODELAGEM E SIMULAÇÃO DO PROCESSO PELO
MODELO DE LEWIS
TABELA 21 - RESULTADOS DA MODELAGEM E SIMULAÇÃO DO PROCESSO PELO
MODELO DE HENDERSON E PABIS
TABELA 22 - RESULTADOS DA MODELAGEM E SIMULAÇÃO DO PROCESSO PELO
MODELO DE PAGE MODIFICADO
TABELA 23 - RESULTADOS DA MODELAGEM E SIMULAÇÃO DO PROCESSO PELO
MODELO DE HENDERSON
TABELA 24 - PARÂMETROS ADIMENSIONAIS 112
TABELA 25 - ANOVA PARA O MODELO NO TEMPO DE OPERAÇÃO DE 1 HORA 121
TABELA 26 - ANOVA PARA O MODELO NO TEMPO DE OPERAÇÃO DE 2 HORAS 121
TABELA 27 - ANOVA PARA O MODELO NO TEMPO DE OPERAÇÃO DE 3 HORAS 122
TABELA 28 - ANOVA PARA O MODELO NO TEMPO DE OPERAÇÃO DE 4 HORAS 122
TABELA 29 - ANOVA PARA O MODELO NO TEMPO DE OPERAÇÃO DE 5 HORAS 122
TABELA 30 - ANOVA PARA O MODELO NO TEMPO DE OPERAÇÃO DE 6 HORAS 123

# NOMENCLATURA

a	Parâmetro ajustável do modelo matemático (°C <sup>-1</sup> )
$a_1$	Parâmetro ajustável do modelo matemático (adimensional)
$a_w$	Atividade de água (adimensional)
a <sub>i</sub>	Entrada do neurônio artificial (adimensional)
A	Parâmetro ajustável do modelo matemático (adimensional)
$A_1$	Área da tubulação (cm <sup>2</sup> )
$A_2$	Área do orifício da placa (cm <sup>2</sup> )
$A_3$	Área da seção transversal do vaso de secagem $(m^2)$
b	Parâmetro ajustável do modelo matemático (adimensional)
b <sub>j</sub>	Saída do neurônio artificial (adimensional)
В	Parâmetro ajustável do modelo matemático (adimensional)
Bi <sub>m</sub>	Biot mássico (adimensional)
c <sub>i</sub>	Neurônios artificiais da camada C (adimensional)
С	Parâmetro ajustável do modelo matemático (adimensional)
$d_p$	Diâmetro médio dos frutos (cm)
D	Difusividade efetiva (cm <sup>2</sup> /min)
$e_t$	Erro de ajuste do modelo estatístico (adimensional)
<i>e</i> <sub>i</sub>	Erro de ajuste do modelo (adimensional)
F <sub>cal</sub>	Distribuição de Fischer calculada (adimensional)
F <sub>tab</sub>	Distribuição de Fischer tabelada (adimensional)
$\Delta h$	Queda de pressão na placa de orifício (cm H <sub>2</sub> O)
Ι	Vetor-entrada da camada de entrada da RNA (adimensional)

J	fluxo de umidade (cm <sup>2</sup> /min)
k <sub>m</sub>	Coeficiente convectivo de transferência de massa (cm/min)
K	Constante de secagem (min <sup>-1</sup> )
$K_1$	Parâmetro ajustável do modelo (min <sup>-1</sup> )
$K_2$	Parâmetro ajustável do modelo (min <sup>-1</sup> )
$K_p$	Coeficiente de partição (adimensional)
l	Quantidade de experimentos realizados.
L	Número de neurônios da camada A da RNA (adimensional)
т	Coeficiente adimensional (adimensional)
$m_{s,t}$	Massa de sólidos em um certo tempo de secagem (g)
$m_{s,s}$	Massa seca dos sólidos (g)
$m_p$	Massa total da partícula (g)
$m_l$	Massa do leito de partículas (g)
М	Número de neurônios da camada B da RNA (adimensional)
MSE	Erro quadrático médio (adimensional)
n	Parâmetro ajustável do modelo matemático (adimensional)
Ν	Quantidade de vetores utilizados em cada etapa (treinamento ou verificação)
p-valor	Estatística utilizada para sintetizar o resultado de um teste de hipótese
p	Presão parcial de vapor no material a uma dada temperatura (N/m <sup>2</sup> )
$p_w$	Presão de vapor da água pura a uma dada temperatura (N/m <sup>2</sup> )
Р	Pressão barométrica local (mm Hg)
$P_1$	Pressão estática na linha de ar (cmH <sub>2</sub> O)
Q	Vazão mássica do ar de secagem (kg/min)
r	Coordenada esférica (cm)

$r_p$	Raio da partícula (cm)
$R_1, R_2$	Constantes do modelo (adimensional)
S	Comprimento característico do sistema (cm)
S	desvio padrão
SSE	Somatório do erro ao quadrado (adimensional)
t	Tempo (min)
Т	Temperatura do ar de secagem (°C)
Th	Residual de atividade (ou viés) (adimensional)
UR	Umidade relativa do ar de secagem (adimensional)
и	Velocidade do ar de secagem no leito (m/s)
v <sub>ij</sub>	Fator ponderal da interconexão entre o i-ésimo nódulo da camada A e o j-ésimo da
camada B (adi	imensional)
$V_p$	Volume total da partícula (cm <sup>3</sup> )
$V_l$	Volume do leito de partículas (cm <sup>3</sup> )
w <sub>ij</sub>	Pesos entre as conexões dos neurônios (adimensional)
Wo	Entrada adicional do neurônio artificial (adimensional)
w <sub>jk</sub> camada C	Fator ponderal da interconexão entre o j-ésimo nódulo da camada B e o k-ésimo da (adimensional)
<i>x</i> <sub>1</sub>	Temperatura codificada (adimensional)
<i>x</i> <sub>2</sub>	Velocidade codificada (adimensional)
$X_{s,c}$	Umidade crítica de secagem (adimensional)
$X_{s,t}$	Umidade do sólido em base seca e um certo tempo (adimensional)
$X_{s,e}$	Umidade de equilíbrio do sólido (adimensional)
$X_{s,o}$	Umidade inicial do sólido (adimensional)
$X_{u,t}$	Umidade do sólido em base úmida e um certo tempo (adimensional)

X <sub>i,máximo</sub>	Maior valor real da variável
X <sub>i,mínimo</sub>	Menor valor real da variável
X <sub>i</sub>	Variável codificada
$X_i$	Variável real
<i>Yi</i>	Valor medido
$\overline{y}$	Média das medidas

# Letras gregas

α	Coeficiente de descarga (adimensional)
γ	Fator de compressibilidade (adimensional)
З	Porosidade do leito fixo (adimensional)
β	Coeficiente adimensional (adimensional)
$eta_0$	Coeficiente de interceptação do modelo estatístico (adimensional)
$\beta_1$	Termo linear do modelo estatístico (adimensional)
$\beta_{12}$	Termo de interação do modelo estatítico (adimensional)
$\beta_{11}$	Termo quadrado do modelo estatístico (adimensional)
$ ho_p$	Massa específica aparente do sólido (g/cm <sup>3</sup> )
$ ho_l$	Massa específica do leito (g/cm <sup>3</sup> )
ρ	Massa específica do ar de secagem no leito (g/cm <sup>3</sup> )
$\theta_t$	Razão de umidade (adimensional)
$\overline{ heta}^{*}$	Umidade adimensional (adimensional)
θ, φ	Coordenadas esféricas
$\phi_p$	Esfericidade do fruto de aroeira-vermelha (adimensional)

# SUMÁRIO

1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS 1
1.1 INTRODUÇÃO1
1.2 JUSTIFICATIVA
1.3 OBJETIVOS
1.3.1 <b>Objetivo geral</b>
1.3.2 <b>Objetivos específicos</b>
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 4
2.1 AROEIRA-VERMELHA
2.1.1 Aspectos gerais
2.1.2 Potencialidades da aroeira-vermelha
2.1.3 Processamento dos frutos da aroeira-vermelha
2.2 SECAGEM 10
2.2.1 Aspectos gerais
2.2.2 Umidade de um sólido 11
2.2.3 Isotermas de equilíbrio
2.2.4 Cinética de secagem
2.3 MODELAGENS DE PROCESSOS DE SECAGEM 19
2.3.1 Planejamento experimental e otimização de processos
2.3.2 <b>Redes neurais artificiais</b>
2.3.3 Modelo de difusão
2.3.4 Modelos semi-empíricos e empíricos

2.4 CONCLUSÕES
3 MATERIAIS E MÉTODOS
3.1 MATERIAIS
3.1.1 Matéria-prima
3.1.2 Equipamento experimental
3.2 OPERAÇÕES DE PRÉ-PROCESSAMENTO 41
3.3 PARÂMETROS DOS FRUTOS DE AROEIRA-VERMELHA 42
3.3.1 <b>Teor de umidade em base seca</b>
3.3.2 Diâmetro médio e massa específica aparente dos frutos
3.3.3 Massa específica e porosidade do leito fixo
3.3.4 <b>Teor de umidade de equilíbrio</b>
3. 4 AVALIAÇÃO DA SECAGEM MEDIANTE UM PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL 46
3.4.1 Planejamento experimental do processo de secagem
3.4.2 Metodologia experimental
3.4.3 Cinética de secagem dos frutos de aroeira-vermelha
3.4.3.1 Modelo via redes neurais artificiais
3.4.3.2 Modelo de difusão
3.4.3.3 Modelos semi-empíricos
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES
4.1 PARÂMETROS DOS FRUTOS DE AROEIRA-VERMELHA
4.1.1 <b>Teor de umidade de equilíbrio</b>
4.2 AVALIAÇÃO DA SECAGEM MEDIANTE UM PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL. 64
4.2.1 Planejamento experimental para o processo de secagem
4.2.2 Cinética de secagem dos frutos da aroeira-vermelha

4.2.2.1 Modelo via redes neurais artificiais	
4.2.2.2 Modelo de difusão	85
4.2.2.3 Modelos semi-empíricos	88
5 CONCLUSÕES	105
6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	106
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	107
APÊNDICE A - Calibração da placa de orifício	112
APÊNDICE B - Calibração do termopar	114
APÊNDICE C - Testes preliminares	115
APÊNDICE D - Programa de treinamento e verificação das Redes Neurais A	Artificiais no
software MATLAB.	116
APÊNDICE E - Diagrama de Pareto para os períodos operacionais analisados.	118
APÊNDICE F - ANOVA's para os modelos codificados.	121

### **1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS**

#### 1.1 INTRODUÇÃO

A pimenta-rosa, produzida a partir dos frutos da aroeira-vermelha (*Schinus terebinthifolius* Raddi), é um dos mais sofisticados condimentos da culinária internacional. Seu consumo tem apresentado crescimento significativo tanto no mercado nacional quanto no mercado internacional, promovendo desta maneira um aumento na sua procura pelas indústrias alimentícias. Apesar da crescente demanda para a comercialização da pimenta-rosa, na literatura não se encontram muitos estudos a respeito do seu processamento, que é um fator fundamental para atender os requisitos de qualidade impostos pelos países consumidores.

No beneficiamento dos frutos da aroeira-vermelha, a secagem é uma etapa indispensável, pois tem como finalidade aumentar a vida de prateleira e agregar valor ao produto. Além disto, a remoção de grande parte de água contida no material torna o transporte e a embalagem economicamente mais vantajosos. No entanto, nas empresas beneficiadoras, o processo de desidratação normalmente é realizado de forma empírica. Deste modo, investigar a perda de umidade, durante a secagem de frutos de aroeira-vermelha, é fundamental para a melhoria na qualidade do produto pimenta-rosa. Isto nos permite entender melhor os fenômenos envolvidos, bem como avaliar o comportamento deste material durante a operação de secagem.

#### **1.2 JUSTIFICATIVA**

A secagem é a etapa mais importante no processamento dos frutos de aroeira-vermelha. Todavia, o conhecimento sobre os mecanismos envolvidos nesta etapa ainda é limitado. Na literatura, são raros os trabalhos que investigaram a cinética de secagem dos frutos de aroeiravermelha. Encontrou-se apenas o trabalho de Lauriano *et. al* (2005) que iniciaram os estudos da cinética de secagem dos frutos de aroeira-vermelha em camada delgada. Contudo, a aplicação da técnica do planejamento experimental no estudo dos efeitos das variáveis operacionais, bem como o ajuste de modelos matemáticos, em especial atenção à modelagem baseada em Inteligência Artificial são as inovações deste trabalho.

O alto desenvolvimento tecnológico industrial e a grande competitividade no mercado tornam, a cada momento, mais difícil pensar em desenvolvimento de processos sem a utilização de modelos matemáticos confiáveis. Através destes modelos é possível estudar estratégias de controle e, assim, estabelecer um determinado *set point*, em função de aspectos comerciais e de qualidade do produto, atuando-se sobre variáveis operacionais específicas do processo. Deste modo, o desenvolvimento de modelos matemáticos, para descrever o processo de secagem de frutos de aroeira-vermelha, é fundamental para viabilizar a simulação computacional desta operação, visando a otimização de projetos de secadores mais econômicos.

#### **1.3 OBJETIVOS**

#### 1.3.1 Objetivo geral

Este trabalho tem por objetivo investigar a secagem de frutos de aroeira-vermelha, em leito fixo, focando principalmente o desenvolvimento e verificação de modelos matemáticos para a simulação do processo.

#### 1.3.2 Objetivos específicos

Para a realização deste trabalho os seguintes objetivos específicos foram realizados:

- a) Determinar o diâmetro médio e a massa específica aparente dos frutos de aroeiravermelha, além da massa específica e da porosidade do leito fixo de frutos;
- b) Determinar as isotermas de dessorção de umidade dos frutos de aroeira-vermelha;

- c) Investigar a influência das variáveis operacionais de entrada na secagem de frutos de aroeira-vermelha;
- d) Determinar as cinéticas de secagem dos frutos de aroeira-vermelha, em um secador de leito fixo, bem como identificar os períodos característicos das curvas de secagem;
- e) Verificar a aplicação da modelagem via redes neurais artificiais para os dados cinéticos de secagem dos frutos de aroeira-vermelha;
- f) Verificar a capacidade preditiva para descrever a cinética de secagem dos frutos de aroeira-vermelha de um modelo fenomenológico baseado na transferência de massa;
- g) Verificar o ajuste de modelos semi-empíricos aos dados da cinética de secagem dos frutos de aroeira-vermelha.

#### 1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho está estruturado em cinco capítulos, além deste inicial referente às "Considerações iniciais", organizados em "Revisão bibliográfica", "Materiais e métodos", "Resultados e discussões", "Conclusões" e "Sugestões para trabalhos futuros".

No Capítulo 2 buscou-se realizar uma revisão da literatura básica sobre o tema estudado, abordando conceitos sobre a aroeira-vermelha e detalhando, principalmente, as características da secagem e de sua modelagem.

No Capítulo 3 são apresentados os materiais e os métodos desenvolvidos para realizar a caracterização das partículas e também para a obtenção dos dados de cinética de secagem do processo, além do desenvolvimento dos modelos matemáticos.

No Capítulo 4 são apresentados os resultados e é feita a análise e a discussão dos dados.

As conclusões deste trabalho e as sugestões para trabalhos futuros são apresentados, respectivamente, nos Capítulos 5 e 6. Em seguida, as "Referências bibliográficas" e os "Apêndices" são apresentados.

### 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 2.1 AROEIRA-VERMELHA

#### 2.1.1 Aspectos gerais

A aroeira-vermelha, de nome científico *Schinus terebinthifolius* Raddi, é uma planta de grande uso popular e que pertence à família *Anacardiaceae* (NOGUEIRA; MEDEIROS, 2007). Baggio (1988) cita que além destes nomes, a planta é popularmente conhecida como: aroeirinha; aroeira-comum; aroeira-mansa; aroeira-branca; aroeira-da-praia; aroeira-do-paraná; araguaraiba; corneiba; fruto-de-sabiá; e pimenta brasileira. Segundo Lenzi e Orth (2004), esta diversificação em sua nomenclatura é devido, principalmente, à aparência de seus frutos, que são semelhantes a uma pequena pimenta rosa-vermelha, por isto, ela também é denominada de pimenta-rosa, *pink-pepper, poivre rose*, entre outros nomes.

A aroeira-vermelha é uma espécie vegetal pioneira e nativa da América do Sul, especialmente do Brasil, do Paraguai e da Argentina, e que não tem qualquer parentesco com a família das pimentas. Na verdade, ela é parente do caju, da manga e do cajá-mirim (FAES; SENAR, 2009) e (BORNHAUSEN, 2002 e USP, 2002 *apud* DEGÁSPARI; WASZCZYNSKYJ; SANTOS, 2004). No Brasil, a aroeira-vermelha ocorre em grande parte do seu território, do nordeste ao sul do país, sendo encontrada desde a planície costeira até altitudes de pouco mais de mil metros. As matas ciliares e terras úmidas são os ambientes propícios para o seu estabelecimento e desenvolvimento (BAGGIO, 1988) e (GOMES *et al.*, 2005).

A árvore da aroeira-vermelha (Figura 1) é uma espécie de pequeno a médio porte e que possui folhas perenes, tronco tortuoso com casca grossa e fissurada. Devido ao seu caráter de pioneirismo e agressividade, é muito recomendada para recuperação de áreas degradadas e marginais. É válido ressaltar que esta espécie foi introduzida também em diversos países do mundo para fins ornamentais (MEDEIROS; ZANON, 1998). Nos Estados Unidos, a aroeira-

vermelha é encontrada no sul da Flórida, no sul do Arizona, no sul da Califórnia e em outros locais (EWEL *et al.*, 1982).



Figura 1 - Árvore da aroeira-vermelha em São Mateus-ES. Fonte: Acervo do autor.

#### 2.1.2 Potencialidades da aroeira-vermelha

Apesar de ser uma espécie de pouco cultivo agrícola no Brasil (o produto é obtido diretamente de matas nativas), a aroeira-vermelha possui um grande potencial, para exploração e uso comercial, por apresentar propriedades medicinais, cosméticas e alimentícias (RODRIGUEZ; PAULA, 2009) e (LENZI; ORTH, 2004). Almeida e Leite (2010) citam o uso da aroeira-vermelha na indústria de cosméticos e também para a recuperação de áreas degradadas, além de destacarem a sua utilização como medicamento fitoterápico no SUS (Sistema Único de Saúde).

A literatura apresenta diversos estudos das potencialidades medicinais e fitoquímicas da aroeira-vermelha, destacando suas propriedades cicatrizante, adstringente, anti-inflamatória, antimicrobiana e diurética. As partes utilizadas que apresentam tais propriedades são a casca, as folhas e os frutos (VASCONCELOS *et al.*, 2005), (BRANCO NETO *et al.*, 2006), (SILVA *et al.*, 2005) e (BORNHAUSEN, 2002 *apud* DEGÁSPARI; WASZCZYNSKYJ; SANTOS, 2004).

Na culinária são utilizados principalmente os frutos desidratados, inteiros ou moídos, sendo conhecidos como pimenta-rosa. Este produto é considerado um condimento alimentar e sua demanda vem aumentando tanto no mercado nacional quanto no mercado internacional, por acrescentar sabor e refinamento aos pratos da culinária mundial. É utilizada como elemento de decoração e entra na composição de pratos salgados e doces (GOMES *et al.*, 2005) e (LENZI; ORTH, 2004). Segundo Silva *et al.* (2005), Gomes *et al.* (2005) e USP (2002 *apud* DEGÁSPARI; WASZCZYNSKYJ; SANTOS, 2004), a pimenta-rosa apresenta sabor suave e levemente apimentado e é especialmente apropriada para a confecção de molhos que acompanham as carnes brancas, de aves e peixes, por não mascarar o seu gosto sutil.

#### 2.1.3 Processamento dos frutos da aroeira-vermelha

A aroeira-vermelha possui, como frutificação, cachos com frutos de formato globoso e de coloração variando do rosa ao vermelho, apresentando uma bonita aparência lustrosa, conforme mostra a Figura 2. O período de frutificação acontece de janeiro a julho, dependendo da região (DEGÁSPARI; WASZCZYNSKYJ; SANTOS, 2004). Almeida e Leite (2010) citam que, quando frescos e bem conservados, os frutos apresentam uma película fina e delicada, de textura quebradiça, que envolve uma semente de cor escura e de sabor levemente adocicado e de pouca ardência.

Lauriano *et al.* (2005) determinaram as seguintes características para os frutos de aroeiravermelha: esfericidade ( $\phi_p$ ) igual a 1; diâmetro médio da partícula ( $d_p$ ) de (0,465±0,21) cm; massa específica aparente da partícula ( $\rho_p$ ) de (3,23.10<sup>-1</sup>±4,38.10<sup>-3</sup>) g/cm<sup>3</sup>; e porosidade do leito ( $\varepsilon$ ) de 0,33.



Figura 2 - Frutos de aroeira-vermelha. Fonte: FAES e SENAR (2009) e Acervo do autor.

O Brasil exporta anualmente cerca de 300 a 350 toneladas dos frutos da aroeira-vermelha processados, principalmente para os Estados Unidos e para a Europa. Uma pequena parte é comercializada no mercado interno, principalmente, para compradores de São Paulo. Quanto à produção, os estados do Rio de Janeiro, Sergipe e Espírito Santo se destacam no extrativismo dos frutos. A sua exploração é realizada de forma manual em árvores nativas, o que propicia uma alternativa de renda às famílias de coletores. Segundo alguns produtores capixabas, cada árvore produz aproximadamente 6,0 kg de frutos frescos ao ano. Entretanto, o Brasil não é o único produtor desta iguaria, e concorre no mercado mundial com vários países das Ilhas do Pacífico (PEPPERTRADE BOARD, 2005 *apud* GOMES *et al.*, 2005), (NICOLINI; PUGET; MAZZA, 2009) e (ALMEIDA; LEITE, 2010).

De acordo com Gomes *et al.* (2005), para a produção do condimento pimenta-rosa, os frutos devem passar por uma etapa de beneficiamento (Figura 3). Primeiramente, os frutos

passam por um processo de retirada dos ramos e seleção quanto à maturidade, em que os frutos considerados "passados" (muito maduros e/ou murchos) e verdes são descartados. São retirados também materiais estranhos (insetos, terra, partes de outras plantas, etc.) e aqueles classificados como bons são encaminhados para o processo de secagem.



Figura 3 - Processamento dos frutos de aroeira-vermelha. Fonte: FAES e SENAR (2009) e Acervo do autor.

A produção da pimenta-rosa, embora simples, atende a requisitos rígidos de qualidade impostos pelo mercado externo. Nas empresas beneficiadoras, o processo de beneficiamento possui algumas etapas mecanizadas, porém seu controle ainda é realizado de forma empírica. A etapa fundamental do beneficiamento é a secagem do fruto, que se realizada de forma inadequada diminui a qualidade da pimenta-rosa e compromete a sua comercialização. Esta etapa permite aumentar a vida de prateleira do produto, a redução de massa e assim agrega valor ao produto (LAURIANO *et al.*, 2005) e (NICOLINI; PUGET; MAZZA, 2009).

Na empresa AgroRosa Importação e Exportação LTDA, localizada na cidade de São Mateus-ES, a secagem é realizada utilizando-se secadores do tipo tambor rotativo, conforme mostra a Figura 4.



Figura 4 - Secadores da empresa AgroRosa. Fonte: Acervo do autor.

Após a etapa de secagem, os frutos secos passam por uma segunda etapa de classificação. Segundo Nicolini, Puget e Mazza (2009), no processo de beneficiamento, grande parte dos frutos é descartada, por inadequação de forma, cor e maturação, gerando uma quantidade expressiva de resíduos com composição idêntica a dos frutos selecionados. Estes resíduos podem servir como matéria-prima para extração de óleos essenciais. A perda ao longo do processo de beneficiamento é grande, pois o rendimento é em torno de 1 tonelada de pimenta-rosa produzida para cada 3 a 4 toneladas de frutos de aroeira-vermelha. A pimenta-rosa é usualmente empacotada em embalagem de 5,0 a 10,0 kg, fechada a vácuo para a venda. O valor pago por 1,0 kg dos frutos da aroeira-vermelha varia de R\$ 1,00 a R\$ 3,00, de acordo com a qualidade da safra. Já o produto beneficiado (pimenta-rosa) fica em torno de R\$ 8,00 no mercado interno. O valor de exportação gira em torno de US\$ 13 a US\$ 14 por kg (PEPPERTRADE BOARD, 2005 *apud* GOMES *et al.*, 2005) e (FAES; SENAR, 2009). Na empresa AgroRosa o valor dos frutos desidratados, prontos para exportação, é de US\$ 12 por kg.

#### 2.2 SECAGEM

#### 2.2.1 Aspectos gerais

Um dos objetivos principais das indústrias de processamento de alimentos é a conversão de alimentos perecíveis em produtos estáveis que possam ser armazenados por longos períodos de tempo, a fim de reduzir a perda pós-colheita. Dentre as várias tecnologias utilizadas para este fim (como, por exemplo, a conserva e o congelamento de alimentos) destacam-se os processos de secagem (JAYARAMAN; DAS GUPTA, 2006).

A secagem é uma operação unitária destinada à remoção de um solvente (normalmente água), contido em um sistema sólido ou semissólido (orgânico ou inorgânico), por evaporação ou sublimação para uma fase gasosa insaturada (normalmente ar). Eliminam-se a partir desta definição as operações mecânicas de remoção de água, tais como filtração, centrifugação e sedimentação. Em razão da deficiência e dificuldade na modelagem matemática dos fenômenos que a envolve, a secagem é uma das operações unitárias mais complexas da Engenharia Química, sendo considerada uma mistura de ciência, tecnologia e arte, ou conhecimento baseado em extensivas observações experimentais (TREYBAL, 1981) e (MUJUMDAR, 2006).

O processo de secagem é uma das operações unitárias mais antigas e usuais requerida em processos de diversas indústrias, apresentando várias finalidades distintas, pois permite, por exemplo: armazenar em longo prazo um produto ao inibir a proliferação de microrganismos responsáveis pelas reações de deterioração; concentrar algumas substâncias para mudar ou melhorar o sabor e aroma, agregando valor ao produto; e reduzir a massa e o volume, tornando o transporte e a embalagem economicamente mais vantajosos.

Na secagem ocorrem simultaneamente dois fenômenos de transporte: o primeiro processo é a transferência de energia (calor) das vizinhanças para a superfície do sólido, por convecção, o que possibilita a evaporação da umidade superficial em uma temperatura inferior àquela de ebulição do líquido na pressão do sistema; o segundo processo é a transferência de massa (umidade) que ocorre na forma de líquido ou vapor no interior do sólido e na forma de vapor a partir da superfície do sólido (VAN'T LAND, 1991).

O processo de secagem é afetado por vários fatores que dependem principalmente das propriedades físicas do produto e do ambiente de secagem, assim como das características do equipamento. Faria (1998) cita que as variáveis independentes, que a princípio podem ter relevância no comportamento de processos de secagem, são aquelas relacionadas ao ar (temperatura, velocidade e umidade relativa do ar), aos sólidos (granulometria, teor de umidade inicial e massa ou espessura inicial do leito) e ao processo (tempo operacional de secagem). Para processos de secagem em leito fixo, parâmetros como a velocidade, a umidade relativa e a temperatura do ar, a altura do leito, a homogeneização do leito, entre outros fatores, são geralmente investigados.

#### 2.2.2 Umidade de um sólido

Segundo Strumillo e Kudra (1986), os materiais úmidos consistem em material seco com certa quantidade de água, sendo que as diferentes propriedades dos materiais influenciam significativamente no processo de secagem. Um dos parâmetros mais importantes de um sólido a ser submetido à secagem é a sua umidade, que pode ser classificada em:

- a) Umidade não ligada: é a umidade contida no sólido que, em equilíbrio com o gás, exerce uma pressão de vapor igual a do líquido puro na mesma temperatura. Pode ser a umidade superficial que recobre o material como se fosse um filme, devido ao efeito da tensão superficial;
- b) Umidade ligada: é a umidade contida no sólido que, em equilíbrio com o gás, exerce uma pressão de vapor inferior a do líquido puro na mesma temperatura. É a umidade retida em microcapilares, em solução contida nas paredes celulares ou adsorvida quimicamente;
- c) Umidade livre: é a umidade que podemos retirar do sólido em certa condição operacional de secagem, ou seja, trata-se da umidade que está em excesso em relação à umidade de equilíbrio.

Um parâmetro importante do material a ser seco é o seu teor de umidade que segundo Strumillo e Kudra (1986) pode ser classificado em:

- a) Umidade em base seca (X<sub>s,t</sub>): é a umidade expressa na forma de massa de água por massa de sólido seco;
- b) Umidade em base úmida  $(X_{u,t})$ : é a umidade expressa na forma de massa de água por massa de sólido úmido.

#### 2.2.3 Isotermas de equilíbrio

Isotermas de equilíbrio são curvas que relacionam o teor de umidade de equilíbrio de um material com a atividade de água correspondente para uma dada temperatura. A umidade de equilíbrio é definida como uma umidade limite (umidade mais baixa) a que um sólido pode ser seco em uma determinada condição operacional. O teor de umidade de equilíbrio depende de muitos fatores, entre os quais estão a composição química, a estrutura do sólido e as condições do ar (temperatura, pressão e umidade relativa). As isotermas de equilíbrio são utilizadas em projetos e otimização de secadores (como, por exemplo, para determinar o tempo correto de secagem e também para prever a umidade livre de um material em determinadas condições operacionais) e também para garantir a estabilidade da armazenagem do produto seco (FOUST *et al.*, 2008).

Mujumdar (2006) cita que, no equilíbrio higroscópico, a atividade de água é igual à umidade relativa do ar. A atividade de água  $(a_w)$  é definida como a razão entre a pressão de vapor do sólido úmido (p) a uma dada temperatura e a pressão de vapor da água pura  $(p_w)$  na mesma temperatura, conforme a Equação 1.

$$a_w = \frac{p}{p_w} \tag{1}$$

No laboratório, os dados de umidade de equilíbrio, em função da temperatura e da umidade relativa do ar, podem ser determinados pelo método estático ou dinâmico. No método estático, os dados de umidade de equilíbrio para diferentes valores de umidade relativa do ar, são obtidos utilizando-se soluções salinas supersaturadas de sais a temperaturas diferentes. Os sólidos são acondicionados em bandejas suspensas sobre as soluções em frascos hermeticamente fechados, colocados em estufa com temperatura constante até que a amostra atinja massa constante. O método estático tem como principal vantagem o baixo custo do processo e como desvantagem tem-se o longo tempo do processo, além da possibilidade de degradação dos sólidos durante os experimentos. No método dinâmico é utilizado um equipamento muito eficiente no controle das condições operacionais, sendo bem mais caro que o estático, porém mais preciso.

Dependendo da umidade inicial do sólido, são obtidas duas curvas de equilíbrio: a isoterma de adsorção, que é obtida pela exposição de um sólido seco em atividades de água crescente e que são utilizadas, normalmente, para descrever o comportamento higroscópico do produto seco; e a isoterma de dessorção, que é obtida quando se expõe um sólido úmido em atividades de água decrescente e que normalmente é utilizada em processos de secagem para determinar o teor de umidade mínimo de um sólido, fornecendo as condições operacionais do processo. De forma geral, a isoterma de dessorção apresenta valores de umidade de equilíbrio superiores ao da isoterma de adsorção, sendo que a diferença entre estas curvas é denominada de histerese (YOUNG; NELSON, 1967) e (BROOKER; BAKKER-ARKEMA; HALL, 1982).

13

O valor da umidade de equilíbrio é um parâmetro muito importante na modelagem de processos de secagem, pois tem sido incluído em diversos modelos que descrevem a cinética de secagem. Na literatura são encontrados vários modelos matemáticos para serem ajustados aos dados de umidade de equilíbrio, conforme apresentado na Tabela 1.

Modelo	Equação	Fonte
Brunauer-Emmett- Teller (BET)	$X_{s,e} = \frac{A.B.UR}{(1 - UR)} \left( \frac{1 - (C + 1)UR^{C} + C.UR^{C+1}}{1 + (B - 1).UR - B.UR^{C+1}} \right)$	Brunauer, Emmett e Teller (1938)
Gugghenheim- Anderson-de Boer (GAB)	$X_{s,e} = \frac{A.B.C.UR}{(1 - B.UR).(1 - B.UR + B.C.UR)}$	Anderson (1946)
Henderson	$X_{s,e} = \left(\frac{\ln(1-UR)}{-A}\right)^{\frac{1}{B}}$	ASAE (1991)
Halsey	$X_{s,e} = \left(-\frac{A}{\ln UR}\right)^{1/B}$	Halsey (1948)
Oswin	$X_{s,e} = A \left( \frac{UR}{1 - UR} \right)^B$	Oswin (1946)
Caurie	$X_{s,e} = \exp(A + B.UR)$	Caurie (1970)

### TABELA 1 - MODELOS MATEMÁTICOS PARA AJUSTE DE ISOTERMAS DE SORÇÃO EM ALIMENTOS.

Em que:  $A, B \in C$  são os parâmetros adimensionais e ajustáveis do modelo e UR é a umidade relativa do ar.

Lauriano *et al.* (2005) determinaram experimentalmente as isotermas de equilíbrio para os frutos de aroeira-vermelha, através do método estático, em temperaturas de 50 e 65 °C. Os resultados experimentais obtidos foram ajustados e simulados pelo modelo de Halsey modificado (Equação 2), comumente utilizada para produtos agrícolas.
$$X_{s,e} = \left(\frac{-\exp(aT+C)}{\ln UR}\right)^{\frac{1}{B}}$$
(2)

Em que a,  $B \in C$  são os parâmetros ajustáveis do modelo, T é a temperatura e UR é a umidade relativa. Na Figura 5 são apresentados os resultados experimentais e o ajuste da curva da isoterma modificada de Halsey.



Figura 5 - Isotermas de dessorção de umidade dos frutos de aroeira-vermelha. Fonte: Lauriano *et al.* (2005).

# 2.2.4 Cinética de secagem

No processamento de produtos naturais, em que normalmente a secagem é uma etapa indispensável, o conhecimento da cinética de secagem é muito útil, tanto na fase de implantação como na fase operacional. As informações de cinética são primordiais para o dimensionamento do equipamento de secagem, uma vez que o tempo que o material leva para ser desidratado

determina o tempo de residência do sólido no secador. Durante a operação do processo, o conhecimento da cinética pode ajudar na melhoria da qualidade do produto final, evitando principalmente a degradação do sólido, além de minimizar custos operacionais como, por exemplo, em insumos energéticos.

A cinética de secagem é intimamente ligada aos fenômenos de transferência de calor e massa e está associada às mudanças do conteúdo médio de umidade do material e da temperatura média com o tempo, sendo afetada por condições ambientais do meio (pressão total, temperatura, umidade relativa e velocidade do meio de secagem) e pela estrutura física e química do material a ser desidratado. Na secagem de um sólido úmido, mediante um gás em condições ambientais fixas, manisfesta-se sempre certo tipo de comportamento (Figura 6) (FOUST *et al.*, 2008) e (STRUMILLO; KUDRA, 1986).



Figura 6 - Curva típica de secagem convectiva. Fonte: Adaptado de Strumillo e Kudra (1986).

A taxa de secagem (W) pode ser determinada, em qualquer ponto, por diferenciação da curva de secagem, sendo que as curvas de taxa de secagem servem para evidenciar o término do

período de taxa constante, e consequentemente o valor da umidade crítica ( $X_{s,c}$ ). O gráfico da taxa de secagem em função do teor de umidade é mais descritivo do processo de secagem e é apresentado na Figura 7 (FOUST *et al.*, 2008).



Figura 7 - Curva típica da taxa de secagem convectiva. Fonte: Strumillo e Kudra (1986).

Nas Figuras 6 e 7 são observados três períodos de secagem que são descritos abaixo, de acordo com Strumillo e Kudra (1986) e Foust *et al.* (2008):

a) Período inicial da secagem (ponto A ou A' ao ponto B): imediatamente depois do contato entre a amostra e o meio secante, a temperatura do sólido e a taxa de secagem ajustam-se até atingir um regime permanente. Durante esse período de regime não permanente existe uma etapa de aquecimento (A para B) ou resfriamento (A' para B), do sólido, que representa respectivamente o aumento ou decréscimo da taxa de secagem. Este fenômeno ocorre até o equilíbrio entre as transferências de calor e massa e é necessário para se entrar em regime operacional, sendo desprezível em relação ao período total de secagem.

- b) Período de secagem à taxa constante (ponto B ao ponto C): neste período, a secagem ocorre como se fosse a evaporação de uma massa de líquido, sem haver influência direta do sólido na taxa de secagem. A temperatura do sólido atinge uma temperatura constante e próxima da temperatura de bulbo úmido do ar. A pressão de vapor de água na superfície do sólido é constante e é igual à pressão de vapor da água pura, por consequência a taxa de secagem é constante. Nesta fase a quantidade de água disponível no interior do material é grande, fazendo com que o líquido saia facilmente por capilaridade do interior do sólido úmido. Este período de secagem é encontrado em materiais que apresentam resistência interna ao transporte de água menor ou igual à resistência externa. Quando a migração da água contida no interior do sólido úmido até a sua superfície não seja mais suficiente para acompanhar a taxa de evaporação da água na superfície do material, temse o fim deste período.
- c) **Período de secagem à taxa decrescente** (ponto C ao ponto E): ao término da taxa constante de secagem encontra-se a umidade crítica de secagem ( $X_{s,c}$ ), no ponto C, iniciando-se assim o período de taxa decrescente, também conhecida como fase difusional, pois as transferências são limitadas principalmente pela difusão mássica. Durante este período não há mais a formação de um filme de água em volta do sólido, devido à resistência interna ser maior que a resistência externa, ou seja, a velocidade com que a água chega a superfície do sólido é menor que a taxa de vaporização. Nesta etapa a temperatura do sólido aumenta, sendo que há a migração interna de água. Deste modo, esta fase depende do tipo e da característica interna do material que está sendo seco. Esta fase pode ser dividida em dois períodos: o primeiro período (ponto C ao D) pode ser caracterizado pela relação linear entre taxa de secagem e o teor de umidade, sendo que o ponto D é conhecido como teor de umidade de transição; no segundo período (ponto D ao E) toda a evaporação ocorre no interior do material e a secagem chega ao fim quando a pressão de vapor do sólido iguala-se à pressão parcial de vapor de água no ar seco, ou seja, quando se chega ao teor de umidade de equilíbrio (ponto E).

Lauriano *et al.* (2005) citam que, apesar de abundante no Brasil, ainda não há muitos estudos sobre a cinética de secagem dos frutos de aroeira-vermelha. Deste modo, os autores

iniciaram os estudos sobre a cinética de secagem de frutos de aroeira-vermelha em camada delgada. Os resultados experimentais foram ajustados ao modelo a duas fases. Os dados experimentais e o modelo ajustado são apresentados na Figura 8. Os autores sugeriram para trabalhos futuros o levantamento de novos dados de secagem a partir de outras condições operacionais.



Figura 8 - Dados experimentais e simulação da cinética em temperaturas de 40, 50 e 60 °C. Fonte: Lauriano *et al.* (2005).

## 2.3 MODELAGENS DE PROCESSOS DE SECAGEM

Na área de secagem, diversas pesquisas vêm sendo desenvolvidas focando principalmente a avaliação da cinética do processo, o que inclui o desenvolvimento de modelos matemáticos que visam à simulação do processo. O principal objetivo é descrever a transferência de umidade do interior do sólido até a superfície e qual o mecanismo de transferência (interno ou externo) é que controla o processo. Porém, na literatura são poucos os trabalhos que estudaram a modelagem visando o controle do processo, o que em geral limita tais pesquisas ao campo acadêmico e científico, não havendo aproximação com a aplicação industrial. Em processos de secagem, o conhecimento e controle de variáveis como a temperatura, a umidade relativa, a velocidade do ar e o conteúdo de umidade do sólido, são indispensáveis para garantir a qualidade do produto, além de ganhos em economia de energia (LEITE *et al.*, 2005).

A modelagem matemática e a simulação dos dados de cinética são primordiais em processos de secagem, pois proporciona, por exemplo: realizar estudos, em tempo real, do efeito das alterações nas condições operacionais do processo; desenvolver técnicas de otimização do processo; e auxiliar no projeto de secadores como, por exemplo, no desenvolvimento de estratégias de controle do processo (SILVA *et al.*, 2004). Strumillo e Kudra (1986) citam que a modelagem permite ao engenheiro escolher o melhor método de secagem, bem como as condições ideais para um determinado material.

Afzal e Abe (2000) citam que a modelagem matemática de processos de secagem baseiase em três categorias principais: modelos teóricos que utilizam a equação da difusão ou relacionam equações simultâneas de transferência de calor e massa; modelos empíricos que são facilmente aplicados à simulação de processos de secagem, dependendo apenas dos dados experimentais; e modelos semi-empíricos ou semi-teóricos que relacionam equações teóricas com ajustes empíricos.

Para a modelagem de processos de secagem pode-se utilizar diversas ferramentas e modelos matemáticos, como por exemplo: o planejamento fatorial de experimentos; o modelo de difusão; as Redes Neurais Artificiais (RNA's), além de vários outros modelos teóricos, empíricos e semi-empíricos encontrados na literatura.

# 2.3.1 Planejamento experimental e otimização de processos

O alto desenvolvimento tecnológico nas indústrias e a grande competitividade no mercado tornam, a cada momento, mais difícil pensar em desenvolvimento de produtos e processos sem a utilização de planejamentos experimentais. Baseada nos fundamentos estatísticos, esta metodologia é sem dúvida alguma uma ferramenta "poderosa" para se conhecer as condições otimizadas de um processo, para o desenvolvimento da formulação de produtos dentro das especificações desejadas ou simplesmente para investigar os efeitos que as variáveis independentes têm nas saídas desejadas (RODRIGUES; IEMMA, 2009).

Para alcançar o objetivo desejado, utilizando a técnica de planejamento de experimentos, são necessárias as seguintes etapas: definição das variáveis de entrada e saída do processo e as faixas de estudo de cada uma delas; escolha do planejamento adequado que é função direta do número de variáveis independentes envolvidas no estudo; determinação da influência de uma ou mais variáveis independentes sobre as respostas do processo; ajuste de modelos estatísticos aos dados experimentais; análise da qualidade de ajuste do modelo através da Análise de Variância (ANOVA); construir as superfícies de resposta e as curvas de níveis para os modelos validados estatísticamente; encontrar as condições operacionais ótimas e validar essas condições, para confirmar experimentalmente os resultados obtidos pela análise de superfície de resposta.

Vários estudos da literatura mostram a grande vantagem do uso da metodologia do planejamento fatorial em relação ao uso da investigação de uma variável por vez. Esta metodologia fornece informações seguras sobre o processo, minimizando o empirismo que envolve técnicas de tentativa e erro, sendo que há vantagens incomparáveis quanto ao número de ensaios e qualidade na informação. São inúmeros os exemplos de aplicação da metodologia de planejamento experimental e análise de superfície de resposta em processos de secagem.

Gouveia *et al.* (2002) avaliaram a cinética de secagem de caju em um secador de leito fixo, utilizando um planejamento experimental. As variáveis do processo estudadas foram a temperatura (35 a 65 °C) e a velocidade do ar de secagem (0,9 a 1,9 m/s). Nas análises estatísticas verificou-se o efeito significativo da temperatura sobre a redução da razão de umidade do caju e, ainda, que o modelo de segunda ordem foi o que melhor representou os dados experimentais, sendo a temperatura o fator de maior influência na secagem deste produto.

Rodrigues *et al.* (2002) estudaram a cinética de secagem da goiaba (*Psidium guajava* L) em leito fixo e camada fina. A temperatura (76 a 100 °C) e a velocidade do ar de secagem (0,8 a 2,2 m/s) foram as variáveis independentes investigadas. Foram obtidos modelos empíricos para representar o processo de secagem, sendo que o modelo quadrático foi o que obteve os valores de maior significância estatística, com maiores valores de R<sup>2</sup> e a relação de  $F_{cal}$  frente ao  $F_{tab}$  (da regressão em relação aos resíduos) foi no mínimo 11 vezes maior. Observou-se através das curvas que, quanto maior a temperatura, maior a taxa de secagem e a perda de umidade tende a

estabilizar num período de aproximadamente 90 minutos. Deste modo, a temperatura é o fator controlador do processo. Em temperaturas na faixa de 100 °C e velocidade do ar maior que 2 m/s a taxa de secagem foi influenciada pela velocidade do ar de secagem.

Silva (2008) estudou a cinética de secagem do bagaço de cajá em um secador convectivo de bandejas com leito fixo. Nos estudos foi determinada a difusividade efetiva (*D*) através do modelo de difusão. Utilizou-se um planejamento no qual foram avaliados os seguintes fatores: temperatura do ar de entrada no secador (55 a 75 °C); velocidade do ar de entrada (3,2 a 6,0 m/s); e espessura da torta na bandeja (0,8 a 1,6 cm). Nas análises estatísticas, observou-se que todos os fatores e suas interações foram significativos, com nível de confiança de 95%. Os resultados mostraram que o modelo de difusão descreve bem o processo de secagem e que a melhor condição foi com a temperatura de 75 °C, velocidade do ar de secagem de 6,0 m/s no tempo de 220 minutos.

Lauriano *et al.* (2005), realizaram estudos da secagem de aroeira-vermelha utilizando a técnica convencional de análise de uma variável por vez, em que a temperatura foi variada (40, 50 e 60 °C) enquanto as outras condições foram mantidas fixas. Deste modo, estudos utilizando a metodologia do planejamento experimental fatorial são necessários para a investigação da secagem dos frutos de aroeira-vermelha, pois utilizando um menor número de experimentos é possível a exploração de um espaço experimental maior, com uma melhor qualidade nos resultados obtidos.

#### 2.3.2 Redes neurais artificiais

O cérebro humano é uma estrutura complexa, constituída por interligações de cerca de 100 bilhões de neurônios. Possui grande capacidade de armazenar, representar, recuperar e manipular dados, tais como: processamento de imagens; reconhecimento de fala; recuperação de informações de maneira associativa; aprendizado de novos fatos e ideias; seleção de informações; entre outras funções especializadas e complexas. Inspirada na estrutura neural de organismos inteligentes surgiu, então, a área de conhecimento chamada de Redes Neurais Artificiais (RNA's). Esta ferramenta foi criada como um modelo de resolução de problemas complexos através da simulação do cérebro humano, inclusive em seu comportamento, ou seja, aprendendo, errando e fazendo descobertas (BABINI; MARRANGHELLO, 2007).

Uma RNA é uma coleção massivamente paralela de pequenas unidades de processamento, que computam determinadas funções matemáticas, em que as interligações entre elas formam a maior parte da inteligência da RNA. Do ponto de vista físico, as RNA's se diferem bastante das redes neurais biológicas, pois em termos de escala, o cérebro é muito maior que qualquer RNA. Além disto, as unidades utilizadas em uma RNA são bem mais simples que os neurônios biológicos e o processo de aprendizado do cérebro humano, ainda desconhecido, é certamente muito diferente do treinamento das RNA's (BRAGA; CARVALHO; LUDERMIR, 1998).

Os autores citam ainda que as RNA's, uma subespecialidade da Inteligência Artificial, é sem dúvida alguma uma "poderosa" ferramenta matemática, não convencional, que pode ser aplicada para modelagem de processos. É uma abordagem alternativa à forma fenomenológica de resolver problemas, principalmente para o ajuste não-linear e multivariável de dados. A solução de problemas através de RNA's é bastante atrativa, já que a forma como estes são representados internamente pela RNA e o paralelismo natural inerente à arquitetura das RNA's criam a possibilidade de um desempenho superior ao dos modelos tradicionais.

Para que a modelagem via RNA seja bem sucedida, são necessárias as seguintes análises: definição das variáveis de entrada e saída do processo; obtenção de um banco de dados para treinamento e verificação da RNA; definição da arquitetura da RNA; especificação da função de ativação de cada neurônio; estratégia de aprendizado; e verificação da RNA.

Na modelagem utilizando as RNA's, a análise do processo é o ponto crucial para se definir as variáveis independentes a serem investigadas e estabelecer quais serão as respostas desejadas. É necessária uma análise profunda do processo, buscando-se todas as informações possíveis para se levar em conta as variáveis que devem ser estudadas e as respostas de interesse. Também é necessário ter um banco de dados de boa qualidade, ou seja, que contenha todas as informações importantes do processo e no domínio desejado.

A definição da arquitetura de uma RNA é um parâmetro importante na sua concepção, uma vez que ela restringe o tipo de problema que pode ser tratado por ela. A arquitetura de uma RNA é definida pelo seu número de camadas, pelo número de neurônios em cada camada e também pelo padrão das suas conexões. As RNA's podem possuir uma ou múltiplas camadas, sendo que quanto maior o número de camadas, melhor a capacidade de seu aprendizado. No caso de uma RNA com três camadas, tem-se a seguinte descrição: camada de entrada, onde os neurônios recebem diretamente as entradas da rede; camada intermediária, geralmente denominada de "camada oculta", onde é feito o processamento; e camada de saída, que conclui e apresenta o resultado final. Deste modo, os neurônios podem ser designados como neurônios de entrada, neurônios de saída e neurônios ocultos (BRAGA; CARVALHO; LUDERMIR, 1998) e (BABINI; MARRANGHELLO, 2007).

Existem três opções de interconexão entre os neurônios, ou seja, maneiras pelas quais os neurônios podem estar organizados e interconectados em camadas: intracamada, intercamada e recursiva. Na topologia de RNA intracamadas, um neurônio alimenta outros neurônios de uma mesma camada. Nas conexões intercamadas, as saídas de um neurônio alimentam neurônios de outras camadas, podendo ainda ser designadas de RNA amplamente conectada, quando todas as saídas dos neurônios de uma camada estão conectadas com todos os neurônios da próxima camada. Por último, nas conexões recursivas, em que a saída de um neurônio o alimenta (FILETI, 1995).

Em muitas aplicações de engenharia é observada a grande aplicação da conexão intercamada, sendo que as RNA's podem ser classificadas em redes *feedforward* (alimentação direta) e *feedback* (retroalimentação). No que diz respeito à sua conectividade, elas podem se dividir em RNA's completamente conectadas ou parcialmente conectadas (BRAGA; CARVALHO; LUDERMIR, 1998).

A Figura 9 representa um neurônio artificial com a entrada de viés. Normalmente, este dispositivo possui uma ou mais entradas (a<sub>1</sub>, a<sub>i</sub>,..., a<sub>n</sub>) e apenas uma saída (b<sub>j</sub>), sendo que as entradas de um neurônio podem ser as saídas de diversos outros neurônios. Cada conexão entre os neurônios tem um peso numérico (w<sub>ij</sub>) que representa o grau de importância que determinada entrada possui em relação àquele determinado neurônio artificial. Além das entradas normais de uma RNA, outra entrada adicional (w<sub>o</sub>) pode ser acrescentada ao neurônio artificial, não proveniente de nenhum outro neurônio. Esta entrada é conhecida como viés (ou *bias*) e é adicionada à soma ponderada das entradas. Embora inexista biologicamente, seu uso nos modelos artificiais provê meios de transladar o valor de limiar da função transferência (FRANCISCO, 2000).



Figura 9 - Neurônio artificial. Fonte: Adaptado de Francisco (2000).

Nos neurônios artificiais uma **função soma** é utilizada para acumular os dados recebidos de outras unidades. Já a **função de ativação** (ou transferência) é utilizada para processar a função soma. As funções de ativação mais conhecidas são as funções linear, rampa, degrau, sigmoidal e tangente hiperbólica. A função sigmoidal, assim como a tangente hiperbólica, são frequentemente utilizadas como função de ativação na modelagem de diversos processos nas mais variadas áreas, porque introduz a não-linearidade em rede de cálculos e também pelo fato de serem funções diferenciáveis. Suas características tornam seu uso vantajoso, pois possibilitam um treinamento mais rápido e eficiente, resultando ainda em RNA's bem comportadas (FRANCISCO, 2000) e (BRAGA; CARVALHO; LUDERMIR, 1998).

De acordo com Francisco (2000), as RNA's têm a capacidade de aprender através de uma fase chamada de "aprendizagem" ou "treinamento". O treinamento consiste no ajustamento dos pesos (w<sub>ij</sub>) das conexões entre os neurônios, de maneira a se produzir a resposta de saída desejada, baseando-se para isso nas informações de entrada e saída da RNA. Deste modo é possível se estabelecer as correlações existentes entre variáveis de saída, associadas a processos ou funções em estudo. Os pesos iniciais são modificados e ajustados de forma iterativa, mediante

a aplicação de algoritmos de "treinamento" que segue um dos seguintes paradigmas de aprendizado:

- a) Supervisionado: é apresentado um conjunto de treino, consistindo de entradas e correspondentes saídas desejadas. Os valores de saída calculados pela RNA deverão ser comparados aos valores de saída desejados, e quando diferentes, a RNA deverá ajustar os pesos de maneira que armazene o conhecimento desejado. Todos os dados do treinamento deverão passar por este processo até que a taxa de acerto esteja dentro de uma faixa considerada satisfatória.
- b) Não supervisionado: a RNA atualiza seus pesos sem o uso de vetores entrada-saídas desejadas, ou seja, são indicados apenas os valores de entrada. A RNA trabalha essas entradas e se organiza de modo que acabe classificando-as, usando para isso os seus próprios critérios. Esse tipo de RNA utiliza os neurônios como classificadores e os dados de entrada como elementos para classificação. O processo de classificação fica a encargo da RNA e o seu algoritmo de aprendizado.

Francisco (2000) cita que um dos tipos de treinamento supervisionado mais difundidos em RNA's é a técnica chamada de retropropagação (*backpropagation*). Nesta técnica, a resposta correta é comparada com os valores de saída, sendo calculado o valor de alguma função de erro pré-definida. Por alguma técnica, o erro é então alimentado de volta na RNA e usando esta informação, os pesos de cada conexão são ajustados pelo algoritmo, reduzindo o valor da função de erro. Dentre os algoritmos de retropropagação destacam-se: o algoritmo de treinamento Regra de Delta Generalizada (GDR); e o algoritmo de treinamento de Levenberg-Marquardt. A técnica de aprendizado de retropropagação é aplicada exclusivamente para a topologia de RNA's com conexões intercamadas e alimentação direta, denominadas como RNA *Feedforward* ou *Perceptrons* multicamadas (Figura 10).



Figura 10 - *Perceptron* com três camadas. Fonte: Adaptado de Fileti (1995).

Nas RNA's do tipo *feedforward*, cada neurônio em uma camada tem conexões diretas a neurônios da próxima camada. Apresentando como exemplo uma RNA composta por 3 camadas (A, B e C), verifica-se que: a camada de entrada A tem L neurônios artificiais (a<sub>1</sub>, a<sub>2</sub>,..., a<sub>i</sub>,..., a<sub>L</sub>), sendo alimentada pelo vetor I<sub>i</sub>; a camada oculta B tem M neurônios (b<sub>1</sub>, b<sub>2</sub>,..., b<sub>j</sub>,..., b<sub>M</sub>); e a camada de saída C, tem N neurônios (c<sub>1</sub>, c<sub>2</sub>,..., c<sub>k</sub>,..., c<sub>n</sub>), o que resulta nos vetores de saída S<sub>k</sub>. Apesar da Figura 10 apresentar L, M e N iguais, na prática isto não é necessário, ou seja, L $\neq$ M $\neq$ N é totalmente aceitável. O fator ponderal da interconexão entre o i-ésimo nódulo da camada A e o j-ésimo da camada B é chamado de v<sub>ij</sub>; entre o j-ésimo nódulo da camada B e o k-ésimo da camada C, de w<sub>jk</sub>. Os neurônios da camada intermediária e da camada de saída possuem uma entrada de viés (Th) cada um (FILETI, 1995).

Durante uma simulação utilizando este tipo de RNA, o sinal percorre a rede em uma única direção, da entrada para a saída, sendo que os neurônios de uma mesma camada possuem as

mesmas características (função de ativação) e não são conectados entre si. Cada neurônio passa seu dado valor para as conexões que saem dele, sendo que cada conexão transfere um sinal de um neurônio a outro, através do "peso", que pode ser "amplificado" ou "diminuído" pela conexão. Cada neurônio na camada seguinte recebe um valor que é a soma ponderada dos valores produzidos pelas conexões que chegam até ele. Em cada neurônio artificial é realizada uma computação simples sobre esse valor, utilizando a função de ativação. O processo é repetido com os resultados sendo passados através de camadas subsequentes de neurônios, até que os neurônios de saídas sejam atingidos e a resposta é então produzida.

Após a etapa de treinamento, a RNA dever ser eficientemente capaz de garantir um mapeamento para qualquer vetor de entrada/saída que seja introduzido na RNA e que faça parte de seu domínio. Deste modo um novo conjunto de amostras, que não foi utilizado durante o processo de treinamento, é apresentado à RNA, obtendo-se assim, por simulação com os pesos obtidos na fase de treinamento, o dado de saída desejado. A resposta obtida na simulação é comparada ao valor real, verificando-se assim, a qualidade da modelagem realizada para o sistema.

O elevado número de trabalhos publicados que aplicam RNA na área de engenharia reflete a potencialidade desta ferramenta de modelagem em diversos processos industriais. Na área de secagem as redes neurais foram pouco exploradas, sendo utilizadas, por exemplo: para modelar um secador de leito fluidizado (BALASUBRAMANIAN; PANDA; RAO, 1996) e (SATISH; SETTY, 2005); para prever as taxas de secagem no processo de secagem de fatias de batata (ISLAM; SABLANI; MUJUMDAR, 2003); para modelar o processo de secagem em leito fixo de tomate (MOVAGHARNEJAD; NIKZAD, 2007); para prever a cinética de secagem de cubos de cenoura (AGHBASHLO *et al.*, 2011); e para modelar um leito de jorro de pastas com partículas inertes (FREIRE *et al.*, 2012).

## 2.3.3 Modelo de difusão

O fenômeno de transporte de massa está associado à transferência de um ou vários solutos em um meio ou entre meios distintos. Na situação em que o transporte ocorre por mecanismos regidos pela interação soluto-meio em escala molecular, tem-se a difusão mássica. Quando o transporte se dá tanto devido a essa interação como também por mecanismos externos a ela, como o movimento do meio, tem-se a característica básica da convecção mássica (CREMASCO, 2002).

Segundo Cussler (1997), o primeiro tratamento matemático da difusão mássica foi estabelecido por Fick, que tratou a difusão como um processo molecular dinâmico, baseando-se na hipótese que a taxa de transferência da substância, difundida através da unidade de área de uma seção, é proporcional ao gradiente de concentração normal a esta seção. Deste modo, a primeira lei de Fick é a lei fundamental da difusão, expressa pela Equação 3.

$$J = -D\nabla X_s \tag{3}$$

Em que *J* é o fluxo de umidade,  $\nabla X_s$  é o gradiente de teor de umidade no sólido e *D* é a difusividade efetiva no sistema. A difusividade efetiva envolve todos os possíveis efeitos internos, sendo dependente principalmente da temperatura, já que depende da energia térmica das moléculas de água. Outras variáveis que podem afetar esta propriedade são, por exemplo, a umidade e a constituição química e física do sólido.

A primeira lei de Fick é o ponto inicial de numerosos modelos de difusão. Entretanto, esta lei só é válida em situações de estado estacionário, em que a concentração do difusante não varia com o tempo, o que experimentalmente não ocorre. Desta forma, utiliza-se a segunda lei de difusão de Fick (Equação 4) que descreve o estado não estacionário e reflete a maioria das condições experimentais.

$$\frac{\partial X_s}{\partial t} = D\nabla^2 X_s \tag{4}$$

Em que  $X_{s,t}$  é a umidade do material em base seca, t é o tempo e D é a difusividade efetiva. Esta equação é obtida a partir do balanço de massa no volume de controle, considerando

a difusividade efetiva constante e os efeitos da resistência externa e do encolhimento do material como desprezíveis. Segundo Cremasco (2002), na difusão em regime transiente há uma distribuição da concentração do soluto tanto no espaço quanto no tempo, acarretando para cada distribuição espacial de concentração uma concentração média variável com o tempo. A difusão em regime transiente aparece em diversas situações como, por exemplo, em processos de secagem, sendo normalmente dividida em duas partes: difusão sem presença de convecção mássica nas fronteiras do meio difusivo; difusão com presença de convecção mássica nas fronteiras do meio difusivo; difusão com presença de convecção mássica nas fronteiras do meio difusivo; difusão com presença de convecção mássica nas fronteiras do meio difusivo. Esta diferença pode ser determinada por intermédio do número de Biot mássico ( $Bi_m$ ), conforme Equação 5.

$$Bi_m = \frac{sk_m}{D K_p}$$
(5)

Em que *s* é o comprimento característico do sistema,  $k_m$  é coeficiente convectivo, *D* é a difusividade efetiva e  $K_p$  é o coeficiente de partição. Quando o  $Bi_m \rightarrow 0$ , a resistência interna à transferência de massa (*s/D*) é desprezível e a transferência de massa está situada externamente ao meio sólido. Quando o  $Bi_m \rightarrow \infty$ , a resistência externa à transferência de massa é desprezível (*1* /*km*) em face ao fenômeno difusivo. Esta última situação ocorre, por exemplo, na secagem de um sólido poroso, que além da umidade externa, existe aquela contida no interior do material. A externa é facilmente removível enquanto que a variação da interna é mais lenta (CREMASCO, 2002).

Na secagem de biomateriais, na maioria dos casos, assume-se que a transferência de massa ocorre apenas por difusão. Para obter uma relação entre concentração, tempo e posição, realiza-se um balanço de massa em um volume diferencial, sendo que os fluxos que entram e saem do sistema são calculados pela primeira lei de Fick. Especificamente para o fenômeno da secagem em sólidos esféricos, realiza-se um balanço de massa da umidade em um elemento diferencial de volume fixo no espaço, assumindo a difusividade efetiva constante no espaço. Deste modo obtém-se a equação da continuidade (Equação 6), expressa em coordenadas esféricas ( $\theta$ ,  $\phi$  e r) (CRANK, 1975).

$$\frac{\partial X_s}{\partial t} = D\left(\frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial r}\left(r^2\frac{\partial X_s}{\partial r}\right) + \frac{1}{r^2sen\theta}\frac{\partial}{\partial \theta}\left(sen\theta\frac{\partial X_s}{\partial \theta}\right) + \frac{1}{r^2sen^2\theta}\frac{\partial^2 X_s}{\partial \phi^2}\right)$$
(6)

Em que  $X_s$  é a umidade em base seca do sólido, t é o tempo e D é a difusividade efetiva. Crank (1975) calculou um grande número de soluções da equação da difusão para condições iniciais e de contorno variadas. Para a resolução da Equação 6, as condições físicas existentes nos contornos e inicial são as seguintes:

- a) Condição inicial (*t*=0):  $0 \le r \le r_p \rightarrow X_{s,t} = X_{s,o}$ ;
- b) Condições de contornos (t>0):  $r=r_p \rightarrow X_{s,t}=X_{s,e}$  e  $r=0 \rightarrow \partial Xs/\partial r = 0$ .

Em que  $r_p$  é o raio da partícula, t é o tempo de secagem,  $X_{s,o}$  é a umidade inicial dos frutos,  $X_{s,e}$  é a umidade de equilíbrio do sólido e  $X_{s,t}$  é umidade do sólido, em base seca. Os vários modelos teóricos de difusão são soluções truncadas da segunda lei de Fick. Estas soluções se aplicam para materiais que não sofrem nenhuma ou pouca redução de tamanho durante a secagem, e não representa adequadamente materiais porosos, com alto conteúdo de umidade e longo período de taxa de secagem constante (CRANK, 1975).

A teoria de migração de água por difusão, representada pela lei de Fick, é muito utilizada por vários pesquisadores em estudos de processos de secagem de diferentes produtos. Queiroz (1994) cita que os modelos matemáticos baseados na difusão mássica têm apresentado bons resultados em aplicações de secagem de grãos, frutas e cereais. Isto ocorre provavelmente, devido ao fato de estes produtos não apresentarem um período de taxa constante nas curvas características de secagem, ou seja, a secagem é controlada pela difusão interna do material. É válido ressaltar que as análises feitas com a utilização da lei de Fick enfocam principalmente o estudo dos efeitos globais do fenômeno interno, em que a difusividade efetiva engloba todos os efeitos internos que ocorrem durante a secagem de um sólido.

#### 2.3.4 Modelos semi-empíricos e empíricos

Enquanto a modelagem teórica de processos de secagem é baseada na difusão de umidade e em várias considerações teóricas, a modelagem empírica consiste na abordagem matemática do processo tendo como base somente os dados experimentais, sendo que os seus parâmetros não possuem significado físico. Já na modelagem semi-empírica existe uma "harmonia" entre a teoria e a facilidade em seu uso. Os modelos semi-empíricos, em geral, são simplificações derivadas da lei de Newton do resfriamento aplicada à transferência de massa, ou seja, supõe condições isotérmicas e que a resistência à transferênciade massa se restringe apenas à superfície do produto (BROOKER; BAKKER-ARKEMA; HALL, 1982) e (MACHADO, 2009).

Estas simplificações têm sido ajustadas para os dados cinéticos de secagem de diferentes produtos, sendo que novas simplificações também vem sendo desenvolvidas para diferentes processos. A Figura 11 mostra os vários modelos empíricos e semi-empíricos que são encontrados na literatura para a secagem de diferentes produtos.



Figura 11- Modelos utilizados na secagem de diferentes produtos.

A seguir a descrição básica de alguns modelos semi-empíricos empregados para predizer dados experimentais, obtidos na secagem de diferentes produtos, são especificados e suas equações apresentadas.

#### a) Modelo de Lewis:

Fazendo uma analogia com a lei de Newton do resfriamento, Lewis (1921) sugeriu um modelo semi-empírico que considera que a resistência à transferência de massa ocorre numa camada delgada na superfície dos sólidos, conforme a Equação 7.

$$\frac{dX_{s,t}}{dt} = -K(X_{s,t} - X_{s,e})$$
(7)

Em que *K* é a constante de secagem,  $X_{s,t}$  é a umidade média em base seca,  $X_{s,e}$  é a umidade de equilíbrio do sólido e *t* é o tempo de secagem. Observe que a Equação 7 estabelece que a taxa de umidade seja proporcional ao teor de água livre do sólido, sendo que na forma integrada a equação é normalmente chamada de lei exponencial (Equação 8).

$$\frac{X_{s,t} - X_{s,e}}{X_{s,o} - X_{s,e}} = e^{-Kt}$$
(8)

#### b) Modelo de Henderson e Pabis:

O modelo de Henderson e Pabis (1961) (Equação 9) é uma equação muito similar ao modelo de Lewis, sendo apenas adicionado o parâmetro ajustável  $a_1$ , antes do termo exponencial.

$$\frac{X_{s,t} - X_{s,e}}{X_{s,o} - X_{s,e}} = a_1 e^{-Kt}$$
(9)

Este modelo foi desenvolvido através do estudo da secagem de sementes de trigo, sendo considerados os efeitos de velocidade, temperatura, razão de mistura do ar, tamanho médio das sementes, e da taxa de redução de volume no decorrer da secagem. Com esta equação pode-se

obter a difusividade efetiva (*D*) a partir da constante de secagem (*K*). Logo, a relação entre estes parâmetros para geometria esférica é apresentada na Equação 10, sendo  $r_p$  o raio do sólido esférico.

$$K = \frac{\pi^2 D}{r_p^2} \tag{10}$$

#### c) Modelo de Page:

Uma pequena modificação no modelo de Lewis foi realizada por Page (1949), desenvolvendo um modelo mais preciso para a descrição da cinética de secagem em camada delgada (Equação 11). A modificação envolveu a adição de um termo exponencial (*n*) na variável tempo.

$$\frac{X_{s,t} - X_{s,e}}{X_{s,o} - X_{s,e}} = e^{-Kt^n}$$
(11)

A equação de Page foi modificada por Overhults *et al.* (1973), com os dados obtidos na secagem de soja, sendo também conhecida como **modelo de Page modificado** (Equação 12).

$$\frac{X_{s,t} - X_{s,e}}{X_{s,o} - X_{s,e}} = e^{-(Kt)^n}$$
(12)

#### d) Modelo de Henderson:

Henderson (1974) desenvolveu um novo modelo (Equação 13) utilizando dados da secagem de milho.

$$\frac{X_{s,t} - X_{s,e}}{X_{s,o} - X_{s,e}} = a_1 e^{-K_1 t} + b e^{-K_2 t}$$
(13)

Na equação,  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $a_1$  e *b* são parâmetros ajustáveis do modelo, específicos para cada tipo de produto.

# 2.4 CONCLUSÕES

Na área de secagem diversas pesquisas foram desenvolvidas com base na avaliação da cinética de secagem de diversos produtos, o que inclui o desenvolvimento de modelos matemáticos que visam à simulação do processo. Modelos clássicos de secagem (como, por exemplo, os modelos de difusão, de Lewis, de Henderson, de Page, entre outros modelos) são constantemente utilizados. Porém, na literatura são raros os trabalhos que estudaram a secagem dos frutos da aroeira-vermelha, sendo esta etapa fundamental para a produção da iguaria pimentarosa. Assim, julgou-se necessário realizar investigações sobre a secagem dos frutos de aroeira-vermelha, buscando o ajuste de modelos e consequentemente a simulação do processo.

Pela análise dos trabalhos relacionados neste capítulo, julgou-se necessária a utilização da metodologia do planejamento experimental fatorial para investigar a secagem dos frutos de aroeira-vermelha, pois utilizando um menor número de experimentos é possível a exploração de um espaço experimental maior, com uma melhor qualidade nos resultados obtidos.

Como visto anteriormente, o elevado número de trabalhos publicados que aplicam RNA's na área de engenharia reflete a potencialidade desta ferramenta de modelagem em diversos processos industriais, sendo que na área de secagem esta ferramenta ainda é pouco utilizada. Deste modo, os ajustes de modelos matemáticos aos dados cinéticos de secagem, em especial atenção à modelagem baseada em Inteligência Artificial, foram investigados neste estudo.

# **3 MATERIAIS E MÉTODOS**

Neste capítulo são apresentados: os materiais utilizados, com a descrição detalhada do equipamento experimental; as etapas de pré-processamento da matéria-prima; as metodologias empregadas para a caracterização física dos frutos de aroeira-vermelha; o planejamento e o procedimento experimental empregado para o estudo do processo de secagem; e os métodos de tratamento e análise dos dados de secagem, detalhando principalmente o desenvolvimento dos modelos matemáticos. A Figura 12 mostra um fluxograma que apresenta as etapas realizadas neste trabalho.



Figura 12 - Fluxograma das etapas realizadas no presente trabalho.

# **3.1 MATERIAIS**

### 3.1.1 Matéria-prima

Neste trabalho os frutos de aroeira-vermelha (*Schinus terebinthifolius* Raddi) foram utilizados como matéria-prima para o processo de secagem. As amostras foram adquiridas diretamente de fornecedores da cidade de São Mateus, no estado do Espírito Santo, com a ajuda do Instituto Capixaba de Pesquisa, Assistência Técnica e Extensão Rural (Incaper). Como a colheita é realizada no primeiro semestre de cada ano, os frutos de aroeira-vermelha foram adequadamente colhidos no mês de junho de 2012 por ocasião da safra do produto.

As amostras foram transportadas em caixas de papelão até o Laboratório de Engenharia de Sistemas Químicos (LESQ), da Faculdade de Engenharia Quimica da UNICAMP. Estas foram divididas em lotes menores, utilizando recipientes de plástico que foram devidamente lacrados e identificados. A Figura 13 mostra os frutos de aroeira-vermelha *in natura* utilizados neste trabalho.



Figura 13 - Amostra de aroeira-vermelha *in natura*. Fonte: Acervo do autor.

Do material recebido foram retiradas amostras, em triplicatas, para a análise preliminar do teor de umidade, em base seca, dos frutos *in natura*, realizada conforme o método descrito na Seção 3.3.1 deste trabalho. O lote apresentou um teor de umidade, em base seca, de aproximadamente 0,5.

Visando a preservação das características dos frutos de aroeira-vermelha, as amostras foram mantidas em *freezer* à temperatura em torno de -30,0 °C. É válido ressaltar que seria interessante realizar alguns ensaios de secagem com os frutos *in natura*, nas mesmas condições operacionais das corridas experimentais estabelecidas pelo planejamento estatístico, visando verificar a influência das condições da armazenagem prévia dos frutos no comportamento da secagem. Entretanto, neste trabalho não foi possível realizar tal análise, pois o equipamento de secagem não estava disponível no período da safra dos frutos. Faria (1998), em seus estudos sobre secagem de urucum em leito fixo, concluiu que não houve diferenças significativas entre os comportamentos característicos das curvas de secagem, obtidas para o produto *in natura* e o produto armazenado sob refrigeração.

## 3.1.2 Equipamento experimental

O sistema experimental, utilizado para o estudo da cinética de secagem dos frutos de aroeira-vermelha, é caracterizado como um secador convectivo de bandeja com fluxo de ar ascendente. Este equipamento foi escolhido pela sua simplicidade de operação e principalmente por não causar danos físicos aos frutos de aroeira-vermelha durante o processo de secagem, característica importante para a comercialização do produto pimenta-rosa.

O secador em bandejas (Figura 14) pertence ao Laboratório de Fluidodinâmica e Secagem (LFS), da Faculdade de Engenharia Química, da UNICAMP e foi gentilmente cedido para a realização deste trabalho. A montagem do sistema de secagem e sua instrumentação foram projetadas e instaladas por Cavalcante (2003) para o estudo da secagem de alga marinha (*Sargassum* sp).



Figura 14 - Equipamento experimental de secagem em leito fixo. Fonte: Acervo do autor.

A Figura 15 apresenta o desenho esquemático do sistema experimental, destacando-se todas as partes componentes do equipamento.



Figura 15 - Diagrama esquemático do secador de bandeja. Fonte: Adaptado de Cavalcante (2003).

O secador em bandeja é alimentado com ar, na temperatura ambiente, por um **soprador radial (1)** do tipo CRE-02, com motor de 0,75 cv e acoplado a um filtro e atenuador, ambos localizados na parte exterior do laboratório. O soprador de ar é acionado através de um quadro de controle presente dentro do laboratório. No equipamento, toda a tubulação é feita em aço galvanizado de 3,175 cm de diâmetro nominal, sendo que o ajuste da vazão de ar no sistema é realizado por uma **válvula (2)**.

No secador, o ar escoa pela tubulação passando por um ponto de **tomada de pressão** estática na linha (3) que é acoplado a um manômetro diferencial de tubo em "U" (5), que utiliza água como fluido manométrico e possui um dos lados abertos para a pressão atmosférica. Em seguida o ar passa por uma placa de orifício (4) com 20,0 mm de diâmetro de orifício e que é acoplada a um manômetro diferencial de tubo em "U" que também utiliza água como fluido manométrico. As duas tomadas de pressão fornecem dados que foram utilizados na calibração da placa de orifício (APÊNDICE A), determinando deste modo a velocidade de ar no sistema em função destas variáveis.

O sistema de aquecimento de ar (6) está situado logo após a placa de orifício e é constituído de quatro resistências elétricas que estão ligadas a um sistema de controle de temperatura (7). Este sistema é formado por um controlador (N1200-485, Novus) ligado a um indicador digital de temperatura (termopar tipo T) posicionado antes da bandeja, o que possibilita a medida da temperatura do ar de entrada do processo de secagem. No APÊNDICE B é apresentada a calibração do termopar utilizado no sistema de controle.

O vaso de secagem (8) do equipamento, com abertura na parte superior, é constituído de um tubo cilíndrico com fundo e topo cônico, feito de chapa de ferro. Possui 70,0 cm de altura e 16,0 cm de diâmetro interno. O vaso contém três aberturas com portas, por onde se colocam as bandejas, sendo que neste trabalho apenas uma entrada foi utilizada. A bandeja metálica (9) utilizada foi construída em tela de arame de malha fina e possui aproximadamente 7,2 cm de diâmetro interno e 2,0 cm de altura.

# 3.2 OPERAÇÕES DE PRÉ-PROCESSAMENTO

Antes de cada experimento, os frutos de aroeira-vermelha foram classificados, descongelados e reumidificados artificialmente. A Figura 16 apresenta o fluxograma básico dos procedimentos utilizados nesta etapa.



Figura 16 - Fluxograma básico dos procedimentos utilizados no pré-processamento.

Com o objetivo de padronizar os frutos de aroeira-vermelha, após o congelamento e antes de cada experimento, efetuava-se uma etapa de classificação manual dos frutos. Nesta etapa de seleção manual, as amostras foram retiradas do *freezer* e logo depois foi realizada a separação das impurezas (folhas, galhos), desprezando também os frutos que se apresentavam danificados e verdes.

Segundo Lima (1995), para a avaliação do comportamento de processos de secagem é necessário que se tenha o conhecimento da umidade inicial do produto estudado. O autor cita que grãos pós-colheita são os mais apropriados para testes, porém quando isto não é possível o teor de umidade dos grãos pode ser reconstituído pela adição de água através de processos artificiais de reumidificação. Deste modo, os frutos de aroeira-vermelha foram reumidificados artificialmente através de um método empírico baseado nas metodologias citadas por Silva *et al.* (2004) e Lauriano *et al.* (2005). As amostras foram acondicionadas e mantidas suspensas em um dessecador (recipiente hermeticamente fechado) que continha água destilada por um período de

24 horas à temperatura ambiente do laboratório. É válido ressaltar que a reumidificação foi realizada através de um processo lento de adsorção de umidade e que durante o procedimento, consequentemente os frutos eram descongelados de forma homogênea e à temperatura ambiente do laboratório.

# 3.3 PARÂMETROS DOS FRUTOS DE AROEIRA-VERMELHA

Com a finalidade de conhecer a estrutura e o comportamento do material a ser estudado, foram realizadas análises para a caracterização física dos frutos de aroeira-vermelha. O conhecimento das propriedades físicas das partículas é de suma importância na compreensão dos fenômenos que regem o processo de secagem. Todos os ensaios de caracterização foram realizados para o material que foi classificado manualmente e reumidificado artificialmente, conforme procedimentos citados anteriormente na Seção 3.2.

Para a caracterização, os seguintes parâmetros foram determinados: teor de umidade, em base seca; diâmetro médio e massa específica aparente dos frutos; e massa específica e porosidade do leito de frutos. Além destas análises, foram determinadas as isotermas de dessorção de umidade dos frutos de aroeira-vermelha. Para a estimar do erro padrão associado a cada medida, calculou-se o desvio padrão (*S*) (Equação 14) que é uma medida do grau de dispersão dos valores em relação ao valor médio (RODRIGUES; IEMMA, 2009).

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{l} (y_i - \overline{y})^2}{l - 1}}$$
(14)

Em que  $y_i$  é o valor medido,  $\overline{y}$  é a média e *l* é a quantidade de experimentos realizados. Os métodos empregados na medida de cada propriedade de interesse são descritos a seguir.

#### 3.3.1 Teor de umidade em base seca

O teor de umidade, em base seca, dos frutos de aroeira-vermelha em certo tempo  $(X_{s,t})$  foi determinada utilizando-se a Equação 15.

$$X_{s,t} = \frac{m_{s,t} - m_{s,s}}{m_{s,s}}$$
(15)

Em que  $m_{s,t}$  é a massa de sólido úmido em certo tempo e  $m_{s,s}$  é a massa de sólido seco. A massa de sólido seco foi determinada pelo Método da estufa, no qual as amostras foram mantidas por 24,0 h em uma estufa à uma temperatura de (105 ± 3) °C (BRASIL, 2009). Logo após, o material foi retirado da estufa e armazenado em dessecador até esfriar. Em seguida, a massa do material foi determinada em balança analítica. Para esta análise, foi utilizada uma estufa convencional (marca QUIMIS) com circulação de ar forçada e para a determinação das massas das amostras foi utilizada uma balança analítica da marca Bel (precisão de 0,0001g).

## 3.3.2 Diâmetro médio e massa específica aparente dos frutos

Para a determinação do diâmetro médio e da massa específica aparente dos frutos de aroeira-vermelha, utilizou-se a metodologia baseada no trabalho de Lauriano *et al.* (2005). Deste modo, como os frutos de aroeira-vermelha são considerados como esferas ( $\phi_p$ =1), o diâmetro médio das partículas ( $d_p$ ) foi determinado utilizando-se um paquímetro digital da marca Digimess®. Nas análises foram utilizadas cinco amostras representativas do lote de frutos de aroeira-vermelha, sendo escolhidos 100 frutos aleatoriamente nestas amostras, totalizando 500 medidas para a determinação do diâmetro médio das partículas.

A massa específica aparente da partícula ( $\rho_p$ ) foi determinada pela razão entre a massa ( $m_p$ ) e o volume total da partícula ( $V_p$ ), conforme a Equação 16.

$$\rho_p = \frac{m_p}{V_p} \tag{16}$$

Através de uma balança analítica da marca Bel (precisão de 0,0001g), foi obtida a massa da amostra representativa analisada e dividindo-se pelo número de partículas foi obtida a massa de cada fruto. Já o volume total da partícula, incluindo o volume que os poros ocupam, foi calculado a partir do diâmetro médio da amostra representativa analisada, conforme Equação 17.

$$V_p = \frac{\pi d_p^{-3}}{6} \tag{17}$$

## 3.3.3 Massa específica e porosidade do leito fixo

A massa específica e a porosidade do leito fixo de frutos de aroeira-vermelha foram determinadas experimentalmente utilizando uma metodologia baseada nos trabalhos de Pozitano e Rocha (2011) e Hahne (2001 *apud* GODOI, 2009). A massa específica do leito ( $\rho_l$ ) foi determinada a partir das medidas de massa ( $m_l$ ) e volume de um leito fixo de partículas ( $V_l$ ), conforme a Equação 18.

$$\rho_l = \frac{m_l}{V_l} \tag{18}$$

Para esta análise, uma quantidade conhecida de frutos de aroeira-vermelha (aproximadamente 16,0 g) foi colocada em uma proveta graduada sob uma inclinação próxima de 45°. O material foi acomodado de tal forma que o mesmo não fique compactado. Em seguida foi realizada a leitura do volume do leito pela escala graduada da proveta. A massa do leito foi determinada por meio de balança analítica.

A porosidade do leito ( $\varepsilon$ ), considerando apenas o volume de ar entre as partículas, foi determinada pela Equação 19.

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_l}{\rho_p} \tag{19}$$

Em que  $\rho_l$  é a massa específica do leito e  $\rho_p$  é a massa específica aparente da partícula, ambas as medidas determinadas anteriormente. Para as análises de massa específica e porosidade do leito fixo foram realizadas cinco repetições.

## 3.3.4 Teor de umidade de equilíbrio

Para determinar a umidade de equilíbrio  $(X_{s,e})$  dos frutos de aroeira-vermelha, em certa temperatura e umidade relativa do ar, foram utilizadas as isotermas de dessorção de umidade. As isotermas foram determinadas experimentalmente em três diferentes temperaturas (30, 50 e 70 °C) através do método estático. Esta análise foi realizada no Laboratório de Engenharia de Processos (LEP), da Faculdade de Engenharia de Alimentos, da UNICAMP.

No método estático, amostras contendo 1,0 g dos frutos de aroeira-vermelha (em triplicata) foram acondicionadas em recipientes hermeticamente fechados, sendo colocadas em cadinhos de alumínio suspensos sobre soluções salinas. Os dados de umidade relativa do ar (UR) ou atividade de água ( $a_w$ ) foram obtidos utilizando-se soluções salinas supersaturadas a temperaturas diferentes, de acordo com a Tabela 2. Os recipientes foram colocados em estufa com temperatura constante e as amostras foram pesadas em intervalos regulares de tempo (3 em 3 dias) até que a amostra atinja massa constante (entre 3 e 5 semanas). Alcançado o equilíbrio, determinou-se a umidade das amostras conforme método apresentado na Seção 3.3.1 deste trabalho.

Sal	UR ou $a_w$ (%)			
	30 °C	50 °C	70 °C	
LiCl	11,28	11,10	10,75	
MgCl <sub>2</sub>	32,44	30,54	27,77	
$K_2CO_3$	43,17	43,20	43,23	
$Mg(NO_3)_2$	51,40	45,44	39,47	
KI	67,89	64,49	61,93	
NaCl	75,09	74,43	75,06	
KCl	83,62	81,20	79,49	

TABELA 2 - UMIDADE RELATIVA DAS SOLUÇÕES SALINAS SATURADAS EM FUNÇÃO DAS TEMPERATURAS ESTUDADAS.

Fonte: Greenspan (1977).

Para o ajuste das isotermas dos frutos de aroeira-vermelha, foram analisados diversos modelos encontrados na literatura (Tabela 1). Os parâmetros dos modelos foram determinados através da estimativa não linear, com o auxílio do *software* STATISTICA, sendo utilizado o método de otimização de Quasi-Newton, com um número máximo de interações igual a 1000 e um critério de convergência igual a 0,001. Para a validação do modelo foram analisados os gráficos de dispersão dos dados reais *versus* dados simulados. O modelo foi considerado adequado quando o valor de R<sup>2</sup> era próximo da unidade, além de ser analisado se os dados se apresentavam na forma de uma reta coincidente com a diagonal, em que o coeficiente linear se aproximava de zero e o coeficiente angular ficava próximo de um.

# 3. 4 AVALIAÇÃO DA SECAGEM MEDIANTE UM PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

Com a finalidade de investigar os efeitos das variáveis operacionais e modelar o processo de secagem de frutos de aroeira-vermelha, neste capítulo foi desenvolvido um planejamento experimental estatístico, além de serem descritas a metodologia experimental e a modelagem da cinética do processo.

## 3.4.1 Planejamento experimental do processo de secagem

Neste trabalho, a aplicação da metodologia do planejamento fatorial teve como objetivo principal verificar a influência das variáveis operacionais de entrada, bem como a interação entre elas, no processo de secagem de frutos de aroeira-vermelha. Na Figura 17, são apresentadas todas as etapas realizadas para se atingir tal objetivo.



Figura 17 - Etapas realizadas nas análises estatísticas realizadas neste trabalho.

Conforme citado na revisão bibliográfica deste trabalho, são inúmeras as variáveis que podem influenciar significativamente o processo de secagem. Na secagem dos frutos de aroeiravermelha, o teor de umidade inicial dos frutos e a umidade relativa do ar de secagem são parâmetros não controláveis, podendo apenas ser medidos. Já a espessura do leito fixo de sólidos foi fixada em aproximadamente 1,0 cm, conforme citado por Yoshida (1997) para o estudo da cinética de secagem em leito fixo e camada fina. O tempo total do processo de secagem, obtido do início da secagem até o equilíbrio, varia para cada uma das diferentes condições de operação do processo, sendo estipulado para a realização da análise estatística deste trabalho.

Assim, foram investigadas as seguintes variáveis controláveis: a temperatura do ar de entrada  $(x_I)$ ; e a velocidade do ar  $(x_2)$ . A resposta de interesse foi a umidade em base seca dos frutos de aroeira-vermelha, em um certo tempo de secagem. Em virtude da variabilidade do teor

de umidade inicial do sólido nos experimentos, foi utilizada a sua forma adimensional conhecida como razão de umidade ( $\theta_t$ ), calculada conforme a Equação 20.

$$\theta_t = \frac{X_{s,t}}{X_{s,o}} \tag{20}$$

Em que  $X_{s,t}$  é o teor médio de umidade do sólido em certo tempo de secagem, em base seca, e  $X_{s,o}$  é o teor de umidade inicial, em base seca.

Portanto, para as duas variáveis independentes investigadas, foi realizado um DCCR (Delineamento Composto Central Rotacional) composto por um planejamento fatorial completo  $(2^2)$ , incluindo 4 pontos axiais e 3 repetições no ponto central, totalizando 11 experimentos de secagem para a análise do processo. Os níveis (máximo e mínimo) de cada fator de entrada (Tabela 3), além da quantidade de massa inicial do leito (aproximadamente 16,0 g) foram definidos a partir de ensaios preliminares que são apresentados no APÊNDICE C.

Variável			Nível		
	-1,41	-1	0	+1	+1,41
Temperatura do ar (°C)	40,0	44,4	55,0	65,6	70,0
Velocidade do ar (m/s)	0,40	0,46	0,60	0,74	0,80

TABELA 3 - VALORES UTILIZADOS NO DELINEAMENTO.

A Tabela 4 apresenta a matriz do planejamento experimental contendo os 11 experimentos, sendo que todos os ensaios foram realizados de forma aleatória, com o intuito de eliminar possíveis efeitos da variabilidade inesperada nas respostas observadas.

Ensaios	Temperatura do ar (°C)	Velocidade do ar (m/s)
1	44,4 (-1)	0,46 (-1)
2	65,6 (+1)	0,46 (-1)
3	44,4 (-1)	0,74 (+1)
4	65,6 (+1)	0,74 (+1)
5	40,0 (-1,41)	0,60 (0)
6	70,0 (+1,41)	0,60 (0)
7	55,0 (0)	0,40 (-1,41)
8	55,0 (0)	0,80 (+1,41)
9	55,0 (0)	0,60 (0)
10	55,0 (0)	0,60 (0)
11	55,0 (0)	0,60 (0)

TABELA 4 - MATRIZ DO DELINEAMENTO.

Nota: Valores codificados  $(x_i)$  entre parênteses.

Para a estimativa do erro padrão associado às medidas de umidade dos frutos de aroeiravermelha, foram utilizados os experimentos 9, 10 e 11. Nestes experimentos, para cada ponto experimental calculou-se o desvio padrão (*S*), conforme a Equação 14. Foi considerado que o desvio padrão é constante, sendo o seu valor estabelecido como a média dos desvios padrão de cada ponto experimental dos ensaios do ponto central do planejamento experimental.

Nas análises estatísticas, os dados do planejamento experimental foram tratados com o auxílio do *software* STATISTICA, sendo utilizado um nível de significância fixa à priori de 5,0 %. Inicialmente foram determinados os efeitos das variáveis e com estes resultados foram obtidos os coeficientes de regressão ( $\beta_0$ ,  $\beta_1$ ,  $\beta_{11}$ ,  $\beta_2$ ,  $\beta_{22}$  e  $\beta_{12}$ ) do modelo codificado (Equação 21), considerando somente as variáveis e interações significativas do processo de secagem.

$$\theta_{i \text{ predice}} = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_{11} x_{12} + \beta_2 x_2 + \beta_{22} x_{22} + \beta_{12} x_1 x_2 \tag{21}$$

A Equação 21 é uma equação polinomial de segunda ordem, em unidades codificadas, que relaciona a razão de umidade dos frutos ( $\theta_{t,predito}$ ) com as variáveis independentes codificadas ( $x_1$  e  $x_2$ ). Para verificar a qualidade de ajuste deste modelo foi realizada a Análise de Variância (ANOVA) e então foram construídas e analisadas as superfícies de respostas e curvas de níveis.

Com o objetivo de analisar o erro de ajuste  $(e_t)$  do modelo estatístico, para cada um dos ensaios do DCCR, foi realizada a comparação entre o seu resultado experimental  $(\theta_{t,real})$  e o resultado predito pelo modelo codificado  $(\theta_{t,realino})$ , conforme a Equação 22.

$$e_t = \theta_{t,real} - \theta_{t,predito} \tag{22}$$

#### 3.4.2 Metodologia experimental

De forma geral, o procedimento experimental para a análise do processo de secagem de frutos de aroeira-vermelha consistiu na passagem de ar aquecido através de um leito fixo de sólidos. No estudo foi avaliada a perda de umidade dos frutos de aroeira-vermelha ao longo do tempo e nas condições operacionais do planejamento experimental definido anteriormente. Os experimentos de secagem foram realizados sob as condições meteorológicas de Campinas-SP, utilizando o secador convectivo de bandeja (descrito na Seção 3.1.2 deste trabalho). É válido ressaltar que em todos os ensaios de secagem foram utilizados conforme o procedimento descrito a seguir:

#### a) Estabilização do sistema:

Nos ensaios de secagem, o procedimento operacional inicial consistiu na fixação da velocidade e da temperatura do ar de secagem. Deste modo, antes de cada experimento de
secagem e a partir do planejamento experimental, sorteava-se um ensaio e preparava-se o equipamento (sem a amostra dos frutos) em função dos parâmetros.

Para o ajuste da velocidade de ar, ligou-se o soprador e em seguida a válvula foi manipulada até se chegar à queda de pressão na placa de orifício para se obter a velocidade desejada, conforme o planejamento experimental. Para o ajuste da temperatura do ar de secagem foram ligadas as resistências elétricas e o sistema controlador de temperatura, e deste modo foi ajustado a temperatura fixa de operação desejada. Após a estabilização do sistema mediu-se a umidade relativa do ar de secagem, utilizando um Termo-higrômetro da marca Traceable®, em alguns períodos durante a secagem.

### **b**) Preparação do leito:

Para a preparação do leito de frutos de aroeira-vermelha, primeiramente foi determinada a massa da bandeja vazia. Em seguida os frutos de aroeira-vermelha reumidificados artificialmente foram distribuídos uniformemente na bandeja, mantendo-se o cuidado de realizar o mesmo procedimento de empacotamento para todas as condições estudadas no planejamento experimental. Então, a massa do conjunto (bandeja + amostra) foi determinada e em seguida colocado adequadamente dentro do secador através da abertura do vaso de secagem.

#### c) Processo de secagem:

Após acoplar o leito no secador, o processo de secagem foi iniciado (tempo zero) com o ar fluindo de forma ascendente através do leito fixo de sólidos. Como já citado, em cada um dos experimentos de secagem foi analisada a cinética do processo, coletando dados de massa em tempos fixados previamente até o equilíbrio. Deste modo, durante a secagem foram realizadas pesagens descontínuas da bandeja, sendo o leito retirado rapidamente do equipamento, levado até a balança, pesado e retornado à unidade de secagem de forma a promover a menor perda de temperatura e ganho de umidade possível mediante contato com o ar exterior. Para isto, foi utilizada uma balança da marca Marte® (modelo AL 500 e precisão de 0,001g), posicionada perto do sistema de secagem, e um cronômetro para a medida de tempo.

Em todos os experimentos, os resultados foram registrados em intervalos de cinco minutos até as duas primeiras horas do processo, depois a cada dez minutos até atingir as quatro horas do processo e a cada quinze minutos até que as variações da massa das amostras fossem insignificantes (triplicata da massa). Ao fim do processo de secagem, para se obter a massa de sólidos seco da amostra, a bandeja foi colocada em uma estufa a 105,0 °C por 24,0 h, conforme método descrito na Seção 3.3.1 deste trabalho.

### 3.4.3 Cinética de secagem dos frutos de aroeira-vermelha

Para cada um dos experimentos de secagem, a cinética de secagem dos frutos de aroeiravermelha foi construída relacionando-se a razão de umidade dos frutos ( $X_{s,t}/X_{s,o}$ ) com o tempo de secagem (*t*). Para determinar os períodos característicos do processo de secagem, foram construídas as curvas de taxa de secagem, relacionando as taxas de secagem (Equação 23) com a razão de umidade dos frutos.

$$\frac{dX_{s,i}}{dt_i} = \frac{X_{s,i-1} - X_{s,i}}{t_i - t_{i-1}}$$
(23)

Em que  $X_{s,i-1}$  é o conteúdo de umidade anterior;  $X_{s,i}$ , conteúdo de umidade atual;  $t_i$  é o tempo atual e  $t_{i-1}$ , tempo da medida anterior.

Neste trabalho, além de determinar os dados experimentais da cinética e taxa de secagem, vários modelos matemáticos foram ajustados aos dados experimentais da cinética de secagem, sendo realizada a comparação de modelos tradicionais com um modelo fundamentado na Inteligência Artificial.

Neste trabalho, a cinética de secagem dos frutos de aroeira-vermelha foi modelada e simulada utilizando-se as Redes Neurais Artificiais (RNA's). O objetivo foi prever a umidade dos frutos de aroeira-vermelha, em determinadas condições operacionais, visando à aplicação desta ferramenta de modelagem em processos de secagem industriais. Para realizar as modelagens e simulações, foi utilizado como ferramenta computacional o *software* MATLAB (*Neural Network Toolbox*). No APÊNDICE D encontra-se o programa desenvolvido que apresenta, de forma geral, as etapas descritas na Figura 18.



Figura 18 – Fluxograma das etapas utilizadas para a modelagem e simulação via RNA's.

Para que a modelagem via RNA seja eficiente, é necessário utilizar um banco de dados que garanta um mapeamento para qualquer par entrada/saída que seja introduzido na RNA e que faça parte de seu domínio. Deste modo, o uso do planejamento de experimentos permitiu a exploração de um espaço experimental amplo, com a utilização de poucos experimentos de secagem. Assim, a partir dos 11 ensaios do planejamento experimental foram organizados dois

bancos de dados, conforme apresentado na Tabela 5. Observa-se nesta tabela que cada banco de dados é constituído por 8 experimentos, utilizados na etapa de treinamento da RNA, e 3 experimentos que foram utilizados na etapa de verificação da RNA.

TABELA 5 - ORGANIZAÇÃO DOS BANCOS DE DADOS	UTILIZADOS PARA AS
MODELAGENS.	

	Experimentos do planejamento			
Banco de dados	Treinamento	Verificação		
1	1, 2, 5, 6, 7, 8, 9 e 10	3, 4 e 11		
2	1, 3, 5, 6, 7, 8, 10 e 11	2, 4 e 9		

Os bancos de dados foram organizados mantendo-se os valores máximos e mínimos, das variáveis operacionais, na etapa de treinamento da RNA. Além disto, o banco de dados 1 foi organizado para que na etapa de treinamento fossem utilizados todos os níveis de temperatura investigados no planejamento experimental, sendo verificada a capacidade de interpolação da velocidade do ar de secagem. Já o banco de dados 2, foi organizado visando verificar a capacidade de interpolação da temperatura do ar de secagem, sendo que na etapa de treinamento foram utilizados todos os níveis de velocidade do ar do planejamento experimental.

Para determinar a melhor arquitetura da RNA, foi investigada a utilização de 3 e 4 neurônios na camada de entrada. Deste modo, foram realizadas quatro modelagens conforme apresentado na Tabela 6.

Modelagem	Banco de dados	Número de
		neurônios de
		entrada
1	1	4
2	2	4
3	1	3
4	2	3

TABELA 6 - CARACTERÍSTICAS DAS MODELAGENS INVESTIGADAS.

Nas modelagens 1 e 2, as variáveis de entrada associadas ao sistema de secagem estudado foram: o tempo de secagem; a temperatura do ar; a velocidade do ar; e a umidade relativa do ar de secagem. As modelagens 3 e 4 foram realizadas sem a utilização da umidade relativa do ar de secagem (*UR*) como variável de entrada da rede. Em todas as modelagens, a variável de saída de interesse foi a umidade adimensional ( $\theta^*$ ) dos frutos de aroeira-vermelha, calculada conforme a Equação 24.

$$\theta^* = \frac{X_{s,t} - X_{s,e}}{X_{s,o} - X_{s,e}}$$
(24)

Em que  $X_{s,t}$  é o teor médio de umidade do sólido em certo tempo de secagem, em base seca,  $X_{s,e}$  é o teor de umidade de equilíbrio, em base seca, e  $X_{s,o}$  é o teor de umidade inicial, em base seca.

Nas etapas de treinamento e verificação das RNA's, os dados da cinética de secagem foram normalizados, procurando-se desta maneira eliminar eventuais problemas relacionados às diferentes magnitudes dos dados. Para cada variável foram assumidos os valores +1 para o seu maior valor real ( $X_{i,máximo}$ ) e -1 para o seu menor valor real ( $X_{i,mínimo}$ ). Deste modo, para a transformação dos valores reais em valores codificados foi determinada a Equação 25, que relaciona as variáveis codificadas ( $x_i$ ) e as variáveis reais ( $X_i$ ).

$$x_{i} = 2 \left( \frac{X_{i} - X_{i,minimo}}{X_{i,miximo} - X_{i,minimo}} \right) - 1$$
(25)

Esta normalização foi realizada no MATLAB utilizando o comando **premnmx**, sendo que os dados normalizados é que foram submetidos ao processo de treinamento. Os dados de saída da RNA foram desnormalizados utilizando a Equação 26, sendo que no MATLAB foi utilizado o comando **postmnmx**.

$$X_{i} = \frac{(X_{i,máximo} - X_{i,mínimo}).(x_{i} + 1)}{2} + X_{i,mínimo}$$
(26)

Para este trabalho, foi utilizada uma rede neural artificial do tipo *feedforward* (**newff** no *software* MATLAB) formada por três camadas: camada de entrada, constituída por 4 neurônios (nas modelagens 1 e 2) e 3 neurônios (nas modelagens 3 e 4); camada oculta; e camada de saída, constituída por 1 neurônio. A função de ativação utilizada nos neurônios ocultos foi a função tangente hiperbólica (**tansig** no *software* MATLAB) e a função de ativação utilizada no neurônio da camada de saída foi a função linear (**purelin** no *software* MATLAB).

Para a etapa de treinamento da RNA, foi utilizado o algoritmo de treinamento de Levenberg-Marquartdt com regularização bayesiana (função **trainbr** no *software* MATLAB), pois esta técnica evita o sobreajuste de dados. Em cada modelagem, para determinar a melhor arquitetura da RNA representativa do processo de secagem, foram realizadas várias simulações variando-se o número de neurônios na camada oculta e buscando-se principalmente um ajuste eficaz do modelo neural aos dados de verificação. O erro quadrático médio (*MSE*) de cada modelagem foi calculado conforme a Equação 27, tanto para a etapa de treinamento como para a etapa de verificação da rede.

$$MSE = \frac{\sum_{i=1}^{N} e_i^2}{N}$$
(27)

Em que  $\sum_{i=1}^{N} e_i^2$  é o somatório do erro ao quadrado (*SSE*) e N é a quantidade de vetores utilizados em cada etapa (treinamento ou verificação).

Após a etapa de treinamento, foi realizada a etapa de verificação da rede, sendo apresentados novos dados de entrada, obtendo-se assim, por simulação, os dados de saída desejados. A umidade adimensional determinada através do modelo neural ( $\theta^*_{predito}$ ) foi então comparada ao valor real ( $\theta^*_{real}$ ) através da análise dos gráficos de dispersão (dados reais de

verificação *versus* preditos pelo modelo). Quando os dados se apresentavam na forma de uma reta coincidente com a diagonal, em que o coeficiente linear se aproximava de zero e o coeficiente angular e o  $R^2$  fossem próximos de um, a configuração do modelo neural foi considerada adequada.

Para uma melhor visualização do ajuste do modelo neural aos dados cinéticos da secagem dos frutos de aroeira-vermelha, também foi calculado, para cada vetor de verificação, o valor do erro de ajuste ( $e_i$ ) (Equação 28), além de ser analisado o valor de  $\sqrt{MSE}$  para os experimentos de verificação.

$$e_i = \theta^*_{real} - \theta^*_{predito}$$
<sup>(28)</sup>

### 3.4.3.2 Modelo de difusão

Neste trabalho foi analisada a capacidade preditiva, para descrever a cinética de secagem dos frutos de aroeira-vermelha, de um modelo fundamentado na transferência de massa. A modelagem foi baseada na teoria da difusão e nas soluções analíticas das equações de difusão apresentadas por Crank (1975).

Deste modo, foi desenvolvido um modelo matemático unidimensional, considerando as seguintes hipóteses: os frutos de aroeira-vermelha possuem geometria esférica; o fluxo mássico de umidade é somente na direção radial; a umidade inicial do sólido está distribuída uniformemente no seu interior; existem condições de equilíbrio na superfície do sólido; as condições ambientais do processo são constantes; a difusividade efetiva é constante; e o período da taxa decrescente é o fator controlador do processo, ou seja, há resistência à transferência de massa apenas na fase sólida.

Aplicando essas hipóteses na Equação 6, a equação diferencial parcial, que governa o mecanismo de difusão de massa no interior do fruto de aroeira-vermelha, é dada pelo modelo difusivo descrito pela Equação 29.

$$\frac{\partial X_s}{\partial t} = D \left( \frac{\partial^2 X_s}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial X_s}{\partial r} \right)$$
(29)

A solução analítica da Equação 29, para o perfil interno de umidade, é dada por Crank (1975) conforme apresentado na Equação 30.

$$\frac{X_{s,t} - X_{s,e}}{X_{s,o} - X_{s,e}} = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp\left[-n^2 \frac{\pi^2 Dt}{r_p^2}\right]$$
(30)

Em que  $X_{s,t}$  é o teor médio de umidade do sólido em certo tempo de secagem,  $X_{s,e}$  é o teor de umidade de equilíbrio,  $X_{s,o}$  é o teor de umidade inicial, *n* é o número de parâmetros da série,  $r_p$ é o raio da partícula, *t* é o tempo e *D* é a difusividade efetiva. Neste trabalho, utilizou-se apenas o primeiro termo da série, conforme apresentado na Equação 31.

$$\frac{X_{s,t} - X_{s,e}}{X_{s,o} - X_{s,e}} = \frac{6}{\pi^2} \exp\left[-\frac{\pi^2 Dt}{r_p^2}\right]$$
(31)

Para cada experimento do planejamento experimental, a difusividade efetiva (*D*) foi estimada no período da taxa decrescente, utilizando-se o valor do raio dos frutos determinado na Seção 3.3.2 deste trabalho. A estimativa não linear foi desenvolvida com o auxílio do *software* STATISTICA, sendo utilizado o método de otimização de Quasi-Newton, com um número máximo de interações igual a 50 e um critério de convergência igual a 0,001.

A validação do modelo de difusão, assim como de todos os modelos estudados neste trabalho, foi realizada através da análise de gráficos de dispersão e do erro quadrático médio (*MSE*). Para cada modelo, um gráfico de dispersão (dados reais *versus* simulados pelo modelo) foi construído, sendo realizado um ajuste linear dos dados. Assim, os parâmetros da equação da reta e o coeficiente de correlação ( $\mathbb{R}^2$ ) foram obtidos. O erro quadrático médio foi calculado

conforme a Equação 27. Os modelos mais adequados foram escolhidos com base nos seguintes critérios: valor de  $R^2$  mais elevado (próximo da unidade); coeficiente angular da reta próximo da unidade; coeficiente linear da reta próximo de zero; e menores valores de *MSE*.

#### 3.4.3.3 Modelos semi-empíricos

Neste trabalho, os modelos de Lewis, de Henderson e Pabis, de Page modificado e de Henderson foram ajustados aos dados experimentais da cinética de secagem dos frutos de aroeiravermelha. A Tabela 7 apresenta estes modelos, sendo que a descrição destes modelos encontra-se na revisão bibliográfica deste trabalho.

Modelo	Equação
Lewis	$(X_{s,t}-X_{s,e})/(X_{s,o}-X_{s,e})=exp(-K.t)$
Henderson e Pabis	$(X_{s,t}-X_{s,e})/(X_{s,o}-X_{s,e})=a_1.exp(-K.t)$
Page modificado	$(X_{s,t}-X_{s,e})/(X_{s,o}-X_{s,e})=exp-(K.t)^{n}$
Henderson	$(X_{s,t}-X_{s,e})/(X_{s,o}-X_{s,e})=a_1.exp(-K_1.t)+b.exp(-K_2.t)$

TABELA 7 - MODELOS SEMI-EMPÍRICOS PARA A CINÉTICA DE SECAGEM.

Os modelos foram ajustados para todas as condições estudadas no planejamento experimental, sendo que os seus parâmetros ajustáveis foram estimados utilizando a mesma metodologia apresentada no ajuste do modelo de difusão.

# **4 RESULTADOS E DISCUSSÕES**

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados experimentais obtidos para o estudo da secagem dos frutos da aroeira-vermelha, o que inclui a sua caracterização, a análise do comportamento higroscópico dos frutos, a análise das curvas de secagem mediante um planejamento experimental e o estudo da modelagem e simulação da cinética do processo de secagem.

# 4.1 PARÂMETROS DOS FRUTOS DE AROEIRA-VERMELHA

A Tabela 8 apresenta os resultados das medições do teor de umidade, em base seca, do diâmetro médio e da massa específica aparente dos frutos e da massa específica e da porosidade do leito de frutos, além dos respectivos desvios padrão.

Amostras	$X_{s,t}(adm)$	$\rho_l(g/cm^3)$	$d_p(cm)$	$\rho_p (g/cm^3)$	ε (adm)
1	0,493	0,306	0,470	0,562	0,456
2	0,507	0,305	0,476	0,575	0,470
3	0,496	0,303	0,468	0,553	0,453
4	0,516	0,307	0,468	0,553	0,453
5	0,550	0,307	0,468	0,570	0,461
Média	0,512	0,306	0,470	0,563	0,458
Desvio padrão	0,02	0,002	0,004	0,010	0,007

TABELA 8 - CARACTERIZAÇÃO DOS FRUTOS DE AROEIRA-VERMELHA.

Na Tabela 8 observa-se que todas as medidas apresentaram repetibilidade, com baixos desvios padrão. Comparando-se os dados medidos neste trabalho com os valores determinados

por Lauriano *et al.* (2005), verificou-se um desvio de 1,0 % para o diâmetro da partícula, 43,0 % para a massa específica aparente do fruto e 28,0 % para a porosidade do leito. O maior desvio, principalmente nos dados de massa específica aparente do fruto, pode ser devido à influência do teor de umidade dos frutos utilizados nas análises de caracterização.

### 4.1.1 Teor de umidade de equilíbrio

A Tabela 9 apresenta os resultados das umidade de equilíbrio dos frutos de aroeiravermelha para as diferentes atividades de água e temperaturas.

TABELA 9 - RESULTADOS DO LEVANTAMENTO DAS ISOTERMAS DE EQUILÍBRIO.

	T=	<i>T</i> =30,0 °C		=50,0 °C	<i>T</i> =	=70,0 °C
	a <sub>w</sub> (adm)	$X_{s,e}(adm)$	a <sub>w</sub> (adm)	$X_{s,e}(adm)$	$a_w(adm)$	$X_{s,e}(adm)$
	0,1128	0,0284±0,0035	0,1110	0,0046±0,0019	0,1075	0,0085±0,0004
	0,3244	0,0623±0,0019	0,3054	0,0542±0,0028	0,2777	0,0318±0,0003
	0,4317	0,0841±0,0011	0,4320	0,0821±0,0071	0,4323	0,0572±0,0005
	0,5140	0,1069±0,0011	0,6449	0,1397±0,0026	0,3947	0,0477±0,0006
	0,6789	0,1896±0,0029	0,7443	0,2094±0,0064	0,7506	0,1396±0,0036
	0,7509	0,2397±0,0054	0,8120	0,2551±0,0076	0,7949	0,1783±0,0028
	0,8362	0,3569±0,0038	-	-	-	-

Vários modelos foram ajustados aos dados da Tabela 9, sendo que os modelos de BET, GAB, Caurie e Halsey apresentaram resultados adequados nos ajustes aos dados experimentais. Na Tabela 10 são apresentados os valores dos parâmetros da equação da reta obtida no ajuste linear dos dados reais *versus* simulados pelos modelos.

Modelo	R <sup>2</sup>	Coeficiente angular da reta	Coeficiente linear da reta
BET	0,9872	0,9723	0,00540
GAB	0,9950	0,9855	0,00290
Caurie	0,9923	1,0004	0,00008
Halsey	0,9911	1,0193	0,00370

TABELA 10 - RESULTADOS DA SIMULAÇÃO COM OS MODELOS DE ISOTERMAS DE SORÇÃO.

Na Tabela 10 é observado que, de forma geral, todas as modelagens foram adequadas, pois nos gráficos de dispersão foi verificado que os dados se apresentam na forma de uma reta coincidente com a diagonal e os valores de  $R^2$  foram próximos da unidade. Entretanto, os resultados mostram que o modelo de Caurie foi o mais satisfatório entre os modelos investigados.

Os parâmetros ajustáveis do modelo de Caurie, para cada isoterma, são apresentados na Tabela 11.

Temperatura	A (adm)	B (adm)
30,0 °C	-4,112	3,650
50,0 °C	-4,078	3,349
70,0 °C	-4,406	3,330

TABELA 11 - PARÂMETROS AJUSTÁVEIS DO MODELO DE CAURIE PARA CADA TEMPERATURA.

O ajuste do modelo de Caurie aos dados experimentais é apresentado na Figura 19.



Figura 19 - Ajuste do modelo de Caurie aos dados experimentais.

Na Figura 19 é observado que a saída real (dados pontuais) é próxima da saída do modelo (linha contínua), confirmando o desempenho satisfatório do modelo de Caurie para os dados de equilíbrio obtidos através do método estático e para as temperaturas investigadas neste trabalho. É observado na Figura 19 que, para uma determinada atividade de água, quanto maior a temperatura do ar, menor é a umidade de equilíbrio do fruto de aroeira vermelha, padrão característico de isotermas de dessorção.

A Figura 20 mostra a comparação dos dados do presente trabalho com os dados de Lauriano *et al.* (2005) para a temperatura de 50,0 °C. Verifica-se a coerência dos resultados, apesar da matéria-prima ter sido obtida em épocas diferentes.



Figura 20 - Comparação entre isotermas de sorção de 50 °C (Literatura *versus* Presente trabalho) para o modelo de Caurie.

# 4.2 AVALIAÇÃO DA SECAGEM MEDIANTE UM PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

## 4.2.1 Planejamento experimental para o processo de secagem

As condições medidas nos experimentos de secagem (umidade inicial do sólido e umidade relativa do ar de secagem) e as respectivas respostas (razão de umidade em diferentes períodos de secagem) são apresentadas na Tabela 12. É válido lembrar que em todos os experimentos foi analisada a cinética do processo, sendo apresentados aqui somente os resultados da razão de umidade em certos períodos operacionais (variando de 1 hora a 6 horas de operação).

Ensaios	Condições medidas		V	ariáveis	de saída operac	em certo ionais	os tempo	S
	$X_{s,o}(adm)$	UR (%)	$\theta_{t=1\ h}$	$\theta_{t=2\ h}$	$\theta_{t=3 h}$	$\theta_{t=4 h}$	$\theta_{t=5 h}$	$\theta_{t=6 h}$
1	0,537	19,87	0,591	0,381	0,288	0,246	0,223	0,208
2	0,553	7,65	0,330	0,194	0,154	0,135	0,123	0,115
3	0,514	12,77	0,535	0,341	0,277	0,245	0,225	0,211
4	0,544	5,97	0,262	0,170	0,141	0,125	0,115	0,108
5	0,513	14,09	0,628	0,418	0,321	0,276	0,251	0,233
6	0,540	3,50	0,239	0,153	0,125	0,111	0,101	0,096
7	0,518	15,03	0,473	0,285	0,225	0,196	0,180	0,169
8	0,526	9,64	0,376	0,243	0,202	0,180	0,165	0,155
9	0,545	10,34	0,435	0,252	0,200	0,176	0,160	0,150
10	0,533	12,64	0,427	0,254	0,208	0,184	0,170	0,159
11	0,530	11,45	0,427	0,257	0,208	0,182	0,167	0,156

TABELA 12 - CONDIÇÕES MEDIDAS E RESPOSTAS DO PROCESSO EM TODOS OS ENSAIOS DO DCCR.

Conforme observado na Tabela 12, a umidade relativa média do ar de secagem (*UR*) variou de 3,50 % a 19,87 % e as amostras dos frutos de aroeira-vermelha apresentaram umidades iniciais, em base seca, variando entre 0,513 a 0,553. Foi observado também que, conforme a condição operacional, a razão de umidade dos frutos de aroeira-vermelha variou de 0,096 (70,0 °C, 0,6 m/s e 6 horas de operação) a 0,628 (40,0 °C, 0,6 m/s e 1 hora de operação). Assim, estes dados além de indicarem a influência da temperatura no processo de secagem, também indicam a influência do tempo operacional no processo de secagem, pois quanto maior o tempo operacional menor é a umidade final do sólido processado em certas condições operacionais fixas, como já conhecido.

Através da Tabela 12, também é possível observar a repetibilidade dos dados experimentais de secagem no ponto central do planejamento. Para os ensaios no ponto central, foi observado que os dados apresentaram valores bem próximos um dos outros, deste modo existe boa repetibilidade no comportamento da secagem no ponto central, sendo que o desvio padrão médio calculado, relacionado a medida de razão de umidade, foi de 0,004.

Os efeitos padronizados de cada variável de entrada sobre a razão de umidade dos frutos de aroeira-vermelha são mostrados nos diagramas de Pareto das Figuras 21 e 22.



Efeito padronizado (t<sub>cal</sub>) Figura 21 - Diagrama de pareto para o tempo de operação de 4 horas.





Como observado na Figura 21, no período de operação de 4 horas, a temperatura e velocidade do ar de secagem têm um efeito estatisticamente significativo sobre a razão de umidade, com um nível de confiança de 95,0 %. No entanto, notou-se que a secagem foi afetada principalmente pela temperatura do ar de secagem. Já na Figura 22 observou-se que, para o período de 6 horas, apenas a temperatura do ar foi significativa no processo, a um nível de confiança de 95,0 %. O aumento desta variável do nível baixo (40,0 °C) para o nível alto (70,0 °C) apresenta um grande impacto na diminuição da razão de umidade dos frutos de aroeiravermelha. No APÊNDICE E são apresentados os diagramas de pareto para os outros períodos operacionais estudados. É verificado que, para as condições operacionais estudadas neste trabalho, a temperatura do ar de secagem, quando comparada com a velocidade, apresenta uma influência maior sobre o processo de secagem, tal como esperado.

Através dos dados experimentais e com o auxílio do *software* STATISTICA foi avaliado o ajuste de modelos matemáticos para a razão de umidade dos frutos de aroeira-vermelha em certos tempos de secagem. Portanto, foram determinados os coeficientes de regressão do modelo codificado (Equação 21), sendo considerados significativos os parâmetros que apresentaram p-valor menores que 5,0 % (p-valor<0,05). Deste modo, os coeficientes estatisticamente não significativos são ignorados, tendo sido incorporados aos resíduos para o cálculo da ANOVA, e o modelo codificado foi reparametrizado. A Tabela 13 apresenta os modelos codificados e reparametrizados obtidos diretamente das respostas em certos tempos operacionais.

Tempo (h)	Modelo
1	$\theta_{t,predito} = 0,430 - 0,135x_1 - 0,033x_2$
2	$\theta_{t,predito} = 0,258 - 0,092x_1 + 0,014x_1^2 - 0,015x_2$
3	$\theta_{t,predito} = 0,209 - 0,068x_1 + 0,007x_1^2 - 0,007x_2$
4	$\theta_{t,predito} = 0,183 - 0,058x_1 + 0,005x_1^2 - 0,004x_2$
5	$\theta_{t,predito} = 0,171 - 0,053x_1$
6	$\theta_{t, predito} = 0,160 - 0,049 x_1$

TABELA 13 - MODELOS CODIFICADOS PARA A RAZÃO DE UMIDADE EM CERTOS TEMPOS OPERACIONAIS.

Na Tabela 13 é observado que em 1 hora de secagem foram significativos apenas os termos lineares da temperatura e da velocidade do ar de secagem, sendo que em 2, 3 e 4 horas de

secagem, além destes termos significativos, o termo quadrático da temperatura do ar de secagem também foi significativo. Já em períodos operacionais de 5 e 6 horas de secagem, e provavelmente em tempos superiores, somente o termo linear da temperatura do ar de secagem foi estatisticamente significativo. Ressalta-se que, em todos os modelos, o termo quadrático da velocidade do ar e o termo da interação entre a temperatura e a velocidade do ar não foram estatisticamente significativos.

Para determinar a qualidade de ajuste dos modelos codificados (Tabela 13), na Tabela 14 são apresentados os resultados dos cálculos da ANOVA. No APÊNDICE F são apresentadas todas as ANOVA's completas.

Tempo (h)	Regressão/R	esíduos	Falta de aju	ste/ Erro puro	$\mathbf{R}^2$
	<b>F</b> <sub>cal</sub>	<b>F</b> <sub>tab</sub>	<b>F</b> <sub>cal</sub>	<b>F</b> <sub>tab</sub>	
1	2975,56	4,46	1,28	19,33	0,999
2	656,82	4,35	7,75	19,30	0,996
3	593,58	4,35	0,87	19,30	0,996
4	429,59	4,35	1,20	19,30	0,995
5	590,24	5,12	1,82	19,35	0,985
6	572,02	5,12	1,73	19,35	0,985

TABELA 14 - RESULTADOS DAS ANOVA'S PARA OS MODELOS CODIFICADOS.

Analisando a Tabela 14 observa-se que os modelos da Tabela 13 podem ser considerados válidos e adequados para descrever a razão de umidade dos frutos de aroeira-vermelha em função das variáveis estudadas. Isto devido às seguintes análises: o  $F_{cal}$  da regressão em relação aos resíduos é muito superior ao  $F_{tab}$ ; o  $F_{cal}$  da falta de ajuste em relação ao erro puro é inferior ao  $F_{tab}$ ; e o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) é próximo de 1 para todos os modelos. Deste modo, ao se ajustar bem aos dados experimentais, todos os modelos podem ser utilizados para fins preditivos, satisfazendo os requisitos para a construção das superfícies de resposta e curvas de níveis (Figuras 23 a 26).

Entretanto, apenas para os modelos em que todas as variáveis de entrada foram estatisticamente significativas é que foram construídas as superfícies de respostas e curvas de contornos. Assim, nos períodos operacionais de 5 e 6 horas (e provavelmente para períodos

superiores de secagem) não foram construídas as superfícies de respostas e curvas de contorno, uma vez que somente a temperatura do ar foi significativa no processo.



a)

Figura 23 - Superfície de resposta (a) e Curva de contorno (b) para a razão de umidade dos frutos de aroeiravermelha (adm) em função da Temperatura e da Velocidade do ar de secagem para o tempo operacional de 1 hora.

b)



Figura 24 - Superfície de resposta (a) e Curva de contorno (b) para a razão de umidade dos frutos de aroeiravermelha (adm) em função da Temperatura e da Velocidade do ar de secagem para o tempo operacional de 2 horas.



Figura 25 - Superfície de resposta (a) e Curva de contorno (b) para a razão de umidade dos frutos de aroeiravermelha (adm) em função da Temperatura e da Velocidade do ar de secagem para o tempo operacional de 3 horas.



Figura 26 - Superfície de resposta (a) e Curva de contorno (b) para a razão de umidade dos frutos de aroeiravermelha (adm) em função da Temperatura e da Velocidade do ar de secagem para o tempo operacional de 4 horas.

Conforme observado nas Figuras de 23 a 26, foram observadas condições ótimas de secagem nos níveis elevados das variáveis independentes, especialmente em temperaturas elevadas do ar de secagem (70,0 °C), como já esperado. Na Figura 27 foram plotados os valores

previstos pelo modelo codificado em função dos valores observados experimentalmente para o tempo operacional de 4 horas.



Figura 27 - Valores experimentais *versus* valores previstos pelo modelo codificado para a razão de umidade em 4 horas de operação.

No gráfico da Figura 27 observa-se que o  $R^2$  foi de 0,9946, o coeficiente linear foi de 0,000001 (próximo de zero) e coeficiente angular foi de 1. Assim, pode-se concluir que o ajuste deste modelo mostrou-se satisfatório, pois os dados estão na diagonal, sendo que o modelo apresentou um desempenho de previsão com 99,46 % de certeza, como já visto nos cálculos da ANOVA. Na Figura 28 são apresentados os erros de ajuste para cada ensaio do DCCR no tempo de 4 horas.



Figura 28 - Erro versus experimentos do DCCR para o tempo operacional de 4 horas.

Observa-se na Figura 28 que o erro máximo verificado foi de -0,008 para o ensaio 9 do DCCR e no tempo operacional de 4 horas. A modelagem apresentou uma precisão ( $\sqrt{MSE}$ ) de 0,0037, o que indica o bom desempenho da modelagem estatística para o processo de secagem dos frutos de aroeira-vermelha nas condições operacionais avaliadas neste trabalho.

Mediante a exposição dos resultados anteriores, verifica-se que a temperatura é o principal fator que afeta o processo de secagem dos frutos de aroeira-vermelha, sendo sua influência preponderante em relação a velocidade do ar de secagem. Estes resultados estão de acordo com os resultados de Yoshida (1997) que estudou a secagem de milho superdoce, de Gouveia *et al.* (2002) que avaliaram a cinética de secagem de caju e de Rodrigues *et al.* (2002) que estudaram a cinética de secagem de caju e de Rodrigues *et al.* (2002) que estudaram a cinética de secagem de caju e de Rodrigues *et al.* (2002) que estudaram a cinética de secagem de caju e de Rodrigues *et al.* (2002) que estudaram a cinética de secagem de caju e de Rodrigues *et al.* (2002) que estudaram a cinética de secagem de caju e de Rodrigues *et al.* (2002) que estudaram a cinética de secagem de caju e de Rodrigues *et al.* (2002) que estudaram a cinética de secagem de caju e de Rodrigues *et al.* (2002) que estudaram a cinética de secagem de caju e de Rodrigues *et al.* (2002) que estudaram a cinética de secagem de caju e de Rodrigues *et al.* (2002) que estudaram a cinética de secagem de caju e de Rodrigues *et al.* (2002) que estudaram a cinética de secagem de caju e de Rodrigues *et al.* (2002) que estudaram a cinética de secagem de caju e de Rodrigues *et al.* (2002) que estudaram a cinética de secagem de caju e de Rodrigues *et al.* (2002) que estudaram a cinética de secagem de caju e de Rodrigues *et al.* (2002) que estudaram a cinética de secagem de caju e de Rodrigues *et al.* (2002) que estudaram a cinética de secagem de caju e de Rodrigues *et al.* (2002) que estudaram a cinética de secagem de caju e de Rodrigues *et al.* (2002) que estudaram a cinética de secagem de caju e de Rodrigues *et al.* (2002) que estudaram a cinética de secagem de caju e de Rodrigues *et al.* (2002) que estudaram a cinética de secagem de caju e de Rodrigues *et al.* (2002) que estudaram a cinética de secagem de caju e de Rodrigues *et al.* (2002) que estudaram a cin

## 4.2.2 Cinética de secagem dos frutos da aroeira-vermelha

Nas Figuras de 29 a 31 são apresentados os dados experimentais da cinética de secagem dos frutos de aroeira-vermelha para todas as condições operacionais do planejamento experimental.



Figura 29 - Resultados experimentais da cinética de secagem para os ensaios de 1 a 4.



Figura 30 - Resultados experimentais da cinética de secagem para os ensaios de 5 a 8.



Figura 31 - Resultados experimentais da cinética de secagem para os ensaios de 9 a 11.

Nas Figuras de 32 a 34 são apresentadas as curvas de taxa de secagem para os frutos de aroeira-vermelha em todas as condições do planejamento experimental. É válido ressaltar que nas figuras foi indicado, com uma seta vermelha, o início do período de taxa decrescente do processo de secagem.



Figura 32 - Resultados experimentais das taxas de secagem para os ensaios de 1 a 4.



Figura 33 - Resultados experimentais das taxas de secagem para os ensaios de 5 a 8.



Figura 34 - Resultados experimentais das taxas de secagem para os ensaios de 9 a 11.

Através da análise das curvas de cinética e taxa de secagem observa-se os efeitos das variáveis operacionais de entrada sobre a cinética e a taxa de secagem dos frutos de aroeiravermelha, além do melhor entendimento dos fenômenos que ocorrem durante o processo de secagem.

Os efeitos da temperatura e da velocidade do ar de secagem sobre a cinética de secagem dos frutos da aroeira-vermelha podem ser verificados nas Figuras 29 e 30, enquanto os efeitos destas variáveis sobre a taxa de secagem podem ser analisados nas Figuras 32 e 33. Deste modo, foi verificado que a temperatura do ar de secagem contribuiu de forma muito significativa para a eficiência do processo de secagem. Em temperaturas altas foram obtidas as maiores taxas de secagem e consequentemente menores valores para a razão de umidade dos frutos de aroeira-vermelha foram alcançados, conforme já esperado. Observa-se também que o teor de umidade de equilíbrio diminui com o aumento da temperatura.

A velocidade do ar de secagem apresentou pouca influência em comparação ao grande efeito da temperatura do ar sobre redução da razão de umidade dos frutos. Apenas foram observados pequenos efeitos em períodos iniciais da cinética de secagem, em que os frutos de aroeira-vermelha apresentavam alto teor de umidade. Porém à medida que o processo foi sendo realizado, o efeito da velocidade do ar não foi mais significativo (conforme já visto na análise estatística deste trabalho), pois somente a resistência interna à transferência de massa foi o fator controlador do processo.

Para o acompanhamento da repetibilidade dos dados experimentais da cinética de secagem, foram construídas as Figuras 31 e 34 que apresentam os dados experimentais do ponto central do planejamento experimental. Assim foi observado que tanto as curvas da cinética como as curvas da taxa de secagem se sobrepuseram ou apresentaram comportamento bem próximo, convalidando os dados experimentais. Deste modo, existe boa repetibilidade no comportamento da secagem no ponto central para a secagem dos frutos de aroeira-vermelha nas condições estudadas neste trabalho. Lembrando que o desvio padrão médio, relacionado a medida de razão de umidade, é igual a 0,004.

Em relação aos períodos característicos do processo de secagem, conforme observado nas curvas de taxa de secagem, a cinética do processo apresentou o período inicial da secagem e principalmente o período de taxa decrescente.

O período inicial da secagem iniciou-se imediatamente após o contato entre o leito dos frutos (inicialmente a temperatura ambiente) e o ar aquecido, ocorrendo deste modo o aumento da temperatura do sólido e consequentemente o aumento da taxa de secagem. Este período de regime não permanente ocorreu em um tempo muito curto (entre 5 e 15 minutos), sendo insignificante quando comparado ao período de taxas decrescentes.

O período de secagem à taxa decrescente iniciou-se imediatamente após o período inicial de secagem, sendo indicados nas curvas de taxa de secagem pela seta vermelha. Durante este período a temperatura do sólido aumentou, ocorrendo a migração interna de água para a superfície do material e à medida que o processo foi se desenvolvendo ao longo do tempo, a superfície dos frutos se tornou cada vez mais seca. Assim, o período das taxas decrescentes foi o fator controlador do processo de secagem dos frutos de aroeira-vermelha, que é uma característica específica da secagem de materiais agrícolas.

Os resultados encontrados anteriormente mostram que os frutos da aroeira-vermelha apresentam principalmente água interna, comprovado pelo período de taxa decrescente na maior parte do processo de secagem e também pela maior influência da temperatura no processo. Estes resultados estão de acordo com os resultados da análise estatística e também com os resultados respaldados por vários estudos de secagem em camada fina de produtos agrícolas. Como, por exemplo, nos estudos de Misra e Brooker (1980), Syarief, Morey e Gustafson (1984), Jayas e Sokhansanj (1989), entre outros pesquisadores.

## 4.2.2.1 Modelo via redes neurais artificiais

Na Tabela 15 são apresentadas, para cada modelagem, as quantidades dos vetores utilizados nas etapas de treinamento e verificação da RNA.

	Número de vetores				
Modelagem	Treinamento	Verificação			
1 e 3	477	179			
2 e 4	489	167			

TABELA 15 - NÚMERO DE VETORES UTILIZADOS NAS MODELAGENS VIA RNA's.

As configurações e os desempenhos durante a etapa de treinamento, dos modelos neurais que apresentaram o melhor ajuste aos dados de verificação, são apresentados na Tabela 16.

TABELA 16 - RESULTADOS DOS TREINAMENTOS DAS RNA'S ESCOLHIDAS.

Modelagem	Topologia da RNA	Número de parâmetros originais	Número de parâmetros efetivos	Número de iterações	SSE	√ <i>MSE</i> (adm)
1	4x4x1	25	23	1177	0,1264	0,0080
2	4x8x1	49	44	847	0,0055	0,0017
3	3x5x1	26	23	301	0,0945	0,0074
4	3x5x1	26	25	1803	0,0301	0,0039

Na Tabela 16 são indicados os valores do *SSE* de treinamento, sendo verificado que em nenhuma modelagem o *SSE* desejado (0,001) foi atingido durante a etapa de treinamento, pois os métodos de otimização do MATLAB, usados dentro da função **trainbr**, têm outros critérios paralelos e acabam parando o treinamento antes de atingir o *SSE* desejado. Os resultados da verificação da qualidade dos modelos neurais são apresentados na Tabela 17.

Modelagem	R <sup>2</sup>	Coeficiente angular da reta	Coeficiente linear da reta	$\sqrt{MSE}$
1	0,9988	0,9950	0,0008	0,009
2	0,9971	1,0011	0,0039	0,014
3	0,9993	0,9950	-0,0004	0,007
4	0,9990	1,0090	0,0042	0,010

TABELA 17 - RESULTADOS DA SIMULAÇÃO VIA RNA COM OS DADOS DE VERIFICAÇÃO.

Na Tabela 17 é observado que, de forma geral, todas as modelagens por RNA's foram adequadas, pois nos gráficos de dispersão foi verificado que os dados se apresentam na forma de uma reta coincidente com a diagonal e os valores de  $R^2$  foram próximos da unidade. Entretanto, os resultados mostram que a modelagem 3 foi a mais satisfatória entre todas as modelagens investigadas. Provavelmente devido, principalmente, ao banco de dados utilizado.

Na modelagem 3 o banco de dados foi organizado de tal forma que na etapa de treinamento da RNA foram apresentados todos os níveis de temperaturas investigados no planejamento experimental. Isto foi fundamental pois, de acordo com as análises estatísticas deste trabalho, a temperatura do ar de secagem é a variável mais influente no processo de secagem dos frutos de aroeira-vermelha. A utilização de apenas três neurônios de entrada (tempo, temperatura do ar e velocidade do ar) indica que a umidade relativa do ar de secagem não tem uma influência significativa na modelagem por RNA, nas condições operacionais estudadas.

Na Figura 35 é apresentado o esquema da topologia da RNA obtida na modelagem 3, que poderá ser utilizado na simulação da cinética de secagem dos frutos de aroeira-vermelha.



Figura 35 - Esquema da topologia da RNA obtida na modelagem 3.

Os pesos e viés encontrados no processo de treinamento da RNA 3 são apresentados na Tabela 18.

	Pesos entre os neurônios da camada de entrada (I) e os neurônios da camada oculta (H)			Pesos entre os neurônios da camada oculta (H) e os neurônios da camada de saída (O)		
	I <sub>1</sub>	$I_2$	I <sub>3</sub>		0	
$\mathbf{H}_{1}$	1,3762	0,4422	0,0768	-0,2509		
$H_2$	-7,8915	-0,4457	-0,1836	3,4184		
$H_3$	-1,0969	5,0283	-2,1201	-0,0126		
$H_4$	-8,3451	-0,4201	-0,1821	-2,8865		
H <sub>5</sub>	-7,3979	0,1604	0,0321	5,7277		
Viés dos neurônios ocultos (H) e neurônio de saída (O)						
$H_1$	$\mathbf{H}_{2}$	$H_3$	$H_4$	$H_5$	0	
1,0895	-6,6445	2,1927	-6,9440	-8,6595	5,5029	

TABELA 18 - VIÉS E PESOS ENTRE OS NEURÔNIOS (RNA 3).

Na Figura 36 são apresentados os dados reais de verificação *versus* os dados preditos pela RNA 3.



Figura 36 - Dados reais de verificação versus dados preditos pela modelagem 3.

Na Figura 36 é observado que o  $R^2$  foi de 0,9993 (aproximadamente um), o coeficiente linear foi de -0,0004 (próximo de zero) e coeficiente angular foi de 0,995 (próximo de um). Assim, como já citado, o ajuste desta rede neural artificial foi o mais satisfatório entre todos os resultados, pois os dados estão na diagonal e o modelo neural proposto conseguiu uma boa medida de desempenho de previsão, com 99,93 % de certeza. Para uma melhor visualização dos resultados da verificação e comprovar o desempenho satisfatório do modelo neural desenvolvido na modelagem 3, na Figura 37 são apresentados os erros de ajuste em todos os pontos dos experimentos de verificação.



Figura 37 - Erro de ajuste versus experimentos de verificação na modelagem 3.

Observa-se na Figura 37 que o erro máximo obtido, entre todos os vetores, foi de 0,0291, observado nas condições iniciais do ensaio 4 do planejamento experimental. Apesar deste valor, verifica-se que a modelagem 3 apresentou uma precisão ( $\sqrt{MSE}$ ) próxima de 0,007. É válido lembrar que o desvio padrão médio, relacionado à medida de umidade adimensional, é igual a 0,003. O ajuste da modelagem 3 aos dados de verificação é representado na Figura 38.



Figura 38 - Ajuste da modelagem 3 aos experimentos de verificação.

Na Figura 38 é observado que a saída desejada (dados pontuais) é muito próxima da saída da rede neural (linha contínua), indicando um bom desempenho da modelagem 3 para predizer a cinética de secagem dos frutos de aroeira-vermelha nas condições operacionais estudadas neste trabalho. Deste modo, os resultados satisfatórios da utilização de um modelo baseado em redes neurais artificiais em processos de secagem, indicam a potencialidade da aplicação desta ferramenta na modelagem de processos industriais de secagem. O estabelecimento de modelos confiáveis é fundamental, por exemplo, para a realização de investigações de estratégias de controle com o objetivo de melhorar a qualidade do produto (por exemplo, padronizar a umidade final dos frutos de aroeira-vermelha) e diminuir custos operacionais, principalmente em consumo de energia.

Conforme observado anteriormente, a cinética de secagem dos frutos da aroeira-vermelha apresentou dois períodos, o período inicial e o período de taxa decrescente. Deste modo, como o modelo da difusão deve ser ajustado apenas para os dados experimentais do período de taxa decrescente, o período inicial da secagem foi desconsiderado para o ajuste deste modelo. Na Tabela 19 são apresentados, para cada experimento de secagem, os valores da difusividade efetiva estimada (*D*), além dos parâmetros da equação da reta obtida no ajuste linear dos dados reais *versus* simulados pelo modelo de difusão.

Experimentos	D (cm <sup>2</sup> /min)	$\mathbf{R}^2$	Coeficiente angular	Coeficiente linear
			da reta	da reta
1	0,000034	0,9407	1,3181	-0,0471
2	0,000071	0,9271	1,2488	-0,0235
3	0,000040	0,9271	1,3207	-0,0396
4	0,000093	0,9372	1,1401	-0,0061
5	0,000030	0,9372	1,3925	-0,0585
6	0,000103	0,9354	1,2152	-0,0190
7	0,000048	0,9318	1,3163	-0,0427
8	0,000064	0,9267	1,2450	-0,0220
9	0,000054	0,9312	1,3006	-0,0374
10	0,000056	0,9251	1,2899	-0,0340
11	0,000055	0,9312	1,2741	-0,0325

TABELA 19 - RESULTADOS DA MODELAGEM E SIMULAÇÃO DO MODELO DE DIFUSÃO.

Conforme observado na Tabela 19, o maior valor da difusividade efetiva foi próximo de 0,000103 cm<sup>2</sup>/min, obtida na maior temperatura investigada do planejamento experimental, e o menor valor foi de 0,00003 cm<sup>2</sup>/min, obtida no menor nível de temperatura investigado. Deste modo, os valores estimados para a difusividade efetiva apresentaram resultados esperados em relação a sua dependência com a temperatura, pois a difusividade efetiva aumenta à medida que a temperatura aumenta. Na Figura 39 são apresentados todos os dados reais *versus* os dados preditos pelo modelo de difusão.



Figura 39 - Dados reais versus dados preditos pelo modelo de difusão.

Na Figura 39 é observado que o  $R^2$  foi de 0,9309, o coeficiente linear foi de 0,0337 e coeficiente angularfoi de 1,29. Deste modo, o ajuste deste modelo não foi adequado, pois os dados não se apresentaram na forma de uma reta coincidente com a diagonal. Portanto, devido à falta de ajuste deste modelo, os valores da difusividade efetiva da Tabela 19 não possuem significado físico. Na Figura 40 são apresentados os erros de ajuste para todos os pontos experimentais.



Figura 40 - Erro de ajuste do modelo de difusão versus pontos experimentais.
Observa-se na Figura 40 que os maiores erros ocorreram nas condições iniciais dos experimentos, sendo que o erro máximo (obtido no início do ensaio 5) foi de aproximadamente 0,36. A diminuição do erro ao longo do tempo de secagem é, provavelmente, devida a maior influência da difusão da umidade interna no sólido ao longo do processo de secagem. A modelagem apresentou uma precisão ( $\sqrt{MSE}$ ) de 0,078. O ajuste do modelo de difusão aos dados do experimento 4 (que apresentou o melhor desempenho no ajuste do modelo de difusão) é representado na Figura 41, além do ajuste do modelo via RNA (modelagem 3).



Figura 41 - Ajuste dos modelos de difusão e de RNA aos dados do experimento 4.

Na Figura 41 é observado que a saída desejada (dados pontuais) não é próxima da saída do modelo de difusão (linha contínua verde), confirmando o desempenho não adequado do modelo de difusão para a descrição da cinética de secagem dos frutos de aroeira-vermelha nas condições operacionais analisadas neste trabalho. Este resultado insatisfatório pode ser explicado pelo fato de o modelo de difusão ser uma solução analítica da segunda lei de Fick que foi truncada no primeiro termo, sendo que este modelo não representa adequadamente materiais com alto conteúdo de umidade, como é o caso dos frutos de aroeira-vermelha.

Comparando o modelo de difusão com o modelo via RNA, observa-se que o modelo de difusão apresenta um desempenho muito inferior ao desempenho da modelagem via RNA.

Provavelmente, isto ocorreu devido ao modelo via RNA ser um modelo completamente empírico e o modelo de difusão apresentar muitas considerações teóricas, que na prática não se aplicam. Enquanto a modelagem teórica da secagem é baseada na difusão de umidade e em várias hipóteses, a modelagem empírica consiste na abordagem matemática do processo tendo como base somente os dados experimentais, sendo que os seus parâmetros não possuem significado físico.

### 4.2.2.3 Modelos semi-empíricos

A seguir são apresentados os resultados dos ajustes dos modelos de Lewis, Henderson e Pabis, Page modificado e Henderson.

### a) Modelo de Lewis:

Na Tabela 20 são apresentados, para cada experimento de secagem, os valores dos parâmetros ajustáveis (*K*), além dos parâmetros da equação da reta obtida no ajuste linear dos dados reais *versus* simulados pelo modelo de Lewis.

Experimentos	$K (\min^{-1})$	$\mathbf{R}^2$	Coeficiente angular	Coeficiente linear
			da reta	da reta
1	0,0109	0,9977	0,9656	0,0161
2	0,0212	0,9940	0,9670	0,0163
3	0,0130	0,9947	0,9498	0,0218
4	0,0278	0,9911	0,9237	0,0248
5	0,0099	0,9975	0,9645	0,0166
6	0,0300	0,9936	0,9583	0,0170
7	0,0152	0,9960	0,9685	0,0157
8	0,0200	0,9924	0,9193	0,0276
9	0,0167	0,9961	0,9707	0,0148
10	0,0171	0,9939	0,9697	0,0151
11	0,0171	0,9951	0,9590	0,0182

TABELA 20 - RESULTADOS DA MODELAGEM E SIMULAÇÃO DO PROCESSO PELO MODELO DE LEWIS.

Conforme observado na Tabela 20, o maior valor da constante de secagem foi próximo de 0,03 min<sup>-1</sup> (obtida na maior temperatura investigada) e o menor valor foi de 0,0099 min<sup>-1</sup> (obtida no menor nível de temperatura investigado). Isto indica uma certa dependência da constante de secagem com a temperatura.

Na Figura 42 são apresentados todos os dados reais versus os dados preditos pelo modelo de Lewis.



Figura 42 - Dados reais versus dados preditos pelo modelo de Lewis.

Na Figura 42 é observado que o  $R^2$  foi de 0,995, o coeficiente linear foi de 0,0185 e coeficiente angular foi de 0,9577. Deste modo, quando comparado à modelagem via RNA, o ajuste deste modelo não foi adequado.

Na Figura 43 são apresentados os erros de ajuste do modelo de Lewis para todos os experimentos



Figura 43 - Erro de ajuste do modelo de Lewis versus pontos experimentais.

Observa-se na Figura 43 que o erro máximo obtido, entre todos os vetores, foi de 0,0513, observado nas condições do ensaio 8 do planejamento experimental, sendo que a modelagem apresentou uma precisão ( $\sqrt{MSE}$ ) de 0,023.

Na Figura 44 é apresentada a curva da cinética de secagem obtida no experimento 9 (que apresentou os resultados mais satisfatórios entre todos os ensaios no ajuste deste modelo), além das curvas simuladas pelo modelos de Lewis, modelo via RNA (modelagem 4) e modelo de difusão.



Figura 44 - Ajuste dos modelos de Lewis, RNA e difusão aos dados do experimento 9.

Na Figura 44 observa-se que a saída desejada (dados pontuais) é próxima da saída do modelo de Lewis (linha contínua azul) apenas no início do processo, até aproximadamente 2 horas de secagem. Após este período o desempenho do modelo apresentou resultados insatisfatórios, pois o modelo de Lewis considera que a resistência à transferência de massa ocorre numa fina camada na superfície dos frutos. Isto significa que o modelo considera que toda resistência ao transporte de umidade concentra-se na camada limite, desconsiderando os efeitos no interior do sólido.

De forma geral, quando comparando ao modelo de difusão, o modelo de Lewis apresentou um melhor ajuste. Já quando se compara com a modelagem via RNA, o modelo de Lewis apresentou um ajuste inferior aos resultados da modelagem neural.

### b) Modelo de Henderson e Pabis:

Na Tabela 21 são apresentados, para cada experimento de secagem, os valores dos parâmetros ajustáveis, além dos parâmetros da equação da reta obtida no ajuste linear dos dados reais *versus* simulados pelo modelo de Henderson e Pabis.

Ensaios	<i>a</i> <sub>1</sub> (adm)	K (min <sup>-1</sup> )	$D (\text{cm}^2/\text{min})$	$\mathbf{R}^2$	Coeficiente angular da	Coeficiente linear da
					reta	reta
1	0,987	0,0107	0,000060	0,9973	0,9735	0,0144
2	1,001	0,0212	0,000119	0,9941	0,9667	0,0164
3	0,977	0,0126	0,000071	0,9937	0,9634	0,0192
4	0,937	0,0259	0,000145	0,9882	0,9557	0,0199
5	1,000	0,0099	0,000055	0,9975	0,9644	0,0165
6	0,986	0,0296	0,000165	0,9930	0,9659	0,0158
7	0,997	0,0151	0,000084	0,9959	0,9705	0,0153
8	0,936	0,0185	0,000104	0,9894	0,9548	0,0213
9	1,000	0,0167	0,000093	0,9962	0,9709	0,0149
10	1,010	0,0174	0,000097	0,9948	0,9669	0,0170
11	0,987	0,0169	0,000094	0,9946	0,9667	0,0168

TABELA 21 - RESULTADOS DA MODELAGEM E SIMULAÇÃO DO PROCESSO PELO MODELO DE HENDERSON E PABIS.

Na Tabela 21 é observado que o ajuste deste modelo foi muito semelhante ao modelo de Lewis, pois os valores da constante de secagem (K) são muito próximos dos valores ajustados pelo modelo de Lewis e consequentemente o valor do parâmetro ajustável  $a_1$  é próximo da unidade. Na Figura 45 são apresentados todos os dados reais *versus* os dados preditos pelo modelo de Henderson e Pabis.



Figura 45 - Dados reais versus dados preditos pelo modelo de Henderson e Pabis.

Na Figura 45 é observado que o  $R^2$  foi de 0,9947, o coeficiente linear foi de 0,017 e coeficiente angularfoi de 0,9659. Deste modo, da mesma maneira que o modelo de Lewis, o ajuste deste modelo não foi satisfatório.

Na Figura 46 são apresentados os erros de ajuste do modelo de Henderson e Pabis para todos os experimentos.



Figura 46 - Erro de ajuste do modelo de Henderson e Pabis versus pontos experimentais.

Observa-se na Figura 46 que o erro máximo obtido, entre todos os vetores, foi de 0,0514, observado nas condições do ensaio 4 do planejamento experimental, sendo que a modelagem apresentou uma precisão ( $\sqrt{MSE}$ ) de 0,022.

A comparação entre os dados experimentais do ensaio 1 (que apresentou os resultados mais satisfatórios entre todos os ensaios para o ajuste deste modelo) e a curva simulada pelo modelo de Henderson e Pabis, modelo de Lewis e de difusão é representada na Figura 47. O modelo via RNA não foi comparado, pois o ensaio 1 foi utilizado para a etapa de treinamento de todas as modelagens neurais deste trabalho.



Figura 47 - Ajuste dos modelos de Henderson e Pabis, Lewis e difusão aos dados do experimento 1.

Na Figura 47 é observado que o ajuste do modelo de Henderson e Pabis foi satisfatório principalmente no início da secagem (pouco mais de 3 horas de secagem), assim como o modelo de Lewis. Quando se compara o modelo de Henderson e Pabis com o modelo de difusão pode-se observar que o modelo de Henderson e Pabis apresenta resultados mais satisfatórios. Entretanto, na etapa final do processo de secagem, o modelo de difusão apresentou resultados melhores, isto devido provavelmente a temperatura do ar de secagem ser o único fator controlador do processo. Os valores da difusividade efetiva estimados para os dois modelos foram bem diferentes (erro relativo médio de aproximadamente 70,0 %).

Para a difusividade efetiva determinada pelo modelo de Henderson e Pabis, o valor máximo foi de 0,000165 cm<sup>2</sup>/min, obtida na maior temperatura investigada, e o menor valor foi de 0,000055 cm<sup>2</sup>/min que foi obtida no menor nível de temperatura investigado no planejamento experimental. Assim como no modelo de difusão, estes valores não possuem significado devido a falta de ajuste deste modelo.

### c) Modelo de Page modificado:

Na Tabela 22 são apresentados, para cada experimento de secagem, os valores dos parâmetros ajustáveis, além dos parâmetros da equação da reta obtida no ajuste linear dos dados reais *versus* simulados pelo modelo de Page modificado.

Ensaios	K (min <sup>-1</sup> )	<i>n</i> (adm)	$\mathbf{R}^2$	Coeficiente	Coeficiente
				angular	linear da
				da reta	reta
1	0,0109	0,9294	0,9973	0,9941	0,0080
2	0,0214	0,9377	0,9933	0,9914	0,0109
3	0,0130	0,8889	0,9941	0,9940	0,0098
4	0,0286	0,8344	0,9904	0,9928	0,0105
5	0,0098	0,9266	0,9971	0,9941	0,0079
6	0,0304	0,9171	0,9927	0,9939	0,0094
7	0,0152	0,9393	0,9955	0,9933	0,0091
8	0,0204	0,8273	0,9921	0,9937	0,0098
9	0,0168	0,9462	0,9957	0,9926	0,0095
10	0,0173	0,9508	0,9937	0,9921	0,0111
11	0,0173	0,9151	0,9945	0,9938	0,0095

TABELA 22 - RESULTADOS DA MODELAGEM E SIMULAÇÃO DO PROCESSO PELO MODELO DE PAGE MODIFICADO.

Na Tabela 22 é observado que o ajuste deste modelo foi muito semelhante ao modelo de Lewis, pois os valores da constante de secagem (K) são muito próximos dos valores ajustados pelo modelo de Lewis.

Na Figura 48 são apresentados todos os dados reais *versus* os dados preditos pelo modelo de Page modificado.



Figura 48 - Dados reais versus dados preditos pelo modelo de Page modificado.

Na Figura 48 é observado que o  $R^2$  foi de 0,9948, o coeficiente linear foi de 0,0096 e coeficiente angular foi de 0,993, que são resultados um pouco melhores do que os resultados dos modelos de Lewis e de Henderson e Pabis.

Na Figura 49 são apresentados os erros de ajuste do modelo de Page modificado para todos os experimentos.



Figura 49 - Erro de ajuste do modelo de Page modificado versus pontos experimentais.

Observa-se na Figura 49 que o erro máximo obtido, entre todos os vetores, foi de 0,0544, observado nas condições do ensaio 4 do planejamento experimental. A modelagem apresentou uma precisão ( $\sqrt{MSE}$ ) de 0,019.

Na Figura 50 é apresentada a curva da cinética de secagem obtida no experimento 1, além da curva simulada pelos modelos de Page modificado, de Lewis, Henderson e Pabis e de difusão.



Figura 50 - Ajuste dos modelos de Page modificado, de Henderson e Pabis, de Lewis e de difusão aos dados do experimento 1.

Na Figura 50 é observado que ajuste do modelo de Page modificado é próximo aos modelos de Lewis e de Henderson e Pabis, pois os valores de *K* do modelo de Page modificado são próximos aos valores dos outros modelos. Entretanto, o modelo de Page modificado apresentou resultados um pouco superiores aos modelos de Lewis e de Henderson e Pabis. Isto foi devido principalmente às modificações empíricas no modelo proposto, desenvolvendo deste modo um modelo exponencial mais preciso para a descrição da cinética de secagem dos frutos de aroeira-vermelha.

### d) Modelo de Henderson:

Na Tabela 23 são apresentados, para cada experimento de secagem, os valores dos parâmetros ajustáveis, além dos parâmetros da equação da reta obtida no ajuste linear dos dados reais *versus* simulados pelo modelo de Henderson.

Ensaios	<i>a</i> <sup>1</sup> (adm)	$K_1(\min^{-1})$	<b>b</b> (adm)	$K_2(\min^{-1})$	$\mathbf{R}^2$	Coeficiente angular	Coeficiente linear da
						da reta	reta
1	0,864	0,014	0,163	0,004	0,9996	1,0013	-0,0007
2	0,134	0,006	0,930	0,028	0,9990	1,0016	-0,0007
3	0,840	0,018	0,200	0,004	0,9992	1,0021	-0,0010
4	0,880	0,040	0,168	0,007	0,9997	1,0014	-0,0006
5	0,173	0,004	0,852	0,013	0,9994	1,0014	-0,0007
6	0,922	0,041	0,145	0,009	0,9991	1,0017	-0,0007
7	0,158	0,005	0,887	0,020	0,9992	1,0016	-0,0008
8	0,826	0,030	0,207	0,006	0,9997	1,0016	-0,0007
9	0,498	0,020	0,498	0,013	0,9953	0,9745	0,0087
10	0,922	0,023	0,144	0,005	0,9990	1,0017	-0,0008
11	0,172	0,005	0,876	0,023	0,9994	1,0018	-0,0009

TABELA 23 - RESULTADOS DA MODELAGEM E SIMULAÇÃO DO PROCESSO PELO MODELO DE HENDERSON.

Na Tabela 23 é observado que os valores de constantes ajustáveis do modelo variam consideravelmente de uma condição experimental para o outra, como já esperado.

Na Figura 51 são apresentados todos os dados reais versus os dados preditos pelo modelo de Henderson.



Figura 51 - Dados reais versus dados preditos pelo modelo de Henderson.

Na Figura 51 é observado que o valor de  $R^2$  é próximo de 1, o valor do coeficiente linear é próximo de zero e o coeficiente angular é próximo de 1. Deste modo, pode-se concluir que o ajuste deste modelo foi adequado, pois no gráfico de dispersão dos dados reais *versus* preditos, os dados apresentaram na forma de reta coincidente com a diagonal.

Na Figura 52 são apresentados os erros de ajuste do modelo de Henderson para todos os experimentos do planejamento experimental.



Figura 52 - Erro de ajuste do modelo de Henderson versus pontos experimentais.

Observa-se na Figura 52 que o erro máximo obtido, entre todos os vetores, foi de 0,0275, observado nas condições do ensaio 9 do planejamento experimental, sendo que a modelagem apresentou uma precisão ( $\sqrt{MSE}$ ) de 0,008. É válido ressaltar que o desvio padrão médio, relacionado à medida de umidade adimensional, é igual a 0,003.

A Figura 53 representa o ajuste dos modelos (de Henderson, de Lewis, de Henderson e Pabis e de Page modificado) aos dados da cinética de secagem dos frutos de aroeira-vermelha para o ensaio 4 que apresentou o melhor desempenho no ajuste do modelo de Henderson, entre todos os ensaios do planejamento experimental.



Figura 53 - Ajuste dos modelos de Henderson, Lewis, Henderson e Pabis e Page modificado aos dados do experimento 4.

Conforme observado na Figura 53, dentre todos modelos semi-empíricos selecionados na literatura, o modelo que apresentou os melhores resultados foi o modelo de Henderson, pois se observa na figura que a saída desejada (dados pontuais) se apresenta próxima da saída do modelo (linha contínua vermelha), indicando o desempenho adequado deste modelo. Assim os resultados mostraram que o modelo de Henderson descreveu bem o processo de secagem dos frutos de aroeira-vermelha, sendo capaz de predizer a cinética de secagem dos frutos nas condições operacionais estudadas.

A Figura 54 representa o ajuste dos modelos de Henderson e de RNA (modelagem 3) aos dados da cinética de secagem dos frutos de aroeira-vermelha para o experimento 4.



Figura 54 - Ajuste dos modelos de Henderson e de RNA aos dados do experimento 4.

Comparando o modelo de Henderson com o modelo via RNA, percebe-se que ambos apresentam resultados satisfatórios e muito próximos. Entretanto, a utilização dos modelos via RNA é mais promissora para aplicações industriais. Os modelos neurais são capazes de interpolar condições operacionais (como a temperatura e a velocidade do ar de secagem), enquanto o modelo de Henderson é ajustado para condições fixas operacionais, assim como os outros modelos clássicos estudados neste trabalho.

## **5 CONCLUSÕES**

Na determinação das isotermas de dessorção de umidade dos frutos de aroeira-vermelha, o método estático se mostrou adequado. O modelo de Caurie apresentou um ajuste adequado aos dados experimentais das isotermas de dessorção, com R<sup>2</sup> igual a 0,9923, coeficiente angular da reta igual a 1,0004 e coeficiente linear da reta próximo de zero.

Os resultados revelaram que, para as condições operacionais estudadas, a temperatura do ar de secagem quando comparada com a velocidade apresenta uma influência maior no processo. A cinética de secagem ocorre, principalmente, durante o período de taxa decrescente. Isto indica que a secagem ocorre, principalmente, pela remoção da umidade interna do sólido, como já esperado. Verificou-se também um desempenho adequado da modelagem estatística para o processo de secagem dos frutos de aroeira-vermelha, sendo que um planejamento fatorial se mostrou útil para uma avaliação das variáveis do processo de secagem.

Na modelagem da cinética de secagem dos frutos de aroeira-vermelha, os resultados mostraram que a modelagem via Redes Neurais Artificiais e o modelo de Henderson se ajustaram com maior precisão aos dados experimentais. Os modelos apresentaram o  $R^2$  próximo de um, o coeficiente linear da reta próximo de zero e o coeficiente angular da reta próximo de um.

Comparando o modelo de Henderson com o modelo via RNA, percebe-se que a utilização do modelo via RNA's é bem mais promissora para aplicações industriais, devido principalmente a sua generalidade. O modelo de RNA foi capaz de descrever uma série de experiências com precisão, enquanto que a aplicação de modelos clássicos foi limitado a uma experiência específica. Para o modelo neural, esta gama de condições experimentais pode ser expandida através da adição de novos conjuntos de experimentos de treinamento. Deste modo, os resultados satisfatórios da utilização de um modelo baseado em RNA's em processos de secagem, indicam a potencialidade da aplicação desta ferramenta na modelagem de processos industriais de secagem.

# 6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para os próximos trabalhos, com os frutos de aroeira-vermelha, têm-se as seguintes sugestões:

- a) Determinar as isotermas de dessorção utilizando o método dinâmico e comparar com os resultados do método estático;
- b) Estudar a influência das variáveis operacionais do processo de secagem sobre a extração de óleo essencial dos frutos de aroeira-vermelha;
- c) Desenvolver um secador com capacidade de supervisionar, registrar e atuar sobre o processo de secagem de maneira *on line*, visando a aplicação no processo industrial de secagem de frutos de aroeira-vermelha;
- d) Realizar investigações de estratégias de controle com o objetivo de melhorar a qualidade do produto (por exemplo, padronizar a umidade final dos frutos de aroeira-vermelha) e diminuir custos operacionais, principalmente em consumo de energia.

# **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

AFZAL, T. M.; ABE, T. Simulation of moisture changes in barley during far infrared radiation drying. **Computers and Electronics in Agriculture**, [S.l.], v. 26, n. 2, p. 137-145, 2000.

AGHBASHLO, M. *et al.* Optimization of an Artificial Neural Network Topology for Predicting Drying Kinetics of Carrot Cubes Using Combined Response Surface and Genetic Algorithm. **Drying Technology**, v.29, n.7, p.770-779, 2011.

ALMEIDA, A. A.; LEITE, J. P. V. A hora e a vez da Aroeirinha. **Espaço do Produtor**, [S.1], Universidade Federal de Viçosa, p. 1-4, jul. 2010. Disponível em: <a href="https://www2.cead.ufv.br/espacoProdutor/scripts/verArtigo.php?codigo=22&acao=exibir">https://www2.cead.ufv.br/espacoProdutor/scripts/verArtigo.php?codigo=22&acao=exibir</a>. Acesso em: 15 jan. 2012.

ANDERSON, R. B. Modifications of the Brunauer, Emmett and Teller equation. Journal of American Chemistry Society, v.68, p.686-691, 1946.

ASAE. Moisture Relationship of Grains. American Society of Agricultural Engineers, St. Joseph, p.363-367, 1991.

BABINI, M.; MARRANGHELLO, N. Introdução às redes neurais artificiais. São José do Rio Preto: Cultura Acadêmica, 2007. 61p. v.2.

BAGGIO, A. J. Aroeira como potencial para usos múltiplos na propriedade rural. **Boletim de Pesquisa Florestal**, Colombo, n.17, p.25-32, 1988.

BALASUBRAMANIAN, A.; PANDA, R. C.; RAO, V. S. R. Modelling of a fluidized bed drier using artificial neural network. **Drying Technology**, v.14, n.7-8, p. 1881-1889, 1996.

BRAGA, A. P.; CARVALHO, A. P. L. F.; LUDERMIR, T. B. Fundamentos de redes neurais artificiais. Rio de Janeiro: DCC/IM, COPPE/Sistemas, NCE/UFRJ, 1998. 246 p.

BRANCO NETO, M. L. C. *et al.* Avaliação do extrato hidroalcoólico de Aroeira (*Schinus terebinthifolius* Raddi) no processo de cicatrização de feridas em pele de ratos. Acta Cirúrgica Brasileira, [S.I.], v.21, n.2, p.17-22, 2006. Disponível em: < http://www.scielo.br/pdf/acb/v21s2/32158.pdf>. Acesso em: 18 jan. 2012.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Regras para análise de sementes**. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria de Defesa Agropecuária. Brasília, DF: Mapa/ACS, 2009. 395p. ISBN 978-8-99851-70-8. Disponível em: < http://www.bs.cca.ufsc.br/publicacoes/regras%20analise%20sementes.pdf>. Acesso em: 25 jan. 2012.

BROOKER, D. B.; BAKKER-ARKEMA, F.W.; HALL, C.W. **Drying cereal grains**. 3 ed. Westport: AVI Publishing, 1982. 265 p.

BRUNAUER, S.; EMMETT, P. H.; TELLER, E. Adsorption of gases in multi molecular layers. Journal of the American Chemical Society, v.60, p.309-319, 1938.

CAURIE, M. A new model equation for predicting safe storage moisture levels for optimum stability of dehidrated foods. **Journal of Food Technology**, v.5, p.301-307, 1970.

CAVALCANTE, J. A. Análise experimental da cinética de secagem da alga marinha *sargassum* sp. 2003. 191 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.

CRANK, J. The Mathematics of diffusion. 2 ed. Oxford: Clarendon Press, 1975. 414 p.

CREMASCO, M. A. **Fundamentos de transferência de massa**. 2 ed. rev. Campinas: Editora da UNICAMP, 2002. 725 p.

CUSSLER, E. L. **Difussion Mass transfer in fluid systems**. 2 ed. New York: Cambridge University Press, 1997. 580 p.

DEGÁSPARI, C. H.; WASZCZYNSKYJ, N.; SANTOS, R. J. Atividade antioxidante de extrato de fruto de aroeira (*Schinus terebenthifolius* Raddi). **Visão Acadêmica**, Curitiba, v. 5, n. 2, p. 83-90, 2004. ISSN 1518-5192.

EWEL, J. J. *et al.* Schinus in Successional Ecosystems of Everglades National Park. Florida: National Park Service, South Florida Research Center, Everglades National Park, Homestead, 1982. 141 p.

FAES; SENAR. Pimenta-rosa desponta para a exportação no Espírito Santo. **Jornal Esta Terra**, Vitória, n. 212, p. 6-7, 2009. Disponível em: <http://www.faes.org.br/doc/jornal/1259682672\_SenarNov\_OK.pdf>. Acesso em: 15 jan. 2012.

FARIA, L. J. G. Análise experimental do processo de secagem de Urucum (*Bixa de orellana L.*) em leito fixo. 1998. 274 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1998.

FILETI, A. M. F. Controle em Destilação Batelada: Controle Adaptativo e Controle Preditivo com Modelo Baseado em Redes Neurais Artificiais. 1995. 201 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1995.

FOUST, A. S. *et al.* **Princípios das Operações Unitárias**. 2 ed. Tradução de Horacio Macedo. Rio de Janeiro: LTC, 2008. 670 p.

FRANCISCO, C. F. **Modelagem e simulação de um secador industrial de gelatina através de redes neurais artificial**. 2000. 100 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2000.

FREIRE, J. T. *et al.* A Hybrid Lumped Parameter/Neural Network Model for Spouted Bed Drying of Pastes with Inert Particles. **Drying Technology**, v.30, n.11-12, p. 1342-1353, 2012.

GODOI, F. C. Fluidodinâmica e secagem do polihidroxibutirato (PHB) em leito fluidizado pulsado rotativo. 2009. 148 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2009.

GOMES, M. D. G. *et al.* Extrativismo e comercialização da aroeira (*Schinus terebinthifolius* Raddi) na região do Baixo São Francisco. In: CONGRESSO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ECONOMIA, ADMINISTRAÇÃO DE SOCIOLOGIA RURAL, 43., 2005, Ribeirão Preto. **Anais eletrônico**. 2005. Ribeirão Preto: SOBER, 2005. p.1-13. Disponível em: < http://www.sober.org.br/palestra/2/602.pdf >. Acesso em: 19 jan. 2012.

GOUVEIA, J. P. G. *et al.* Avaliação da cinética de secagem de caju mediante um planejamento experimental. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.6, n.3, p. 471-474, 2002.

GREENSPAN, L. Humidity fixed points of binary saturated aqueoussolutions. Journal of Research of the National Bureau of Standard, n.81, p. 89–96, 1977.

HALSEY, G. Physical adsorption on noun-uniform surfaces. **The Journal of Chemical Physics**, v.16, n.10, p.931-937, 1948.

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

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.

ISLAM, M. R.; SABLANI, S. S.; MUJUMDAR, A. S. An artificial neural network model for prediction of drying rates. **Drying Technology**, v.21, n.9, p.1867-1884, 2003.

JAYARAMAN, K. S.; DAS GUPTA, D. K. **Drying of Fruits and Vegetables**. In: Handbook of Industrial Drying, Mujumdar, A.S. (Ed.). 3 ed. New York: CRC Press, 2006. 1280 p.

JAYAS, D. S.; SOKHANSANJ, S. Thin-layer drying of barley at low temperatures. **Canadian agricultural engineering**, v.31, p. 21-23,1989.

LAURIANO, A. C. N. *et al.* Estudo da cinética de secagem de frutos de aroeira em camada delgada. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA EM INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 6., 2005, Campinas. **Anais eletrônico**. Campinas: UNICAMP, 2005. p.1-6. Disponível em: <a href="http://www.feq.unicamp.br/~cobeqic/tPT26.pdf">http://www.feq.unicamp.br/~cobeqic/tPT26.pdf</a>>. Acesso em: 15 jan. 2012.

LEITE, J. C. C. *et al.* Simulação de Secagem de Milho (*Zea Mays* L.) utilizando o modelo matemático de Thompson. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**, Campina Grande, v. 5, n. 2, 2005.

LENZI, M.; ORTH, A. I. Caracterização funcional do sistema reprodutivo da aroeiravermelha (*Schinus terebinthifolius* Raddi), em Florianópolis, Brasil. **Revista Brasileira de Fruticultura**, Jaboticabal, v. 26, n. 2, p. 198-201, 2004.

LEWIS, W. K. The Rate of Drying of Solid Materials. Industrial e Engineering Chemistry, v.13, n.5, p.427-32, 1921.

LIMA. A. C. C. Análise experimental da secagem de feijão em leito fixo, leito de jorro e leito fluidizado. 1995. 151 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1995.

MACHADO, A. V. Estudo da secagem do pendúculo do caju em sistemas convencional e solar: modelagem e simulação do processo. 2009. 126 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2009.

MEDEIROS, A. C. S.; ZANON, A. Conservação de sementes de aroeira-vermelha (*Schinus Terebinthifolius* Raddi). **Boletim de Pesquisa Florestal**, Colombo, n.36, p.11-20, 1998.

MISRA, M. K.; BROOKER, D. B. Thin-layer drying and rewetting equations for shelled yellow corn. **Transactions of the ASAE**, v.23, p.1254-1260, 1980.

MOVAGHARNEJAD, K.; NIKZAD, M. Modeling of tomato drying using artificial neural network. **Computers and Electronics in Agriculture**, [S.1.], v.59, n.1-2, p.78–85, 2007.

MUJUNDAR, A. S. (Ed.). Handbook of Industrial Drying. 3 ed. New York: CRC Press, 2006. 1280 p.

NICOLINI, J. V.; PUGET, F. P.; MAZZA, M. G. G. Avaliação da eficiência de extração de óleo essencial de *Schinus terebinthifolius* Raddi (aroeira vermelha) pelos métodos de hidrodestilação e arraste a vapor. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA EM INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 8., 2009, Uberlândia. **Anais eletrônico**. Uberlândia: UFU, 2009. p.1-5. Disponível em: <http://www.cobeqic2009.feq.ufu.br/uploads/media/99317061.pdf>. Acesso em: 15 jan. 2012.

NOGUEIRA, A. C.; MEDEIROS, A. C. S. Extração e beneficiamento de sementes florestas nativas. **Circular Técnica Embrapa Florestas**, Colombo, v.131, p. 1-7, 2007. ISSN 1517-5278.

OSWIN, C.R. The kinetics of packing life. III. The isotherm. Journal of Chemistry Industrial, n.65, p.419-23, 1946.

OVERHULTS, D. G. *et al.* Drying of soybeans with heated air. Transactions of the ASAE, 16, p.112–113, 1973.

OWER, E.; PANKHURST, R. C. The measurement of air flow. 5 ed. New York: Pergamon Press, 1977. 362 p.

PAGE, G. E. Factors influencing the maximum rates of air drying shelled corn in thin layers. 1949. Dissertação (Mestrado) - Purdue University, Indiana, 1949.

POZITANO, M.; ROCHA, S. C. S. Caracterização física e germinação de sementes de *Senna macranthera*. **Revista Brasileira de Sementes**,[S.1.], v. 33, n. 4, p. 777-784, 2011.

QUEIROZ, M. R. Estudo Teórico-Experimental da cinética de secagem de bananas. 1994. 176 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1994.

RODRIGUES, M. E. A. *et al.* Avaliação da temperatura e velocidade do ar na secagem de goiaba. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v.4, n. 2, p.141-147, 2002.

RODRIGUES, M. I.; IEMMA, A. F. **Planejamento de experimentos e otimização de processos**. 2 ed. rev. e amp. Campinas: Cárita, 2009. 358 p.

RODRIGUEZ, E. M.; PAULA, R. C. Variabilidade de germinação e condutividade elétrica em sementes de aroeira-pimenteira (*Schinus terebinthifolius* Raddi). In: CONGRESSO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA UNESP, 21., 2009, São José do Rio Preto. **Índice geral dos resumos do XXI CIC**. São José do Rio Preto: UNESP, 2009, p. 1995-1998. ISBN 978-85-88792-08-1. Disponível em: <a href="http://prope.unesp.br/xxi\_cic/27\_32306112843.pdf">http://prope.unesp.br/xxi\_cic/27\_32306112843.pdf</a>>. Acesso em: 15 jan. 2012.

SATISH, S.; SETTY, Y. P. Modeling of a continuous fluidized bed dryer using artificial neural networks. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, [S.l.], v.38, n. 3-4, p. 539–547, 2005.

SILVA, L. S. *et al.* Determinação do coeficiente global de transferência de massa na secagem de sementes de agrião e agrião d'água em leito fixo e leito fluidizado: modelo a duas fases. **Revista Universidade Rural**: Série Ciências Exatas e da Terra. Seropédica, v.23, n.1-2, p. 18-33, 2004.

SILVA, L. V. *et al.* Extração do óleo essencial da pimenta rosa (Schinus molle) usando hidrodestilação e soxhlet. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA EM INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 6., 2005, Campinas. **Anais eletrônico**. Campinas: UNICAMP, 2005. p.1-7. Disponível em: <a href="http://www.feq.unicamp.br/~cobeqic/top14.pdf">http://www.feq.unicamp.br/~cobeqic/top14.pdf</a>>. Acesso em: 15 jan. 2012.

SILVA, A. S. **Avaliação da secagem do bagaço de cajá usando planejamento fatorial composto central**. 2008. 69 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2008.

STRUMILLO, C; KUDRA, T. **Drying**: Principles, applications and design. New York: Gordon and Breach Science Publishers, 1986. 448 p.

SYARIEF, A. M.; MOREY, R.V.; GUSTAFSON, R. J. Thin layer drying rates of sunflower seed. **Transactions of the ASAE**, v.27, p.195-200, 1984.

TREYBAL, R. E. Mass-Transfer Operations. 3 ed. Singapore: McGraw-Hill, 1981. 784 p.

VAN'T LAND, C. M. **Industrial Drying Equipment**: Selection and Application. New York: Marcel Dekker, 1991. 362 p.

VASCONCELOS, E. A. F. *et al.* Influência da temperatura de secagem e da concentração de Aerosil®200 nas características dos extratos secos por aspersão da *Schinus terebinthifolius* Raddi (Anacardiaceae). **Revista Brasileira de Farmacognosia**, [S.I.], v.15, n.3, p. 243-249, 2005. ISSN 0102-695X.

YOSHIDA, C. M. P. **Cinética de secagem do milho superdoce**. 1997. 151 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1997.

YOUNG, J. H.; NELSON, G. L. Theory of hysteresis between sorption and desorption isotherms in biological materials. **Transactions of the ASABE**, St. Joseph, Michigan, v. 10, n.2, p. 260-263, 1967.

## APÊNDICE A - Calibração da placa de orifício

A vazão mássica de ar (Q) no equipamento, em kg/min, foi obtida utilizando uma equação de aferição (Equação 32) que é baseada na equação de Bernoulli (OWER e PANKHURST, 1977).

$$Q = R_1 \gamma \alpha A_2 \sqrt{\frac{1}{1 - m^2} \cdot \Delta h \cdot \frac{P}{R_2 + T}}$$
(32)

Em que  $\Delta h$  é a queda de pressão na placa de orifício (em cmH<sub>2</sub>O), *T* é temperatura do ar a montante da placa de orifício e *P* é a pressão barométrica local. Se os valores obtidos para a temperatura e para a altura barométrica forem dados em °C e mmHg, respectivamente, então:  $R_1$ =0,0573 e  $R_2$ =273,0. No ensaio de calibração, a temperatura média do ar na entrada da placa e a pressão barométrica local eram, respectivamente, 28,6 °C e 716,2 mmHg.

No secador, a tubulação possui um diâmetro de 3,175 cm e a placa de orifício possui uma abertura com diâmetro de 2,0 cm. Deste modo  $A_1$ =7,92 cm<sup>2</sup> e  $A_2$ =3,14 cm<sup>2</sup>, sendo  $A_1$  a área da tubulação e  $A_2$  a área do orifício da placa. Logo, utilizando as Equações 33, 34 e 35, foram calculados os parâmetros da Tabela 24.

Parâmetros Adimensionais	Equação		Valor
т	$\frac{A_2}{A_1}$	(33)	0,40
α	$0,5959 + 0,0312m^{1,05} - 0,184m^4$	(34)	0,60
β	$0,3041+0,0876m-0,1166m^2+0,4089m^3$	(35)	0,35

TABELA 24 - PARÂMETROS ADIMENSIONAIS.

Na Equação 32,  $\gamma$  é o fator de compressibilidade que é calculado com o auxílio da Equação 36.

$$\gamma = 1 - \frac{\beta \cdot \Delta h}{P_1 + P} \tag{36}$$

Em que  $P_1$  é a pressão estática na linha de ar, em cmH<sub>2</sub>O, obtida através de um ponto localizado a montante da placa de orifício. Para a calibração da placa de orifício, aumentou-se gradativamente a vazão através da abertura da válvula, e a cada valor escolhido eram lidas as respectivas quedas de pressão na placa de orifício e a pressão estática na linha, além da temperatura do ar a montante da placa de orifício. Deste modo, foi obtida a seguinte curva de calibração para a placa de orifício do secador de bandejas (Figura 55).



Figura 55 - Vazão mássica do ar em função da queda de pressão na placa de orifício.

A velocidade do ar se secagem (*u*) foi determinada utilizando a Equação 37.

$$u = \frac{Q}{A_3.\rho} \tag{37}$$

Em que  $A_3$  é a área da seção transversal do vaso de secagem, aproximadamente 0,02 m<sup>2</sup>, e  $\rho$  é massa específica do ar de secagem em função da temperatura no leito.

# APÊNDICE B - Calibração do termopar

O termopar do sistema de controle de temperatura do secador foi calibrado utilizando os seguintes materiais: um banho termostático; o Paratherm OR® como fluido térmico; e um termômetro de mercúrio (calibrado e certificado) utilizado como referência. Na Figura 56 é apresentada a curva de calibração com a equação ajustada.



Figura 56 - Curva de calibração para o termopar do sistema de controle do equipamento de secagem.

## **APÊNDICE C - Testes preliminares**

Foram realizados ensaios preliminares com os seguintes objetivos: determinar a massa inicial do leito fixo; definir os níveis das variáveis independentes; e conhecer o comportamento do material em leito fixo, definindo, por exemplo, alguns procedimentos operacionais.

A quantidade de material utilizada em todos os experimentos foi definida respeitando-se as características físicas do secador, mais especificamente a capacidade da bandeja. Como a proposta deste trabalho é o estudo da cinética de secagem em camada fina, a espessura do leito utilizada foi definida em aproximadamente 1,0 cm, o que equivale à aproximadamente 16,0 g de frutos de aroeira-vermelha. Esta quantidade foi utilizada em todos os experimentos de secagem.

A faixa da velocidade do ar de secagem foi definida, observando-se principalmente a manutenção das condições de leito fixo durante o processo de secagem. Neste trabalho, a velocidade máxima seria estabelecida como sendo, aproximadamente, a velocidade de ar correspondente a máxima queda de pressão na placa de orifício para a qual os frutos de aroeira-vermelha permanecem fixos na bandeja. Porém, nos ensaios de calibração observou-se que a velocidade máxima alcançada no equipamento é de aproximadamente 0,9 m/s e que nesta velocidade não houve nenhum movimento ou expansão do leito. Deste modo, determinou-se uma velocidade máxima de 0,8 m/s para o planejamento estatístico. A velocidade mínima foi determinada como sendo 50,0 % da velocidade máxima, ou seja, 0,4 m/s.

Em processos de secagem de produtos agrícolas, a temperatura do ar é uma das variáveis independentes mais significativas, pois se sabe que quanto maior a temperatura mais rápida se processará a secagem. Neste trabalho, a faixa de temperatura definida foi baseada em dados da literatura. Lauriano *et al.* (2005) estudaram a cinética de secagem dos frutos de aroeira-vermelha em camada delgada em temperaturas de 40, 50 e 60 °C. Deste modo, com base nesta informação e em outros processos de secagem de produtos alimentícios, optou-se pela amplificação das condições operacionais. Assim ficou estabelecido o limite superior de 70,0 °C, sendo o limite inferior de 40,0 °C.

# APÊNDICE D - Programa de treinamento e verificação das Redes Neurais Artificiais no software MATLAB.

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%DADOS PARA A MODELAGEM VIA RNA:

%limpa as variáveis do histórico: clear;

%carregamento do arquivo de dados: M=load('seca1.dat');

%definição das variáveis de entrada e saída: entrada=M(:,1:3); saida=M(:,4);

%matriz transposta: entrada=entrada'; saida=saida';

%normalização dos dados entre -1 e 1: [entradan,minentrada,maxentrada,saidan,minsaida,maxsaida]=premnmx(entrada,saida);

%divisão dos dados:

%%treino: entradatreina=entradan(:,1:477); saidatreina=saidan(:,1:477);

%%verificação: entradaverifica=entradan(:,478:656); saidaverifica=saidan(:,478:656);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%ARQUITETURA DA REDE:

%rede feedforward: net=newff(minmax(entradatreina),[5,1],{'tansig','purelin'},'trainbr');

%definição do número máximo de iteracões (épocas): net.trainParam.epochs = 3000;

% define o objetivo de erro quadrático (SSE): net.trainParam.goal=0.001;

%inicialização dos pesos da rede aleatoriamente (chuta valores iniciais para os pesos e bias): net=init(net);

%treinamento: [net,tr]=train(net,entradatreina,saidatreina); %determinados os pesos e bias da rede e arquivados temporariamente em "net"

%simula com os dados de entrada do arquivo de treinamento: Y=sim(net,entradatreina); %desnormaliza os dados: X=postmnmx(Y,minsaida,maxsaida); F=postmnmx(saidatreina,minsaida,maxsaida);

figure(1); postreg(F(1,:),X(1,:));

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%VERIFICAÇÃO DA RNA:

%simulação da variável de saída a partir das entradas do conjunto de verificação; Z=sim(net,entradaverifica);

%desnormalização da variável de saída; H=postmnmx(Z,minsaida,maxsaida); %simulada I=postmnmx(saidaverifica,minsaida,maxsaida); %real

%geração dos gráficos para análise do erro: erro=I-H

figure(2); plot(erro); xlabel('Experimentos de verificação'); ylabel('Erro');

%grafico das saída (real x simulada): figure(3); postreg(I(1,:),H(1,:));

%Gráfico para observar o ajuste do modelo aos dados reais: figure(4); plot(I,'o') %grafica a saída real do arquivo de verificação hold on plot(H,'g'); %grafica a saída calculada xlabel('Experimentos de verificação'); ylabel('Umidade adimensional'); hold off

%Salvar a rede criada e os parâmetros ajustados: save 'secal' net;

%Para visualizar os pesos e bias finais:

net.IW{1} %pesos entre camadas entrada/intermediária

- net.LW{2} %pesos entre camadas intermediária/saída
- net.b{1} %bias da camada intermediária
- net.b{2} %bias da camada de saída

# APÊNDICE E - Diagrama de Pareto para os períodos operacionais analisados.

Conforme já citado na metodologia deste trabalho, a significância estatística dos efeitos das variáveis de entrada sobre na resposta do processo (razão de umidade) foi analisada estatisticamente através do programa STATISTICA. Deste modo, a estimativa dos efeitos padronizados de cada variável de entrada sobre a razão de umidade, em certos tempos operacionais, são descritos no gráfico de Pareto, conforme ilustrado nas Figuras de 57 a 60.



Figura 57 - Diagrama de pareto para o tempo de operação de 1 hora.



Efeito padronizado (t<sub>cal</sub>)

Figura 58 - Diagrama de pareto para o tempo de operação de 2 horas.



Efeito padronizado (t<sub>cal</sub>)

Figura 59 - Diagrama de pareto para o tempo de operação de 3 horas.



Efeito padronizado (t<sub>cal</sub>)

Figura 60 - Diagrama de pareto para o tempo de operação de 5 horas .

# APÊNDICE F - ANOVA's para os modelos codificados.

Nas Tabelas de 25 a 30 são apresentadas as análises de variância (ANOVA) para os modelos estatísticos, sendo que os valores apresentados foram gerados pela tabela ANOVA do programa STATISTICA.

Fonte de variação	Soma de Quadrados	Graus de liberdade	Quadrados Médios	F <sub>cal</sub>	F <sub>tab</sub>	p-valor				
Regressão	0,1552449	2	0,0776225	- 2975,56	4,46	0,000				
Resíduos	0,0002087	8	0,0000261							
Falta de ajuste	0,0001657	6	0,0000276	1.28	19,33	0,499				
Erro puro	0,0000430	2	0,0000215							
Total	0,1554536	10	-	-	-	-				
	R <sup>2</sup> =0.999									

TABELA 25 - ANOVA PARA O MODELO NO TEMPO DE OPERAÇÃO DE 1 HORA.

# TABELA 26 - ANOVA PARA O MODELO NO TEMPO DE OPERAÇÃO DE 2 HORAS.

Fonte de variação	Soma de Quadrados	Graus de liberdade	Quadrados Médios	F <sub>cal</sub>	F <sub>tab</sub>	p-valor			
Regressão	0,0700474	3	0,02334914	656.00	1 25	0.00000			
Resíduos	0,0002488	7	0,00003555	656,82	4,55	0,00000			
Falta de ajuste	0,0002366	5	0,00004732	7,75	19,30	0,11826			
Erro puro	0,0000122	2	0,00000611		- ,				
Total	0,0702963	10	-	-	-	-			
	R <sup>2</sup> =0.996								

Fonte de variação	Soma de Quadrados	Graus de liberdade	Quadrados Médios	F <sub>cal</sub>	<b>F</b> <sub>tab</sub>	p-valor				
Regressão	0,0381135	3	0,0127045	502.58	1 25	0.00000				
Resíduos	0,0001498	7	0,0000214	393,30	4,55	0,00000				
Falta de ajuste	0,0001028	5	0,0000206	0,87	19,30	0,61000				
Erro puro	0,0000470	2	0,0000235							
Total	0,0382633	10	-	-	-	-				
	R <sup>2</sup> =0.996									

TABELA 27 - ANOVA PARA O MODELO NO TEMPO DE OPERAÇÃO DE 3 HORAS.

# TABELA 28 - ANOVA PARA O MODELO NO TEMPO DE OPERAÇÃO DE 4 HORAS.

Fonte de variação	Soma de Quadrados	Graus de liberdade	Quadrados Médios	<b>F</b> <sub>cal</sub>	F <sub>tab</sub>	p-valor			
Regressão	0,0272794	3	0,0090931	420.50	1 35	0.00000			
Resíduos	0,0001482	7	0,0000212	429,59	4,55	0,00000			
Falta de ajuste	0,0001110	5	0,0000222	1,20	19,30	0,51395			
Erro puro	0,0000371	2	0,0000186		,	,			
Total	0,0274276	10	-	-	-	-			
	R <sup>2</sup> =0.995								

# TABELA 29 - ANOVA PARA O MODELO NO TEMPO DE OPERAÇÃO DE 5 HORAS.

Fonte de variação	Soma de Quadrados	Graus de liberdade	Quadrados Médios	<b>F</b> <sub>cal</sub>	F <sub>tab</sub>	p-valor
Regressão	0,0222077	1	0,0222077	500.24	5 1 2	0.00000
Resíduos	0,0003386	9	0,0000376	390,24	3,12	0,00000
Falta de						
ajuste	0,0002928	7	0,0000418	1,82	19,35	0,39918
Erro puro	0,0000459	2	0,0000229			
Total	0,0225463	10	-	-	-	-
		$R^2 = 0.0$	985			
Fonte de variação	Soma de Quadrados	Graus de liberdade	Quadrados Médios	F <sub>cal</sub>	F <sub>tab</sub>	p-valor
-----------------------	----------------------	-----------------------	---------------------	------------------	------------------	---------
Regressão	0,0189905	1	0,0189905	572,02	5,12	0,0000
Resíduos	0,0002988	9	0,0000332			
Falta de ajuste	0,0002565	7	0,0000366	1,73	19,35	0,4140
Erro puro	0,0000423	2	0,0000212			
Total	0,0192893	10	-	-	-	-
R <sup>2</sup> =0.985						

## TABELA 30 - ANOVA PARA O MODELO NO TEMPO DE OPERAÇÃO DE 6 HORAS.