



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE DOUTORADO
EM ENGENHARIA DE PROCESSOS



TESE DE DOUTORADO

CINÉTICA DE SECAGEM DE RESÍDUOS DE ABACAXI
(*Ananas comosus* L.) ENRIQUECIDOS COM A LEVEDURA *Saccharomyces*
cerevisiae

Orientanda: HOFKY VIEIRA ALEXANDRE

Orientadores: Prof. Dr. FLÁVIO LUIZ HONORATO DA SILVA
Prof^a. Dra. JOSIVANDA PALMEIRA GOMES

Campina Grande – PB
Agosto de 2010

**CINÉTICA DE SECAGEM DE RESÍDUOS DE ABACAXI (*Ananas comosus* L.)
ENRIQUECIDOS COM A LEVEDURA *Saccharomyces cerevisiae***

HOFKY VIEIRA ALEXANDRE

**Tese de Doutorado apresentada a
Coordenação do Curso de Doutorado em
Engenharia de Processos da Universidade
Federal de Campina Grande, como parte
dos requisitos necessários para obtenção do
Grau de Doutora em Engenharia de
Processos.**

Área de concentração: Processos Químicos

Orientadores: Prof. D. Sc. Flávio Luiz Honorato da Silva
Prof^a. D. Sc. Josivanda Palmeira Gomes

Campina Grande – PB

Agosto de 2010

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

A381c Alexandre, Hofsky Vieira.
Cinética de secagem de resíduos de abacaxi (*Ananas comosus* L.)
enriquecidos com a levedura *Saccharomyces cerevisiae* / Hofsky Vieira
Alexandre. - Campina Grande, 2010.
107f. : il., color.

Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) – Universidade Federal
de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia.

Orientadores: Prof. Dr. Flávio Luiz Honorato da Silva, Profa. Dra.
Josivanda Palmeira Gomes.

Referências.

1. Secagem. 2. Resíduos Agroindustriais. 3. Isotermas. 4. Planejamento
Fatorial. I. Título.

CDU 66.047(043)

**CINÉTICA DE SECAGEM DE RESÍDUOS DE ABACAXI (*Ananas comosus* L.)
ENRIQUECIDOS COM A LEVEDURA *Saccharomyces cerevisiae***

Hofsky Vieira Alexandre

Tese aprovada em 30 de agosto de 2010

BANCA EXAMINADORA:



Prof. D. Sc. Flávio Luiz Honorato da Silva – UFCG/UAEQ

Orientador



Prof.ª D. Sc. Josivanda Palmeira Gomes – UFCG/UAEA

Orientadora



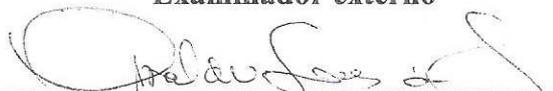
Prof. D. Sc. Francisco de Assis Cardoso Almeida – UFCG/UAEA

Examinador externo



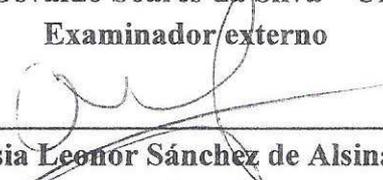
Prof. D. Sc. Prof. Dr. Vimário Simões Silva – UFCG/UAEQ

Examinador externo



Prof. D. Sc. Osvaldo Soares da Silva – UFCG/CCTA

Examinador externo



Prof.ª D. Sc. Odelsia Leonor Sánchez de Alsina – UFCG/UAEQ

Examinadora interna

*“Se não houver frutos
Valeu pela beleza das flores
Se não houver flores
Valeu pela sombra das folhas
Se não houver folhas
Valeu pela intenção da semente.”*

Dedico

*A minha amada **mãe**. Mãinha que Deus me permita continuar sonhando com a senhora, para que eu possa nesses sonhos ter seu colo confortante e protetor e sentir seu abraço aconchegante cheio de amor, carinho, afeto, cuidado e doce alegria. Agradeço imensamente a Deus a felicidade de ser sua filha. **Te amo**, muito!*

Ofereço

*A meu primo-irmão Jairinho e meu tio-padrinho João Bosco (Nikitinha) pelos ensinamentos, amor, atenção e carinho. Vocês serão sempre um exemplo de humildade, generosidade e cuidado com o próximo. Saudades...! **Amo vocês!***

Agradeço

*Ao Professor Flávio Luiz Honorato da Silva, pela sensibilidade, generosidade e toda paz que nos transmite. Pelo apoio e por todas às vezes que pacientemente me escutou com o coração, me compreendeu e demonstrou sua confiança em mim, me impulsionando em busca de novos desafios. **Obrigada** Mestre, por tudo!*

Agradecimentos

A Deus, por me permitir! Ele tem me abençoado todos os dias da minha vida. 'Pois dEle, por Ele e para Ele são todas as coisas. A Ele seja a glória para sempre! Amém!'

A Universidade Federal de Campina Grande e o Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos pela oportunidade e a CAPES pela concessão da bolsa e apoio a pesquisa.

A meus pais Cícero Luiz Alexandre e Terezinha Vieira Alexandre (in memória), pelo amor, carinho, ensinamentos e exemplo de bondade.

A João Vitor, meu amado sobrinho, motivo maior de minha perseverança.

A minha irmã e grande amiga Histamack, por estar sempre ao meu lado, me escutando, dando força e incentivo para que eu possa vencer as dificuldades encontradas nos meus percursos.

As minhas irmãs Mavinyeux e Rimucy, pelo amor, incentivo, confiança e apoio em meus projetos.

A minha querida prima Neyla, pelo amor, carinho, paciência e compreensão. Sua ajuda foi essencial para realização desse trabalho.

A Marco Antônio, pela enorme paciência nos momentos de ensinamentos e incansáveis orientações. Por todas as vezes que me faz compreender a vida, as situações e principalmente as pessoas, confortando o meu coração e me encorajando, sempre. Você é o meu radar, um presente especial de Deus em minha vida. Amo você, muito!

A minha zelosa amiga Liginha, pelo carinho, atenção, confiança e estímulo, pelas conversas intermináveis quando tudo parecia que não ia dar certo, mas que no final sempre acabávamos rindo, muito! Nosso reencontro foi um sábio propósito de Deus.

Aos meus amados amigos Mardônio, Soni, Jerusa, Jofrânio e Fabíola, pelo amor, carinho, incentivo e anos de amizade sincera.

Aos meus amigos Ezenildo e Adriano pela amizade, atenção, divertida convivência e disponibilidade para me ajudar, sempre.

As famílias de José Alves Feitosa Filho e Luiz Pereira da Silva, pela acolhida calorosa, carinho e incentivo em meus projetos.

A toda minha amada e preciosa família pelo amor, carinho e confiança neste momento especial de minha vida.

Aos meus queridos orientadores os Professores Flávio Luiz Honorato da Silva e Josivanda Palmeira Gomes, pela orientação, amizade, confiança, incentivo e muita paciência comigo na realização desse trabalho.

Aos Professores Odelsia Leonor Sánchez de Alsina pela atenção, valiosa ajuda e sugestões para construção desse trabalho e Osvaldo Soares da Silva pela ajuda, sugestões, amizade, companhia e por ter me proporcionado deliciosas gargalhadas com suas adoráveis “pérolas” principalmente nos momentos em que “meu mundo caia”.

As professoras Rossana Maria Feitosa de Figueirêdo, pela amizade, incentivo e confiança, uma das grandes responsáveis pelo meu interesse pela pesquisa e Líbia de Souza Conrado pela ajuda, amizade, carinho e confiança.

Aos Professores Francisco de Assis Cardoso Almeida, Vimário Simões Silva, Osvaldo Soares da Silva e Odelsia Leonor Sánchez de Alsina, pela participação nesse trabalho como examinadores, contribuindo muito para o seu melhoramento.

Aos professores Paulo Pinto e Caio César Martino, pela ajuda, confiança e constante estímulo.

Aos alunos do PIBIC, pelo companheirismo e ajuda em todas as etapas desse trabalho, muito especialmente a João Paulo “meu filho”; Romney, Klivisson, Juliana, Paloma, Priscila, Daniel, Sandrinha, Israel, Mateus (Neto) e Gabriel. A todos agradeço a agradável convivência e principalmente por me trazer de volta a doce e contagiante alegria da juventude.

Aos meus amigos e colegas de laboratório, meu eterno carinho: Marcelo, Aleksandra, Mércia, Carlos Bispo, Siumara, Ângela, Clóvis, Nicole, Vitória e Cleidimário que contribuíram, na forma de cada um, para a conclusão desse trabalho.

Aos funcionários Jardes Caiçara, José Lopes, Nogueira (in memorian), Cajá, José Carlos, Wellington e Fátima pela companhia e colaboração na construção desse trabalho.

*A todos que contribuíram de forma direta ou indireta em os todos os processos desse trabalho: **minha eterna gratidão!!!***

RESUMO

A crescente preocupação com o meio ambiente vem mobilizando vários segmentos do mercado. Inúmeros órgãos governamentais e indústrias estão se preparando para aplicar uma política ambiental que diminua os impactos negativos à natureza. Os resíduos industriais, depois de gerados, necessitam de destinos adequados, pois além de criar potenciais problemas ambientais, representam perdas de matérias-primas e energia. O Brasil é um dos maiores produtores de abacaxi do mundo e o maior da América do Sul. O fruto é a parte comercializável da planta, porém, esta porção representa somente 23% do total da planta, enquanto que o restante formado por caule, folha, casca, coroa e talos, é considerado resíduo agrícola e não tem sido devidamente aproveitado, resultando em perdas econômicas. Assim objetivou-se com este trabalho estudar a secagem dos resíduos de abacaxi enriquecidos (casca e coroa) utilizando a levedura *Saccharomyces cerevisiae* em leito estático em camada fina. A caracterização dos resíduos *in natura* e enriquecidos consistiu na determinação de umidade, acidez total titulável, pH, cinzas e matéria orgânica, sólidos solúveis (°Brix), fibra em detergente neutro (FDN), fibra em detergente ácido (FDA), pectina, açúcares redutores totais (ART), matéria seca e proteína bruta. As isotermas de dessorção dos resíduos *in natura* e enriquecidos foram determinadas a fim de se conhecer os valores de umidade de equilíbrio, obtidas através do método gravimétrico estático, nas temperaturas de 25 a 40 °C. Os melhores ajustes aos dados das isotermas de dessorção de umidade dos resíduos *in natura* e enriquecidos foram obtidos utilizando-se o modelo de GAB. No estudo da cinética de secagem foi utilizada a metodologia de planejamento experimental fatorial 2², onde foram avaliadas as influências da temperatura e da velocidade do ar nas respostas: umidade nos tempos de 120 e 60 minutos para casca e coroa, respectivamente e proteína do resíduo seco. Os experimentos de secagem foram conduzidos com temperatura variando de 40 a 60 °C e velocidade do ar de 0,8 a 1,8 ms⁻¹. De acordo com as análises dos dados, a cinética de secagem ocorreu no período de taxa decrescente. Os modelos Page, Henderson & Pabis e Lewis, ajustaram satisfatoriamente os dados experimentais. Foi verificada influência da variável temperatura apenas para variável resposta umidade, não sendo observada influência estatisticamente significativa da velocidade do ar de secagem.

Palavras-chave: resíduos agroindustriais, isotermas, secagem, planejamento fatorial

ABSTRACT

Growing concerns with the environment have been mobilizing several segments of the market. Countless government offices and industries are preparing to employ an environmental politics that reduces negative impacts on nature. After they are generated, industrial residues need appropriate disposal for they create potential environmental problems and represent loss of raw materials and energy. Brazil is the largest producer of pineapple in South America and one of the largest in the world. The fruit is the marketable part of the plant; however, this portion represents only 23% of the plant total, while the remaining (formed by stem, leaves, peel, crowns and shafts) is considered agricultural residue and has not been properly used, thus, resulting in economic loss. The objective of this work was to study the drying of enriched pineapple residues (peel and crowns) by using *Saccharomyces cerevisiae* yeast in static bed in fine layer. *In natura* and enriched residues characterization consisted of the determination of moisture content, total titratable acidity, pH, ashes and organic matter, soluble solids (°Brix), neutral detergent fiber (NDF), acid detergent fiber (ADF), pectin, total reducer sugars (RS; TS), Dried matter and Rude protein. Desorption isotherms of *in natura* and enriched residues were determined in order to know the values of balance humidity, obtained through the gravimetric static method, at temperatures that ranged from 25 to 40 °C. The best fittings to data of desorption isotherms of humidity of *in natura* and enriched residues were obtained by using the GAB model. In the study of drying kinetics the methodology of factorial experimental planning 2² was used, which assessed temperature and air speed influences in the responses: moisture content after 120 and 60 minutes for peel and crown, respectively, and protein of dried residue. Drying experiments were carried out with temperature varying from 40 to 60 °C and air speed from 0,8 to 1,8 m.s⁻¹. According to data analyses, drying kinetics happened in the period of decreasing rate. The experimental data were adjusted to Page, Henderson & Pabis, and Lewis' models, and the three represented experimental data satisfactorily. Influence of the variable *temperature* was verified only for the responses variable *humidity*; no statistically significant influence of drying air speed was observed.

Keywords: agroindustrial residues, isotherm, drying, factorial planning

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Fruto do abacaxi Cultivar pérola	6
Figura 2.2. Velocidade relativa de reações em função da atividade de água	21
Figura 2.3. Histerese das isotermas de sorção	23
Figura 2.4. Curvas típicas de secagem	36
Figura 3.1. Material utilizado para o estudo	45
Figura 3.2. Fluxograma das etapas para o enriquecimento, caracterização e isotermas dos resíduos <i>in natura</i>	47
Figura 3.3. Equipamento Thermoconstanter Novasina TH-2000	51
Figura 3.4. Fluxograma das etapas para a cinética de secagem	55
Figura 3.5. Diagrama do equipamento utilizado na realização da secagem convectiva	56
Figura 4.1. Isotermas de dessorção de umidade da casca de abacaxi <i>in natura</i>	64
Figura 4.2. Isotermas de dessorção de umidade da coroa de abacaxi <i>in natura</i>	65
Figura 4.3. Isotermas de dessorção de umidade da casca de abacaxi <i>in natura</i> , ajuste pelo modelo de GAB	66
Figura 4.4. Isotermas de dessorção de umidade da coroa de abacaxi <i>in natura</i> , ajuste pelo modelo de GAB	69
Figura 4.5. Isotermas de dessorção de umidade da casca de abacaxi enriquecida	70
Figura 4.6. Isotermas de dessorção de umidade da coroa de abacaxi enriquecida	71
Figura 4.7. Isotermas de dessorção de umidade da casca de abacaxi enriquecida, ajuste pelo modelo de GAB	72
Figura 4.8. Isotermas de dessorção de umidade da coroa de abacaxi enriquecida, ajuste pelo modelo de GAB	75
Figura 5.1. Curvas de secagem da casca de abacaxi enriquecida nas temperaturas e velocidades de secagem estudada	77
Figura 5.2. Geometria da casca enriquecida	78
Figura 5.3. Curvas de secagem da casca de abacaxi enriquecida para as temperaturas estudadas com ajuste pelo modelo de Page	81

Figura 5.4. Curvas de secagem da casca de abacaxi enriquecida para as temperaturas estudadas com ajuste pelo modelo de Henderson & Pabis	81
Figura 5.5. Curvas de secagem da casca de abacaxi enriquecida para as temperaturas estudadas com ajuste pelo modelo de Lewis	82
Figura 5.6. Curvas de secagem da coroa de abacaxi enriquecida nas temperaturas e velocidades de secagem estudadas	83
Figura 5.7. Geometria da coroa de abacaxi enriquecida	84
Figura 5.8. Curvas de secagem da coroa de abacaxi enriquecida para temperaturas estudadas com ajuste pelo modelo de Page	86
Figura 5.9. Curvas de secagem da coroa de abacaxi enriquecida para as temperaturas estudadas com ajuste pelo modelo de Henderson& Pabis	87
Figura 5.10. Curvas de secagem da coroa de abacaxi enriquecida para temperaturas estudadas com ajuste pelo modelo de Lewis	87
Figura 6.1. Diagrama de Pareto dos efeitos das variáveis independentes sobre a umidade t_{120} da casca enriquecida	89
Figura 6.2. Diagrama de Pareto dos efeitos das variáveis independentes sobre o teor de proteína da casca enriquecida	90
Figura 6.3. Valores observados em função dos valores preditos – $X_{t_{120}}$	92
Figura 6.4. Superfície de resposta da umidade final do enriquecido (casca) em função de T e v_{ar}	93
Figura 6.5. Diagrama de Pareto dos efeitos das variáveis independentes sobre a umidade (t_{60}) da coroa enriquecida	95
Figura 6.6. Diagrama de Pareto dos efeitos das variáveis independentes sobre o teor de proteína da coroa enriquecida	95
Figura 6.7. Valores observados em função dos valores preditos – $X_{t_{60}}$	97
Figura 6.8. Superfície de resposta da umidade (t_{60}) do enriquecido (coroa)	98

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1. Valores reais e os níveis dos fatores estudados para o planejamento 2^2	53
Tabela 3.2. Matriz de planejamento fatorial completo 2^2	54
Tabela 4.1. Caracterização física dos frutos <i>in natura</i>	59
Tabela 4.2. Caracterização físico-química do resíduo <i>in natura</i>	60
Tabela 4.3. Caracterização físico-química do resíduo enriquecido	62
Tabela 4.4. Dados do enriquecimento protéico do resíduo do abacaxi	63
Tabela 4.5. Parâmetros de ajuste dos modelos das isotermas de dessorção da casca de abacaxi <i>in natura</i> , coeficientes de determinação (R^2) e desvios percentuais médios (P)	67
Tabela 4.6. Parâmetros de ajuste dos modelos das isotermas de dessorção da coroa de abacaxi <i>in natura</i> , coeficientes de determinação (R^2) e desvios percentuais médios (P)	68
Tabela 4.7. Valores experimentais da umidade de equilíbrio (X_{eq}) da coroa de abacaxi enriquecida em função da atividade de água (a_w), nas temperaturas de 25, 30, 35 e 40 °C.	73
Tabela 4.8. Parâmetros de ajuste dos modelos das isotermas de dessorção da coroa de abacaxi enriquecido, coeficientes de determinação (R^2) e desvios percentuais médios (P)	74
Tabela 5.1. Dados das condições e tempo de secagem da casca de abacaxi enriquecida	76
Tabela 5.2. Parâmetros estimados pela equação de Page para os dados de secagem, coeficiente de determinação e erro relativo médio para casca de abacaxi enriquecida	79
Tabela 5.3. Dados das condições e tempo de secagem da coroa de abacaxi enriquecida	82
Tabela 5.4. Parâmetros estimados pela equação de Page para os dados de secagem, coeficiente de determinação e erro relativo médio para coroa de abacaxi enriquecida	85
Tabela 6.1. Resultados do planejamento fatorial 2^2 – Matriz das variáveis independentes e as variáveis resposta para os ensaios com casca de abacaxi enriquecida	88

Tabela 6.2. Estimativa dos efeitos para a umidade (t120) do enriquecido	91
Tabela 6.3. Análise de variância - Umidade (t120)	91
Tabela 6.4. Resultados do planejamento fatorial 2^2 – Matriz das variáveis independentes e as variáveis resposta para os ensaios com coroa do abacaxi enriquecida	94
Tabela 6.5. Estimativa dos efeitos para a umidade (t60) do enriquecido	96
Tabela 6.6. Análise de variância - Umidade (t60)	97

LISTA DE SÍMBOLOS

- ΔH_{BET} - entalpia de adsorção da monocamada ($J.g^{-1}$)
A, B, C, D - constantes do modelo ($J.mol^{-1}$)
a, a'', b, k_1 , k_2 , M_a , M_b , e n – parâmetros de ajustes
AP – aumento protéico (%)
ART – açúcares redutores totais (%)
ATP - trifosfato de adenosina
 a_w – atividade de água
c - constante da Equação
C - constante de Lagmuir
 C_{BET} - constante de BET
 C_{GAB} – constante de GAB
 D_{ef} - difusividade efetiva ($m^2 s^{-1}$)
FB – fibra bruta (%)
FDA - fibra em detergente ácido (%)
FDN - fibra em detergente neutro (%)
FES – fermentação em estado sólido
FS_m – fermentação submersa
FSS – fermentação semi-sólida
 H_L - calor de condensação do vapor de água ($J mol^{-1}$)
 H_m - calor de sorção da camada molecular da água ($J mol^{-1}$)
 H_n - calor de sorção da camada multimolecular da água ($J mol^{-1}$)
in natura – material não fermentado
K' – constante da equação GAB
k – constante de secagem
 k_1, k_2 e m_o - constantes
 m_e – massa da amostra no equilíbrio (g)
MO - matéria orgânica (%)
 m_s – massa seca da amostra (g)
n – número de camadas moleculares
n' – constante da equação
NRC – National Research Council

P - desvio percentual médio
PB - proteína bruta (%)
PBe - teor de proteína presente no resíduo (%)
PBin - teor de proteína presente no resíduo *in natura* (%)
 Q_{ST} - calor isostérico (kJ kg^{-2})
R - constante universal dos gases (J (mol K)^{-1})
RX – razão de umidade do produto
SST – Sólidos solúveis totais (°Brix)
T - temperatura (°C, K)
t – tempo (min, s)
Xe – umidade de equilíbrio
UR – umidade relativa (%)
X – teor de água, $\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}$
X - conteúdo de umidade expresso em base seca
 X_{eq} – conteúdo de umidade de equilíbrio expressa em base seca
 X_{m} – conteúdo de umidade na monocamada molecular

LISTA DE ABREVIATURAS/E OU SIGLAS

a.C. – Antes de Cristo

ANOVA - Análise de variância

ANVISA – Agência Nacional de Vigilância Sanitária

AOAC – Association Official Analytical Chemists

BET – Brunauer – Emmer - Teller

CCT – Centro de Ciências e Tecnologia

CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa do Algodão

GAB – Guggenheim, Anderson e de Boer

IBF – Instituto Brasileiro de Fruticultura

IBGE – Instituto Brasileiro Geográfico e Estatística

ISO - International Organization for Standardization

LEB – Laboratório de Engenharia Química

LTMPSP - Laboratório de Transferência em Meios Porosos e Sistemas Particulados

UAEA – Unidade Acadêmica de Engenharia Agrícola

UAEQ – Unidade Acadêmica de Engenharia Química

UFCG – Universidade Federal de Campina Grande

ZERI - Zero Emissions Research Initiative

SUMÁRIO

RESUMO	i
ABSTRAT	ii
LISTA DE FIGURAS	iii
LISTA DE TABELAS	v
LISTA DE SIMBOLOS	vii
LISTA DE ABREVIATURAS/E OU SIGLAS	ix
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Justificativa	2
1.2. Objetivo geral	4
1.3. Objetivos específicos	4
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
2.1. O abacaxi	6
2.2. Resíduos	8
2.3. Fermentação	11
2.3.1. Fermentação semi-sólida	12
2.3.2. Microrganismo	14
2.4. Características físico-químicas	15
2.4.1. Umidade/Matéria seca	16
2.4.2. Acidez total titulável	16
2.4.3. pH	17
2.4.4. Cinzas	18
2.4.5. Sólidos solúveis totais	18
2.4.6. Açúcares	19
2.4.7. Pectina	19
2.4.8. Fibras	20
2.4.9. Proteínas	20
2.5. Atividade de água	22
2.4.1. Modelos matemáticos para ajuste das isotermas	27
2.4.2. Histerese	34
2.4.3. Calor isostérico de sorção	35
2.5. Secagem	36

2.6. Cinética de secagem	41
2.6.1. Modelos matemáticos	42
2.7. Estado da arte	47
2.7.1. Caracterização de resíduos agroindustriais	47
2.7.2. Cinética de secagem de resíduos agroindustriais	48
3. MATERIAL E MÉTODOS	50
3.1. Local de trabalho	50
3.2. Matéria-prima (substrato)	50
3.3. Microrganismo	51
3.4. Fermentação	51
3.5. Caracterização físico-química	52
3.5.1. Umidade/Sólidos totais	53
3.5.2. Acidez total titulável	53
3.5.3. pH	53
3.5.4. Cinzas e matéria orgânica	53
3.5.5. Sólidos solúveis (°Brix)	54
3.5.6. Fibra de detergente neutro (FDN)	54
3.5.7. Fibra de detergente ácido (FDA)	54
3.5.8. Hemicelulose	54
3.5.9. Pectina	54
3.5.10. Açúcares redutores totais (ART)	55
3.5.11. Matéria seca	55
3.3.12. Proteína bruta	55
3.6. Isotermas de sorção de umidade	55
3.6.1. Umidade de equilíbrio	56
3.7. Planejamento experimental	58
3.8. Cinética de secagem	59
3.8.1. Razão de umidade	62
3.8.2. Modelos matemáticos	62
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO – CARACTERIZAÇÃO E ISOTERMAS DE DESSORÇÃO	64
4.1. Caracterização física e físico-química dos resíduos <i>in natura</i>	64
4.2. Caracterização físico-química dos resíduos enriquecidos	67

4.3. Isotermas de dessecção de umidade dos resíduos	69
4.3.1. Isotermas de dessecção de umidade dos resíduos in natura	69
4.3.2. Isotermas de dessecção de umidade dos resíduos enriquecidos	71
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO – CINÉTICA DE SECAGEM	81
5.1. Cinética de secagem da casca de abacaxi enriquecida	81
5.2. Cinética de secagem da coroa de abacaxi enriquecida	87
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO – PLANEJAMENTO FATORIAL	94
6.1. Planejamento fatorial simples 2^2 para casca de abacaxi enriquecida	94
6.1.1. Análise estatística	94
6.1.2. Análise estatística para a resposta do planejamento umidade (t120) da casca enriquecida	94
6.2. Planejamento fatorial simples 2^2 para coroa de abacaxi enriquecida	99
6.2.1. Análise estatística	100
6.2.2. Análise estatística para a resposta do planejamento umidade (t60) da casca enriquecida	102
7. CONCLUSÕES	105
8. SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS	106
9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	107

1. INTRODUÇÃO

A região Nordeste, no Brasil, apresenta principalmente nas áreas semi-áridas, condições climáticas adversas que prejudicam o desenvolvimento das atividades na agropecuária, comprometendo assim a nutrição de parte de sua população. E essa situação se estende aos rebanhos criados. No entanto, vem se desenvolvendo na região Nordeste um importante setor da agropecuária, a fruticultura, e nesses últimos anos tem-se observado de maneira geral um processo de profissionalização, caracterizado pela exploração de áreas mais extensas, pela utilização da irrigação e pelo incremento de novas tecnologias, visando à elevada e qualitativa produção de frutos. Em resposta a esse avanço, o número de agroindústrias instaladas por toda a região tem aumentado significativamente, gerando incremento na produção de resíduos agroindustriais que podem ser aproveitados na dieta humana e principalmente animal, tornando-se importante fator de barateamento nos custos de produção.

A utilização integral desses resíduos gerados de processos industriais é uma necessidade fundamental da sociedade contemporânea, já que se evita impactos ao meio ambiente ao se colocar os resíduos e emissões como insumos para outros produtos de elevada importância econômica e social. O estabelecimento desta tecnologia envolve princípios e desafios que levam os cientistas a desenvolverem procedimentos tecnológicos sustentáveis. Este pensamento atende a proposta ZERI (Zero Emissions Research Initiative), que estabelece uma mudança de paradigmas no conjunto das atividades econômicas, particularmente dos processos de produção industrial (SANTOS et al., 2006).

O abacaxi é uma das frutas tropicais mais populares do mundo e está presente praticamente o ano todo no mercado. O Brasil é um dos maiores produtores do fruto e os principais Estados produtores são a Paraíba, Pará e Minas Gerais. Segundo o IBGE (2010), o Estado da Paraíba deverá colher este ano cerca 280 milhões de frutos. E com essa produção crescerá a geração de resíduo que será disponibilizado pela agroindústria processadora do fruto.

O resíduo da industrialização do abacaxi, como qualquer outro subproduto, quando fornecido de forma exclusiva, não atende às necessidades de manutenção dos animais (RIBEIRO et al., 1993), uma vez que apresenta baixo teor de proteína e elevado percentual de fibra em detergente neutro (FDN). Estas restrições, de acordo com

MARTIN (1997), resultam em baixos coeficientes de digestibilidade e, conseqüentemente, em baixo consumo voluntário. Para utilização do resíduo agroindustrial do abacaxi na alimentação animal, é necessário estabelecer um equilíbrio entre os nutrientes da dieta para que haja fermentação eficiente no rúmen, objetivando otimizar o crescimento microbiano e maximizar a digestão da fibra, atendendo às necessidades nutricionais dos ruminantes.

Com o acréscimo de microrganismos, esse resíduo pode aumentar seu valor nutricional em proteínas, vitaminas, fósforo e cálcio, importantes fatores de crescimento para os animais, podendo ser utilizado como fonte alternativa de alto potencial protéico, em ração animal, tornando-se uma boa estratégia para solucionar alguns dos problemas relacionados às limitações e desperdícios de alimentos, principalmente na região Semi-árida do Nordeste (CAMPOS et al., 2005).

1.1. Justificativa

O custo da alimentação é um dos fatores mais limitantes para criação de animais de corte e leiteiro. Assim, existe necessidade de utilização de alimentos alternativos, objetivando minimizar os custos de produção e maximizar a produção de carne e leite. Surge, então, a possibilidade de uso de resíduos industriais que apresentem características nutritivas favoráveis à alimentação animal. Entre estes, os resíduos industriais de abacaxi tornam-se uma alternativa, em função do grande consumo na alimentação humana, tanto na forma de sucos, como geléias, sorvetes, doces e outros, gerando grande quantidade de resíduos industriais, surgindo então a necessidade de um maior aproveitamento destes. Uma destas formas de aproveitamento seria na alimentação de animais (PRADO et al., 2003).

A escassez de dados particularmente no que diz respeito à utilização de subprodutos da indústria processadora de frutas na alimentação de ruminantes têm representado perdas econômicas incalculáveis no que diz respeito à material de reconhecido valor nutritivo e contaminações ambientais, já que grande parte desses resíduos é acumulada a céu aberto sem ser executado nenhum tipo de tratamento (ROGÉRIO et al., 2004). No entanto, essa realidade vem se modificando gradativamente nos últimos anos; especial atenção vem sendo dada para minimização ou reaproveitamento de resíduos sólidos gerados nos diferentes processos industriais, porque muitas vezes são fontes de matéria orgânica, que servem como fonte de proteínas, enzimas e óleos

essenciais, passíveis de recuperação e aproveitamento. Nesse sentido pesquisadores vêm se empenhando para dar contribuições em trabalhos científicos, no sentido de desenvolver alimentos alternativos, buscando fontes de enriquecidos protéicos “não convencionais” para humanos e animais. Entre esses grupos, destacam-se os pesquisadores do Laboratório de Engenharia Bioquímica do CCT/UFCG, alguns de cujos trabalhos são relatados a seguir: CAMPOS et al. (2005) trabalharam com enriquecimento protéico do bagaço do pedúnculo de caju com a utilização da levedura *Saccharomyces cerevisiae*, para a produção de uma ração animal alternativa, rica em proteínas; AMORIM et al. (2005) estudaram o enriquecimento protéico e nutricional do bagaço da fruta da palma forrageira (*Opuntia ficus-indica* Mill) por fermentação semi-sólida utilizando a levedura *Saccharomyces cerevisiae* e OLIVEIRA (2007) que trabalhou com processo de enriquecimento protéico (bioconversão) de resíduos agroindustriais (casca e coroa de abacaxi e casca de maracujá) para utilização na alimentação animal. Esses trabalhos vêm propondo alternativas para o aproveitamento dos resíduos agroindustriais de processamento de diversos frutos, visando à agregação de valor a tais resíduos e a minimização do impacto ambiental causado pelo acúmulo destes no ambiente.

O processo de enriquecimento protéico em rejeitos agroindustriais utilizando microrganismo pode ser realizado através de uma fermentação (cultivo) semi-sólida, que possibilita a utilização desses rejeitos como substrato. Porém, após o enriquecimento, devem-se criar condições nas quais o resíduo enriquecido esteja protegido e livre das ações malélicas dos fatores que condicionam sua deterioração. A tecnologia de alimentos tem entre seus elementos de estudo o aumento da vida útil do produto alimentício, convertendo-os em produtos mais estáveis que possam ser estocados por longos períodos, tendo como técnicas mais importantes o congelamento e a secagem.

A secagem, operação unitária, visa à remoção da água de determinado material na forma de vapor para a fase gasosa insaturada, que ocorre mediante mecanismo de vaporização térmica (ou sublimação na liofilização) (FERRUA & BARCELOS, 2003). Trata-se de fenômeno complexo que envolve simultaneamente a transferência de calor e massa, podendo abranger ainda a transferência de quantidade de movimento, no qual a disponibilidade de água no alimento é reduzida, dificultando a atividade enzimática,

deteriorações de origem físico-químicas e crescimento microbiano (BARUFFALDI & OLIVEIRA, 1998).

Os produtos alimentícios em pó são atualmente cada vez mais utilizados pela indústria nacional de alimentos, tendo em vista que tais produtos reduzem significativamente os custos de certas operações, tais como: embalagem, transporte, armazenamento e conservação, elevando o valor agregado dos mesmos e prolongando sua vida de prateleira (COSTA et al., 2003).

Esse projeto propõe o aproveitamento dos resíduos da indústria de processamento de abacaxi, visando à agregação de valor a tais resíduos e a minimização do impacto ambiental causado pelo acúmulo destes no ambiente.

1.2. Objetivo geral

Este trabalho foi conduzido com o objetivo de estudar a cinética de secagem em camada fina em secador convectivo dos resíduos de abacaxi (casca e coroa) enriquecidos com a levedura *Saccharomyces cerevisiae* para utilização como suplemento protéico em ração animal.

1.3. Objetivos específicos

- Caracterizar a matéria seca dos resíduos de abacaxi *in natura* e enriquecidos pela levedura *Saccharomyces cerevisiae* por meio de fermentação semi-sólida.
- Caracterizar os resíduos enriquecidos seco de abacaxi.
- Determinar as isotermas de dessecamento dos resíduos *in natura* e enriquecidos nas temperaturas de 25, 30, 35 e 40 °C.
- Estudar a cinética de secagem em camada fina para os resíduos enriquecidos (casca e coroa) e ajustá-los aos modelos descritos na literatura.
- Verificar os efeitos das variáveis temperatura e velocidade do ar de secagem para os resíduos (casca e coroa) enriquecidos, sobre a cinética de secagem.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. O abacaxi

O abacaxi ou ananás, nomes utilizados tanto para a fruta como para a planta, pertence à família *Bromeliaceae* e gênero *Ananas Mill.* Esse gênero é vastamente distribuído nas regiões tropicais por intermédio da espécie *Ananas comosus (L.) Merrill*, a qual abrange todas as cultivares de abacaxi. Arbusto baixo o abacaxizeiro é perene, tem raízes profusas pequenas que alcançam até 15 cm de profundidade, caule com gemas que garantem a reprodução da planta. Folhas planas, esverdeadas, com parte superior em calha dispostas em espiral em torno da haste central que, no término do desenvolvimento, dá origem a 150 a 200 flores brancas ou branco-roxas em espigas. Estas originam 100-200 frutos pequenos, com pontas na casca, colados entre si e dispostos em torno do eixo central. O fruto inteiro (infrutescência) tem forma cilíndrica ou cônica, com rebentos na base e coroa de folhas no ápice. A polpa do fruto é sucosa, aromática, saborosa, com leve acidez, apresenta cor branca, amarela ou laranja-avermelhada, sendo o peso médio dos frutos de um quilo, dos quais 25% é representado pela coroa (GIACOMELLI & PY, 1981; EMBRAPA, 2006).

Autêntico fruto das regiões tropicais e subtropicais, por longo tempo tem sido a fruta não cítrica mais popular nos países dessas regiões e uma das principais frutas brasileiras e está presente, praticamente, o ano todo no mercado sendo consumido em todo o mundo, tanto ao natural quanto na forma de produtos industrializados. Muito apreciado nas principais regiões do mundo, não só por suas características peculiares, como pelo reconhecimento de suas notáveis qualidades nutritivas, as excelentes características qualitativas dos frutos refletem na sua importância sócio-econômica (GORGATTI NETTO, 1996; BOTELHO et al., 2002; PIEDADE & CANNIATTI-BRAZACA; 2003).

As principais cultivares brasileiras são: Smooth Cayenne e a Pérola. A primeira é a preferida pelos importadores, em função de suas características externas é mais conhecida e cultivada mundialmente, dada sua qualidade e aceitação comercial, mas a segunda é considerada a principal variedade cultivada no Brasil sendo muito apreciada no mercado interno graças a sua polpa suculenta e saborosa, mais doce e menos ácido, considerada insuperável para o consumo ao natural, fazendo com que os frutos tenham

grande potencial de comercialização internacional, pois também é muito apreciada no Mercosul e Europa (GIACOMELLI & PY, 1981; REINHARDT, 2000; PINHEIRO et al., 2005).

Atualmente, o abacaxi é extensivamente produzido em todos os países tropicais, sendo o Brasil seu maior produtor, onde encontra excelentes condições para seu desenvolvimento, sendo cultivado em quase todos os Estados (FAOSTAT, 2010; IBGE, 2010).

BARREIRO NETO & SANTOS (2002) afirmam que as condições brasileiras para a produção de abacaxi, visando aos mercados interno e externo, asseguram-lhe vantagens comparativas em relação aos países concorrentes devido ao clima favorável, grande disponibilidade de área e de tecnologias. Segundo o IBGE (2010) a Paraíba deverá voltar a liderar a produção de abacaxi no País. O Estado deverá colher este ano de 2010, 280 milhões de frutos, enquanto o Estado do Pará deverá ficar em segundo lugar com 260 milhões de unidades e o Estado de Minas Gerais em terceiro com 245 milhões.

A cultivar Pérola (Figura 2.1), planta de crescimento ereto apresenta folhas com 65 cm de comprimento. O fruto é cilíndrico (levemente cônico no ápice) com cor verde-amarelada, contendo de 3 a 8 rebentos na base. A polpa, suculenta e amarelo-pálida ou branca, é pouco adequada para industrialização (baixa acidez) (VAILLANT et al., 2001).



Figura 2.1. Fruto de abacaxi Cultivar Pérola

Fonte: <http://www.quitandadonamaria.com.br>

Destaca-se pelo valor energético, devido à sua alta composição de açúcares, e valor nutritivo pela presença de sais minerais (cálcio, fósforo, magnésio, potássio,

sódio, cobre e iodo) e de vitaminas (C, A, B1, B2 e Niacina); no entanto, apresenta teor protéico e de gordura inferiores a 0,5% (FRANCO, 1989). Além disso, contém fibras celulósicas, importantes no funcionamento digestivo, e bromelina-proteinase que facilita a digestão de carnes (FIGUEIRÊDO et al., 2003).

O abacaxi é utilizado tanto para o consumo *in natura* quanto na industrialização, em diferentes formas: pedaços em calda, suco, pedaços cristalizados, geléias, licor, vinho, vinagre e aguardente. Como subproduto desse processo industrial pode-se obter ainda: álcool, ácidos cítrico, málico e ascórbico e rações para animais (EMBRAPA, 2006).

2.2. Resíduos

Os resíduos de várias frutas, leguminosas e hortaliças são, na maioria das vezes, desprezados pelas indústrias. Esses podem ser utilizados como fonte alternativa de nutrientes e de fibras alimentares.

A crescente preocupação com o meio ambiente vem mobilizando vários segmentos do mercado. Inúmeros órgãos governamentais e indústrias estão se preparando para aplicar uma política ambiental que diminua os impactos negativos à natureza. Os órgãos fiscalizadores têm se mobilizado. Constantes revisões têm ocorrido em resoluções ligadas a resíduos, tais como a RDC 306/04, resolução da ANVISA (BRASIL, 2004) e a Resolução 388/05 do CONAMA (BRASIL, 2005a) que classificam e propõem tratamentos, forma de manipulação e descarte dos resíduos de serviço da saúde. Muito se fala em gestão ambiental e certificação da ISO 14000, conjunto de normas que visam o desenvolvimento de atividades dos mais diversos segmentos, sem transgredir as leis ambientais vigentes. Enfim, o século 21 está preocupado principalmente como o meio ambiente e a sustentabilidade do planeta.

O Brasil, país com intensa atividade no setor de produção primário, gera anualmente quantidades significativas de resíduos agroindustriais (VILLAS BÔAS, 2001) e graças a sua localização geográfica e dimensão territorial, é um dos maiores repositórios de espécies nativas do mundo, possuindo importantes centros de diversidade genética tanto de plantas nativas como de cultivadas (FORTUNATO, 2002). Este país é um dos três maiores produtores mundiais de frutas, com uma produção que supera os 34 milhões de toneladas (IBF, 2004), porém, segundo

MARTINS & FARIAS (2002), os prejuízos decorrentes dos desperdícios de frutas e hortaliças, encontram-se ao redor de 30 a 40% da produção.

O resíduo industrial, depois de gerado, necessita de destino adequado, pois não pode ser acumulado indefinidamente no local em que foi produzido. A disposição dos resíduos no meio ambiente, por meio de emissões de matéria e de energia lançados na atmosfera, nas águas ou no solo deve ocorrer após os resíduos sofrerem tratamentos e serem enquadrados nos padrões estabelecidos na legislação ambiental para não causarem poluição (PELIZER et al., 2007).

Segundo LAUFENBERG et al. (2003), os resíduos podem conter muitas substâncias de alto valor. Se for empregada uma tecnologia adequada, este material pode ser convertido em produtos comerciais ou matérias-primas para processos secundários. Numerosas substâncias relacionadas ao processo de produção de alimentos são adequadas para separação e reciclagem. De acordo com os mesmos autores é necessário um inventário completo, baseado numa visão holística da indústria de alimentos contendo dados sobre ocorrência, quantidade e utilização dos resíduos.

A utilização integral de resíduos gerados de processos industriais é uma necessidade fundamental da sociedade contemporânea, uma vez que se evita impactos ao meio ambiente ao se colocar os resíduos e emissões como insumos para outros produtos de elevada importância econômica e social. O estabelecimento desta tecnologia envolve princípios e desafios que levam os cientistas a desenvolverem procedimentos tecnológicos sustentáveis. Este pensamento atende a proposta ZERI (*Zero Emissions Research Initiative*), a qual estabelece uma mudança de paradigmas no conjunto das atividades econômicas, particularmente dos processos de produção industrial (SANTOS et al., 2006).

Aliado ao aspecto nutricional e funcional do fruto, o abacaxi apresenta uma elevada produção e um forte potencial para industrialização, gerando resíduo agroindustrial que, geralmente, resulta em acúmulo de rejeito e impacto ambiental. Vale destacar que as cascas são frequentemente os maiores componentes de vários frutos e geralmente não recebem a devida atenção. Neste sentido, não ocorre o reaproveitamento ou a reciclagem deste material, possivelmente, em decorrência da falta de valor comercial.

BORGES et al. (2004) desenvolveram um estudo sobre a viabilidade da utilização de resíduos das indústrias de conserva de abacaxi da região de Pelotas, RS,

para a produção de suco. O processamento do suco-base foi feito a partir da obtenção das cascas, centros e aparas da fruta e consistiu das etapas de branqueamento, prensagem e filtragem. Concluíram que é viável a elaboração de suco de abacaxi a partir de resíduos de sua industrialização.

O estado da Paraíba, por ser um grande produtor nacional de abacaxi e possuir agroindústrias processadoras do fruto, disponibiliza grande quantidade de resíduos, que, em virtude do seu custo relativamente baixo, pode ser utilizado na alimentação de caprinos no período de escassez de forragem, que coincide com o do beneficiamento do fruto (BANDEIRA, 1995).

Independente de sua origem, os resíduos de interesse se encontram localizados de maneira mais ou menos concentrada. Isto se deve a que sua produção depende de outras atividades produtivas. Esta situação facilita sua quantificação. Sua disponibilidade e custo dependem da atividade a que estão associados e a utilização local dos mesmos.

2.3. Fermentação

Processos biológicos têm sido utilizados para obtenção de vários produtos, principalmente alimentos, muito antes do início da era cristã, confundindo-se com a própria história da humanidade. O preparo de bebidas fermentadas a partir de cereais era prática comum na Babilônia e no Egito (8.000 a 6.000 anos a.C.); a produção de cerveja e pão utilizando fermentos já era realizada no Egito (4.000 anos a.C.) e a produção de vinhos na Grécia (2.000 a.C.). Outras aplicações são na produção de vinagre, iogurte e queijos, há muito tempo realizadas pelo ser humano (BORZANI et al., 2001).

A biotecnologia é um conjunto de conhecimentos, técnicas e métodos, de base científica e prática, que permitem a utilização de seres vivos como parte integrante e ativa do processo de produção industrial de bens e serviços BORZANI et al. (2001), que segundo VILLEN (2010) sempre esteve integrada à vida humana, porém, foi somente no final do século XIX que Louis Pasteur demonstrou o papel dos microrganismos nos chamados processos fermentativos, derrubando a teoria de que a fermentação era puramente química.

Na indústria de alimentos essa integração de conhecimentos é de fundamental importância, tornando possível a melhoria da produção e da qualidade do produto final,

através da modificação das características intrínsecas das matérias primas inicialmente e/ou em outro nível do processamento, o que garante ao consumidor uma ampla variedade de alimentos industrializados (VITOLLO, 2001).

A fermentação do ponto de vista bioquímico é um termo geral que denota a degradação anaeróbia da glicose ou de outros nutrientes orgânicos em vários produtos (característicos para diferentes organismos) para obter energia na forma de ATP (LEHNINGER et al., 2002). É um processo comumente desenvolvido por microrganismos (bactérias e fungos) cujo desempenho depende muito da composição do meio de cultura onde são colocados (SCHMIDELL & FACCIOTTI, 2001), pois cada ser vivo responde de maneira única ao ambiente, usando mecanismos físicos ou químicos para a formação do produto desejado (COONEY, 1981).

STEINKRAUS (1997) destaca a qualidade nutricional dos alimentos fermentados, pois em geral a fermentação aumenta a quantidade de proteína, aminoácidos essenciais e vitaminas. A enorme versatilidade dos microrganismos também tem sido explorada através de processos fermentativos na obtenção de metabólitos de alto valor comercial, como vitaminas, enzimas, além da própria biomassa microbiana, rica em proteínas de alta qualidade, que surge como uma alternativa promissora na obtenção de fontes protéicas de baixo custo (DEMAIN, 2000; LITCHFIELD, 1983).

2.3.1. Fermentação semi-sólida

A fermentação semi-sólida (FSS), também chamada de fermentação sólida ou em estado sólido, tem se destacado nos estudos e avanços obtidos no aproveitamento destes resíduos. De um modo geral, a FSS é um processo microbiano que se desenvolve na superfície de materiais sólidos, que apresentam a propriedade de absorver ou de conter água, com ou sem nutrientes solúveis. Estes materiais sólidos podem ser biodegradáveis ou não. Para a FSS, é necessário que os microrganismos cresçam com nutrientes difusíveis sob ou sobre a interface líquido-sólido (VINIEGRA-GONZALEZ, 1998).

Entre as formas de aumentar a disponibilidade de nutrientes em matérias-primas, estão os processos fermentativos, que implicam no emprego de microrganismos para obter transformações resultantes da atividade metabólica dos mesmos (WAINWRIGHT,

1995). Esses processos podem tornar os alimentos mais nutritivos por aumentar a digestibilidade e a palatabilidade, com um odor mais agradável. As leveduras se destacam como uma excelente fonte de proteínas, não apenas pela sua capacidade de sintetizá-las e a outros compostos, mas também por suas características não patogênicas, podendo ser usadas tanto como alimento para humanos quanto como ração (RODRIGUES & SANT'ANNA, 2001) sendo por isto utilizadas em diversas formulações alimentícias.

A tecnologia das fermentações se favoreceu em muito dos avanços no aproveitamento de resíduos, especialmente pelos reatores desenvolvidos e pelos processos de recuperação. Porém ainda restam muitos obstáculos a serem ultrapassados para a sua máxima utilização (SILVA & SASSON, 1995).

Segundo VINIEGRA-GONZÁLEZ (1998) a fermentação semi-sólida (FSS) apresenta diversas vantagens quando comparada ao processo de fermentação submersa (FS_m) devido a seus aspectos físico-químicos, especialmente sua reduzida atividade de água, o que torna o processo mais produtivo, além de requerer baixo investimento de capital e energia e praticamente não produzir rejeitos (resíduos).

Características da fermentação semi-sólida:

- O meio é geralmente simples, consistindo de produtos agrícolas não refinados que podem conter todos os nutrientes necessários para o crescimento do microrganismo;
- Tratamento de efluentes e disposição de resíduos é geralmente simples ou minimizado;
- O custo de esterilização é reduzido, pois se aquece menos água;
- O espaço ocupado pelo equipamento de fermentação é pequeno considerando-se o rendimento do produto. Utiliza-se menor quantidade de água e o substrato é concentrado;
- Como a maioria das bactérias requer altos níveis de mistura líquida, a FSS exclui, ou reduz, sensivelmente, o problema da contaminação bacteriana;
- O meio é facilmente aerado, desde que haja espaço entre as partículas do substrato;
- A solubilidade e difusão de oxigênio e outros gases, são maiores em FSS;

- O resíduo remanescente possui um volume reduzido e este resíduo não apresenta condições para o desenvolvimento de patógenos;
- Geralmente, o único componente necessário a ser adicionado ao meio é água, embora, ocasionalmente, outros nutrientes como fonte de nitrogênio ou minerais possam ser adicionados;
- Torna-se possível a obtenção de esporos que são impossíveis de se obter em cultura submersa;
- Menor custo dos equipamentos e exige menor demanda de energia.

2.3.2. Microrganismos

Conforme ARAÚJO et al. (2008) criadores recorrem ao uso de concentrados comerciais para suplementação protéica na dieta dos animais, o que onera substancialmente os custos de produção, tornando a atividade antieconômica. Os freqüentes aumentos dos preços da suplementação protéica, utilizada na dieta dos animais, têm estimulado o interesse pelo aproveitamento de alimentos não convencionais na indústria de alimentação animal do Brasil. Dentre os produtos que podem substituir os suplementos protéicos, destacam-se os microrganismos, algas, fungos filamentosos e leveduras, considerados fonte unicelular de elevado teor protéico, além de apresentarem rápido crescimento e possibilidade de cultivo em vários tipos de substratos.

O meio de cultivo deve atender à demanda nutricional do microrganismo produtor, aos objetivos do processo e à escala de operação. Sua seleção depende, para a maioria dos processos em larga escala, do custo, disponibilidade e características dos seus componentes.

Muitos microrganismos foram utilizados em todas as áreas da biotecnologia, tendo a maioria se concentrado em aplicações na agricultura, saúde, energia e meio ambiente (VERSTRAETE et al., 1996). As aplicações da biotransformação dos resíduos e subprodutos (sólidos e líquidos) trouxeram como conseqüências à melhoria do saneamento do ambiente, o estabelecimento de indústrias secundárias e melhoria de estrutura de preços.

A seleção adequada do microrganismo é um dos mais importantes critérios quando se trata de fermentação em estado sólido (FES). Eles devem apresentar elevada

eficiência na conversão do substrato em produto e permitir sua rápida liberação para o meio. Não devem produzir substâncias incompatíveis com o produto e apresentar inconstância quanto ao comportamento fisiológico, ser patogênicos, exigir condições de processo muito complexas, exigir meios de cultura dispendiosos (SCHMIDELL & FACCIOTTI, 2001).

Segundo PANDEY (2003), tanto microrganismos em seu estado natural como na forma de culturas puras individuais ou mistas podem ser utilizados no processo da fermentação semi-sólida.

A utilização de derivados de microrganismos unicelulares, para geração de produtos de interesse comercial, tem recebido considerável atenção por parte da indústria alimentícia. As proteínas de levedura, devido ao seu elevado valor nutricional e propriedades físico-químicas desejáveis, se apresentam como uma alternativa tecnológica favorável para aplicação em diversas formulações de alimentos (KINSELLA, 1987).

2.4. Características físico-químicas

Os parâmetros físico-químicos e químicos dos alimentos são de grande importância, pois, além de caracterizar a matéria prima também é utilizada para análise de alimentos processados quando se deseja verificar a eficiência do processo ou até mesmo a comparação de processamento, como por exemplo, diferentes tipos de secagem. Através das análises químicas pode-se verificar o que ocorreu com os constituintes dos alimentos processados, isto é, se ocorreram perdas de vitaminas e/ou minerais, desnaturação das proteínas, gelatinização de amido, etc.

Portanto, quando se trabalha com processamento de materiais biológicos, é imprescindível que seja realizada a sua caracterização, para que o produto obtido chegue ao consumidor apresentando melhor qualidade e maior vida de prateleira.

2.4.1. Umidade/Matéria seca

A umidade de um alimento é de grande importância por razões diversas, porém, sua determinação precisa é muito difícil, uma vez que a água ocorre nos alimentos de três diferentes maneiras: água ligada, água disponível e água livre. A técnica

gravimétrica com o emprego de calor é a mais utilizada e baseia-se na determinação da perda de peso de alimento que se decompõe ou iniciam transformações a temperatura de 105°C (ALDRIGUE et al., 2002).

Segundo CASTRO et al. (1998) a água contida nos alimentos é excelente meio de transmissão de calor, sendo eficiente tanto para resfriar quanto para aquecer. Nos alimentos a água livre é fracamente ligada ao substrato e funciona como solvente, permitindo o crescimento de microrganismos e as reações químicas; e a água combinada é fortemente ligada ao substrato, mais difícil de ser eliminada, e não é utilizada como solvente nem para o crescimento de microrganismos e nem para reações químicas.

A matéria seca ou sólidos totais é composta de proteínas, lipídios, glicídios, sais minerais, vitaminas, ácidos orgânicos, pigmentos e outras substâncias fisiológicas ativas ou não, podendo ser divididos em duas classes: aquo-solúvel ou solúvel em água e aquo-insolúvel, cujo conhecimento facilita a identificação laboratorial da composição da matéria-prima em estudo. A quantidade de matéria seca serve para comparar o valor nutritivo de dois ou mais alimentos, dá idéia de preservação. Os sólidos totais são obtidos pela diferença entre o peso total da amostra e o teor de umidade (CHAVES et al., 2004; CECCHI, 2003).

2.4.2. Acidez total titulável

A determinação da acidez pode fornecer um dado valioso na apreciação do estado de conservação de um produto alimentício. Um processo de decomposição, seja por hidrólise, oxidação ou fermentação, altera quase sempre a conservação dos íons hidrogênio. Os métodos de determinação da acidez podem ser os que avaliam a acidez titulável ou que fornecem a concentração de íons-hidrogênio livres, por meio do pH. Os métodos que avaliam a acidez titulável resumem-se em titular a amostra, com solução de álcali padrão (BRASIL, 2005b).

CECCHI (2003) relatou que os ácidos orgânicos (cítrico, málico, oxálico, succínico e tartárico) presentes em alimentos, influenciam o sabor, o odor, a cor, a estabilidade e a manutenção de qualidade.

2.4.3. pH

De acordo com GOMES (2002), pH é a acidez de um alimento qualquer, devendo-se ao fato de que os ácidos presentes nos alimentos se encontram parcialmente na forma molecular e, parcialmente, na forma dissociada, que é a que apresenta as propriedades ácidas.

Vários fatores tornam importante, a determinação do pH de um alimento, tais como: influência na palatabilidade, desenvolvimento de microrganismos, escolha da temperatura de esterilização, embalagem que será utilizada para o alimento, tipo de material de limpeza e desinfecção, do equipamento com o qual vai se trabalhar na indústria e de aditivos e vários outros (CHAVES, 1993).

Segundo LEITÃO (1980), o pH é uma característica intrínseca do alimento, de fundamental importância na limitação dos tipos de microrganismos capazes de se desenvolverem e na maior ou menor facilidade de conservação.

Tanto o controle do crescimento quanto o desenvolvimento de microrganismos em alimentos por meio do uso de conservantes químicos, estão relacionados com o pH do meio. A forma não dissociada da molécula é que confere a característica antimicrobiológica aos conservadores químicos. A concentração da forma não-dissociada aumenta com o aumento da acidez do alimento, garantindo maior eficiência no controle de microrganismos (ARAÚJO, 1995).

2.2.4. Cinzas

São resíduos minerais que permanecem após a queima da matéria orgânica, sua composição dependerá da natureza da matéria-prima em estudo e do tipo de determinação utilizada (CECCHI, 2003). As cinzas são constituídas principalmente de potássio, fósforo, sódio, cálcio, magnésio, manganês.

O teor de cinzas pode permitir, às vezes, uma estimativa das riquezas de cálcio e fósforo do alimento analisado; porém, alguns alimentos de origem vegetal são ainda ricos em sílica, o que resulta num teor elevado de cinzas. A determinação das cinzas ou matéria mineral é feita muitas vezes apenas para se conhecer o extrato não nitrogenado e/ou a matéria orgânica de determinadas amostras, sem a preocupação do teor de minerais (SILVA, 1981).

Segundo OLIVEIRA (1997), a determinação das cinzas é considerada medida geral de qualidade, sendo freqüentemente utilizada como critério na identificação dos alimentos: o teor muito alto de cinzas indica presença de adulterantes. As cinzas contêm componentes minerais, dentre eles: cálcio, magnésio, ferro, fósforo, chumbo, mercúrio e outros componentes minerais.

2.4.5. Sólidos solúveis totais (°Brix)

Os sólidos solúveis indicam a quantidade, em gramas, dos sólidos que se encontram dissolvidos no suco ou polpa. São comumente designados como °Brix, e têm tendência de aumento com a maturação. Neste contexto, os graus brix podem ser considerados como indicativo da concentração da polpa, índice de maturação da fruta e pontos inicial e final de doces e geléias. Os sólidos solúveis podem ser medidos no campo ou na indústria, com o auxílio de refratômetros (CHITARRA & CHITARRA, 2005; BRASIL, 2005b).

O °Brix é utilizado na agroindústria, para intensificar o controle da qualidade do produto final, controle de processos, ingredientes e outros, tais como: doces, sucos, néctar, polpas, leite condensado, álcool, açúcar, sorvetes, licores e bebidas em geral, entre outros (CHAVES et al., 2004).

De acordo com CIABOTTI et al. (2000) é enorme a importância de sólidos solúveis para a agroindústria, pois auxilia no controle de qualidade do produto final, controle de processos, controle de ingredientes e de produtos utilizados em indústrias de doces, sucos, néctares, polpas, leite condensado, álcool, açúcar, licores, sorvetes, bebidas em geral, etc.

2.2.6. Açúcares

Açúcares são geralmente sólidos cristalinos, incolores e têm sabor doce. São os compostos naturais com sabor doce mais conhecido e, entre eles, a sacarose é um dos adoçantes mais antigos, uma vez que os primeiros documentos escritos encontrados já fazem referência a esse composto (BOBBIO & BOBBIO, 2001).

Na análise de alimentos, a identificação dos açúcares presentes numa amostra quase sempre depende da natureza dos produtos. Em muitos casos, uma simples medida

físico-química é suficiente para sua determinação, em outros, torna-se necessário uma separação dos açúcares componentes (BRASIL, 2005b).

CHITARRA (1998) relatou que os principais açúcares encontrados nos frutos são a glicose, a frutose e a sacarose, variando suas concentrações em função da espécie e do cultivar. Geralmente com a maturação dos frutos, o teor de açúcares aumenta. O teor individual dos açúcares como a glicose, sacarose e frutose é importante quando se deseja quantificar o grau de doçura do produto, uma vez que o poder adoçante desses açúcares é variável. Os açúcares solúveis presentes nos frutos, na forma livre ou combinada, são responsáveis pela doçura, pelo flavor, através do balanço com os ácidos; pela cor atrativa, como derivados das antocianidinas; e pela textura quando combinados adequadamente com os polissacarídeos estruturais.

2.2.7. Pectina

As pectinas, polissacarídeos estruturais, formam um grupo complexo de polissacarídeos que são encontrados na parede celular primária e nas camadas intercelulares de plantas terrestres. Elas estão associadas à celulose, hemicelulose e lignina e são mais abundantes em frutos e em tecidos jovens, tais como cascas de frutas cítricas (30%), dentre as quais o limão é a fonte mais abundante ASPINALL (1970).

Segundo ROMBOOTS & PILNIK (1978) as pectinas contribuem para a adesão entre as células e para a resistência mecânica da parede celular além de seu papel importante no crescimento das células, elas estão envolvidas em interações com agentes patogênicos, e a sua quantidade e natureza são determinantes para a textura de frutos e vegetais em geral, durante o seu crescimento, amadurecimento, armazenamento e processamento.

2.2.8. Fibras

Fibra é um termo nutricional e sua definição está vinculada ao método analítico empregado na sua determinação. Quimicamente, a fibra é um agregado de compostos e não uma entidade química distinta, portanto, a composição química da fibra é dependente da sua fonte e da metodologia usada na sua determinação laboratorial (MERTENS, 1992).

A fibra vem sendo utilizada para caracterizar os alimentos (VAN SOEST, 1994) e para estabelecer limites de inclusão de ingredientes nas rações, entretanto, não existe consenso a respeito da definição de fibra, assim como a respeito da concentração de fibra na dieta que otimiza o consumo de energia. Segundo WEISS (1993) a fibra pode ser definida como sendo o componente estrutural das plantas (parede celular), a fração menos digestível dos alimentos, a fração do alimento que não é digerida por enzimas de mamíferos ou a fração do alimento que promove a ruminação e a saúde do rúmen.

A presença da fibra, em maiores ou menores proporções, afeta três características dos alimentos importantes na nutrição animal: está relacionada com a digestibilidade e com o valor energético, com a fermentação ruminal e pode estar envolvida no controle da ingestão de alimento (MERTENS, 1992). Alguns estudos vêm mostrando alta correlação entre consumo da matéria seca e o nível de FDN da dieta. Nesse sentido, RODE et al. (1985), verificaram que o aumento do nível de concentrado e a redução do nível de FDN levaram a um aumento na digestibilidade aparente da matéria seca e matéria orgânica. Contudo, GRANT & MERTENS (1992), afirmaram que uma redução na digestão da fibra pode ocorrer com o aumento da quantidade de concentrado e redução na quantidade de volumoso e fibra na dieta, em decorrência do aumento nas proporções de carboidratos prontamente fermentáveis.

A fibra constitui-se da parede celular dos vegetais. Neste caso, temos os seguintes polímeros que compõem a parede celular, portanto, a fibra: celulose, hemicelulose, lignina, proteína e outros compostos minoritários.

A FDN isola celulose, hemicelulose, lignina, com alguma contaminação de pectina, proteína e cinzas. Como meio de quantificar os componentes isolados da fibra, Van Soest, adicionalmente, criou a fibra insolúvel em detergente ácido, a qual é composta de celulose, lignina, sílica e proteína insolúvel em detergente ácido (FDA). Desta forma, a hemicelulose pode ser estimada através da diferença entre FDN e FDA, e a lignina e a celulose podem ser quantificadas, seqüencialmente, a partir da oxidação da FDA em solução de permanganato de potássio, e através da queima deste resíduo em mufla, respectivamente. Dos três métodos utilizados para quantificar a fibra (FDN, FDA, FB), somente a FDN mensura os três maiores componentes indigestíveis ou incompletamente digestíveis das plantas: hemicelulose, celulose e lignina (MERTENS, 1996).

2.2.9. Proteínas

As proteínas são macromoléculas nitrogenadas fundamentais para o crescimento, desenvolvimento e manutenção das funções celulares de todos os organismos vivos. Estão presentes em muitos processos biológicos atuando como enzimas, anticorpos, hormônios, moléculas de transporte, de armazenamento, de motilidade, além de possuir importante função estrutural (LEHNINGER et al., 1993). Resultantes da combinação entre 20 aminoácidos, polimerizados através de ligações peptídicas, as proteínas devem ser ingeridas através da dieta para fornecer os aminoácidos essenciais (CHAMPE & HARVEY, 1996).

Segundo PEZZATO (1999) as proteínas correspondem aos nutrientes de máxima importância, pois são os componentes constituintes do organismo animal em crescimento e o perfil aminoacídico é decisivo para a sua qualidade e determina seu valor como componente da dieta. CLARK et al. (1990) afirmaram ser a proteína um dos nutrientes mais caros numa dieta, portanto é de grande importância determinar a concentração mínima desse nutriente.

Nos alimentos, além da função nutricional, as proteínas têm propriedades organolépticas e de textura. Podem estar combinadas com lipídeos e carboidratos.

2.5. Atividade de água

A água é um dos fatores que mais influem na alteração dos alimentos; por outro lado, está perfeitamente demonstrado que os alimentos com o mesmo teor em água se alteram de forma distinta, do que se deduz claramente que a quantidade de água não é por si só, um indício fiel da deterioração dos alimentos; assim, surgiu o conceito de atividade de água (a_w) que indica a intensidade das forças que unem a outros componentes e, conseqüentemente, à água disponível para o crescimento de microrganismos, podendo ocorrer diferentes reações químicas e bioquímicas (ORDOÑEZ, 2005).

Analisando-se somente em termos de conteúdo de umidade fica difícil a percepção da validade desta propriedade para o controle de qualidade de materiais biológicos, no entanto, utilizando-se a definição da atividade de água, que segundo GOUVEIA (1999) pode ser definida, na equação 2.1, como a relação entre a pressão de

vapor da água no ar e a pressão de vapor da água no ar saturado, medidas à mesma temperatura. Quando se refere à atividade de água de um alimento, isto significa a relação entre a pressão de vapor de água no alimento (P) e a pressão de vapor de água pura (P₀), medidas à mesma temperatura

$$a_w = \frac{P}{P_0} 100 \quad (2.1)$$

Em que:

a_w - atividade de água

P - pressão de vapor da água no alimento a temperatura T

P₀ - pressão de vapor da água a temperatura T

Segundo FIOREZE (2004), a atividade de água é um dos principais fatores que governam a conservação ou deterioração dos alimentos, e também afirma, ser esta definida, na Equação (2.1), como a razão entre a pressão de vapor da água na superfície do alimento em equilíbrio com o ambiente em que se encontra, e a pressão de vapor do ar em contato com uma superfície de água líquida, e é numericamente igual à umidade relativa do ar em equilíbrio com a umidade do produto, Equação (2.2).

$$a_w = \frac{UR}{100} \quad (2.2)$$

Em que:

UR - umidade relativa (%)

A relação existente entre a água e os outros componentes de um produto definem a sua higroscopicidade que é muito marcante nos produtos alimentícios e torna-se uma característica fundamental a influenciar os processos de manuseio, processamento, estocagem e consumo de materiais biológicos (LABUZA, 1986).

O crescimento de microrganismos e efetivação de reações químicas está relacionado com a atividade de água nos alimentos. A retirada de água reduz o crescimento destes microrganismos e impede reações bioquímicas que dependem da

umidade, evitando a rápida perda que ocorre nos produtos biológicos (PARK et al., 2002).

O valor máximo de atividade de água é 1, na água pura. Nos alimentos ricos em água corresponde a valores acima de 0,90, podendo então formar soluções diluídas com componentes do alimento onde os microorganismos podem desenvolver-se. Nessa diluição, as reações químicas e enzimáticas podem ter sua velocidade diminuída devido à baixa concentração de reagentes, mas sofrem facilmente contaminação microbiológica. Quando a atividade de água baixar para 0,40- 0,80 haverá possibilidade de reações químicas e enzimáticas rápidas pelo aumento das concentrações dos reagentes, enquanto que para atividade de água próxima de 0,60, tem-se um pequeno ou nenhum crescimento microbiano. Em regiões de atividade de água inferior a 0,30, a água está fortemente ligada ao alimento, não sendo utilizada pelos microorganismos e para dissolver componentes do alimento, o que leva as reações a terem velocidade tendendo a zero, com exceção da oxidação de lipídios, que é consideravelmente mais rápida (BOBBIO & BOBBIO, 2003).

A Figura 2.2 apresenta as velocidades de reação e crescimento microbiano em função da atividade de água.

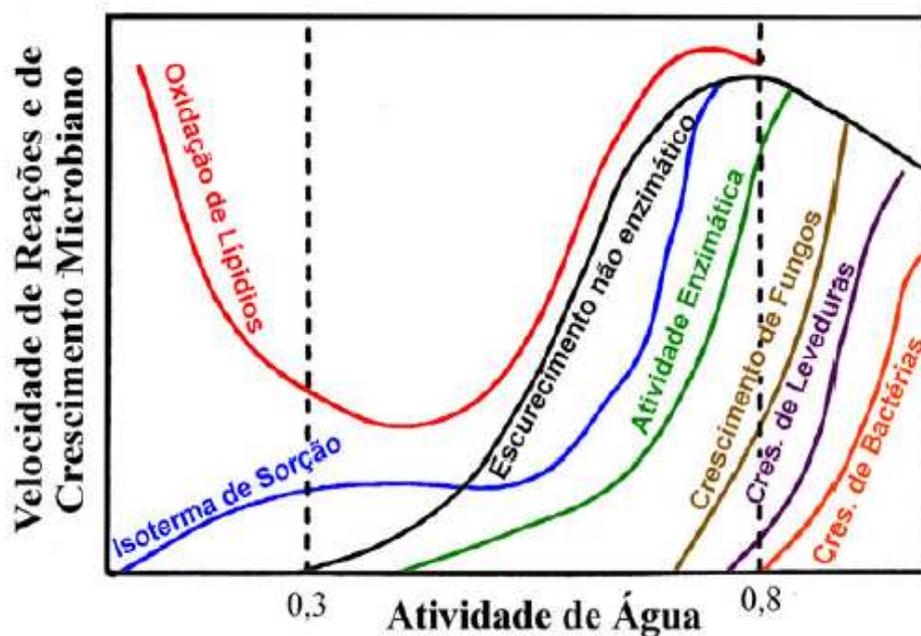


Figura 2.2: Velocidade relativa de reações em função da atividade de água

Fonte: LABUZA (1968)

O conteúdo de água no produto pode ser medido de diferentes formas, mas nem todos os métodos indicam a disponibilidade da água para a atividade dos microrganismos, uma vez que nem toda a água presente no produto está igualmente disponível. A disponibilidade da água em materiais higroscópicos é melhor indicada pela atividade de água ou pela umidade de equilíbrio com a umidade relativa do ar ambiente. A atividade de água e a umidade relativa do ar em contato, quando atingido o equilíbrio são numericamente iguais (HALL, 1980; BROOKER et al., 1992).

O teor de umidade de equilíbrio é particularmente importante na secagem porque ele representa o valor limite para uma dada condição de umidade relativa e temperatura. Se o alimento for seco até um teor de umidade menor que normalmente possui quando em equilíbrio com o ambiente, ele retornará ao seu equilíbrio na estocagem ou manipulação se precauções não forem tomadas.

A determinação do teor de umidade de equilíbrio pode ser realizada por métodos estáticos, semi-estáticos, dinâmicos ou extrapolação gráfica.

- Métodos estáticos

O produto permanece em repouso acima de uma solução saturada de sal ou uma solução de um ácido, porém sem entrar em contato com a solução. O inconveniente deste método é que o processo é muito lento, uma vez que ocorre somente por difusão molecular, o que pode levar o produto à deterioração antes de alcançar o equilíbrio, em ambientes com alta umidade relativa.

- Método semi-estáticos

Neste método o produto sofre uma pequena agitação periódica para facilitar a difusão de umidade nas proximidades da sua superfície para a atmosfera dentro de recipiente, o que torna este processo um pouco mais rápido que o estático.

- Extrapolação gráfica

Outro método bastante prático e simples consiste em obter os dados de secagem, construir uma curva de secagem e realizar uma extrapolação gráfica para estimar o teor de umidade de equilíbrio para aquele processo.

O estudo da atividade de água pode ser feito através das isotermas de sorção. Uma isoterma é uma curva que descreve a relação de equilíbrio entre o teor total de

umidade de um alimento e a pressão de vapor ou umidade relativa, a uma dada temperatura. Essa relação depende de diversos fatores, tais como da estrutura física da superfície do material, composição química e afinidade com a água. Portanto, como cada alimento apresenta características distintas de sorção de umidade, faz-se necessária a determinação experimental das curvas de sorção para cada tipo de produto (BRUNAUER et al., 1938).

Uma isoterma de sorção pode ser obtida em duas direções: adsorção e dessorção. A primeira é feita quando um material mais seco é colocado em várias atmosferas, aumentando a umidade relativa e medindo o aumento de peso devido ao ganho de água. Na segunda, o material inicialmente úmido é colocado sob as mesmas condições ambientais utilizadas na adsorção, sendo medida a perda de peso, devido à saída de água LABUZA (1968).

Uma curva típica de isoterma de sorção é apresentada na Figura 2.3 em que LABUZA, (1968), classifica estas três regiões de monocamada (a_w até 0,2), policamada (a_w entre 0,2 a 0,6) e condensação seguida da dissolução de materiais solúveis (a_w acima de 0,6).

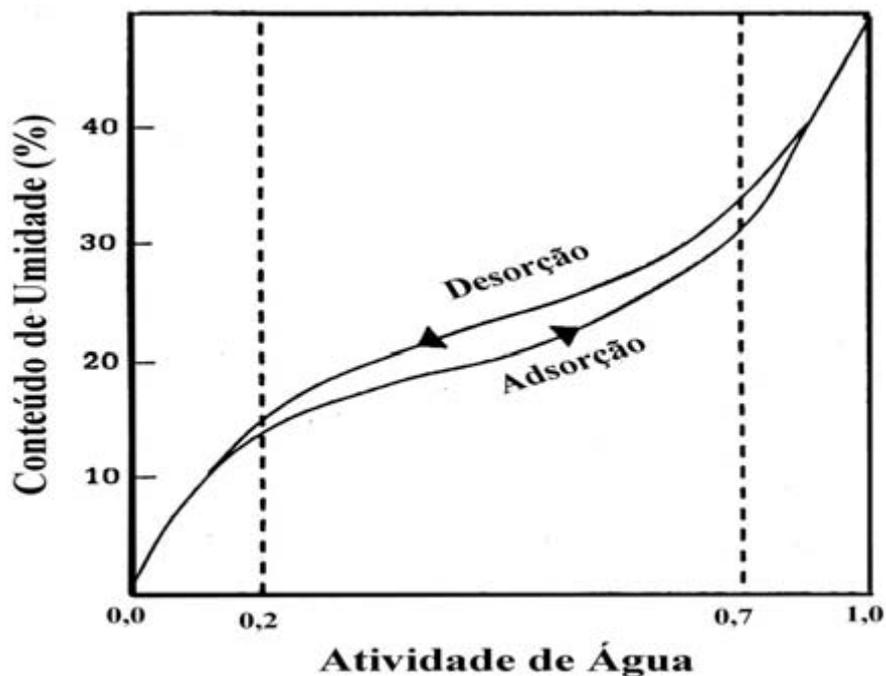


Figura 2.3: Histerese das isotermas de sorção

Fonte: PARK & NOGUEIRA (1992)

O conhecimento das isotermas de sorção de alimentos é de grande importância para o desenvolvimento da indústria alimentícia, já que oferecem informação útil para a otimização do processo de secagem e projeto de secadores, a seleção do material de embalagem e misturas, os ingredientes apropriados para a formulação de um produto alimentício, a previsão da vida útil do produto e da evolução no conteúdo de umidade durante o armazenamento (GÁL, 1987; ZHANG et al., 1996).

2.4.1 - Modelos matemáticos para ajuste das isotermas

Existem numerosos modelos matemáticos disponíveis na literatura com capacidade de prever uma isoterma de adsorção de umidade em alimentos. As equações de dois parâmetros são mais utilizadas por serem de fácil solução matemática, porém têm o inconveniente de, em geral, não se prestarem para prever isotermas em todas as faixas de a_w (0 – 1); já as equações de três ou mais parâmetros quase sempre dão melhores resultados na previsão (PENA et al., 2000).

A escolha de um modelo para prever as isotermas de sorção depende do objetivo do seu uso, como por exemplo, na estimativa do tempo de secagem ou na vida de prateleira de alimentos secos embalados, e deve ajustar-se tão rigorosamente quanto possível aos dados experimentais LABUZA (1968).

Alguns modelos matemáticos empíricos e teóricos têm sido propostos para o ajuste dos valores de umidade de equilíbrio de vários produtos em função da atividade de água e, também, da temperatura do ar. O uso destes modelos é de grande importância, tanto no armazenamento quanto na secagem de produtos agrícolas. No armazenamento, como na secagem, devido às variações contínuas de temperatura e umidade relativa do ar em contato com o produto, ocorrem mudanças no teor de umidade de equilíbrio, sendo, portanto, necessário o seu cálculo inúmeras vezes. Estes cálculos são facilitados com o auxílio destas equações (SILVA et al., 2002).

A teoria de Langmuir assume que as forças que atuam na adsorção são similares em natureza às que envolvem combinação química. Considera-se implicitamente que: o sistema é ideal; as moléculas são adsorvidas e aderem à superfície do adsorvente em sítios definidos e localizados, com adsorção em monocamada em superfície homogênea; cada sítio pode acomodar uma, e somente uma, entidade adsorvida; a energia da entidade adsorvida é a mesma em todos os sítios da superfície e não depende

da presença ou ausência de outras entidades nos sítios vizinhos, ou seja, apresenta interação desprezível entre as moléculas adsorvidas. O modelo quando aplicado à secagem de alimentos pode ser escrito como a Equação 2.3 (KEEY, 1972).

$$\frac{X_e}{X_m} = \frac{Ca_w}{1 + Ca_w} \quad (2.3)$$

Em que:

C - constante de Lagmuir

X_m - conteúdo de umidade na monocamada molecular

a_w - atividade de água

X_e - conteúdo de umidade de equilíbrio expressa em base seca

BRUNAUER et al. (1938) tomando a conceituação de LANGMUIR (1918) de adsorção na monocamada molecular, propuseram um modelo para descrever a adsorção de multicamadas moleculares, cuja equação diz que a capilaridade define o limite superior do número de monocamadas (CHIRIFE & IGLESIAS, 1978).

$$\frac{X_e}{X_m} = \frac{C_{BET} a_w}{1 - a_w} \left\{ \frac{1 - (n + 1)a_w^n + n a_w^{n+1}}{1 - (1 - C_{BET})a_w - C_{BET} a_w^{n+1}} \right\} \quad (2.4)$$

Em que:

a_w - atividade de água

n - número de camadas moleculares

X_m - conteúdo de umidade na monocamada molecular

X_e - conteúdo de umidade de equilíbrio expressa em base seca

C_{BET} - constante de BET, que está relacionada ao calor de sorção da camada molecular

Sendo:

$$C_{BET} = K' \exp\left(\frac{\Delta H_{BET}}{RT}\right) \quad (2.5)$$

Em que:

ΔH_{BET} - entalpia de adsorção da monocamada, J g⁻¹

K' - constante da equação

R - constante universal dos gases, J (mol K)⁻¹

T - temperatura, K

Para casos especiais da Equação 2.4, quando n é igual a 1, a equação fica reduzida a equação de Langmuir (Equação 2.3); já quando n tende a infinito, ela se reduz a Equação 2.6.

$$X_e = \frac{X_m C a_w}{1 - a_w [1 - (C - 1)a_w]} \quad (2.6)$$

A Equação 2.7 é a linearização da Equação 2.6. Graficando o primeiro membro da equação versus a atividade de água o coeficiente linear é igual a $1/X_m C$ e o coeficiente angular $(C-1)/X_m C$, calculando assim os parâmetros X_m e C .

$$\frac{a_w}{(1 - a_w) X_e} = \frac{1}{X_m C_{BET}} + \frac{a_w (C_{BET} - 1)}{X_m C_{BET}} \quad (2.7)$$

IGLESIAS & CHIRIFE (1976) calcularam o teor de umidade na monocamada de BET (X_m) a partir dos dados de literatura de isoterma de sorção de umidade em alimentos através do modelo linearizado de BET e concluíram que X_m diminui com o aumento da temperatura. Isto pode ser atribuído à redução do número de zonas ativas como resultado de mudanças físicas e químicas induzidas pela temperatura.

GUGGENHEIM (1966), ANDERSON (1946) e BOER (1953) estenderam as teorias de adsorção física de LANGMUIR e BET, conhecida como equação de GAB, matematicamente adequada para aplicações em engenharia e que permite um ótimo ajuste de dados de sorção de quase todos os alimentos até atividade de água de 0,9. A equação de GAB é dada por:

$$\frac{X_e}{X_m} = \frac{C_{GAB} K_{GAB} a_w}{(1 - K_{GAB} a_w)(1 - K_{GAB} a_w + C_{GAB} K_{GAB} a_w)} \quad (2.8)$$

Em que:

C_{GAB} e K_{GAB} - constantes de adsorção relacionadas com as interações energéticas entre as moléculas da monocamada e as subsequentes, em um dado sítio de sorção:

$$C_{GAB} = c \exp\left[\left(\frac{H_m - H_n}{RT}\right)\right] \quad (2.9)$$

Em que:

H_m - calor de sorção da camada molecular da água, $J \text{ mol}^{-1}$

H_n - calor de sorção da camada multimolecular da água, $J \text{ mol}^{-1}$

c - constante da equação

$$K_{GAB} = k \exp\left[\left(\frac{H_L - H_n}{RT}\right)\right] \quad (2.10)$$

Em que:

H_L - calor de condensação do vapor de água, $J \text{ mol}^{-1}$

k - constante da equação

Quando K_{GAB} for igual à unidade a equação de GAB se reduz a equação de BET.

Conforme SARAVACOS et al. (1986) a equação de GAB pode ser escrita do seguinte modo:

$$\frac{X_e}{X_m} = \frac{(C_{GAB} - 1) K_{GAB} a_w}{1 + (C_{GAB} - 1) K_{GAB} a_w} + \frac{K_{GAB}}{1 - K_{GAB} a_w} \quad (2.11)$$

Onde o primeiro termo da equação mostra a adsorção física em multicamadas e o outro termo é considerado como uma forma da lei de Raoult que descreve a dissolução de açúcares com alta atividade de água.

O modelo de GAB é similar ao de BET e assume a adsorção física localizada nas multicamadas, sem interações laterais, porém com a seguinte vantagem, descrição da sorção de água da maioria dos alimentos na faixa de $0 < a_w < 0,9$.

Em 1940, Halsey, desenvolveu uma equação que considera a condensação da multicamada a uma distância relativamente grande da superfície. Ele assumiu que a magnitude do parâmetro b caracteriza o tipo de interação entre o vapor e o sólido. Se b é grande, a atração entre o sólido e o vapor é muito específica e não se estende para muito longe da superfície. Se b é pequeno, as forças de atração predominantes são de Van der Waals e são capazes de agir a grandes distâncias da superfície, sendo dada pela seguinte equação:

$$a_w = \exp \left(\frac{-a}{RT \left(\frac{X_e}{X_m} \right)^b} \right) \quad (2.12)$$

Em que:

a_w - atividade de água

X_m - conteúdo de umidade na monocamada molecular

a e b - parâmetros de ajuste

R - constante universal dos gases

T - temperatura de realização do experimento

X_e - conteúdo umidade de equilíbrio expressa em base seca

CHIRIFE & IGLESIAS (1978) simplificaram a equação de Halsey e encontraram resultados satisfatórios para mais de 220 isotermas experimentais testadas. A forma simplificada da equação é:

$$a_w = \exp \left(\frac{-a''}{X_e^b} \right) \quad (2.13)$$

Em que:

a_w - atividade de água

a'' e b - parâmetro ajustado pelo modelo acima

X_e - umidade de equilíbrio expressa em base seca

O modelo de OSWIN baseia-se na expansão matemática para curvas de formato sigmoidal, que é descrita como (CHINNAN & BEAUCHAT, 1985):

$$X_e = a \left(\frac{a_w}{(1 - a_w)} \right)^b \quad (2.14)$$

Em que:

a_w - atividade de água

a e b - parâmetros de ajuste do modelo

X_e - umidade de equilíbrio expressa em base seca

Em 1947, Smith estudou o comportamento de sorção de umidade por altos polímeros, tendo sugerido o seguinte modelo:

$$X_e = M_b - M_a \ln [(1 - a_w)] \quad (2.15)$$

Em que:

M_a e M_b - parâmetros de ajuste

a_w - atividade de água

X_e - umidade de equilíbrio expressa em base seca

PELEG (1993) propôs um modelo com quatro parâmetros para ajustar os dados de isotermas de sorção da literatura. Apresentou resultados em que o modelo proposto mostrou um ajuste comparável ou levemente melhor que o modelo de GAB, para valores de atividade de água abaixo de 90%.

$$X_e = K_1 a_w^{n_1} + K_2 a_w^{n_2} \quad (2.16)$$

Em que:

a_w - atividade de água

k_1, k_2, n_1 e n_2 - parâmetros de ajuste

X_e - umidade de equilíbrio expressa em base seca

Modelo de Henderson é uma das equações mais usadas e pode ser escrita como (HENDERSON, 1952):

$$1-a_w = \exp(-k X_e^{n'}) \quad (2.17)$$

Ou sua modificação:

$$1-a_w = \exp(-kT X_e^{n'}) \quad (2.18)$$

Em que:

a_w - atividade de água

k e n' - constantes da equação

Apesar dos esforços em pesquisa nesta área, nenhum modelo teórico desenvolvido é capaz de prever exatamente o conteúdo de umidade de equilíbrio para os diferentes alimentos em todas as faixas de temperatura e umidade relativa (DURAL & HINES, 1993).

2.4.2. Histerese

O equilíbrio higroscópico é diferente quando o produto está ganhando (adsorção) ou perdendo água (dessorção). Os extremos das curvas sempre coincidem e o ciclo formado entre elas é chamado de histerese (PUZZI, 2000). A defasagem entre estas duas curvas, denominada histerese, pode ocorrer devido a diversos fatores, tais como condensação capilar, mudanças na estrutura física do material, impurezas na superfície e mudança de fase (RAHMAN, 1995).

A histerese de sorção de vapor de água é um fenômeno no qual dois diferentes patamares existem entre as isotermas de adsorção e dessorção e apresentam importantes aplicações práticas e teóricas em alimentos. As teóricas dão um aspecto geral da irreversibilidade do processo de sorção para a questão de validade das funções termodinâmicas. As aplicações práticas dos efeitos da histerese sobre a deterioração química e microbiológica são importantes nos estudos de alimentos com teor de umidade intermediário e em alimentos com baixa umidade. Em vários produtos o

conteúdo de umidade de equilíbrio para uma dada atividade de água é maior para dessorção que para a adsorção devido à histerese (KAPSALIS, 1981).

IGLESIAS & CHIRIFE (1976) relataram que o efeito da temperatura sobre a magnitude da histerese varia de acordo com o alimento. Para alguns alimentos um aumento na temperatura diminui ou elimina a histerese, em outros, a histerese total permanece constante, como é o caso de nozes e gengibre ou até diminui, como a camomila e o anis.

2.4.3. Calor isostérico de sorção

O conhecimento do calor de sorção, em função do conteúdo de água, é essencial nos estudos de secagem e armazenagem de produtos agrícolas, servindo para estimar as necessidades energéticas do processo de secagem, além de fornecer dados sobre o estado da água no produto. É um bom parâmetro para estimar a quantidade mínima de calor requerido para remover uma dada quantidade de água e permite algumas deduções sobre a microestrutura do alimento e as mudanças físicas que acontecem na superfície dos alimentos (WANG & BRENNAN, 1991; DURAL & HINES, 1993; SOPADE & AJISERIGI, 1994; SILVA et al., 2002).

Segundo YOSHIDA (1997), o calor isostérico de sorção é, geralmente, obtido a partir de dados de sorção e é definido como a diferença entre a entalpia da água na fase de vapor e a entalpia da água líquida adsorvida no sólido a uma dada concentração, isto é, ele representa a quantidade de energia necessária para evaporar a água adsorvida, na fase sólida.

Um método largamente usado para se calcular o calor isostérico de sorção, seja pelo processo de adsorção ou pelo de dessorção, é dado pela equação de Clausius-Clayperon (AGUERRE et al., 1988), como mostrado a seguir:

$$Q_{ST} = -R \left(\frac{d \ln a_w}{d \left(\frac{1}{T} \right)} \right) \quad (2.19)$$

Em que :

Q_{ST} - calor isostérico, kJ kg^{-2}

a_w - atividade de água

T - temperatura, K

R - constante dos gases, $0,4618 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$

Para a determinação do calor isostérico, diversos autores consideraram o calor de sorção de umidade dependente da temperatura. Isto é uma consideração conveniente que permite um cálculo facilitado do calor isostérico das isotermas de sorção (AGUERRE et al., 1988; SILVA et al., 2002).

TOLABA & SUAREZ, (1995) desenvolveram uma equação triparamétrica para prever o excesso de calor de sorção em função da umidade do produto conforme a Equação 2.19:

$$Q_{ST} = R k_1 k_2^{X/mo} \quad (2.20)$$

Em que:

k_1, k_2 e m_o - constantes

R - constante universal dos gases

X - conteúdo de umidade expresso em base seca

2.5. Secagem

A operação de secagem deve ser realizada com extremo cuidado, pois esta prática pode reduzir sensivelmente a qualidade dos materiais biológicos durante seu procedimento.

Foi ressaltado por CORREA et al. (2007), que a secagem de produtos é um processo utilizado em vários países, objetivando preservar a atividade enzimática original, reduzindo e/ou evitando a contaminação microbiológica em produtos de origem biotecnológica. Esse processo consiste na remoção de uma substância volátil (não necessariamente a água) de produto sólido diminuindo assim, sua atividade de água.

Os resíduos da agroindústria na atualidade têm um alto valor, já que podem ser aproveitados em vários processos, porém é necessário estudar e pesquisar as propriedades e métodos de conservação destes produtos. Uma das formas de processamento de resíduos agroindustriais para a produção de farinhas com alto conteúdo em fibras, por exemplo, é a secagem do resíduo com subsequente trituração.

A qualidade de um produto depende do seu uso final que, por sua vez dirá qual a característica necessária da qualidade que deverá ser conservada. Assim, é o critério de conservação de qualidade que dita o processo de secagem (BROD, 2003).

Conforme ALMEIDA et al. (2002), os produtos são muito diferenciados entre si, devido a sua forma, estrutura e suas dimensões, além de as condições de secagem serem muito diversas, conforme as propriedades do ar de secagem e a forma como se faz o contato ar produto. Uma vez que o produto é colocado em contato com o ar quente, ocorre uma transferência de calor do ar ao produto sob o efeito da diferença de temperatura existente entre eles. Simultaneamente, a diferença de pressão parcial de vapor existente entre o ar e a superfície do produto determina uma transferência de massa para o ar. Esta última se faz na forma de vapor de água, uma parte do calor que chega ao produto é utilizada para vaporizar a água.

Atualmente, percebe-se um refortalecimento da secagem de produtos agropecuários devido à retomada da discussão da recuperação da qualidade de vida, que insere a importância de preparo de refeições saudáveis, mas com as limitações do tempo imposto pela vida moderna. Outro fator é a crescente demanda das indústrias que produzem alimentos chamados de instantâneos (prontos e semiprontos) que utilizam alimentos secos como matéria-prima. A facilidade de manuseio e de armazenagem dos produtos secos também é um importante fator no atual mundo globalizado. Além disso, os alimentos secos retomam seu mercado devido ao seu preço compatível com os alimentos processados denominados de “pratos-prontos” (PARK et al., 2002).

Processo comercial mais utilizado para conservar o alimento, pois quando comparado com outros métodos de preservação para períodos longos, como a centrifugação, o enlatamento, os tratamentos químicos, a irradiação, entre outros, a secagem é de custo mais baixo e de operação mais simples, podendo realizar-se por meio natural expondo o produto ao sol e artificial por meio de secadores mecânicos (FARIAS et al., 2002).

Existem inúmeros métodos destinados à desidratação de alimentos, desde os mais avançados direcionados a produção em grande escala, aos mais simples direcionados ao pequeno produtor, como a desidratação solar (mecânica e natural), sala de secagem, forno doméstico e desidratador (CRUZ, 1990).

Para evaporar a umidade do sólido é necessário fornecimento de calor, bem como um meio de transporte para remover o vapor de água formado na superfície do material a ser seco. O processo de secagem pode envolver três meios de transferência de calor: convecção, condução e radiação. A transferência de calor por convecção é o meio mais utilizado na secagem comercial, nela um fluxo de ar aquecido passa através da camada do material. Durante o processo, a umidade migra do interior para a superfície do produto, de onde se evapora para o ambiente (VALENTE, 2007).

Algumas variáveis são importantes na taxa de remoção de água do alimento por secagem. A perda de água do produto por secagem está diretamente relacionada com a superfície exposta do material, a temperatura, a velocidade do ar, a umidade do ar, o tempo do processo, a pressão e as características do produto.

- Temperatura

A aplicação de temperaturas elevadas aumenta a velocidade de secagem pelo ar, pois aumenta sua capacidade de transportar umidade e com o aquecimento do ar, o produto também é aquecido, aumentando sua pressão de vapor e facilitando a saída de umidade do produto para a superfície (POTTER & HOTCHKISS, 1995).

Apesar do aumento da temperatura responder positivamente ao aumento da taxa de secagem, a temperatura elevada pode causar injúrias nos produtos biológicos. Ao escolher a temperatura do processo é preciso ter o conhecimento prévio do comportamento do material nessa temperatura escolhida, de acordo com os objetivos pretendidos para o produto. As temperaturas elevadas podem causar alterações na estrutura do alimento, perda de nutrientes voláteis, reações de escurecimento e mudanças sensoriais.

- Velocidade do ar

Embora a temperatura tenha maior influência sobre a cinética de secagem, a taxa de evaporação também é influenciada pela velocidade do ar de secagem, principalmente na fase inicial. A velocidade do ar de secagem é importante para a remoção do vapor de

água no ambiente ao redor do produto, evitando a saturação do ar e resultando num diferencial de pressão de vapor de água entre a superfície do material e o ambiente, o que favorece a transferência de massa do sólido para o ar.

- Umidade relativa

A umidade relativa é a relação entre a pressão de vapor da água presente no ar e a pressão de vapor da água quando o ar está saturado à mesma temperatura (POTTER & HOTCHKISS, 1995). Um ar úmido saturado de vapor d'água não pode mais conter umidade e, portanto, não tem mais capacidade de evaporar a água do sólido. Durante o processo de secagem, o ar nas proximidades do material fica saturado de vapor d'água, e isso prejudica a taxa de secagem. Para a continuidade da operação é necessário que se forneça calor ao produto, que ocorre através da circulação e aquecimento do ar que envolve o sólido durante a secagem. A umidade relativa mostra a capacidade que o ar possui de absorver umidade, logo, um valor de umidade relativa baixo implica numa capacidade elevada do ar de absorver umidade.

De acordo com KEEY (1972) o fenômeno de secagem de materiais biológicos não pode ser generalizado, uma vez que possuem características intrínsecas as quais podem ser diferentes entre si, com a existência da contribuição do soluto durante a secagem e o encolhimento do produto, devido à mudança de pressão entre o líquido e a parede celular.

Durante o processo de secagem, quando o sólido é colocado em contato com o ar quente, ocorre o fenômeno da transferência de energia sob a forma de calor do ar ao material, devido à diferença de temperatura entre eles. Em consequência da diferença de pressão parcial de vapor d'água entre a superfície do sólido e o ar, ocorre simultaneamente o fenômeno de transferência de massa sob a forma de vapor de água do sólido para o ar. De acordo com o comportamento da transferência de calor e massa ao longo da operação, a secagem pode ser dividida em três períodos (BROD et al., 1999): período de indução, período em taxa constante e período em taxa decrescente de secagem, como mostra a Figura 2.4.

A curva (a) representa a diminuição do teor de água do produto durante a secagem, conteúdo de umidade do produto em base seca (X), em relação à evolução do tempo de secagem (t), isto é, é a curva obtida pesando o produto durante a secagem numa determinada condição de secagem.

A curva (b) representa a velocidade (taxa) de secagem do produto, variação do conteúdo de umidade do produto por tempo, dX/dt em relação à evolução do tempo (t), isto é, é a curva obtida diferenciando a curva (a).

A curva (c) representa a variação da temperatura do produto durante a secagem (variação da temperatura do produto (T) em relação à evolução do tempo t), isto é, é a curva obtida medindo a temperatura do produto durante a secagem.

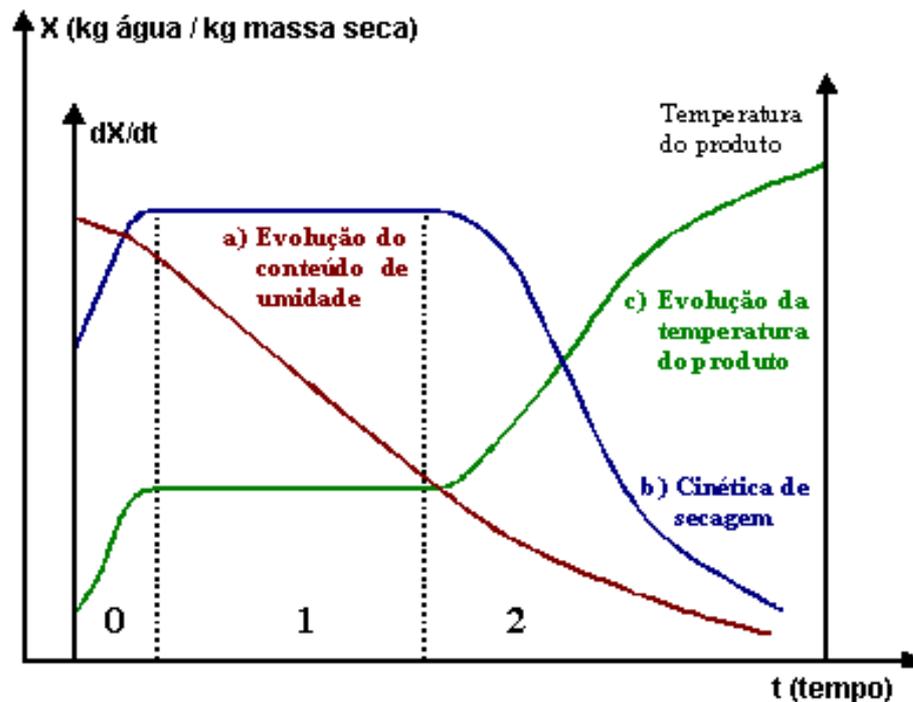


Figura 2.4. Curvas típicas de secagem

Fonte: PARK et al. (2001a)

O primeiro período (0) representa o início da secagem. Nesse período ocorre uma elevação gradual da temperatura do produto e da pressão de vapor de água. Essas elevações têm prosseguimento até o ponto em que a transferência de calor seja equivalente à transferência de massa (água).

O segundo período (1) caracteriza-se pela taxa constante de secagem. A água evaporada é a água livre. A transferência de massa e de calor é equivalente e, portanto, a velocidade de secagem é constante. Enquanto houver quantidade de água na superfície do produto suficiente para acompanhar a evaporação, a taxa de secagem será constante.

No terceiro período (2), a taxa de secagem é decrescente. A quantidade de água presente na superfície do produto é menor, reduzindo-se, portanto, a transferência de massa. A transferência de calor não é compensada pela transferência de massa; o fator

limitante nessa fase é a redução da migração de umidade do interior para a superfície do produto. A temperatura do produto aumenta, atingindo a temperatura do ar de secagem. Quando o produto atinge o ponto de umidade de equilíbrio em relação ao ar de secagem, o processo é encerrado.

O terceiro período é quase sempre o único observado para a secagem de produtos agrícolas e alimentícios. A complexidade dos fenômenos, colocados em jogo durante a secagem, conduz os pesquisadores a proporem numerosas teorias e múltiplas fórmulas empíricas para predizer a taxa de secagem (BROD et al., 1999): Teoria difusional; Teoria capilar; Teoria de Luikov; Teoria de Philip & de Vries; Teoria de Krisher – Berger & Pei; Teoria da condensação – evaporação.

2.6. Cinética de secagem

O estudo da cinética de secagem visa o conhecimento do comportamento do material ao longo do processo e a predição do tempo de secagem, uma vez que a modelagem do processo é de grande importância para o desenvolvimento e a otimização dos secadores, além de possibilitar padronização do processo.

De acordo com NICOLETTI (2001), os principais fatores que afetam a taxa de secagem são as propriedades físicas do produto, o arranjo geométrico do produto em relação à superfície de transferência de calor, as propriedades físicas do ambiente de secagem e a característica do equipamento de secagem. Dos fatores citados, o que mais influencia a taxa de secagem é a natureza da matéria-prima, compreendendo a constituição química e física das paredes das células.

Durante os períodos de taxa constante e decrescente, os métodos de cálculo da secagem diferem. No primeiro caso, as transferências de calor e massa são analisadas na superfície do material em contato com o ar de secagem, já para o segundo caso, as análises são baseadas nas transferências internas que governam a secagem (PARK et al., 2002).

2.6.1. Modelos matemáticos

A secagem de materiais biológicos é bastante complexa, em função das interações na matriz sólida que afetam diretamente a transferência de massa e calor no

decorrer do processo. A fim de explicar o mecanismo de migração de umidade no interior dos alimentos, vários modelos matemáticos foram propostos para descrever a influência de cada variável no processo e estimar a difusividade da água (TORGRUL & PEHLIVAN, 2004).

A teoria difusional se apóia exclusivamente sobre a lei de Fick, que expressa que o fluxo de massa por unidade de área é proporcional ao gradiente de concentração de água. Utilizando a lei de Fick, na equação de balanço de massa de água no interior do produto, vem:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \nabla \cdot (D_{ef} \cdot \nabla X) \quad (2.21)$$

Em que:

D_{ef} - difusividade efetiva, $m^2 s^{-1}$

X - teor de água, kg_{H_2O}/kg_{ms}

t - tempo, s^{-1}

Independentemente dos trabalhos de secagem, CRANK (1975) apresentou diversas soluções analíticas para a equação de difusão, considerando diferentes condições iniciais e de contorno. Tratou também de casos onde a difusividade pode variar de forma linear ou exponencial com a concentração de umidade. No entanto, estas situações se aplicam a sólidos com formas geométricas simples (corpos semi-infinitos; placas planas, cilindros e esferas) e com difusividade efetiva constante ou variando com a umidade.

O coeficiente de difusão (D_{ef}) é uma difusividade efetiva que engloba os efeitos de todos os fenômenos que podem intervir sobre a migração da água, e seu valor é sempre obtido pelo ajuste de valores experimentais. A solução da equação de difusão utilizada é uma das mais simples e parece ser a principal razão de seu emprego. Pode-se entender a difusividade como a facilidade com que a água se desloca dentro do material. Como a difusividade varia conforme mudam as condições de secagem (temperatura e umidade), ela não é intrínseca ao material. Assim, convencionou-se chamá-la de difusividade efetiva (OLIVEIRA et al., 2006).

Modelos empíricos também têm sido utilizados para o estudo da cinética de secagem de materiais biológicos, apesar de sua restrição às condições sob as quais os dados experimentais foram obtidos ser muito mais severa.

O método empírico é um método de abordagem com base em dados experimentais e na análise adimensional. Os modelos empíricos de secagem apresentam uma relação direta entre o conteúdo médio de umidade e o tempo de secagem omitem os fundamentos do processo de secagem e seus parâmetros não têm significado físico conseqüentemente, não oferecem uma visão apurada dos processos importantes que ocorrem durante o fenômeno, embora descrevam as curvas de secagem para determinadas condições experimentais.

Muita ênfase se tem dado ao desenvolvimento de modelos semi-teóricos, que concorrem para que haja harmonia entre a teoria e a facilidade de uso. Geralmente, os modelos empíricos são uma expressão da lei de resfriamento de Newton, aplicada à transferência de massa durante a secagem, e assumindo que as condições sejam isotérmicas e que a transferência de umidade se restrinja à superfície do produto.

LEWIS (1921) sugeriu uma equação análoga a lei de Newton para o resfriamento. Segundo o autor durante a secagem dos materiais higroscópicos porosos no período de taxa de secagem decrescente a mudança de umidade é proporcional a diferença instantânea entre o teor de umidade do material e o teor de umidade do material em equilíbrio com o ar de secagem:

$$\frac{dX}{dt} = -k(X - X_e) \quad (2.22)$$

Em que:

X - teor de água do produto no tempo t , b.s.

X_e - teor de água de equilíbrio, b.s.

t - tempo em segundos

k - constante de secagem (s^{-1})

Desconsiderando-se os efeitos no interior do material, a equação de Lewis presume que toda a resistência ao transporte de umidade encontra-se na camada limite. Assumindo k como uma constante e integrando a Equação 2.22 para incrementos de tempo de 0 a t e teores de umidade decrescentes, a partir de X_0 tem-se o modelo exponencial:

$$RX = \left(\frac{X(t) - X_e}{X_o - X_e} \right) = \exp(-kt) \quad (2.23)$$

Em que:

RX – razão de umidade do produto

t - tempo de secagem, s

k – constante de secagem, s^{-1} .

A constante de secagem foi investigada por vários pesquisadores e foi estabelecido que k pode ser descrita como uma equação do tipo Arrhenius como uma função da temperatura do ar de secagem (RATTANAPANT et al., 1990; HENDERSON & PABIS, 1961).

Dentre os modelos empíricos se destacam os modelos exponenciais. Todos os modelos da curva de secagem utilizam o número adimensional de secagem (RX) como variável dependente, que está em função do tempo de secagem.

Na literatura existem vários modelos matemáticos os quais são utilizados para estimar as curvas de secagem de produtos agrícolas e/ou alimentícios.

O modelo de Henderson (Equação 2.24) é uma das equações empíricas mais utilizadas para ajuste de dados experimentais de umidade de equilíbrio, em função da temperatura e da umidade relativa, para faixas mais amplas de temperatura e umidade relativa (BROOKER et al., 1992). De acordo com CHRIST (1996) modificações empíricas introduzindo um terceiro parâmetro, “C”, melhoraram substancialmente esta equação, tornando-a aplicável em faixas mais amplas de temperaturas e umidade relativa.

Henderson

$$RX = Ae^{-Bt} + Ce^{-Dt} \quad (2.24)$$

Em que:

RX - razão de umidade, adimensional

A, B, C, D - constantes do modelo

t – tempo, s

O modelo empírico de Page (Equação 2.25) representa, de forma satisfatória, os dados de secagem de alimentos e é muito utilizado para descrever o comportamento de secagem de uma ampla variedade de materiais biológicos (TAN et al., 2001).

Page

$$RX = e^{-kt^n} \quad (2.25)$$

Em que:

RX - razão de umidade (adimensional)

k – constante de secagem

n - constante do modelo

t – tempo, s

O parâmetro n possui um efeito de moderação do tempo e corrige os possíveis erros resultantes da negligência da resistência interna para a transferência de umidade (AZZOUZ et al., 1998)

O modelo de WANG & SINGH (1978) tem sido utilizado com sucesso no ajuste de curvas de secagem de camada fina de produtos agrícolas (Equação 2.26). DOYMAZ (2005) utilizou este modelo no ajuste de curvas de secagem solar do figo, obtendo coeficiente de determinação de 0,9512. JAIN & PATHARE (2004) utilizaram no ajuste da curva de secagem de cebola ($R^2 = 0,8936$) desidratadas por infravermelho a 40 °C e MENGES & ERTEKIN (2006) no ajuste das curvas de secagem de maçã.

$$RX = 1 + At + Bt^2 \quad (2.26)$$

Em que:

RX - razão de umidade, adimensional

A, B - constantes do modelo

t – tempo, s

O modelo de HENDERSON & PABIS (1961), Equação 2.27, foi utilizada por GUNHAN et al. (2005), entre outros modelos, para predição das curvas de secagem de orégano em secador com temperaturas (40, 50 e 60 °C).

$$RX = a \exp(-kt) \quad (2.27)$$

Em que:

RX - razão de umidade, adimensional

a - constante de secagem do modelo, adimensional

t – tempo, s

A aplicabilidade de modelos matemáticos na predição de dados experimentais alcança grande importância na prática, pois permite a redução dos exaustivos ensaios de laboratório.

2.7. Estado da arte

2.7.1. Caracterização de resíduos agroindustriais

No processamento de alimentos é importante conhecer a sua composição e avaliar se a condição que a matéria-prima estará sendo submetida irá produzir efeitos indesejáveis ou mesmo desejáveis ao produto final.

BOTELHO et al. (2002) caracterizaram a casca e o cilindro central do abacaxi Smooth Cayenne quanto aos componentes da fibra alimentar em fibra detergente ácido - FDA, fibra detergente neutro - FDN, celulose, lignina, hemicelulose e pectina total e concluíram que tanto a casca como o cilindro central do abacaxi podem ser considerados boa fonte de fibra alimentar em termos de FDA, FDN, celulose, hemicelulose e lignina; porém, as duas partes do fruto são pobres em pectina. A casca apresentou maiores teores de todos os constituintes analisados.

LOUSADA JÚNIOR et al. (2006) avaliaram o valor nutritivo de subprodutos da indústria processadora de frutas, tendo em vista seu uso como fonte alimentar alternativa para suprir as necessidades do rebanho ovino, melhorando assim a eficiência do manejo alimentar e concluíram que os resíduos estudados: abacaxi, acerola, goiaba,

maracujá e melão apresentaram altos teores de matéria seca e proteína, variando entre 83,33 e 86,33%; 8,35 e 17,3%, respectivamente, o que satisfaz à condição mínima para um bom funcionamento ruminal.

COSTA et al. (2007) estudaram a transformação dos resíduos de casca e bagaço do abacaxi proveniente da industrialização deste fruto em pós alimentícios com intuito de efetuar uma análise comparativa dos seus parâmetros físico-químicos e químicos e concluíram que em relação aos teores de fibras observados, os pós alimentícios analisados podem ser considerados como ricos neste constituinte e apresentaram boas quantidades de proteínas, porém, quando utilizados na elaboração de um novo produto alimentício, os mesmos têm a necessidade de uma complementação protéica.

2.7.2. Cinética de secagem resíduos agroindustriais

A cinética de secagem vem sendo estudada por diversos pesquisadores em todo mundo que buscam formas de ajustar algum tipo de modelo ao processo, assim como novas tecnologias de secagem.

PENA et al. (2008) estudaram a cinética de secagem do resíduo de maracujá gerado na produção do suco de maracujá (resíduo fibroso), em estufa com recirculação de ar, nas temperaturas de 70, 80 e 90 °C. Os estudos evidenciaram a possibilidade de aproveitamento do segundo resíduo da industrialização do suco do maracujá amarelo (fibra residual), após secagem a 70 °C, seguida de secagem complementar a 90 °C, em estufa com circulação de ar.

WAUGHON & PENA (2008) testaram a aplicabilidade de dez modelos matemáticos semi-empíricos (Newton, Page, Page modificado, Henderson e Pabis, Logarítmico, Midilli, Dois termos, Aproximação da difusão, Verma e Dois termos exponencial) para a predição das curvas de secagem em camada delgada do resíduo fibroso, gerado no beneficiamento do abacaxi. Os ajustes foram aplicados aos dados de secagem obtidos em secador de leito fixo (escala laboratorial) com três diferentes temperaturas (50, 60 e 70 °C) e velocidades do ar de secagem (2,0, 2,5 e 3,0 m s⁻¹). Os autores concluíram que os modelos de Page, Page Modificado e dois termos exponencial foram os que melhor ajustaram os dados de secagem do material em estudo.

PENA & MENDONÇA (2009) estudaram a secagem em leito fixo visando o aproveitamento do resíduo da industrialização do suco de maracujá (*Passiflora edulis*), em diferentes condições de temperatura (50 a 70 °C) e velocidade do ar de secagem (2,0 a 3,0 ms⁻¹). Com base no estudo, recomenda-se como condições de secagem a temperatura de 65 °C e a velocidade do ar de secagem de 2,5 ms⁻¹. Nessas condições, o produto atingirá umidade de 11 g/100 g b.s. em, aproximadamente, 6 horas de secagem.

FIorentin et al. (2010) realizaram um estudo para avaliar as características cinéticas envolvidas no processo de secagem do bagaço de laranja, para a utilização deste material como adsorvente, concluíram que a secagem convectiva do bagaço mostrou que quanto maior a temperatura de secagem, menor o tempo de secagem, justificado pela maior taxa de secagem.

3. MATERIAL E MÉTODOS

Neste capítulo estão descritas as metodologias empregadas no desenvolvimento desse trabalho, como os ensaios do enriquecimento nutricional dos resíduos, por fermentação semi-sólida utilizando-se a levedura *Saccharomyces cerevisiae*, as características físicas, físico-químicas e químico-bromatológicas dos resíduos utilizados na forma *in natura*, enriquecido e enriquecido seco, a determinação das isothermas de desorção dos resíduos *in natura* e enriquecidos e o estudo da cinética de secagem dos resíduos enriquecidos.

3.1. Local de trabalho

Este trabalho foi realizado no Laboratório de Engenharia Bioquímica em conjunto com o Laboratório de Transferência em Meios Porosos e Sistemas Particulados, ambos pertencentes à Unidade Acadêmica de Engenharia Química, no Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal de Campina Grande, PB.

3.2. Matéria-prima (Substrato)

A matéria-prima utilizada neste trabalho foi a casca (Csc) e coroa (Cro) do abacaxi pérola (*Ananas comosus* L.), fruto adquirido na EMPASA na cidade de Campina Grande, PB. No laboratório, o resíduo (casca e coroa) foi separado da polpa e em seguida, acondicionado em sacos de polietileno e armazenados em freezer a $-22\text{ }^{\circ}\text{C}$ até o momento de serem utilizados nos experimentos (Figura 3.1).



(a)



(b)



(c)

Figura 3.1. Material utilizado para o estudo (a) fruto (b) casca e (c) coroa do abacaxi

3.3. Microrganismo

O microrganismo utilizado para o enriquecimento protéico dos substratos em estudo foi a levedura *Saccharomyces cerevisiae*, prensada, do tipo comercial, fermento biológico fresco para a fabricação de pães e seus derivados da marca Levapan, com 70% de umidade e 45% de proteína bruta (base seca).

3.4. Fermentação

Para a fermentação utilizou-se as condições maximizadas para a fermentação semi-sólida obtidas por OLIVEIRA (2007). Período de enriquecimento de 48 h para os dois resíduos, concentração de levedura 3% e temperatura de 34 °C para a casca e 5,8% de concentração de levedura e temperatura 38 °C para coroa. Foi utilizado 500 g de substrato dos dois resíduos. O resíduo congelado foi submetido ao descongelamento em refrigerador com temperatura média de 8 °C e em seguida a temperatura ambiente (≈ 25 °C), as amostras, de casca e coroa de abacaxi foram trituradas em liquidificador industrial e inoculadas nos percentuais referidos acima, colocadas em bandejas de estrutura de alumínio e levadas a estufa nas condições descritas anteriormente.

Após o enriquecimento protéico do resíduo, determinou-se o aumento protéico (AP) em relação ao resíduo *in natura* através da Equação 3.1, onde P_{Be} é o teor de proteína presente no resíduo após o enriquecimento e P_{Bin} é o teor de proteína presente no resíduo *in natura*.

$$AP = \left(\frac{P_{Be} - P_{Bin}}{P_{Bin}} \right) * 100 \quad (3.1)$$

Uma parcela dos resíduos enriquecidos foi submetida à secagem em estufa com circulação de ar, na temperatura de 55 °C durante 72 h, e depois de triturados em moinho elétrico, colocados em recipientes de plástico herméticos, armazenados a temperatura ambiente para análises. O restante foi colocado em sacos plásticos com ranhuras, retirados o ar em seladora a vácuo, e posteriormente armazenado em freezer - 22 °C até o momento de serem utilizados nos experimentos de secagem.

As etapas para o enriquecimento dos resíduos foram realizadas conforme o fluxograma apresentado na Figura 3.2.

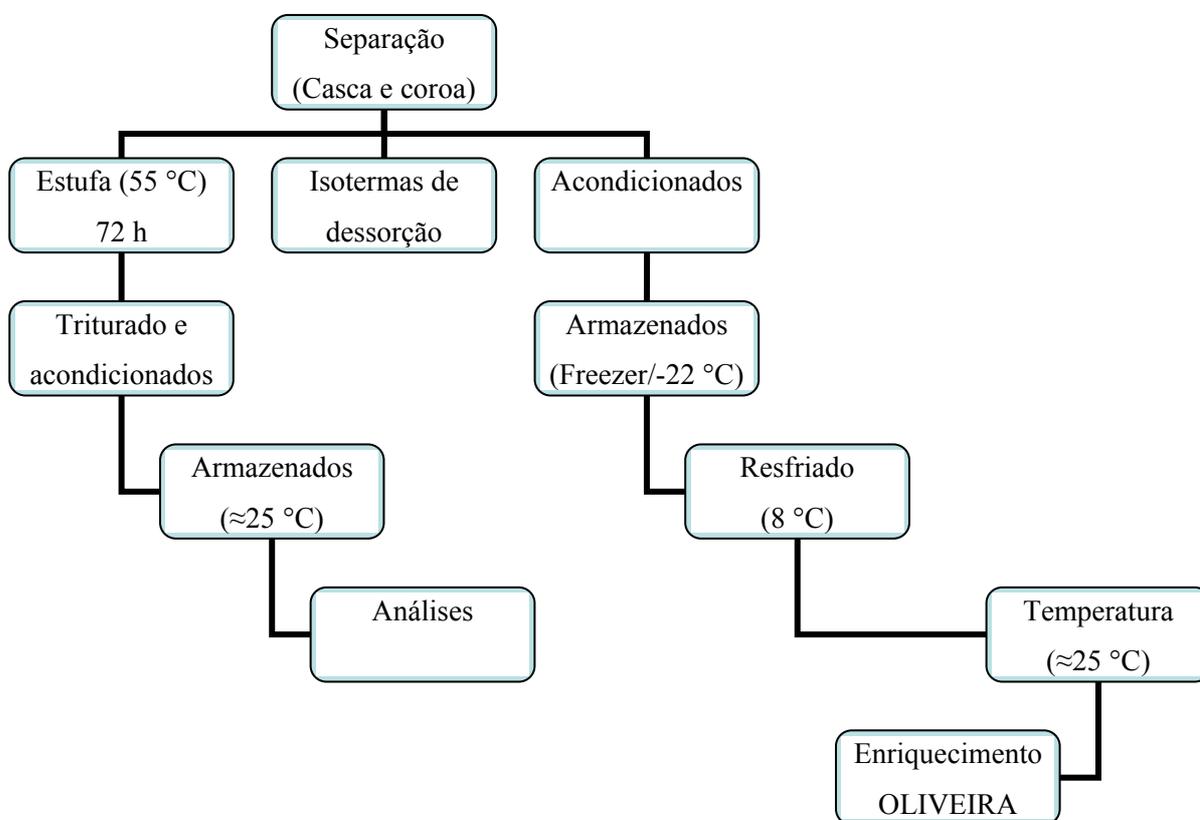


Figura 3.2 - Fluxograma das etapas para o enriquecimento, caracterização e isotermas dos resíduos *in natura*

3.5. Caracterização físico-química

O material para caracterização do resíduo *in natura* foi elaborado da seguinte forma: inicialmente, a casca e coroa do abacaxi foram separados do fruto, triturados em liquidificador industrial e colocados em bandejas de alumínio. Posteriormente, as bandejas foram colocadas em estufa com circulação de ar a temperatura de 55 °C, por um período de 72 h. Após a secagem, o material foi moído e acondicionado em recipiente de plástico hermético e armazenado a temperatura ambiente.

O procedimento para obter o material utilizado para caracterização dos resíduos enriquecidos foi descrito no item 3.4. Quanto aos enriquecidos secos, esses após secagem foram moídos e acondicionados em tubos plásticos herméticos identificados e armazenados a temperatura ambiente, para análise.

Os mesmos procedimentos foram adotados para as caracterizações dos resíduos *in natura*, enriquecidos e enriquecidos secos otimizados. Todos os experimentos foram realizados em triplicata.

3.5.1. Umidade/Sólidos totais

A umidade e sólidos totais dos resíduos foi determinada seguindo a metodologia descrita em BRASIL (2005b). Os resultados foram expressos em percentagem (% massa/massa).

3.5.2. Acidez total titulável

Na determinação da acidez total titulável utilizou-se o método acidimétrico da AOAC (1997), titulando-se a amostra com solução padronizada de NaOH 0,1 N. Os resultados foram expressos em percentagem de ácido cítrico.

3.5.3. pH

O pH foi medido segundo a metodologia descrita em BRASIL (2005b). Preparou-se uma suspensão com 10 mL de água destilada e 1 g da amostra sólida. Após completa homogeneização, seguida de filtração em chumaço de algodão, foi realizada a medida do pH em potenciômetro digital, calibrado com soluções tampão (pH 4,0 e 7,0), a 20 °C. Os resultados foram expressos em unidades de pH.

3.5.4. Cinzas e matéria orgânica

A determinação de cinzas foi realizada, seguindo a metodologia descrita pela AOAC (1997) e os resultados expressos em porcentagem (% massa/massa). Com o teor de cinzas determinou-se a matéria orgânica, onde $MO = 100 - \text{Cinzas}$.

3.5.5. Sólidos solúveis (°Brix)

A leitura do °Brix foi feita de forma direta em refratômetro, segundo o procedimento descrito em BRASIL (2005b).

3.5.6. Fibra em detergente neutro (FDN)

Utilizou-se a técnica descrita por SILVA (1998), que se fundamenta em remover todo conteúdo celular separando os constituintes da parede que é formada basicamente por celulose, hemicelulose e lignina. Considerou-se como fibra em detergente neutro a porcentagem dos constituintes da parede celular, calculada pela diferença entre as pesagens.

3.5.7. Fibra em detergente ácido (FDA)

A metodologia utilizada foi a técnica proposta por SILVA (1998). A fração de fibra em detergente ácido (FDA) dos alimentos inclui celulose e lignina como componentes primários além de quantidades variáveis de cinza e compostos nitrogenados.

3.5.8. Hemicelulose

O valor da hemicelulose foi determinado através da subtração do valor de fibra em detergente neutro (FDN) pelo de fibra em detergente ácido (FDA).

3.5.9. Pectina

A determinação de pectina realizou-se segundo a metodologia descrita em BRASIL (2005b).

3.5.10. Açúcares redutores totais (ART)

O método para a obtenção de ART baseia-se na redução do DNS (ácido 3,5-dinitro salicílico) a ácido 3-amino-5-nitro salicílico, concomitantemente com a oxidação do grupo aldeído do açúcar a grupo carboxílico. Após aquecimento, a solução torna-se alaranjada, sendo lida, em espectrofotômetro, a 540 nm. Utilizou-se a metodologia descrita por MILLER (1959) com algumas modificações. Na determinação de ART (frutose, glicose e sacarose) foi necessário fazer inicialmente a inversão da sacarose da amostra diluída, e posteriormente seguir o método de DNS.

3.5.11. Matéria seca

Para a determinação da matéria seca, a amostra foi colocada em estufa a 105 °C, até atingir peso constante, de acordo com a metodologia de BRASIL (2005b).

3.5.12. Proteína bruta

O teor de proteína bruta foi determinado pelo método semi-micro *Kjeldahl* com adaptação para nitrogênio (N), por espectrofotometria UV-VIS, segundo o método descrito em LE POIDEVIN & ROBINSON (1964). Para calcular a porcentagem de proteína da amostra a partir da quantidade de nitrogênio orgânico existente, foi preciso considerar que em média as proteínas possuem 16% de nitrogênio e que são totalmente digeridas, fazendo com que o fator de conversão de porcentagem de nitrogênio em porcentagem de proteína seja 6,25, ou seja, $PB (\%) = N (\%) \times 6,25$.

3.6. Isotermas de sorção de umidade

Para o levantamento dos dados das isotermas de dessecção do resíduo do abacaxi *in natura* e enriquecido foi utilizado o equipamento *Thermoconstanter Novasina* TH200 (Figura 3.3). Este equipamento é projetado para a medida de atividade de água (a_w) com a temperatura controlada. No aparelho um sensor mede a atividade de água à temperatura indicada de pequenas amostras e o transmissor RTD-20 converte os sinais

da célula de medição, indicando os valores medidos de a_w e de temperatura diretamente no mostrador frontal do mesmo.



Figura 3.3. Equipamento Thermoconstanter Novasina TH-200

Para determinação das isotermas de dessecção, amostras de aproximadamente 2,0 g de resíduo (casca e coroa) e do resíduo enriquecido, foram colocadas em formas de papel alumínio, e após serem pesadas foram levadas à estufa regulada à 55 °C por um período de aproximadamente 2h, onde sofreram um processo suave de secagem. Após esse período na estufa, as amostras eram retiradas e colocadas em um dessecador em células que acompanham o aparelho, a fim de uniformizar a distribuição de água na amostra.

Em intervalos diferentes, as cápsulas plásticas, contendo as amostras nas formas de papel alumínio, foram levadas ao equipamento para a determinação da atividade da água nas temperaturas de 25, 30, 35 e 40 °C; onde permaneceram até estabilização das leituras, para então, serem retiradas e pesadas em uma balança analítica, sendo retornadas novamente para a estufa. A sucessão dessas leituras indica os pontos da curva da isoterma de dessecção dos resíduos do abacaxi *in natura* e enriquecidos.

3.6.1. Umidade de equilíbrio

Posteriormente à determinação desses pontos, as amostras foram levadas à estufa sem circulação de ar, a 105 °C por 24 h para determinação da massa seca e posteriormente a umidade de equilíbrio (Equação 3.2).

$$X_{eq} = \frac{m_{eq} - m_s}{m_s} \quad (3.2)$$

Em que:

X_{eq} - umidade de equilíbrio em base seca, % base seca

m_{eq} - massa da amostra quando atingido o equilíbrio, g

m_s - massa seca da amostra, g

Para o ajuste matemático dos dados experimentais utilizou-se modelos matemáticos, e fez-se a correspondência entre a umidade do produto em questão (X_{eq}) e a atividade de água (a_w) fornecendo importantes informações sobre o fenômeno de dessecção. Para o ajuste das isotermas de dessecção da casca e coroa do abacaxi *in natura* e enriquecidos a análise de regressão foi realizada com auxílio do aplicativo Statistica 5.0, utilizando a metodologia de estimativa de Quasi-Newton para os modelos GAB e BET (Equações 2.4 e 2.8). Para o modelo de BET linearizado (Equação 2.7), foi utilizada a metodologia de estimativa Simplex.

Os critérios usados para determinação do melhor ajuste dos modelos aos dados experimentais foram: o coeficiente de determinação (R^2) e o desvio percentual médio (P), calculado pela Equação 3.3.

$$P = \frac{100}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \left| \frac{X_{eq(\text{exp})} - X_{eq(\text{teor})}}{X_{eq(\text{exp})}} \right| \quad (3.3)$$

Em que:

$X_{eq(\text{exp})}$ - umidade de equilíbrio experimental, % base seca

$X_{eq(\text{teor})}$ - umidade de equilíbrio predito pelo modelo, % base seca

P - desvio percentual médio, %

n - número de dados experimentais

3.7. Planejamento experimental (fatorial 2²)

Para realização desse trabalho, foram definidas como variáveis de entrada (variáveis independentes) para verificação dos seus efeitos sobre a cinética de secagem a temperatura de 40, 50 e 60 °C e a velocidade do ar de 0,8, 1,3, e 1,8 m s⁻¹. Diferenças de temperaturas de 10°C e velocidades do ar de 0,5 m s⁻¹.

As variáveis resposta em estudo foram: a proteína na umidade de equilíbrio e a umidade nos tempos 120 para casca e 60 para coroa. Foram realizados 7 experimentos para cada variável fixa, ou seja:

- 7 experimentos para casca
- 7 experimentos para coroa

Para o estudo que abrange muitas variáveis, o método de planejamento experimental permite a realização, de forma organizada, de uma quantidade mínima de experimentos. Na Tabela. 3.1 encontram-se os valores reais e codificados para as variáveis no planejamento fatorial.

Tabela 3.1 - Valores reais e os níveis dos fatores estudados para o planejamento fatorial 2².

Variáveis	Níveis		
	-1	0	+1
Temperatura (°C)	40	50	60
Velocidade do ar (m s ⁻¹)	0,8	1,3	1,8

A matriz de planejamento fatorial 2², conforme Tabela 3.2., totaliza em 7 experimentos, sendo 4 ensaios distintos e mais 3 no ponto central, que são 3 ensaios idênticos com uma das finalidades de verificar a reprodução dos ensaios (verificação dos erros).

Tabela 3.2 – Matriz de planejamento fatorial completo 2²

Ensaio	Temperatura		Velocidade do ar	
	codificada	real (°C)	codificada	real (ms ⁻¹)
01	-1	40	-1	0,8
02	+1	60	-1	0,8
03	-1	40	+1	1,8
04	+1	60	+1	1,8
05	0	50	0	1,3
06	0	50	0	1,3
07	0	50	0	1,3

Para a elaboração dos modelos, foi utilizado o software Statistica 5.0, com a finalidade de assegurar a validade dos coeficientes dentro de um nível de confiança de 95%, através de análises estatísticas apropriadas. Após a análise estatística dos coeficientes, foi realizada uma análise de variância (ANOVA), que consiste na avaliação do coeficiente de determinação (R^2) e do teste F, verificando se o modelo apresenta um ajuste adequado aos dados experimentais.

3.8. Cinética de secagem

As etapas da cinética dos resíduos da casca e coroa enriquecidos foram realizadas de acordo com o fluxograma apresentado na Figura 3.4.

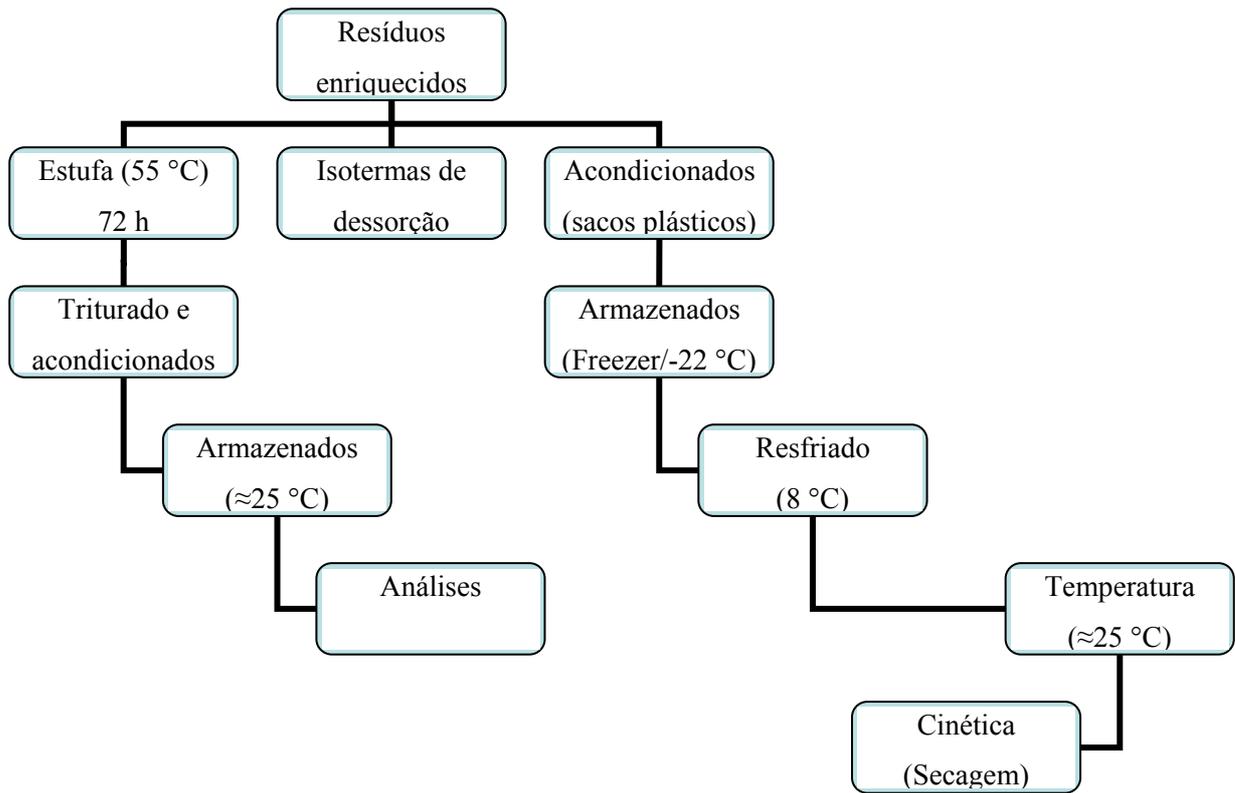


Figura 3.4 - Fluxograma das etapas para a cinética de secagem, caracterização e isotermas dos resíduos enriquecidos

Para os experimentos de secagem utilizou-se um secador convectivo (Figura 3.5) que se encontra no Laboratório de Transferência em Meios Porosos e Sistemas Particulados da Unidade Acadêmica de Engenharia Química da UFCG e consiste de um compressor radial que impulsiona o ar no interior da linha de alimentação do leito, rotâmetro, que mede a vazão do ar de secagem, resistências elétricas que aquecem o ar de secagem, válvulas para controlar a vazão na linha de alimentação, dois termopares do tipo Chromel–alumel, controlador de temperatura, chaves seletoras, milivoltímetro digital e câmara de secagem. A câmara de secagem é composta por uma coluna cilíndrica de 17,80 cm de diâmetro e 60 cm de altura. Possui uma seção inferior tronco-cônica que funciona como um distribuidor de ar, onde são colocadas esferas de vidro, empilhadas aleatoriamente, permitindo a uniformidade do ar de secagem em todo o leito. A câmara é isolada termicamente nas laterais com uma camada de amianto de 1,5 cm de espessura. Nas suas laterais existem furos, onde são colocados termopares para a medição da temperatura do ar de secagem. Existe também outro termopar que é inserido

na parte inferior da seção cônica, que serve para enviar sinal ao controlador de temperatura.

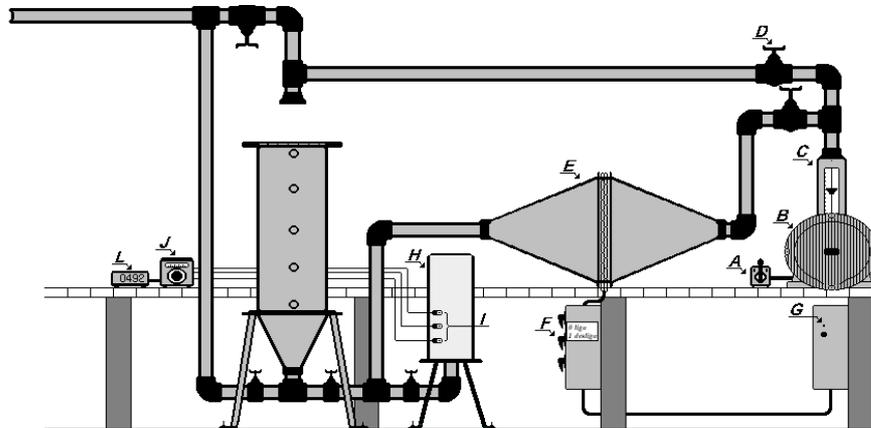


Figura 3.5. Diagrama do equipamento utilizado na realização da secagem convectiva.

LEGENDA:

- A. Chave do compressor
- B. Ventilador radial
- C. Medidor de vazão
- D. Válvula reguladora
- E. Aquecedor elétrico
- F. Chave das resistências
- G. Chave do sistema de controle
- H. Câmara de secagem
- I. Termopares
- J. Controlador de temperatura
- L. Milivoltímetro digital

Inicialmente foram determinadas as condições do ambiente como temperatura e umidade relativa do ar utilizando um higrômetro. A velocidade do ar de secagem foi verificada mediante um anemômetro de ventoinha. A secagem foi realizada em camada delgada, de aproximadamente 12 mm de espessura. As amostras dos resíduos enriquecidos com uma massa média de 115 g para casca enriquecida e 75 g para coroa enriquecida, foram colocadas em uma cesta de material metálico, em tela fina de aço inox. O conjunto (cesta + amostra) foi pesado manualmente e colocado na câmara de secagem, procedendo-se ao início da operação. A quantidade de água perdida durante o processo foi obtido por pesagens descontínuas das amostras e o esquema de pesagem

seguiu intervalos de 5, 10, e 30 min, até o final do processo. Os testes foram realizados até que as variações do peso das amostras fossem insignificantes. Em seguida as amostras foram colocadas em estufa, a uma temperatura de 105 °C por 24 h, para determinação da matéria seca.

3.8.1. Razão de umidade

Com os dados das pesagens das amostras durante a secagem foram calculadas as razões de umidade ou umidade adimensional (Equação 3.4).

$$RX = \frac{X - X_e}{X_o - X_e} \quad (3.4)$$

Em que:

RX – razão de umidade ou umidade adimensional

X – umidade “absoluta” (base seca)

X_o – umidade inicial (base seca)

X_e – umidade de equilíbrio (base seca)

3.8.2. Modelos matemáticos

Para o ajuste matemático das curvas de secagem dos resíduos, foram utilizadas as equações de Lewis, Page e Henderson & Pabis (Equações 2.23, 2.25 e 2.27), ajustadas com o auxílio do processador matemático STATISTICA, versão 5.0.

Os critérios usados para determinação do melhor ajuste dos modelos aos dados experimentais foram: o coeficiente de determinação (R^2) e o desvio quadrático médio (DQM) calculado pela Equação 3.5.

$$DQM = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (RX_{pre} - RX_{exp})^2} \quad (3.5)$$

Em que:

DQM - desvio quadrático médio

RX_{pre} - razão de umidade predito

RU_{exp} - razão de umidade experimental

N - numero de dados experimentais

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO – CARACTERIZAÇÃO E ISOTERMAS DE DESSORÇÃO

São apresentados neste capítulo os resultados e discussão da composição física e físico-química do resíduo do abacaxi *in natura*, composição físico-química do resíduo enriquecido, as isotermas de dessecamento dos resíduos *in natura* e enriquecidos e o calor de dessecamento dos resíduos *in natura* e enriquecidos.

4.1. Caracterização física e físico-química dos resíduos *in natura*

Estão apresentados na Tabela 4.1, os resultados médios da caracterização física dos frutos de abacaxi *in natura* com os respectivos desvios padrões.

Verificou-se que a massa média do fruto foi de 1.140,54g, estando dentro dos resultados encontrados por PEREIRA et al. (2009), que oscilou entre de 1.335 a 1.772g. Para CHITARRA & CHITARRA (2005), o peso considerado ótimo para os abacaxis da cv. Pérola está entre 1.000-1.400 g. O rendimento do fruto (polpa) corresponde a 78,34% (massa/massa), incluindo o talo e apresenta um rendimento de 14,12% (massa/massa) e 7,54 % (massa/massa) para casca e coroa, respectivamente, ou seja, um rendimento de 21,66% (massa/massa) de resíduo.

Tabela 4.1 – Caracterização Física do fruto de abacaxi cultivar pérola

Análises	Valor médio*	Desvio Padrão
Massa do fruto (g)	1.140,54	±22,21
Massa da casca (g)	161,05	±11,64
Massa da coroa (g)	86,04	±11,64
Comprimento do fruto (cm)	39,33	±2,08
Comprimento do fruto sem coroa (cm)	21,00	±1,00
Diâmetro (cm)	10,6	±1,18

*média de seis amostras

Os valores obtidos neste trabalho para o comprimento do fruto com coroa e comprimento do fruto sem coroa foram de 39,33 e 18,41 cm, respectivamente (Tabela 4.1). PEREIRA et al. (2009) encontraram comprimentos de frutos de abacaxi ‘Pérola’

de 35,4 a 43,2 cm e 15,8 a 20,3 cm, com coroa e comprimento do fruto sem coroa, respectivamente.

Para o diâmetro do fruto, foi encontrado valor médio de 10,6 cm (Tabela 4.1) que estão abaixo dos encontrados por CHITARRA & CHITARRA (2005) para a ‘Pérola’, que foi de 11,2 –11,3 cm.

Provavelmente, a produção de frutos maiores esteja relacionada com o manejo utilizado pelos produtores e pela alta disponibilidade de luminosidade, fazendo com que as plantas tenham maior massa foliar e, conseqüentemente, frutos maiores.

Na Tabela 4.2 são apresentados os valores médios das análises físico-químicas da casca e coroa do abacaxi *in natura* com os respectivos desvios padrões, na qual os parâmetros são expressos em base seca.

Tabela 4.2 – Caracterização físico-química do resíduo do abacaxi *in natura*

Parâmetros	Casca	Coroa
Umidade (Massa seca)	8,91±1,06	10,92±0,91
Matéria seca (%)	91,09±1,07	89,08±0,91
pH	4,97±0,20	5,10±0,02
Cinzas (%)	4,07±0,40	1,41±0,43
Matéria orgânica (%)	95,93±0,40	98,58±0,43
Pectina (%)	0,79±0,01	-----
Acidez total titulável (% ácido cítrico)	7,77±0,79	2,00±0,70
Sólidos solúveis (°Brix)	10,56±0,01	6,21±0,02
Açúcares redutores totais (%)	3,64±0,47	2,06±0,43
FDN (%)	44,83±0,33	55,07±0,86
FDA (%)	17,66±0,18	27,28±0,16
Hemicelulose	27,17±0,14	27,78±0,70
Proteína bruta (%)	7,61±0,64	7,06±0,64

Os valores médios encontrados da umidade foram 8,91% para casca e 10,92% para coroa de abacaxi. Quanto ao resultado médio da matéria seca foi de 91,09% e 89,08%, para casca e coroa, respectivamente. O pH apresentou um valor de 4,97 para casca e 5,10 para coroa. Segundo HOLANDA et al. (1997), esse valor não deve ser inferior a 3,5 para processos de fermentação semi-sólida utilizando-se microrganismos, pois poderá causar prejuízo e conseqüentemente redução da eficiência da levedura *Saccharomyces cerevisiae*.

O percentual de cinzas encontrado na coroa foi de 1,41% enquanto na casca foi de 4,07%, valor superior ao citado por COSTA et al. (2007) que foi de 2,03%. O teor de matéria orgânica encontrado foi de 95,93 e 98,93% para a casca e coroa do abacaxi, respectivamente. Quanto a pectina o valor encontrado foi de 0,79% para casca e para coroa não foi encontrado.

Analisando o teor de acidez conclui-se que a casca é mais ácida que a coroa, isto é fato, pois essa parte do fruto tem influência direta da polpa que apresenta alta concentração de acidez. Quanto ao teor de sólidos solúveis totais (SST) da casca do abacaxi encontrado foi de 10,5 °Brix, já o da coroa do foi de 6,21°Brix. OLIVEIRA (2007) encontrou valor similar para casca e inferior para coroa, 5,0°Brix.

Os açúcares redutores totais são os açúcares solúveis presentes no material, compostos por glicose, frutose e sacarose. Como se pode verificar o teor de açúcares nos resíduos é alto, 3,64% para casca e 2,06% para coroa de abacaxi. Para o enriquecimento protéico em meio sólido o microrganismo utilizado foi a *Saccharomyces cerevisiae* que metaboliza carboidratos solúveis. Com isso pode-se afirmar que este material tem potencial para o processo de enriquecimento protéico. O teor de proteína bruta da casca foi de 7,61%, concordando com os valores apresentados por LOUSADA et al. (2006) e para coroa foi de 7,06%.

Quanto aos constituintes da parede celular, dos resíduos estudados, vistos na Tabela 4.2, apresentaram 44,83% em fibra detergente neutro (FDN) e 17,66%, fibra em detergente ácido (FDA) e 27,17% de hemicelulose para casca, valores inferiores ao encontrado por LOUSADA et al. (2006) e 55,07%. Para a coroa os valores de FDN, FDA e hemicelulose foram 55,07%, 27,28% e 27,78%, respectivamente.

As diferenças apresentadas entre os valores obtidos neste trabalho e os da literatura são perfeitamente compreensíveis, pois quando se trabalha com material biológico, a sua composição centesimal é função de diversos fatores, tais como: época do ano da colheita, região da qual o produto é oriundo, ambiente, natureza do substrato de cultivo, dentre outros.

4.2. Caracterização físico-química dos resíduos enriquecidos

Os resultados obtidos para a caracterização físico-química para casca e coroa do abacaxi enriquecido encontram-se na Tabela 4.3.

A partir dos dados apresentados na Tabela 4.3, pode-se perceber que o teor de matéria seca presente no resíduo de abacaxi enriquecido apresenta um valor médio de 90,27%, para casca e 91,55% para coroa. Segundo as normas de alimentação proposta pela NRC (1989) recomenda-se que o teor de matéria seca apresentada na alimentação do rebanho bovino apresente um percentual em torno de 16,5%. Dessa forma, em termos de matéria seca do resíduo de abacaxi enriquecido apresenta uma quantidade suficiente para suprir a necessidade desse parâmetro na alimentação animal.

O teor de cinzas da casca e coroa apresentado neste trabalho foi discretamente menor e o teor de matéria orgânica maior, quando comparados com os valores reportados por OLIVEIRA (2007), que fez também a caracterização bromatológica do resíduo de abacaxi.

Tabela 4.3 – Caracterização físico-química do resíduo do abacaxi enriquecido

Parâmetros	Casca	Coroa
Matéria seca (%)	90,27±1,16%	91,55±0,99%
pH	5,84±0,01	6,11±0,02
Cinzas (%)	6,50±0,13%	4,67±0,01%
Matéria orgânica (%)	93,50±0,13%	95,33±0,01%
ART (%)	0,49±0,01	0,37±0,01%
FDN (%)	57,63±0,33	60,49±1,43
FDA (%)	22,04±0,64	28,99±2,70
Hemicelulose	35,59±0,30	31,49±1,27
Proteína bruta (%)	20,21±0,63	20,66±0,44

Os valores de FDN e FDA, encontrados nesse trabalho para a casca de abacaxi enriquecido, foram de 57,63 e 22,04 % e para coroa de abacaxi enriquecido foram de 60,49 e 28,99%, respectivamente, valores superiores ao encontrado para o resíduo *in natura*. Segundo FIGUEREDO (1996), os alimentos com percentuais de FDN acima de 35% garantem teor normal de gordura do leite. E segundo as recomendações do NRC (1989), para alimentação de vacas em lactação o valor exigido é no mínimo de 21% de FDA, com pelo menos 75% de FDN proveniente de volumoso. O teor de hemicelulose

para casca foi de 35,59%, enquanto para coroa do abacaxi foi de 31,49%. Foi observado um aumento nos parâmetros FDN, FDA e hemicelulose em relação aos dos resíduos *in natura* (Tabela 4.2).

A quantidade de açúcares totais encontrada na casca enriquecida foi de 0,49% e 0,37% na coroa de abacaxi enriquecido, o que se pode considerar que 86,5 e 82% do açúcar contido na casca e coroa *in natura*, respectivamente, foi metabolizado.

O teor de proteína médio foi de 20,21% para casca e 20,66% para coroa, conforme Tabela 4.3 estando, portanto dentro das normas definidas pela NRC (1989), para vacas em lactação, que precisam receber um teor de proteína diária entre 20 a 24%.

Os resultados dos experimentos realizados para o enriquecimento protéico do resíduo do abacaxi (casca e coroa) se encontram na Tabela 4.4

Tabela 4.4 - Dados do enriquecimento protéico do resíduo do abacaxi

Resíduos	PBin (%)	PBe (%)	AP (%)
Casca	7,61	20,21	165,57
Coroa	7,06	20,66	192,63

Mediante os dados da Tabela 4.4 verifica-se que após o enriquecimento protéico, o substrato aumentou seu teor de proteína em 165,57%, para casca e 192,6 % para coroa. Esses valores são superiores aos valores encontrados por OLIVEIRA (2007).

4.3. Isotermas de dessorção de umidade dos resíduos

4.3.1. Isotermas de dessorção de umidade dos resíduos *in natura*

Estão representadas na Figura 4.1 e 4.2 as isotermas de dessorção da casca e coroa de abacaxi *in natura* representadas na forma X_{eq} versus a_w para as temperaturas de 25, 30, 35 e 40 °C.

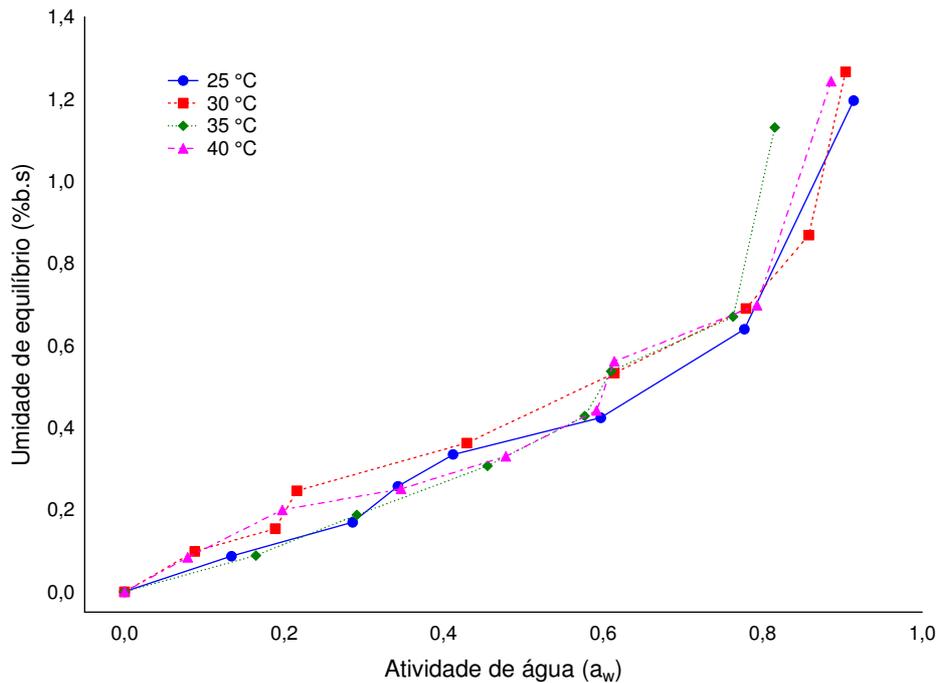


Figura 4.1. Isotermas de dessorção de umidade da casca de abacaxi *in natura*

Verifica-se que a umidade de equilíbrio diminuiu (X_{eq}) com a redução da atividade de água (a_w) para as temperaturas estudadas, resultado que concorda com o que ocorre para a maioria dos produtos higroscópicos. Este comportamento é similar ao reportado por PARK et al. (2001b) ao estudarem o comportamento da umidade de equilíbrio em pêra *in natura*, em função da atividade de água. Não foi observado um comportamento definido em relação à temperatura para esses resíduos, ou seja, o conteúdo de umidade de equilíbrio varia com as mudanças de temperatura. Estes resultados encontraram apoio no trabalho realizado por SILVA et al. (2002), quando verificaram que a polpa de manga entra em equilíbrio higroscópico com valores de umidade de equilíbrio distintos, dependendo da temperatura a que foram submetidas.

Observando-se os dados experimentais obtidos da atividade de água (a_w) com suas respectivas umidades de equilíbrio (X_{eq}) (Figura 4.2) em diferentes temperaturas, verifica-se que as umidades de equilíbrio (X_{eq}) para coroa de abacaxi *in natura* aumentam com o aumento da atividade de água (a_w), resultado que concorda com o que ocorre para a maioria dos produtos higroscópicos, tendo sido observado por OLIVEIRA et al. (2009), ao avaliarem isotermas de dessorção da coroa de abacaxi *in natura* nas mesmas temperaturas estudadas nesse trabalho. Os pontos experimentais das isotermas de dessorção para coroa de abacaxi estão praticamente alinhados nas quatro

temperaturas estudadas, verifica-se então o pouco efeito da temperatura sobre as quatro isotermas, podendo ser justificado pela pequena variação nos níveis de temperatura estudada (25 a 40 °C). Comportamento similar foi encontrado por OLIVEIRA et al. (2006), ao estudarem as isotermas de dessecção da casca do maracujá (*Passiflora edulis* Sims). Verifica-se que as curvas apresentam comportamento típico de isotermas do tipo III, de acordo com classificação de BRUNAUER et al. (1938).

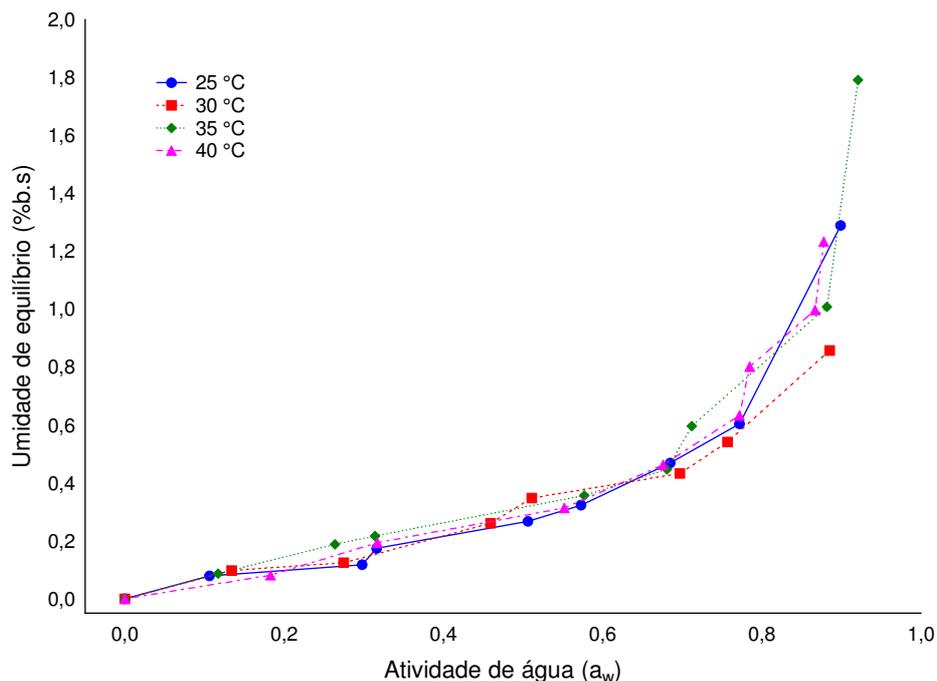


Figura 4.2. Isotermas de dessecção de umidade da coroa de abacaxi *in natura*

Tem-se na Tabela 4.5 os valores dos parâmetros dos modelos de GAB e BET linearizado ajustados as isotermas de dessecção de umidade da casca de abacaxi *in natura*, os coeficientes de determinação (R^2) e os desvios percentuais médios (P), nas temperaturas de 25, 30, 35 e 40°C.

Conforme os resultados apresentados na Tabela 4.5, verifica-se que o modelo de GAB representou com mais precisão os dados experimentais para casca de abacaxi, apresentando R^2 acima de 98% para todas as temperaturas e o menor valor para do desvio percentual médio (P), com exceção da temperatura de 35 °C que apresentou um valor menor de P para o modelo de BET linearizado. Dessa forma, utilizou-se neste

trabalho a equação de GAB para ajustar as isotermas de dessecção da casca de abacaxi *in natura* (Figura 4.3).

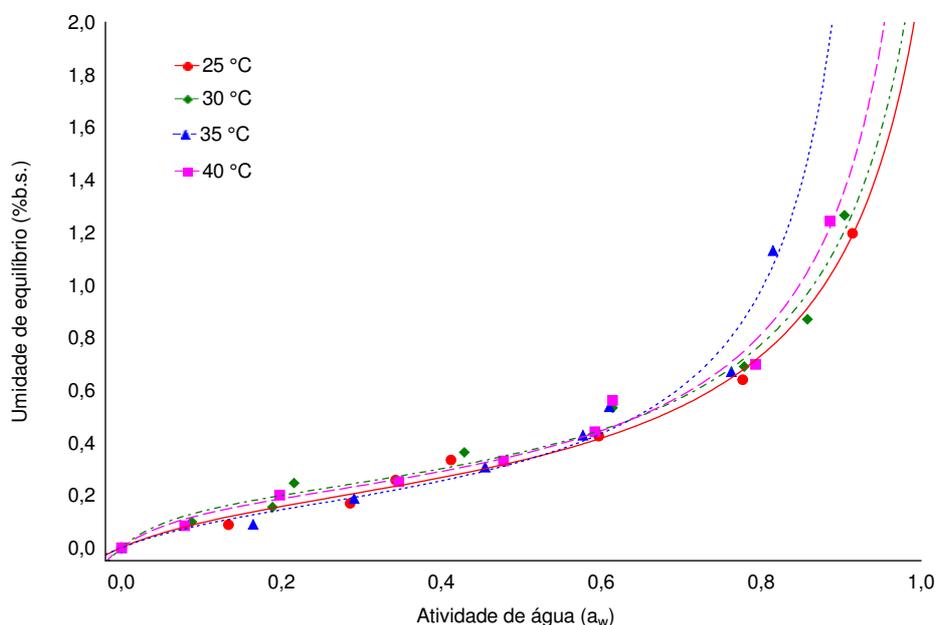


Figura 4.3. Isotermas de dessecção de umidade da casca de abacaxi *in natura*, ajuste pelo modelo de GAB

De acordo ainda com os resultados da Tabela 4.5, observa-se que o conteúdo de umidade da camada monomolecular (X_m) do modelo de GAB apresentou valores próximos nas diferentes temperaturas, apresentando um valor médio de 0,2051. Esse valor de X_m encontra-se acima do valor determinado para alimentos por LABUZA et al. (1985), que indicam como valor máximo para X_m de 10% (b.s.). Em relação ao parâmetro C não se observa uma tendência nos seus respectivos valores em relação às temperaturas estudadas. Quanto ao parâmetro K do modelo de GAB, que representa o fator de correlação das propriedades das moléculas na multicamada com relação ao volume do líquido, observam-se valores em torno de um (1). Tem-se o aumento desse parâmetro com o aumento da temperatura, para faixa de temperatura entre 25 a 35 °C.

Tabela 4.5. Parâmetros de ajuste dos modelos das isotermas de dessorção da casca de abacaxi *in natura*, coeficientes de determinação (R^2) e desvios percentuais médios (P)

	Temperatura (°C)	X_m	C	K	R^2	P (%)
GAB	25	0,2152	6,7166	0,9019	0,9962	13,05
	30	0,2146	13,9128	0,9120	0,9906	14,71
	35	0,1841	6,3718	1,0231	0,9831	13,72
	40	0,2064	11,7087	0,9406	0,9912	9,71
	Temperatura (°C)	X_m	C		R^2	P (%)
BET Linearizado	25	0,1109	13,3569		0,9596	28,11
	30	0,1289	8,9867		0,9684	22,81
	35	0,2060	4,4044		0,9827	11,09
	40	0,1475	8,0289		0,9786	11,64

Na Tabela 4.6, encontram-se os parâmetros obtidos por regressão não-linear para os modelos GAB e BET Linearizado de ajuste das isotermas de dessorção da coroa de abacaxi em cada temperatura estudada, assim como os coeficientes de determinação (R^2) e desvio percentual médio (P).

Verificou-se que GAB foi o modelo que apresentou um bom ajuste para todas as isotermas estudadas. Este modelo é amplamente utilizado, para descrever o comportamento de isotermas de alimentos por diversos pesquisadores: TELIS et al. (2000) obtiveram um bom ajuste de GAB aos dados experimentais de isotermas de casca e polpa de uva, para temperaturas de 20 a 70 °C e atividades de água entre 0,02 e 0,85 e WAUGHON & PENA (2007) obtiveram bons ajustes do modelo GAB aos dados de dessorção de umidade das fibras residuais do abacaxi, após secagem. Os valores referentes ao conteúdo de umidade da monocamada molecular (X_m), do modelo de GAB, flutuaram aleatoriamente dentro da faixa de temperatura estudada (Tabela 4.6). Esta mesma tendência foi obtida por GHODAKE et al. (2007) ao estudarem as isotermas de adsorção do chá preto, nas temperaturas de 20, 30 e 40 °C.

O valor de X_m tem especial importância uma vez que, conforme MISHRA et al. (1996), a umidade na monocamada determina o teor de umidade para uma armazenagem segura, na qual o material tem estabilidade máxima.

Em relação à constante de sorção C do modelo de GAB, que é função das interações entre os sítios ativos do produto e as moléculas de água, observa-se que os valores são próximos para as temperaturas de 25 e 30°C, o mesmo acontecendo para as temperaturas 35 e 40 °C. O valor de K ficou praticamente constante, isto é, em torno de 1 com exceção da temperatura de 30 °C.

Tabela 4.6. Parâmetros de ajuste dos modelos das isotermas de dessorção da coroa de abacaxi *in natura*, coeficientes de determinação (R^2) e desvios percentuais médios (P)

	Temperatura (°C)	X_m	C	K	R^2	P (%)
GAB	25	0,1649	4,6616	0,9740	0,9905	8,12
	30	0,2036	4,7623	0,8755	0,9955	10,88
	35	0,1382	3,8618	0,9994	0,9908	15,38
	40	0,1920	3,4945	0,9608	0,9918	9,49
	Temperatura (°C)	X_m	C	R^2	P (%)	
BET Linearizado	25	0,1344	13,064	0,9968	10,80	
	30	0,1101	8,5724	0,9599	8,89	
	35	0,1373	40,8746	0,9908	15,38	
	40	0,1493	9,8414	0,9892	12,32	

A Figura 4.4 apresenta as isotermas de dessorção da coroa de abacaxi *in natura* nas temperaturas de 25, 30, 35 e 40 °C, respectivamente, ajustadas pelo modelo de GAB.

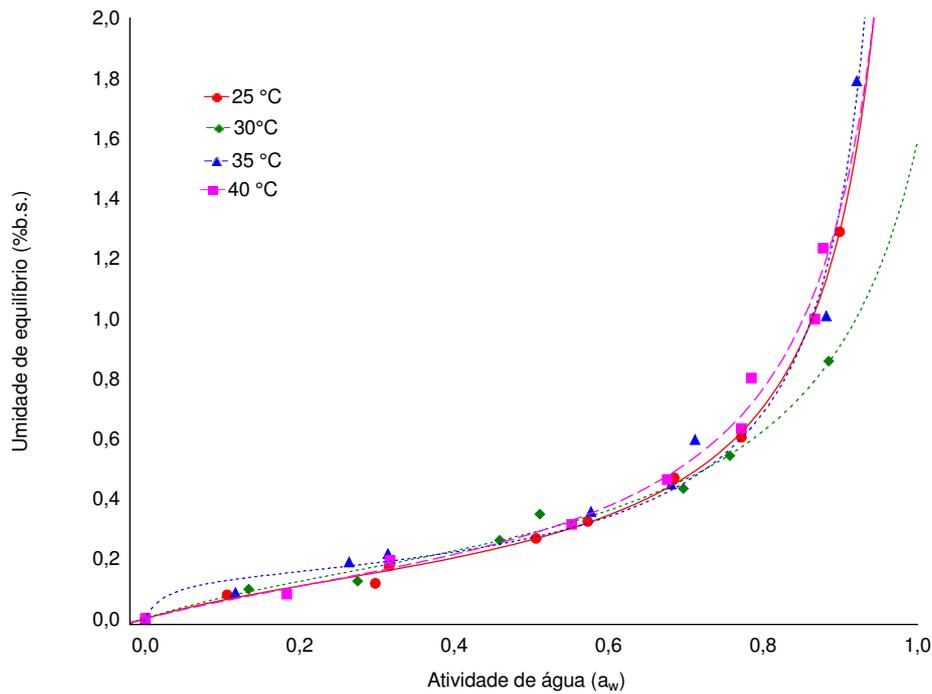


Figura 4.4. Isotermas de dessecção de umidade da coroa de abacaxi *in natura*, ajuste pelo modelo de GAB

4.3.2. Isotermas de dessecção de umidade dos resíduos enriquecidos

Os dados obtidos experimentalmente, referentes à umidade de equilíbrio (X_{eq}) da casca e coroa de abacaxi enriquecidos e seus respectivos valores da atividade de água (a_w) para as temperaturas em estudo, encontram-se representados nas Figuras 4.5 e 4.6.

Em geral, a umidade de equilíbrio aumenta com o aumento da temperatura para a casca de abacaxi enriquecida (Figura 4.5). Comportamento similar ao reportado por FIORENTIN et al. (2010) ao estudarem as isotermas de equilíbrio da casca do bagaço da laranja, nas temperaturas de 25 a 45 °C e contrário ao reportado por MOURA et al. (2004) ao determinarem as isotermas de dessecção em polpa de caju. Para coroa não foi verificado um comportamento definido em relação à temperatura, ou seja, o conteúdo de umidade de equilíbrio varia com as mudanças de temperatura. GOUVEIA et al. (2004) encontraram o mesmo comportamento ao estudarem, experimentalmente, as isotermas de dessecção de polpa de banana a 20, 30 e 40 °C, utilizando-se do método estático indireto.

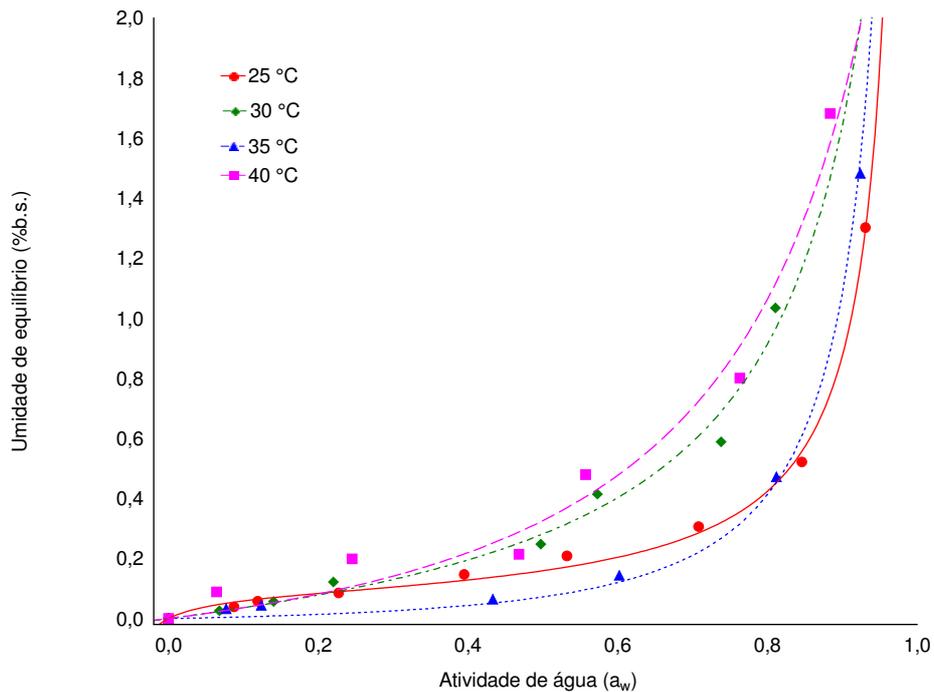


Figura 4.5. Isotermas de dessorção de umidade da casca de abacaxi enriquecido

Verificam-se nas Figuras 4.5 e 4.6, que os pontos experimentais das isotermas de dessorção dos resíduos enriquecidos estão muito próximos nas quatro temperaturas estudadas; verificou-se, desta forma, pouco efeito da temperatura sobre as isotermas, fato que pode ser justificado pela pequena variação nos níveis de temperatura estudada (25, 30, 35 e 40 °C); essas temperaturas se aproximam da temperatura média anual encontrada no semi-árido da Região Nordeste do Brasil.

Assim como foi observado para as curvas de dessorção da coroa *in natura*, as umidades de equilíbrio dos resíduos enriquecidos aumentam com o aumento da atividade de água (a_w) e as formas das isotermas obtidas nas temperaturas estudadas seguem o tipo III de classificação de BET, em forma de J (Figura 4.6). Essas formas são típicas de produtos com altas concentrações de açúcares e solutos e que apresentam pouca adsorção por capilaridade (PARK & NOGUEIRA, 1992), que ocorre para a maioria dos produtos higroscópicos como observado por MOURA et al. (2004), embora a quantidade de açúcar encontrada na coroa seja inferior ao da casca.

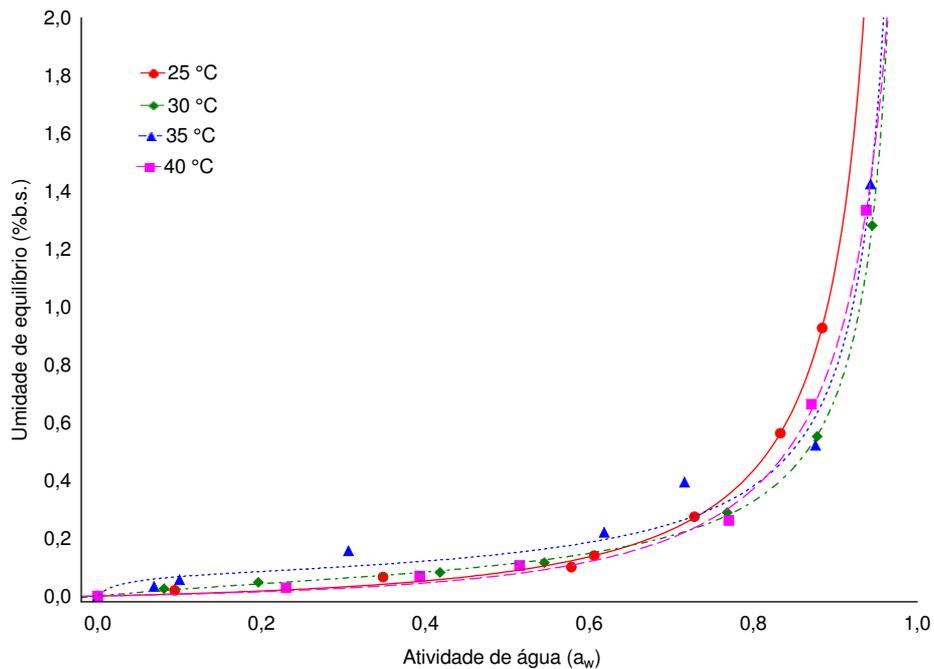


Figura 4.6. Isotermas de dessorção de umidade da coroa de abacaxi enriquecido

A Tabela 4.7 e 4.8 contêm os valores dos parâmetros estimados, obtidos pela regressão não linear para os modelos de GAB e BET, para o ajuste das isotermas de dessorção da casca e coroa enriquecidas em cada uma das temperaturas de 25, 30, 35 e 40 °C; bem como, os coeficientes de determinação (R^2) e os desvios percentuais médios (P).

Verifica-se na Tabela 4.7 que os dois modelos testados de BET e GAB (Figura 4.7) descreveram satisfatoriamente o comportamento das isotermas de dessorção de umidade da casca de abacaxi enriquecida para cada temperatura estudada, uma vez que os valores dos coeficientes de determinação (R^2), foram superiores a 0,98%, com o modelo de GAB apresentando uma pequena superioridade em relação a BET, por apresentar valores para os coeficientes de determinação (R^2) sutilmente maiores. No entanto os valores dos desvios percentuais médios (P) são considerados altos para os dois modelos testados uma vez que para AGUERRE et al. (1989) ajustes com desvios percentuais médios inferiores a 10% indicam um razoável ajuste dos modelos aos dados experimentais e ainda, de acordo com LABUZA (1985), o ajuste é considerado excelente para valores inferiores a 5%.

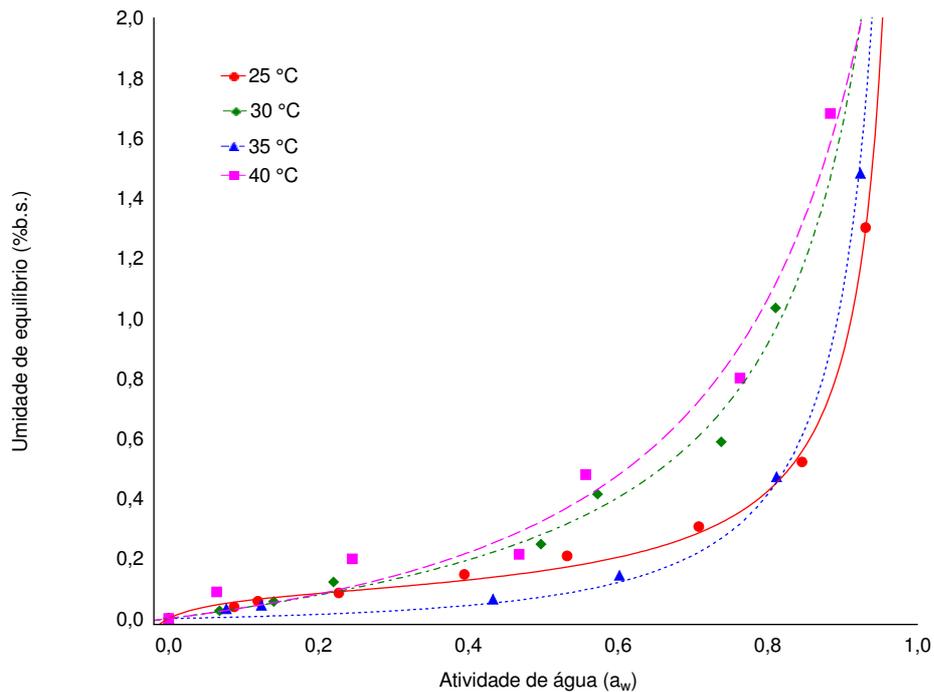


Figura 4.7. Isotermas de desorção de umidade da casca de abacaxi enriquecida, ajuste pelo modelo de GAB

Excetuando-se a temperatura de 35 °C, os valores de X_m aumentaram com o aumento da temperatura para os dois modelos utilizados. OLIVEIRA et al. (2009) observaram esta mesma tendência para temperaturas de 25 e 30 °C no estudo do processo de desorção de umidade em casca de abacaxi *in natura* e utilizaram o modelo de GAB, entre outros, para representar as isotermas. AL-MUHTASEB et al. (2004), MCLAUGHLIN & MAGEE (1998) relataram a diminuição dos valores do conteúdo de umidade da monocamada com o aumento da temperatura, afirmando que esta tendência pode ser explicada pela variação do estado de agitação, distância e atração entre as moléculas de água com a variação da temperatura e PALIPANE & DRISCOLL (1992) explicaram que com o aumento da temperatura algumas moléculas de água podem romper fora de seus sítios de sorção, causando então um abaixamento dos valores de X_m , ao invés de uma elevação, quando há um aumento de temperatura.

Tabela 4.7. Parâmetros de ajuste dos modelos das isotermas de dessorção da casca de abacaxi enriquecido, coeficientes de determinação (R^2) e desvios percentuais médios (P)

	Temperatura	X_m	C	K	R^2	P (%)
	(°C)					
GAB	25	0,0846	14,8398	1,0043	0,9986	12,55
	30	0,2806	1,2564	0,9446	0,9972	11,59
	35	0,1097	0,7479	1,0092	0,9998	23,95
	40	0,5338	0,6924	0,8668	0,9946	27,47
	Temperatura	X_m	C	n	R^2	P (%)
	(°C)					
BET	25	0,0843	11,2971	404,48	0,9984	10,15
	30	0,2091	2,0353	29,047	0,9977	10,40
	35	0,1449	0,3315	613,62	0,9995	30,44
	40	0,2279	3,2193	24,269	0,9944	21,39

Assim como para as isotermas de dessorção da casca enriquecida os modelos de BET e GAB (Figura 4.8) descreveram com precisão as isotermas de dessorção para a atividade de água da coroa enriquecida com valores de coeficiente de determinação variando de 98,94 a 99,98%.

De acordo com os resultados da Tabela 4.8 constata-se que o valor do parâmetro da equação de GAB, X_m , em que este representa a umidade na monocamada do material, não apresentou tendência definida em relação à temperatura, para coroa de abacaxi enriquecida. Resultado semelhante ocorreu na determinação de umidade em monocamada do referido modelo, para as isotermas de dessorção da polpa de goiaba (ARAÚJO et al., 2002). O mesmo comportamento aconteceu com a constante C. Em relação ao parâmetro k, este ficou em torno de 1.

Tabela 4.8. Parâmetros de ajuste dos modelos das isotermas de dessorção da coroa de abacaxi enriquecido, coeficientes de determinação (R^2) e desvios percentuais médios (P)

	Temperatura	X_m	C	K	R^2	P (%)
	(°C)					
GAB	25	0,1204	0,5105	1,0115	0,9991	18,36
	30	0,0692	3,8747	1,0018	0,9998	7,63
	35	0,0753	36,340	1,0039	0,9899	28,25
	40	0,1419	0,3796	0,9752	0,9986	19,5
	Temperatura	X_m	C	n	R^2	P (%)
	(°C)					
BET	25	0,1431	0,3946	242,4	0,9991	19,25
	30	0,0715	3,1767	613,2	0,9997	9,35
	35	0,0798	2,6995	582,6	0,9894	26,56
	40	0,1077	0,5315	49,93	0,9989	17,87

Observa-se que os valores do conteúdo de umidade na monocamada molecular (X_m) das equações de BET e GAB são próximos para casca e coroa enriquecida (Tabelas 4.7 e 4.8). Estes resultados foram semelhantes aos encontrados por PENA et al. (2000) quando estudaram a aplicação de modelos matemáticos bi e tri-paramétricos na predição de isotermas de adsorção de umidade do guaraná (*Paullinia cupana*) em pó, nas temperaturas de 15, 25 e 35 °C.

Com relação aos valores de C, para casca e coroa de abacaxi enriquecidos (Tabela 4.7 e 4.8), os modelos de BET e GAB apresentaram exatamente o mesmo comportamento, ou seja, não foi verificado nenhuma tendência dependente da variação de temperatura. SAMAPUNDO et al. (2006) também não encontraram nenhuma relação dependente de C com a temperatura, para o modelo de GAB. O parâmetro K do modelo de GAB apresentou valores praticamente constantes e em torno de 1, para os dois resíduos enriquecidos, exceto para casca enriquecida na temperatura de 40 °C que apresentou um valor de 0,8668.

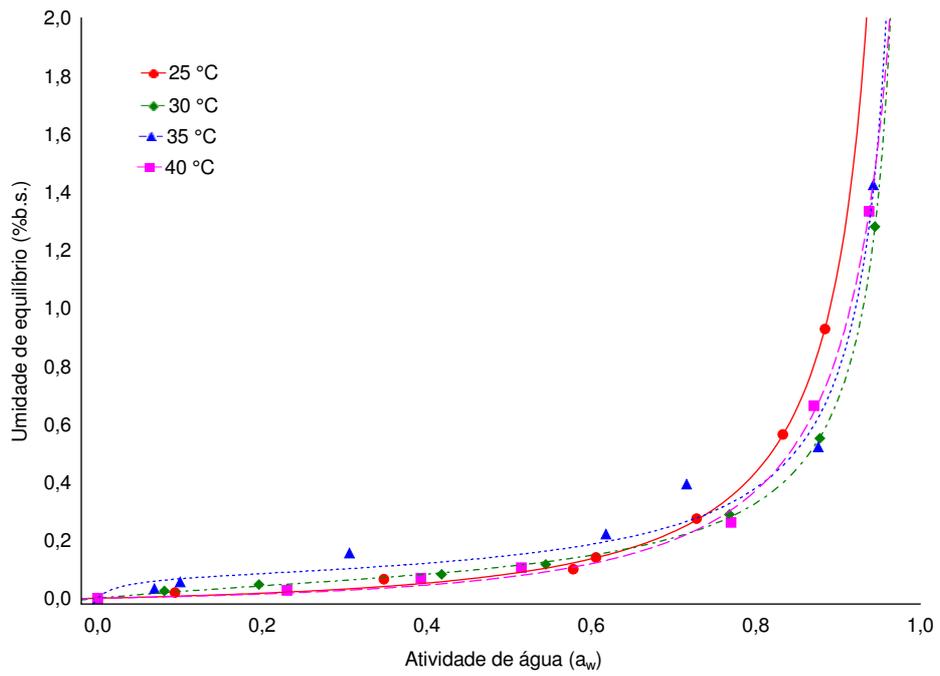


Figura 4.8. Isotermas de dessecção de umidade da coroa de abacaxi enriquecida, ajuste pelo modelo de GAB

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO - CINÉTICA DE SECAGEM

São apresentados neste capítulo os resultados e discussão do estudo da cinética de secagem realizado de acordo com o planejamento fatorial simples 2^2 , no qual foram realizados 7 ensaios a diferentes temperaturas e velocidades do ar, tanto para casca como para coroa enriquecidas, conforme Tabela 3.2.

5.1. Cinética de secagem da casca de abacaxi enriquecida

Os valores médios de temperatura e umidade relativa do ar ambiente, os parâmetros de secagem utilizados nos testes experimentais e o tempo de secagem para casca de abacaxi enriquecida, encontram-se na Tabela 5.1.

Constata-se na Tabela 5.1 que o tempo de secagem diminuiu em função do aumento da temperatura e manteve-se constante em relação às variações na velocidade do ar de secagem para a mesma temperatura.

Tabela 5.1. Dados das condições e tempo de secagem da casca de abacaxi enriquecida

Ensaio	Temperatura do ar de secagem (°C)	Velocidade do ar de secagem (m.s ⁻¹)	Temperatura do ar ambiente (°C)	Umidade relativa do ar ambiente (%)	t (min)
1	40	0,8	31,8	47,4	210
2	60	0,8	34,1	48,3	150
3	40	1,8	32,2	53,1	210
4	60	1,8	33,1	59,6	150
5	50	1,3	32,9	53,5	180
6	50	1,3	32,9	66,0	180
7	50	1,3	32,1	67,2	180

Na Figura 5.1 estão representadas as cinéticas de secagem da casca de abacaxi enriquecida, nas temperaturas e velocidade definidas no planejamento fatorial completo 2^2 (Tabela 3.2), na forma do adimensional de umidade em função do tempo. O aumento da temperatura de secagem acelera o processo, fazendo com que a amostra sofra redução de umidade mais rapidamente no início da secagem e conseqüentemente menor tempo de secagem é requerido, como é apresentado na Figura 5.1. Observa-se que a perda de umidade é mais rápida no início do processo, com tempos aproximados de

secagem de 3,5 horas para a temperatura de 40°C nas velocidades estudadas (0,8 e 1,8 m.s⁻¹), de 3 para a temperatura de 50°C na velocidade de 1,3 m.s⁻¹ e 2,5 para temperatura de 60 °C nas velocidades de 0,8 e 1,8 ms⁻¹.

Verifica-se que a temperatura é a variável de maior influência no processo, visto que para mesmas temperaturas, porém velocidades diferentes têm-se o mesmo tempo de secagem. Mesmo comportamento foi observado por FIORENTIN et al. (2010) ao avaliarem as características cinéticas envolvidas no processo de secagem do bagaço de laranja. GOUVEIA et al. (2002) utilizaram o planejamento experimental na avaliação da cinética de secagem de caju, para a identificação dos efeitos da temperatura e velocidade do ar de secagem e verificaram que a temperatura foi o fator que exerceu maior influência no processo. Conclui-se então que a velocidade do ar de secagem não apresenta efeito sobre as curvas de secagem, nos níveis estudados, o que sugere que a resistência externa não influencia nas condições de operações utilizadas e que o controle da secagem depende da difusão interna do produto.

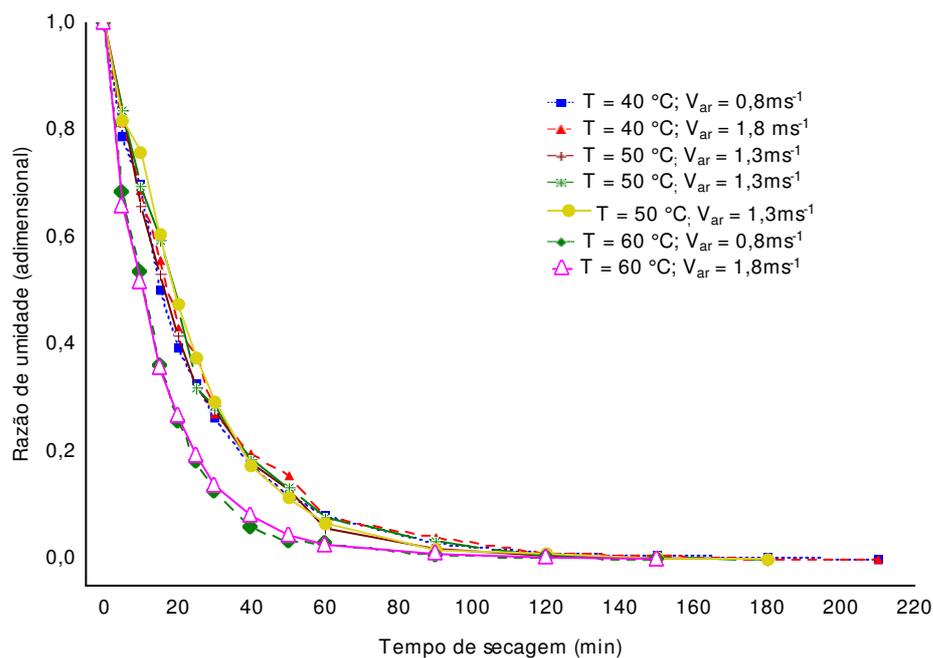


Figura 5.1. Curvas de secagem da casca de abacaxi enriquecida nas temperaturas e velocidades de secagem estudada

O cálculo dos coeficientes de difusividade da água em cada temperatura de secagem através da solução analítica da equação de difusão, não foi possível, para casca

de abacaxi enriquecida, considerando-se que o material, não apresenta uma geometria definida, como se observa na Figura 5.2.



Figura 5.2. Geometria da casca de abacaxi enriquecida

Os dados experimentais das curvas de secagem para casca de abacaxi enriquecida foram então descritos pelos modelos empíricos de Page, Henderson & Pabis e Lewis, através de regressão não-linear.

Na Tabela 5.2 encontram-se os valores dos parâmetros dos modelos Page, Henderson & Pabis e Lewis ajustados aos dados experimentais das cinéticas de secagem da casca de abacaxi enriquecido nas temperaturas e velocidades estudadas, os coeficientes de determinação (R^2) e os desvios quadráticos médios (DQM).

Verifica-se que, dentre os modelos testados, o de Page apresentou os maiores valores de R^2 e os menores valores de DQM para todas as temperaturas, ajustando-se melhor aos dados observados. SILVA et al. (2004) também encontraram maiores valores de R^2 ao ajustarem o modelo de Page a dados de secagem em camada fina da palma forrageira, nas temperaturas de 40 e 50 °C. Observa-se na Tabela 5.1 que todos os modelos mostraram valores de R^2 superiores a 0,99 e valores de DQM inferiores a 0,03 podendo ser utilizados na estimativa das curvas de secagem da casca de abacaxi enriquecido.

Tabela 5.2. Parâmetros estimados pela equação de Page, Henderson & Pabis e Lewis para os dados de secagem, coeficiente de determinação e erro relativo médio para casca de abacaxi enriquecida

Modelo	Ensaio	T (°C)	v _{ar} (m.s ⁻¹)	Parâmetros		R ²	DQM
				k (s ⁻ⁿ)	n		
Page	1	40	0,8	0,044	1,003	0,998	0,017
	2	60	0,8	0,064	0,993	0,999	0,011
	3	40	1,8	0,039	1,012	0,999	0,013
	4	60	1,8	0,089	0,901	0,999	0,011
	5	50	1,3	0,038	1,043	0,999	0,010
	6	50	1,3	0,029	1,103	0,998	0,017
	7	50	1,3	0,020	1,199	0,998	0,017
Modelo	Ensaio	T (°C)	v _{ar} (m.s ⁻¹)	Parâmetros		R ²	DQM
				k (s ⁻ⁿ)	a		
Henderson & Pabis	1	40	0,8	0,044	1,002	0,998	0,017
	2	60	0,8	0,068	0,995	0,999	0,011
	3	40	1,8	0,041	1,004	0,999	0,013
	4	60	1,8	0,066	0,977	0,999	0,015
	5	50	1,3	0,044	1,014	0,999	0,011
	6	50	1,3	0,041	1,023	0,998	0,021
	7	50	1,3	0,044b	1,033	0,996	0,028
Modelo	Ensaio	T (°C)	v _{ar} (m.s ⁻¹)	Parâmetros		R ²	DQM
				k (s ⁻ⁿ)			
Lewis	1	40	0,8	0,044		0,999	0,017
	2	60	0,8	0,068		0,999	0,011
	3	40	1,8	0,040		0,999	0,013
	4	60	1,8	0,068		0,998	0,017
	5	50	1,3	0,043		0,999	0,012
	6	50	1,3	0,040		0,998	0,022
	7	50	1,3	0,039		0,996	0,030

Analisando-se o comportamento do modelo de Page, constata-se que o parâmetro **k**, que representa a constante da taxa de secagem, aumenta com o aumento da temperatura quando se analisa as temperaturas de 40 e 60 °C, no entanto a temperatura de 50 °C apresentou para **k** valores inferiores aos encontrados para temperatura de 40 e 60 °C. Enquanto o parâmetro **n** diminui com o aumento da temperatura para as temperaturas de 40 e 60 °C, para temperatura de 50 °C são superiores aos valores para temperaturas de 40 e 60 °C. Comportamento similar em relação ao parâmetro **k** em

função do acréscimo da temperatura foi reportado por DOYMAZ & PALA (2003) ao estudarem a secagem de milho nas temperaturas de 55 e 65 °C.

Em relação aos modelos de Henderson & Pabis e Lewis, verifica-se que o parâmetro k , aumenta com o aumento da temperatura e o valor dessa constante para as temperaturas de 40 e 50 °C são próximos. O parâmetro a para o modelo de Henderson & Pabis, diminui com o aumento da temperatura para as temperaturas de 40 e 60 °C, enquanto que para a temperatura de 50 °C os valores de n são superiores aos valores das temperaturas de 40 e 60 °C.

Constata-se, no entanto que os valores dos parâmetros n para o modelo de Page e a para o modelo de Henderson & Pabis, utilizados para ajuste dos dados da cinética de secagem da casca de abacaxi enriquecida, são próximos de um, o que reduz essas equações a equação exponencial, ou seja, ao modelo de Lewis.

Nas Figuras 5.3 a 5.5 estão apresentadas as curvas de secagem da casca de abacaxi enriquecida, nas temperaturas estudadas, com ajustes pelos modelos de Page, Henderson & Pabis e Lewis. Verifica-se visualmente nessas figuras, que a curva gerada a partir do modelo de Page se aproxima mais dos pontos experimentais do que os demais modelos de forma muito discreta, confirmando assim que todos os modelos testados se ajustam aos dados observados. SOUSA et al. (2006) relataram que o modelo de Page apresentou melhor ajuste aos dados experimentais da secagem do farelo de mamona (*Ricinus communis* L.), com temperaturas (50, 60, 70 e 80 °C) e espessuras de camada (1, 3 e 5 cm).

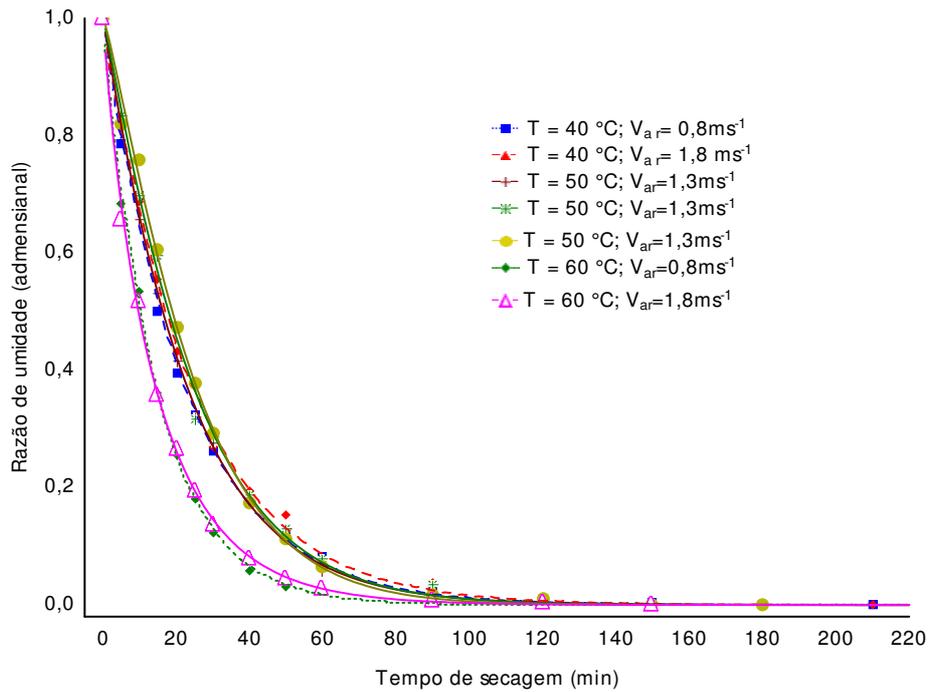


Figura 5.3. Curvas de secagem da casca de abacaxi enriquecida para as temperaturas estudadas com ajuste pelo modelo de Page

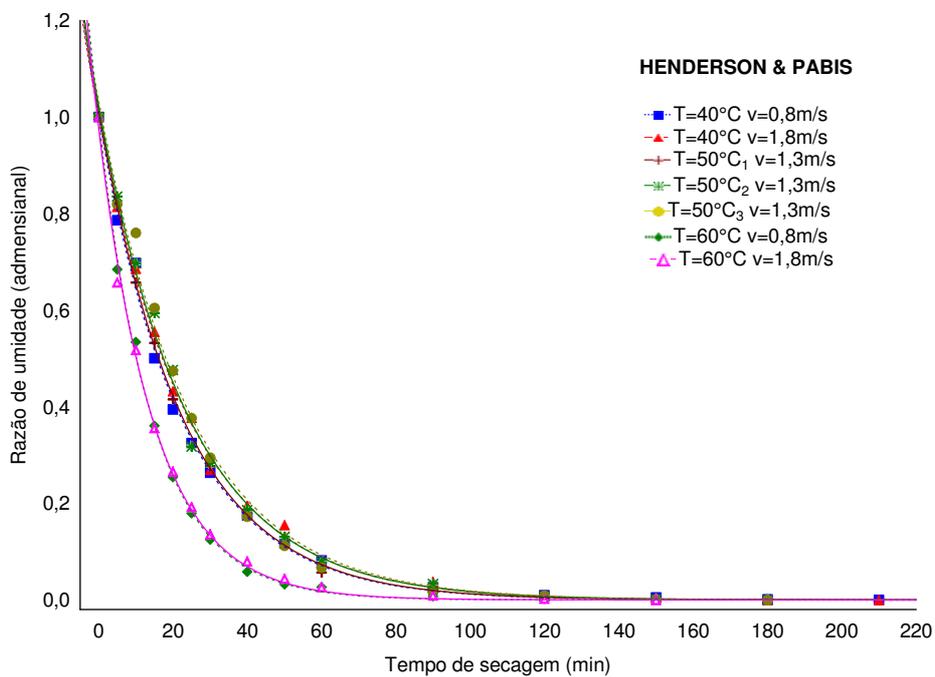


Figura 5.4. Curvas de secagem da casca de abacaxi enriquecida para as temperaturas estudadas com ajuste pelo modelo de Henderson & Pabis

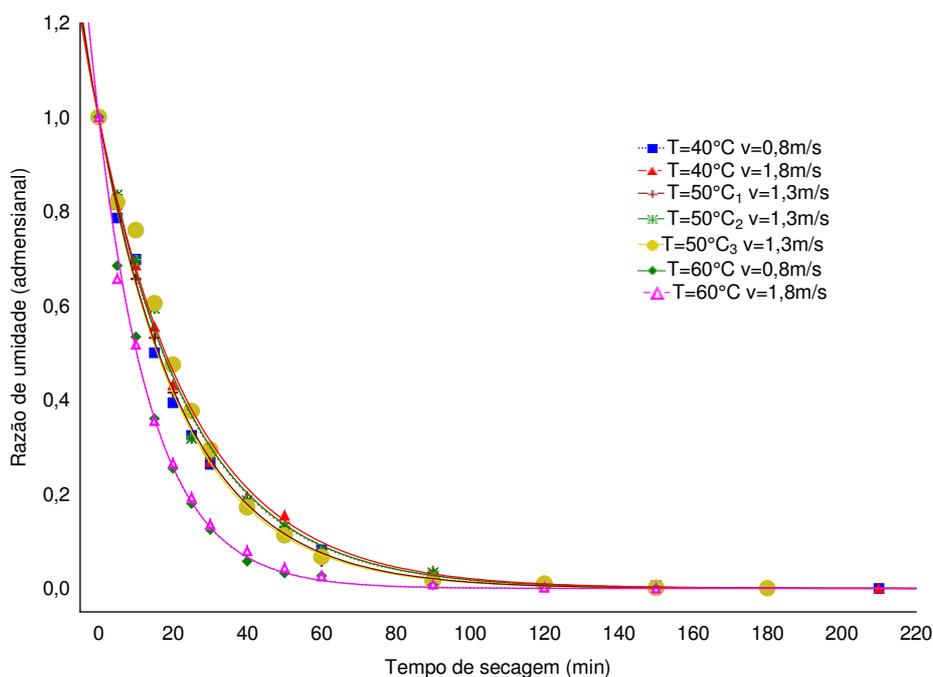


Figura 5.5. Curvas de secagem da casca de abacaxi enriquecida para as temperaturas estudadas com ajuste pelo modelo de Lewis

5.2. Cinética de secagem da coroa de abacaxi enriquecida

Na Tabela 5.3 encontram-se os valores médios de temperatura e umidade relativa do ar ambiente, os parâmetros de secagem utilizados nos testes experimentais e o tempo que transcorreu a cinética de secagem para coroa de abacaxi enriquecida.

Tabela 5.3. Dados das condições e o tempo de secagem da coroa de abacaxi enriquecida

Ensaio	Temperatura do ar de secagem (°C)	Velocidade do ar de secagem (m.s ⁻¹)	Temperatura do ar ambiente (°C)	Umidade relativa (%)	t (min)
1	40	0,8	32,5	61,6	120
2	60	0,8	33,7	51,9	90
3	40	1,8	32,5	52,9	120
4	60	1,8	32,4	56,6	90
5	50	1,3	31,1	71,7	120
6	50	1,3	33,7	63,7	120
7	50	1,3	33,5	64,8	120

Verifica-se na Tabela 5.3 que o tempo de secagem diminuiu em função do aumento da temperatura e manteve-se constante em relação às variações na velocidade do ar de secagem para a mesma temperatura.

Na Figura 5.6 são apresentados os pontos experimentais de secagem da coroa de abacaxi enriquecida, nas temperaturas e velocidade definidas no planejamento fatorial simples 2^2 (Tabela 3.2) pelo adimensional de umidade, em função do tempo, onde se pode observar a influência da temperatura, com redução gradativa nos tempos de secagem sob o efeito da utilização de temperaturas mais elevadas do ar de secagem. Conclui-se que a velocidade na faixa de 0,8 a 1,8 m.s^{-1} não influencia, apenas a temperatura controla a migração de água do interior para a superfície do sólido, o controle difusional interno durante a secagem da coroa de abacaxi enriquecida, é influenciado apenas pela temperatura. Na cinética de secagem de frutas a temperatura do ar é o parâmetro de maior influência na taxa de secagem (ALSINA et al., 1997; PRADO et al., 2000; YOSHIDA & MENEGALLI, 2000), e a velocidade do ar de secagem exerce pequeno efeito sobre as curvas de secagem.

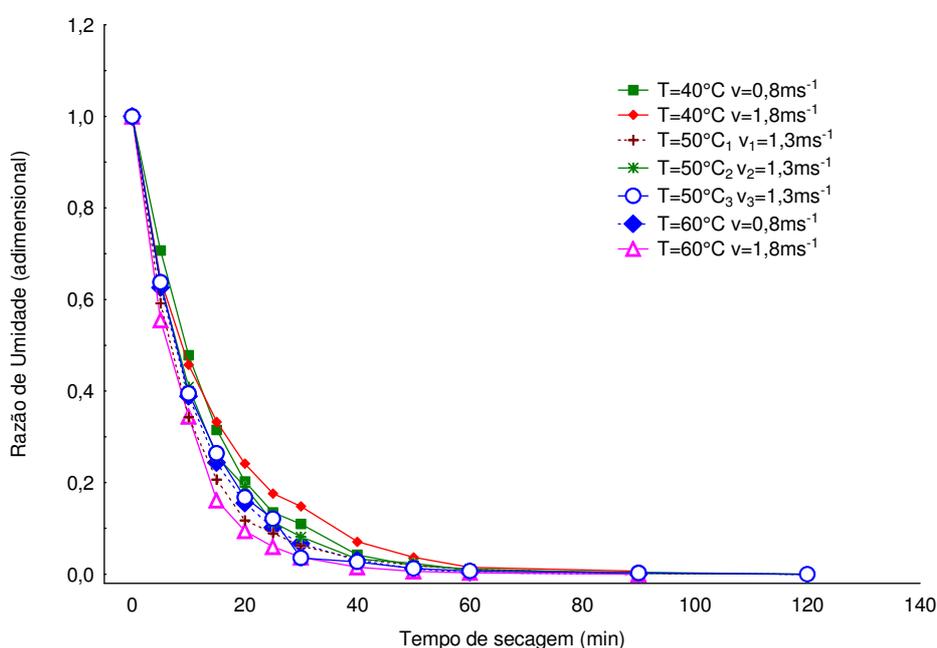


Figura 5.6. Curvas de secagem da coroa de abacaxi enriquecida nas temperaturas e velocidades de secagem estudadas

Nota-se que a curva (Figura 5.6) de pontos referente à temperatura de 60°C ($v=1,8\text{m/s}$) apresenta tendência de redução na razão de umidade, levemente mais acentuada que a curva, representando 50 °C e 40 °C demonstrando a influência da temperatura em que transcorreram as secagens. Este comportamento foi também observado por PRADO et al. (2000) e FARIAS et al.(2002) secando tâmaras e cajá, respectivamente. Na temperatura de 60°C a secagem foi realizada durante cerca 1,5 horas, a 50 °C e a 40 °C, 2.

Verifica-se na Figura 5.7, que o material não apresenta uma geometria definida, impossibilitando o cálculo do coeficiente de difusividade da água em cada temperatura de secagem através da solução analítica da equação de difusão, para coroa de abacaxi enriquecida, assim como ocorreu com a casca de abacaxi enriquecida.



Figura 5.7. Geometria da coroa de abacaxi enriquecida

Os dados experimentais das curvas de secagem da coroa de abacaxi enriquecida foram descritos pelos modelos empíricos de Page, Henderson & Pabis e Lewis, através de regressão não-linear.

Na Tabela 5.4 encontram-se os valores dos parâmetros dos modelos Page, Henderson & Pabis e Lewis ajustados aos dados experimentais das cinéticas de secagem da coroa de abacaxi enriquecido nas temperaturas e velocidades estudadas, os coeficientes de determinação (R^2) e os desvios quadráticos médios (DQM).

Tabela 5.4. Parâmetros estimados pela equação de Page, Henderson & Pabis e Lewis para os dados de secagem, coeficiente de determinação e erro relativo médio para coroa de abacaxi enriquecida

Modelo	Ensaio	T (°C)	v _{ar} (m.s ⁻¹)	Parâmetros		R ²	DQM
				k (s ⁻ⁿ)	n		
Page	1	40	0,8	0,064	1,064	0,999	0,007
	2	60	0,8	0,098	0,981	0,999	0,003
	3	40	1,8	0,108	0,858	0,999	0,006
	4	60	1,8	0,114	1,000	0,999	0,011
	5	50	1,3	0,118	0,950	0,999	0,009
	6	50	1,3	0,127	0,928	0,998	0,006
	7	50	1,3	0,090	1,003	0,999	0,011
Modelo	Ensaio	T (°C)	v _{ar} (m.s ⁻¹)	Parâmetros		R ²	DQM
				k (s ⁻ⁿ)	a		
Henderson & Pabis	1	40	0,8	0,077	1,012	0,999	0,009
	2	60	0,8	0,093	0,999	0,999	0,003
	3	40	1,8	0,070	0,972	0,998	0,019
	4	60	1,8	0,114	0,999	0,999	0,011
	5	50	1,3	0,104	0,996	0,999	0,010
	6	50	1,3	0,087	0,993	0,999	0,008
	7	50	1,3	0,107	0,993	0,998	0,016
Modelo	Ensaio	T (°C)	v _{ar} (m.s ⁻¹)	Parâmetros		R ²	DQM
				k (s ⁻ⁿ)			
Lewis	1	40	0,8	0,076		0,999	0,010
	2	60	0,8	0,093		0,993	0,003
	3	40	1,8	0,073		0,998	0,021
	4	60	1,8	0,113		0,999	0,011
	5	50	1,3	0,104		0,999	0,010
	6	50	1,3	0,088		0,999	0,008
	7	50	1,3	0,107		0,998	0,017

Todos os modelos se ajustaram bem aos dados experimentais das secagens, com os coeficientes de determinação apresentando valores superiores a 0,99, podendo ser usados na predição da cinética de secagem da coroa de abacaxi enriquecida. Coeficientes de determinação acima 0,99 também foram encontrados por BABALIS et al. (2006) ao determinarem a cinética de secagem do figo. O modelo de Page apresentou os maiores valores de R² e valores menores do desvio quadrático médio. Resultados semelhantes foram obtidos por SIMAL et al. (2005) para a secagem de kiwi em cubos a

temperatura variando de 30 a 90 °C, ao ajustarem os dados experimentais aos modelos utilizados nesse trabalho.

Constata-se que os parâmetros **k** das equações utilizadas apresentam aumento com o aumento da temperatura, o que também foi constatado por SILVA et al. (2004) ao determinarem a cinética de secagem de cajá em secador de bandejas nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C.

Assim como aconteceu com a casca de abacaxi enriquecida, verifica-se, que os valores dos parâmetros **n** para o modelo de Page e **a** para o modelo de Henderson & Pabis, utilizados para ajuste dos dados da cinética de secagem da coroa de abacaxi enriquecida, são próximos de um (1), o que reduz essas equações a equação exponencial, ou seja, ao modelo de Lewis.

Nas Figuras 5.8 a 5.10 estão apresentadas as curvas de secagem da coroa de abacaxi enriquecida, nas temperaturas estudadas, com ajustes pelos modelos de Page, Henderson & Pabis e Lewis.

WAUGHON & PENA (2008) concluíram que para a predição das curvas de secagem em camada delgada do resíduo fibroso, gerado no beneficiamento do abacaxi o modelo de Page, Page Modificado e dois termos exponencial foram os que melhores ajustaram os dados de secagem do material em estudo, apresentando coeficientes de determinação superiores a 0,99.

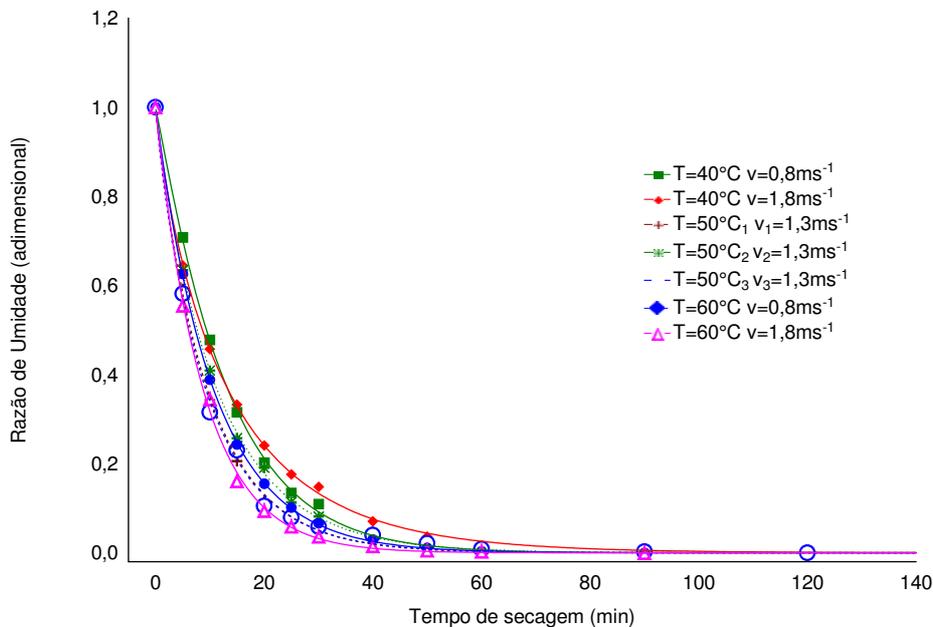


Figura 5.8. Curvas de secagem da coroa de abacaxi enriquecida para temperaturas estudadas com ajuste pelo modelo de Page

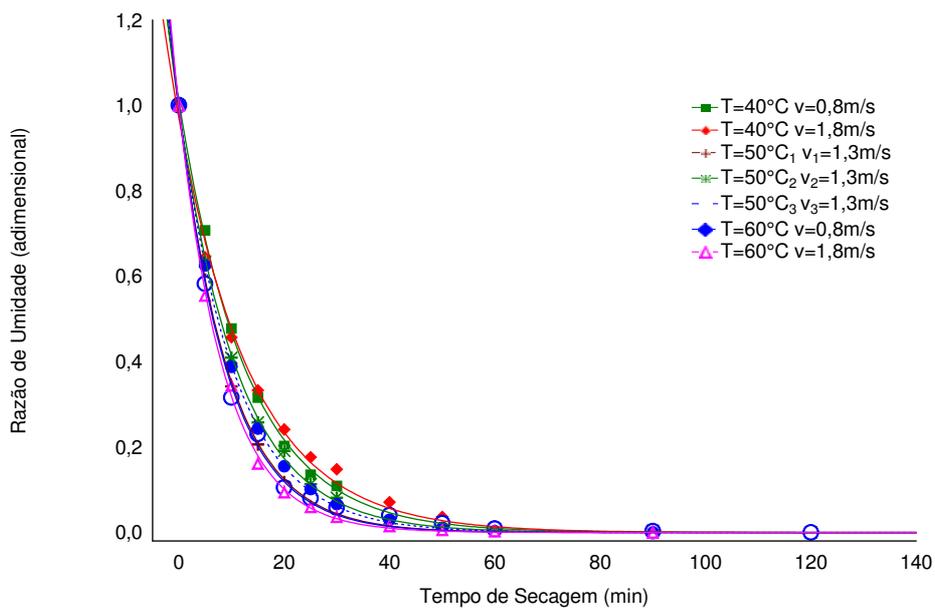


Figura 5.9. Curvas de secagem da coroa de abacaxi enriquecida para as temperaturas estudadas com ajuste pelo modelo de Henderson & Pabis

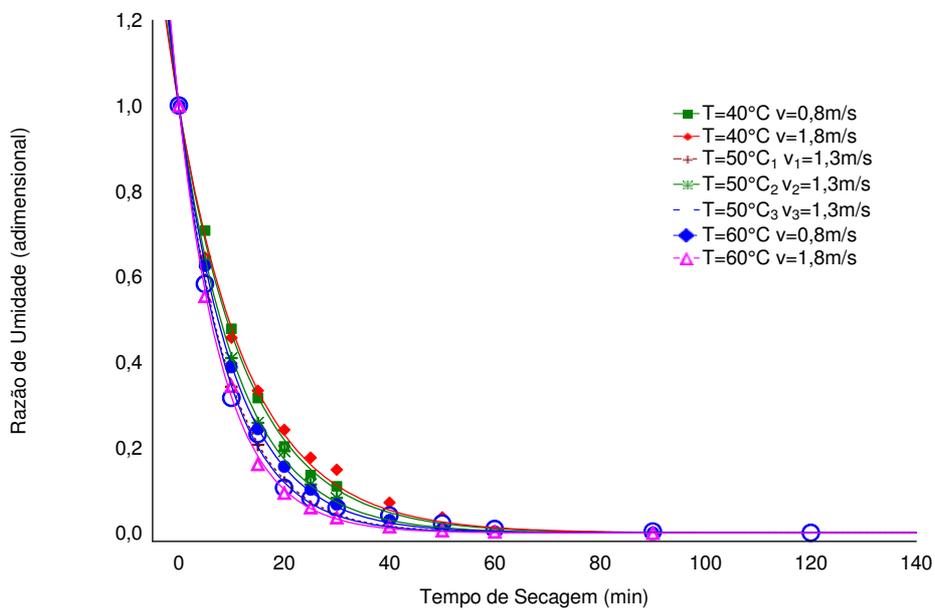


Figura 5.10. Curvas de secagem da coroa de abacaxi enriquecida para temperaturas estudadas com ajuste pelo modelo de Lewis

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO – PLANEJAMENTO FATORIAL

6.1. Planejamento fatorial simples 2² para casca de abacaxi enriquecida

A análise dos resultados obtidos para umidade (t-120 min) e teor de proteína da casca de abacaxi enriquecida foi realizada através de métodos estatísticos, com a utilização do programa STATISTICA[®] 5.0, de acordo com o planejamento fatorial simples 2² com três pontos centrais, cuja matriz estatística está resumida na Tabela 6.1. Na tabela são apresentadas as variáveis codificadas e reais e as variáveis resposta para os ensaios de umidade (t₁₂₀) e teor de proteína no enriquecido seco. Foi realizada a análise de efeitos para a resposta e a possibilidade de obter um modelo estatisticamente significativo e preditivo para esta resposta.

Tabela 6.1. Resultados do planejamento fatorial 2² – Matriz das variáveis independentes e as variáveis resposta para os ensaios com casca de abacaxi enriquecida

Ensaio	T (°C)	Var (ms ⁻¹)	X _(t120) (%)	Prot (%)
01	- 40	- 0,8	9,4	20,75
02	+ 60	- 0,8	6,4	19,11
03	- 40	+ 1,8	9,3	20,05
04	+ 60	+ 1,8	6,2	19,58
05	0 50	0 1,3	8,0	19,89
06	0 50	0 1,3	8,5	20,83
07	0 50	0 1,3	8,3	19,58

6.1.1. Análise estatística

O efeito das variáveis independentes (temperatura e velocidade do ar de secagem) sobre as variáveis dependentes umidade (t₁₂₀) e teor de proteínas no enriquecido seco (Prot) foram avaliadas mediante uma análise estatística, com um nível de 95% de confiança, utilizando o programa Statistica 5.0.

Através do diagrama de Pareto (Figura 6.1) verifica-se que apenas a variável independente temperatura de secagem foi estatisticamente significativa sobre a umidade (t_{120}), ao nível de 95% de confiança. O coeficiente de determinação (R^2) neste caso foi de 0,95 e a qualidade do ajuste de 0,90. De acordo com a Figura 6.1 observa-se que a temperatura apresenta um efeito negativo sobre a umidade (t_{120}), ou seja, diminui com o aumento da temperatura de secagem, como é esperado.

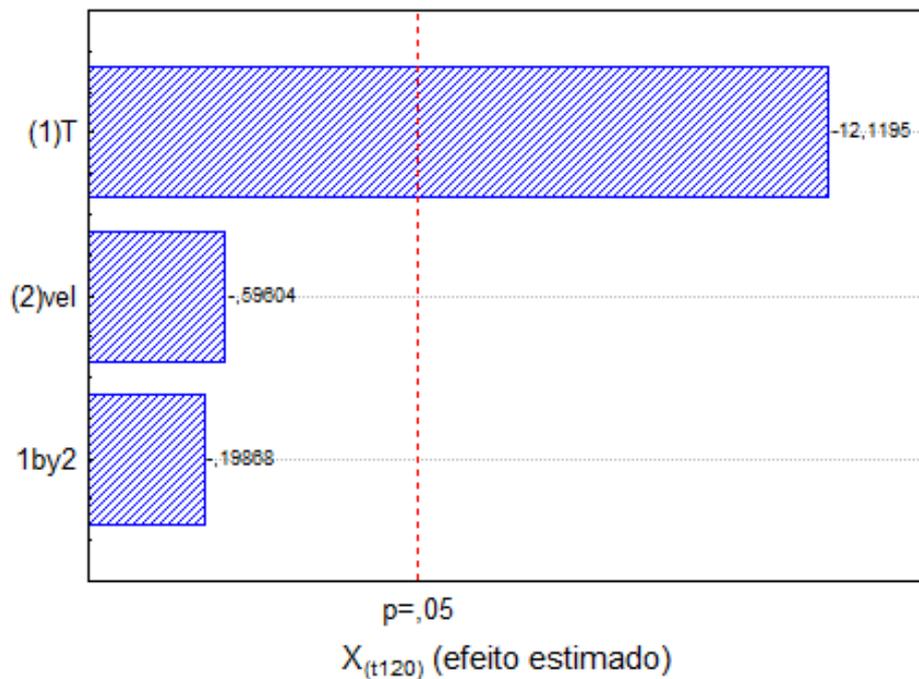


Figura 6.1. Diagrama de Pareto dos efeitos das variáveis independentes sobre a umidade t_{120} da casca enriquecida

Já no diagrama de Pareto da Figura 6.2, para a resposta teor de proteína no enriquecido seco, nenhuma variável foi estatisticamente significativa. Dessa forma, nenhuma análise estatística será realizada para esta resposta.

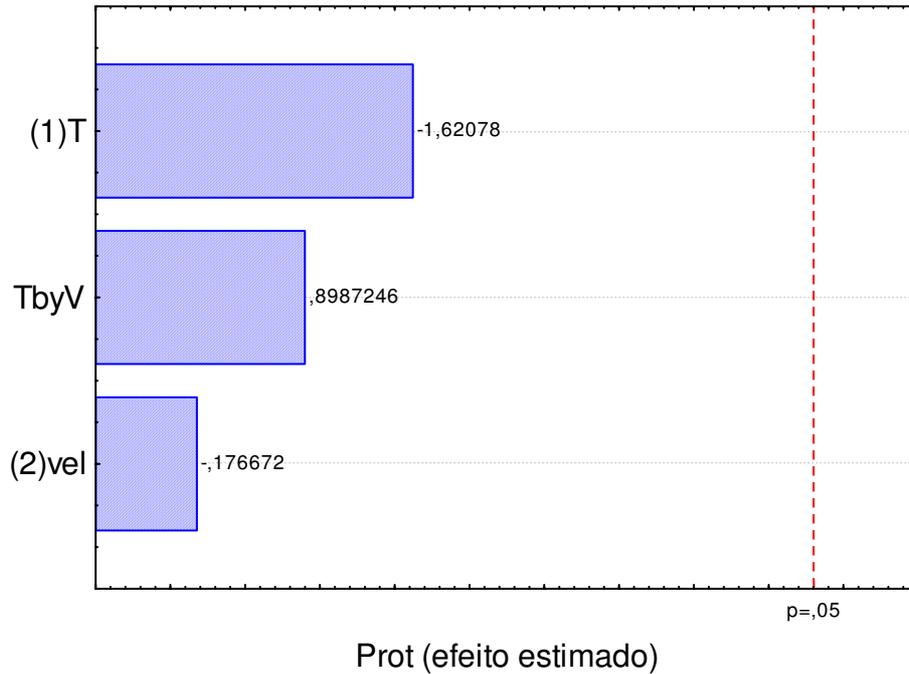


Figura 6.2. Diagrama de Pareto dos efeitos das variáveis independentes sobre o teor de proteína da casca enriquecida

A não significância estatística das variáveis independentes para a resposta teor de proteínas sugere que as duas variáveis estudadas nos níveis definidos não influenciam a resposta % proteína, podendo posteriormente investigar níveis axiais, ou seja, ampliar o planejamento fatorial 2^2 para composto central (planejamento fatorial 2^2 + configuração estrela).

6.1.2 - Análise estatística para a resposta do planejamento umidade (t120) da casca enriquecida

Os efeitos das variáveis independentes na resposta umidade (t120) do enriquecido estão apresentados na Tabela 6.2, com intervalo de confiança de 95 %. Os efeitos são considerados estatisticamente significativos quando seus valores forem superiores ao desvio do efeito.

Tabela 6.2 – Estimativa dos efeitos para a umidade (t120) do enriquecido

Variáveis Independentes	Coeficientes		Limite de	Limite de
	de regressão	p	confiança – 95 %	confiança + 95 %
Média	8,014	0,000141	7,60502	8,423550
T	-1,525	0,006739	-2,06641	-0,983595
Var	-0,075	0,611621	-0,61641	0,466405
T*Var	-0,025	0,860878	-0,56641	0,516405

A percentagem de variação explicada pela regressão em torno da média foi de 95,2 %. A qualidade do ajuste é de 94% o que significa que há um bom ajuste entre os valores observados e os preditos pela correlação. O valor de F obtido pelo modelo foi 14,48 vezes maior que o F tabelado a um nível de confiança de 95%. De acordo com BARROS NETO et al. (2001), o modelo pode ser considerado preditivo quando o valor de F calculado for superior a duas vezes o valor de F tabelado, conforme ocorreu nesse processo, em que o valor de $F_{\text{calc}}/F_{\text{tab}}$ para regressão foi 14,48 e $F_{\text{calc}}/F_{\text{tab}}$ 0,10.

A Tabela 6.3 apresenta a análise de variância para a umidade t120. Como o F_{calc} para regressão (95,69) é altamente significativo e a porcentagem de variação explicada (R^2) pelo modelo foi muito boa, 95%, pode-se concluir que o modelo se ajusta bem aos dados experimentais.

Tabela 6.3 - Análise de variância - Umidade (t120)

Fonte de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F_{Calc}	p-valor
Regressão	9,3025	1	9,3025	95,69	0,000141
Resíduos	0,48607	5	0,0972		
Total	9,7886	6			

% variação explicada (R^2) = 95,03; $F_{1;5;0,05}$ = 6,61

A comparação entre os valores experimentais e os calculados através do modelo de primeira ordem em ajuste linear para a umidade (t120) do enriquecido é

ilustrado na Figura 6.3. Verifica-se que o modelo ajustado aos dados experimentais apresenta uma distribuição dos pontos em torno da reta ideal, com tendências.

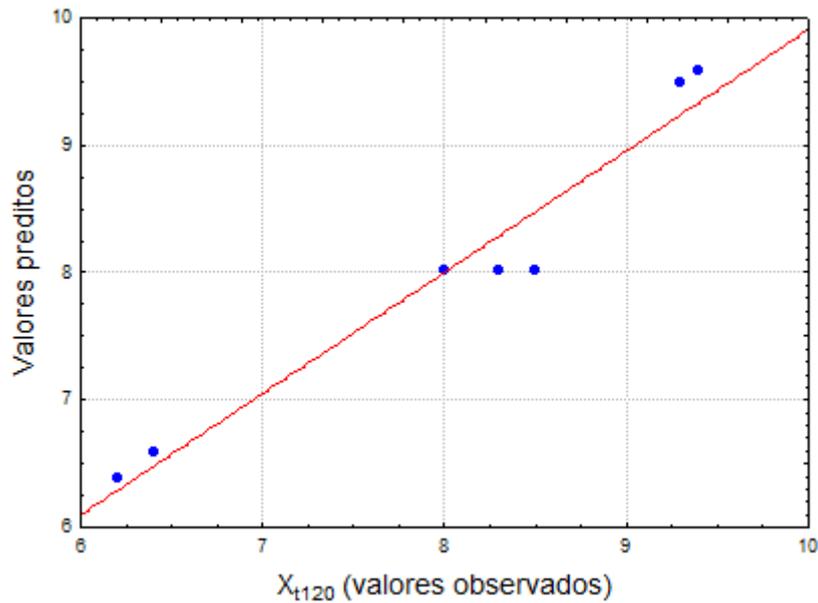


Figura 6.3. Valores observados em função dos valores preditos – X_{t120}

Como a variável umidade (t_{120}) apresentou efeito estatisticamente significativo apenas para variável independente temperatura, optou-se por apresentar um modelo polinomial em base estatística, já que o teste F da regressão e da falta de ajuste foi estatisticamente significativo e preditivo, respectivamente.

$$X_{t120} = 8,014 - 1,525T \quad (6.1)$$

O modelo gerado (Equação 6.1) é estatisticamente significativo e preditivo para a umidade (t_{120}) do enriquecido. A superfície de resposta está apresentada na Figura 6.4 em que se observa a superfície plana, indicando um comportamento esperado para um modelo linear.

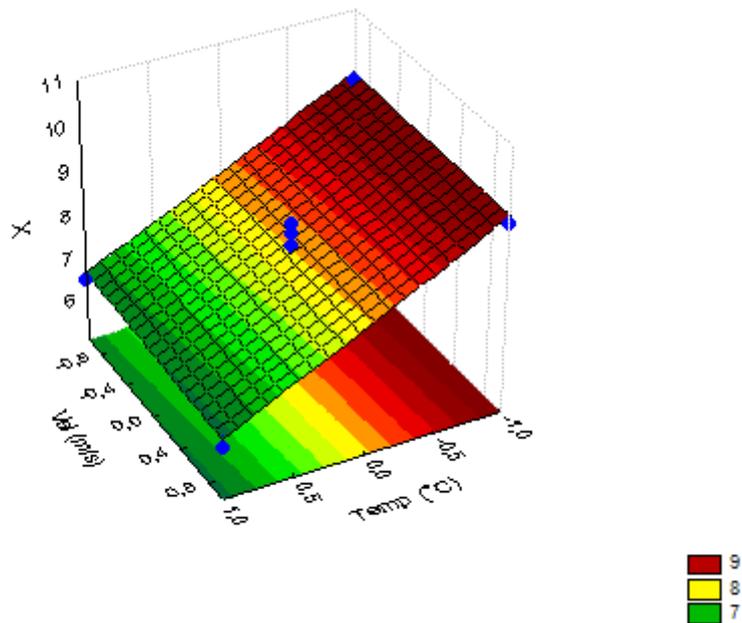


Figura 6.4. Superfície de resposta da umidade final do enriquecido (casca) em função de T e v_{ar}

6.2. Planejamento fatorial simples 2^2 para coroa de abacaxi enriquecida

A análise dos resultados obtidos para umidade ($t=60$ min) e teor de proteína da coroa do abacaxi enriquecida foi realizada através de métodos estatísticos, com a utilização do programa STATISTICA[®] 5.0, de acordo com o planejamento fatorial simples 2^2 com três pontos centrais, cuja matriz estatística está resumida na Tabela 6.4. Na tabela são apresentadas as variáveis codificadas e reais e as variáveis resposta para os ensaios de umidade (t_{60}) e teor de proteína no enriquecida e seco. Foi realizada a análise de efeitos para as respostas e a possibilidade de obter um modelo estatisticamente significativo e preditivo para estas respostas.

Tabela 6.4 – Resultados do planejamento fatorial 2^2 – Matriz das variáveis independentes e as variáveis resposta para os ensaios com coroa do abacaxi enriquecido

Ensaio	T		V _{ar}		X _f (%)	Prot (%)
	(°C)		(m/s)			
01	-	40	-	0,8	8,2	19,74
02	+	60	-	0,8	6,3	19,81
03	-	40	+	1,8	8,0	19,74
04	+	60	+	1,8	6,2	18,48
05	0	50	0	1,3	7,5	20,52
06	0	50	0	1,3	7,6	19,52
07	0	50	0	1,3	7,3	19,89

6.2.1. Análise Estatística

O efeito das variáveis independentes (temperatura e velocidade do ar de secagem) sobre as variáveis dependentes umidade (t_{60}) e teor de proteínas no enriquecido seco (Prot) foram avaliadas mediante uma análise estatística, com um nível de 95% de confiança, utilizando o programa Statistica 5.0.

Através do diagrama de Pareto (Figura 6.6) verifica-se que apenas a variável independente temperatura de secagem foi estatisticamente significativa sobre a umidade (t_{60}), ao nível de 95% de confiança. O coeficiente de determinação (R^2) neste caso foi de 0,95 e a qualidade do ajuste de 0,90. De acordo com a Figura 6.5 observa-se que a temperatura apresenta um efeito negativo sobre a umidade (t_{60}), ou seja, diminui com o aumento da temperatura de secagem, como é esperado.

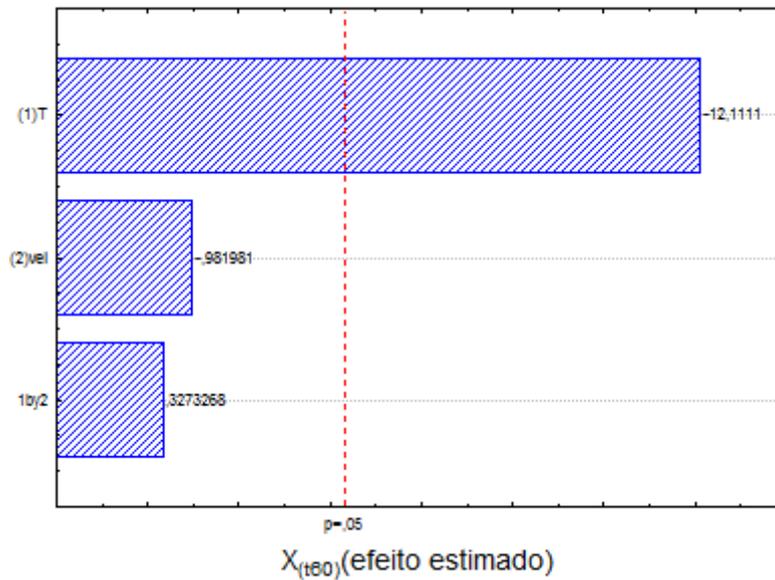


Figura 6.5. Diagrama de Pareto dos efeitos das variáveis independentes sobre a umidade (t_{60}) da coroa enriquecida

Já no diagrama de Pareto da Figura 6.6, para a resposta teor de proteína no enriquecido seco, nenhuma variável foi estatisticamente significativa. Dessa forma, nenhuma análise estatística será realizada para esta resposta.

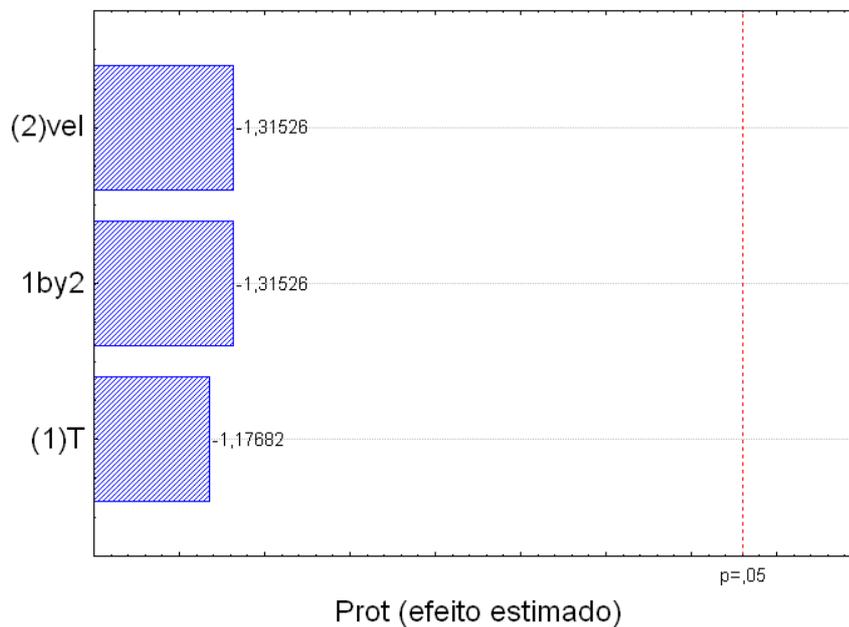


Figura 6.6. Diagrama de Pareto dos efeitos das variáveis independentes sobre o teor de proteína da coroa enriquecida

6.2.2 - Análise estatística para a resposta do planejamento umidade (t60) da coroa enriquecida

Os efeitos das variáveis independentes na resposta umidade (t_{60}), estão apresentados na Tabela 6.5, com intervalo de confiança de 95 % apenas para esta resposta. Os efeitos são considerados estatisticamente significativos quando seus valores forem superiores ao desvio do efeito.

Tabela 6.5 – Estimativa dos efeitos para a umidade (t60) do enriquecido

Variáveis Independentes	Coeficientes		Limite de	Limite de
	de regressão	p	confiança – 95 %	confiança + 95 %
Média	7,300	0,000063	7,05159	7,54841
T	-1,850	0,006749	-2,50724	-1,19276
v _{ar}	-0,150	0,429648	-0,80724	0,50724
T*v _{ar}	0,050	0,774506	-0,60724	0,70724

A percentagem de variação explicada pela regressão em torno da média foi de 94,71 %. A qualidade do ajuste é de 89,42 % o que significa que há um bom ajuste entre os valores observados e os preditos pela correlação. O valor de F obtido pelo modelo foi 11,9 vezes maior que o valor do F tabelado a um nível de confiança de 95 %. Segundo BARROS NETO et al. (2001) o modelo é considerado estatisticamente significativo quando o valor de F calculado for duas vezes maior que o F tabelado e preditivo quando a relação F_{calc}/F_{tab} for menor que 1.

A Tabela 6.6 apresenta a análise de variância para a umidade t60. Como o F_{calc} para regressão (95,69) é altamente significativo e a porcentagem de variação explicada (R^2) pelo modelo foi muito boa, 95%, pode-se concluir que o modelo se ajusta bem aos dados experimentais.

Tabela 6.6 - Análise de variância - Umidade (t_{60})

Fonte de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F_{Calc}	p-valor
Regressão	3,4225	1	3,4225	78,68	0,000063
Resíduos	0,2175	5	0,0435		
Total	3,64	6			

% variação explicada (R^2) = 94,02; $F_{1;5;0,05}$ = 6,61

A comparação entre os valores experimentais e os calculados através do modelo de primeira ordem em ajuste linear para a umidade (t_{60}) do enriquecido é ilustrado na Figura 6.7. Verifica-se que o modelo ajustado aos dados experimentais apresenta uma distribuição dos pontos em torno da reta ideal, com tendências.

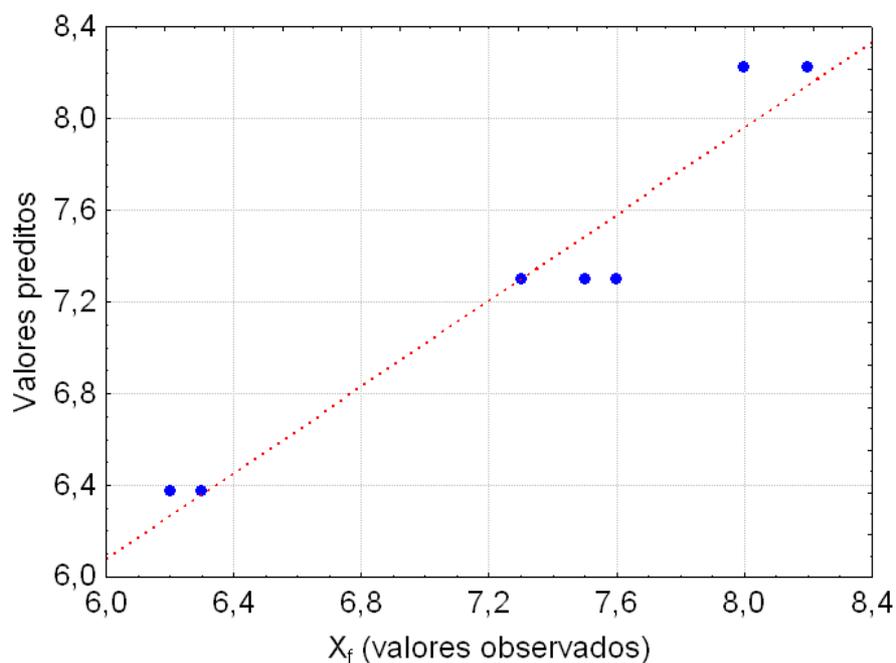


Figura 6.7. Valores observados em função dos valores preditos – X_{t60}

Como a variável umidade (t_{60}), apresentou efeito estatisticamente significativo apenas para a variável independente temperatura, optou-se por apresentar um modelo polinomial em base estatística, já que o teste F da regressão e da falta de ajuste foram estatisticamente significativo e preditivo, respectivamente, conforme Equação (6.2).

$$X(t_{60}) = 7,3 - 1,85T \quad (6.2)$$

Como o modelo gerado é estatisticamente significativo e preditivo para a umidade (t_{60}) do enriquecido, será apresentada a superfície de resposta, para se observar a tendência dos efeitos e uma possível ampliação do processo com a adição de pontos axiais. A superfície de resposta está apresentada na Figura 6.8. Observa-se nessa figura que a superfície é plana, indicando um comportamento esperado para um modelo linear.

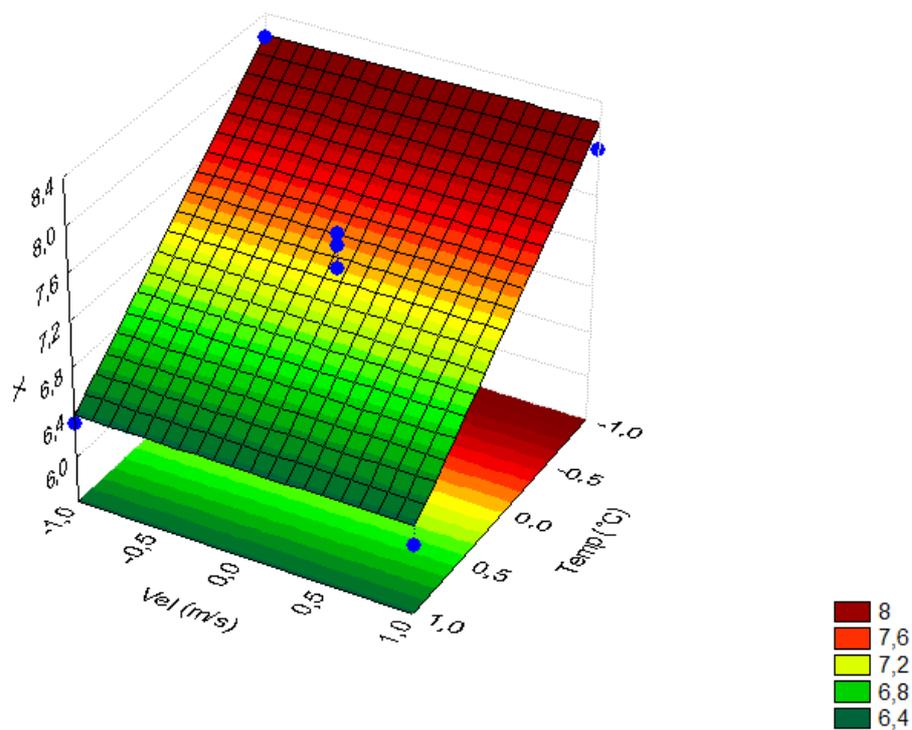


Figura 6.8. Superfície de resposta da umidade (t_{60}) do enriquecido (coroa) em função de T e v_{ar}

7. CONCLUSÕES

- Em relação ao resíduo *in natura*, o resíduo enriquecido diminuiu o percentual de açúcares redutores totais, matéria seca e orgânica e aumentou o percentual de fibra em detergente ácido, fibra em detergente neutro, hemicelulose e principalmente proteína.
- Para as isotermas de dessecamento dos resíduos *in natura* e enriquecidos, em geral, o modelo de GAB ajustou melhor os dados experimentais das isotermas nas condições estudadas.
- A temperatura influenciou a cinética de secagem dos resíduos enriquecidos, com o menor tempo de secagem atingido na temperatura de 60 °C para os dois resíduos.
- Dentre os modelos ajustados aos dados da cinética de secagem dos resíduos enriquecidos, a equação de Page apresentou os maiores valores de coeficientes de determinação e os menores desvios quadráticos médios, porém os três modelos estudados representaram satisfatoriamente os dados experimentais com coeficientes de determinação superiores a 0,99.
- Os parâmetros **n** para o modelo de Page e **a** para o modelo de Henderson & Pabis, utilizados para ajuste dos dados da cinética de secagem dos resíduos enriquecidos, são próximos de um, o que reduz esses modelos ao modelo de Lewis.
- Apenas a variável independente temperatura de secagem foi estatisticamente significativa, ao nível de 95% de confiança, sobre a umidade para casca e coroa enriquecidas e para a resposta teor de proteína no enriquecido seco, nenhuma variável independente (temperatura e velocidade) foi estatisticamente significativa.
- Operando a secagem na temperatura de 60 °C, em qualquer velocidade do ar, obtém-se a minimização do teor de umidade nos resíduos enriquecidos, não alterando o teor de proteína.

8. SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

- Determinar as isotermas de adsorção dos resíduos *in natura* e enriquecidos, para estudar-se o armazenamento.
- Avaliar físico-quimicamente os resíduos enriquecidos secos durante 60, 180, 240 e 360 dias, armazenados sob condições ambientais em diferentes embalagens, monitorando-se a evolução de suas características por meio da determinação dos parâmetros umidade, proteína bruta, matéria orgânica, FDN, FDA, hemicelulose, lignina, entre outras.
- Estudar a fermentação semi-sólida da mistura dos três resíduos (casca, coroa e talo) e também a secagem deste suplemento protéico.
- Estudar o desempenho animal com os resíduos enriquecidos secos.
- Estudar a viabilidade econômica dos resíduos enriquecidos secos.

9 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

AGUERRE, R.J.; SUÁREZ, C.; VIOLLAZ, P.E. The temperature dependence of esosteric heat of sorption of some cereal grains. **International Journal of Food Science and Technology**, v.23, p.141-145, 1988.

AGUERRE, R.J.; SUAREZ, C.; VIOLLAZ, P.E. New BET type multilayer sorption isotherms. Part II: Modeling water sorption in foods. **Lebensmittel-Wissenschaft & Technologie**, v.22, p.192-195, 1989.

ALDRIGUE, M.L.; MADRUGA, M. S.; FIOREZE, R.; LIMA, A. W. O.; SOUSA, C. P. **Aspecto da ciência e tecnologia de alimentos**. João Pessoa: UFPB, v.1, 2002. 198p.

ALMEIDA, F. de A.C.; GOUVEIA, J.P.G. de.; SILVA, J.E. da.; VILLAMIL, J.M.P.; SILVA, M.M. da. Secagem natural e artificial de vagens de algaroba. **Revista Brasileira de Armazenamento**, v.27, p.48-57, 2002.

AL-MUHTASEB, A. H.; MCMINN, W. A. M.; MAGEE T. R. A. Water sorption isotherms of starch powders. Part 2: Thermodynamic characteristics. **Journal of Food Engineering**, v.62, p.135–142, 2004.

ALSINA, O.L.S.; SILVA, O.S. da; SANTOS, J.M. Efeitos das condições operacionais na cinética de secagem de fatias de bananas. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, 26, **Anais...** Campina Grande: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 1997. CD Rom.

AMORIM, B.C.; MOTA, M.M.A.; SILVA, V.S.; SILVA, F.L.H. da; OLIVEIRA, L.S. C. Estudo do enriquecimento protéico do bagaço da fruta da palma forrageira (*Opuntia ficus-indica* Mill). In: VI Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Iniciação Científica. **Anais...**Campinas, 2005. CD-Rom

ANDERSON, R.B. Modifications of the BET equation. **Journal of American Chemical Society**, v.68, p.686-691, 1946.

AOAC - Association of Official Analytical Chemists. **Official methods of analysis of AOAC international**. 16. ed. Maryland: AOAC, 1997. 1141p.

ARAÚJO, J.M.A. **Química de alimentos: Teoria e prática**. 1. ed. Viçosa. Imprensa Universitária, 1995. 335p.

ARAÚJO, L.F.; SILVA, F.L.H. da.; BRITO, E.A.; OLIVEIRA JÚNIOR, S.; SANTOS, E.S. Enriquecimento protéico da palma forrageira com *Saccharomyces cerevisiae* para alimentação de ruminantes. **Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia**, v.60, p.401-407, 2008.

ARAÚJO, M.E.R.; ALMEIDA, F. de A.C.; GOUVEIA, J.P.G. de; SILVA, M.M. da. Avaliação da temperatura e velocidade do ar na secagem de goiaba. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v.4, p.141-9, 2002.

ASPINALL, G.O. Pectins, plants gums, and other plant polysaccharide. In: **The Carbohydrates Chemistry and Biochemistry**. Academic Press, v.2b, 1970. 515p.

AZZOUZ, S.; JOMAA, W.; BELGHITH, A. Drying kinetic equation of single layer of grapes. In: Internacional Drying Symposium, 11, 1998, Halkidiki, Greece. **Proceedings...Greece**: A. S. Mujumdar, p.988-997. 1998.

BABALIS, S.J.; PAPANICOLAOU, E.; KYRIAKIS, N.; BELESSIOTIS, V.G. Evaluation of thin-layer drying models for describing drying kinetics of figs (*Ficus carica*). **Journal of Food Engineering**, v.75, p.205–214, 2006.

BANDEIRA, D.A. **Valor nutritivo do feno de resíduo agroindustrial do abacaxi (*Ananas comonus* L. Mer.) na alimentação de ovinos**. Areia: UFPB. 59p. 1995.
Dissertação Mestrado

BARREIRO NETO, M.; SANTOS, E.S. dos. **Abacaxi: Da agricultura familiar ao agronegócio**. João Pessoa: EMEPA-PB. 98p. 2002.

BARROS NETO, B.; SCARMÍNIO, J.S.; BRUNS, R.E. **Como fazer experimentos: Pesquisa e desenvolvimento na ciência e na indústria**. Editora Unicamp, Campinas, São Paulo, 2001. 401p.

BARUFFALDI, R.; OLIVEIRA, M.N. **Fundamentos de tecnologia de alimentos**. v.3, Ed. Atheneu. São Paulo, 1998. 317p.

BOBBIO, P. A.; BOBBIO, F. O. **Química do processamento de alimentos**. 3. ed. São Paulo: Varela, 2001. 144p.

BOBBIO, P. A.; BOBBIO, F. O. **Introdução à química de alimentos**. 3. ed. São Paulo: Varela, 2003. 240p.

BOER, J.H. de. **The dynamical character of adsorption**. Clarendon Press, Oxford, 1953.

BORGES, C.D.; CHIM, J.F.; LEITÃO, A.M.; PEREIRA, E; LUVIELMO, M.M. Produção de suco de abacaxi obtido a partir dos resíduos da indústria conserveira. **Boletim: CEPPA**, v.22, p.23-34, 2004.

BORZANI, W.; SCHIMIDELL, W.; LIMA, U.A.; AQUARONE, E. **Biotecnologia industrial: Fundamentos**. São Paulo: Edgard Blücher, v.1, 2001. 288p.

BOTELHO, L.; CONCEIÇÃO, A. da.; CARVALHO V.D. de. Caracterização de fibras alimentares da casca e cilindro central do abacaxi '*Smooth cayenne*'. **Ciência e Agrotecnologia**, v.26, p.362-367, 2002.

BRASIL. Agência Nacional de Vigilância Sanitária. Resolução - ANVISA. RDC nº 306, de 07 de dezembro de 2004. **Diário Oficial da União**. Brasília, 10 de dezembro de 2004.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Resolução nº 358 de 29 de abril de 2005. Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA, 2005. **Diário Oficial da União**. Brasília, 04 de maio de 2005a.

BRASIL. Instituto Adolfo Lutz. **Normas analíticas do instituto Adolfo Lutz – Métodos químicos e físicos para análise de alimentos**. 2.ed. São Paulo, v.1, 2005b.

BROD, F.P.R. **Avaliação de um secador vibro-fluidizado**. Campinas: UNICAMP, 335p. 2003. Tese Doutorado

BROD, F.P.R.; SILVA, J.E.A.R.; PARK, K.J. Construção de secador vertical convectivo. In: XXIII Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, Campinas, **Anais...** Campinas: SBEA. Programas e Resumos. Jaboticabal: SBEA, p.260, 1999.

BROOKER, D.B.; BAKKER-ARKEMA, F.W.; HALL, C.W. **Drying and storage of grains and oilseeds**. New York: AVI, 1992. 450p.

BRUNAUER, S.; EMMET, T.H.; TELLER, F. Adsorption of gases in multimolecular layers. **Journal of the American Chemical Society**, v.60, p.309-319, 1938.

CAMPOS, A.R.N.; SANTANA, R.A.C.; DANTAS, J.P.; OLIVEIRA, L. de S.C.; SILVA, F.L.H da. Enriquecimento protéico do bagaço do pedúnculo de caju por cultivo semi-sólido. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**, v.5, p.1-11, 2005.

GORGATTI NETTO, A.; CARVALHO, V.D.; BOTREL, N.; BLEINROTH, E.W.; MATALLO, M.; GARCIA, A.E.; ARDITO, E.F.G.; GARCIA, E.E.C.; BORDIN, M.R.B. **Abacaxi para exportação: Procedimentos de colheita e pós-colheita**. Embrapa, SPI, Brasília, DF, 1996. 41p.

CASTRO, F. A. F.; AZEREDO, R.M.C.; SILVEIRA, I.L. **Estudo experimental dos alimentos: Uma abordagem prática.** Caderno Didático, Viçosa: UFV, 1998.

CECCHI, H.M. **Fundamentos teóricos e práticos em análise de alimentos.** Editora da UNICAMP: 2º Ed. Rev. Campinas, SP, editora da UNICAMP, 2003. 207p.

CHAMPE, P.C.; HARVEY, R.A. **Bioquímica ilustrada.** 2.ed. Porto Alegre: Artes Médicas, 1996. 446p.

CHAVES, J.B.P. **Noções de microbiologia e conservação de alimentos.** Viçosa: UFV, 1993. 113p.

CHAVES, M. da C.V.; GOUVEIA, J.P.G. de; ALMEIDA, F. de A. C.; LEITE, J.C.A. Caracterização físico-química do suco da acerola. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**, v.4, p.1-12, 2004.

CHINNAN, M.S.; BEAUCHAT, L.R. Sorption isotherms of whole cowpeas and flours. **Lebensmittel-Wissenschaft und Technologie**, v.18, p.83-88, 1985.

CHIRIFE, J.; IGLESIAS, H.A. Equations for fitting water sorption isotherms of foods: Part 1 - A review. **Journal of Food Technology**, v.13, p.159-174, 1978.

CHITARRA, A.B. **Armazenamento e processamento de produtos agrícolas.** Poços de Caldas: UFLA/SBEA, 1998. Cap. 1, 58p.

CHITARRA, M.I.F.; CHITARRA, A.B. **Qualidade pós-colheita de frutos e hortaliças: fisiologia e manuseio.** Lavras: ESAL/FAEPE, 2005. 783p.

CHRIST, D. **Curvas de umidade de equilíbrio higroscópico e de secagem de canola (*Brassica napus* L. var. *Oleifera*), e efeito da temperatura e da umidade relativa do ar de secagem sobre a qualidade das sementes.** Viçosa: UFV, 50p. 1996. Tese Doutorado

CIABOTTI, E.D.; BRAGA, M.E.D.; CALVACANTI-MATA, M.E.R.M. Alterações das características físico-químicas da polpa de maracujá amarelo submetido a diferentes técnicas de congelamento inicial. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v.2, p.51-60, 2000.

CLARK, J.H., W.O. WATANABE, V.L. OLLA, AND R.I. WICKLUND. Growth, feed conversion and protein utilization of Florida red tilapia fed isocaloric diets with different protein levels in seawater pools. **Aquaculture**, v.88, p.75-85, 1990.

COONEY, C.L. **Growth of microorganisms**. In: REHM, H.J.; REED, G. *Biotechnology: A comprehensive treatise*. v.1, p.75-112, 1981.

CORREA, P.C.; RESENDE, O.; MARTINAZZO, A.P.; GONELI, A.L.D.; BOTELHO, F.M. Modelagem matemática para a descrição do processo de secagem do feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) em camadas delgadas. **Engenharia Agrícola**, v.27, p.501-510, 2007.

COSTA, J.M.C.; MEDEIROS, M.F.D.; MATA, A.L.M.L. Isotermas de adsorção de pós de beterraba (*Beta vulgaris* L.), abóbora (*Cucurbita moschata*) e cenoura (*Daucus carota*) obtidos pelo processo de secagem em leito de jorro: estudo comparativo. **Revista Ciência Agronômica**, v.34, p.5-9, 2003.

COSTA, J.M.C. da.; FELIPE, E.M. de F.; MAIA, G.A.; BRASIL, I.M. HERNANDEZ, F.F.H. Comparação dos parâmetros físico-químicos e químicos de pós alimentícios obtidos de resíduos de abacaxi. **Revista Ciência Agronômica**, v.38, p.228-232, 2007.

CRANK, J. **The mathematics of diffusion**. 2ed., Clarendon Press, 1975, 414p.

CRUZ, G.A. **Desidratação de alimentos**. São Paulo: Globo, 1990. 270p.

DEMAIN, A.L. Small bugs, big business: The economic power of the microbe **Biotechnology Advances**, v.18, p.499-514, 2000.

DOYMAZ, I. Sun drying of figs: An experimental study. **Journal of Food Engineering**, v.71, p.403-407, 2005.

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

DURAL, N.H.; HINES, A.L. A new theoretical isotherm equation for water vapor-food systems: multilayer adsorption on heterogeneous surfaces. **Journal of Food Engineering**, v.20, p.75-96, 1993.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. <
<http://www.embrapa.br/>>. Acesso em: novembro de 2006.

FARIAS, E. da S.; GOUVEIA, J.P.G. de ; ALMEIDA, F. de A.C.; BRUNO, L. de A.; NASCIMENTO, J. do. Secagem de cajá em um secador de leito fixo. In: congresso Brasileiro de Fruticultura, 18., 2002, Belém. **Anais...** 2002. 5p. CD Rom

FAOSTAT - Food and Agriculture Organization of the United Nations Statistical Database. **Crops database.** Disponível em: <<http://faostat.fao.org/site/567/DesktopDefault>>. Acesso em: 25 jul. 2010.

FERRUA, F.Q.; BARCELOS, M.F.P. **Equipamentos e embalagens utilizados em tecnologia de alimentos.** Lavras: UFLA/ FAEPE, 2003.

FIGUEREDO, M.P. Nutrição de bovinos leiteiros e rações metabólicas. **Bahia Agrícola**, v.1, 1996, 51p.

FIGUEIRÊDO, R.M.F. de; QUEIROZ, A.J. de M.; NORONHA, M.A.S. Armazenamento de abacaxi minimamente processado. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v.2, p.95-103, 2003.

FIorentin, L.D.; MENON, B.T.; ALVES, J.A.; BARROS, S.T.D de.; PEREIRA, N.C.; MÓDENES, A.N. Determinação da cinética e das isotermas de secagem do bagaço da laranja. **Acta Scientiarum. Technology**, v.32, p.147-152, 2010.

Fioreze, R. **Princípios de secagem de produtos biológicos**, João Pessoa. Editora Universitária. UFPB, 2004. 229p.

Fortunato, A.A. **Estudo da cinética de inativação térmica da pectinase e da peroxidase presentes na polpa de cajá (*Spondias lutea*)**. Natal: UFRN, 78p. 2002. Dissertação Mestrado

Franco, G. **Tabela de composição química dos alimentos**. 8.ed. Rio de Janeiro: Livraria Atheneu, 230 p. 1989.

GAL, S. **The need for, and practical applications of sorption data**. In: JOWIT, R.; ESCHER, F.; HALLSTROM, B.; MEFERT, H.; SPIESS, W.; VOS, G. Physical properties of foods. London: Elsevier Applied Science, v.2, p.13-25, 1987.

GIACOMELLI, E.J.; PY, C. **Abacaxi no Brasil**. Campinas: Fundação Cargill, 1981.

GhodaKe, H.M.; Goswami, T.K.; ChakraVertY, A. Moisture sorption isotherms, heat of sorption and vaporization of withered leaves, black and green tea. **Journal of Food Engineering**, v.78, p.827-835, 2007.

GOMES, P. M. de A. **Estudo da polpa de acerola (*Malpighia emarginata* D. C) desidratada em leite de jorro**. Campina Grande; UFPB, 2002. 86p. Dissertação Mestrado

Gouveia, J.P.G. de. **Avaliação da cinética de secagem de gengibre (*Zingiber officinale*, Roscoe) em um secador de leito fixo**. Campinas: UNICAMP, 161p. 1999. Tese Doutorado

GOUVEIA, J.P.G de.; MOURA, R.S.F. de; ALMEIDA, F. de A. C.; OLIVEIRA, A.M. de V.; SILVA, M.M. da. Avaliação da cinética de secagem de caju mediante um planejamento experimental. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.6, p.471-474, 2002.

GOUVEIA, J.P.G de.; NASCIMENTO, J do.; ALMEIDA, F. de A.C.; SILVA, M.M. da; FARIAS, E. da S.; SILVA, F.L.H da. Modelos matemáticos para ajuste das isotermas de dessorção da polpa de banana da variedade prata. **Engenharia Agrícola**, v.24, p.799-806, 2004.

GRANT, R.J.; MERTENS, D.R. Development of buffer system for pH control and evaluation of ph effects on fiber digestion in vitro. **Journal Dairy Science**, v.75, p.1581-1587, 1992.

GUGGENHEIM, E.A. **Applications of statistical mechanics**. Clarendon Press, Oxford, 1966, 86p.

GUNHAN, T.; DEMIR, V.; HANCIOGLU, E.; HEPBASLI, A. Mathematical modelling of drying of bay leaves. **Energy Conversion & Management**, v.46, p.1667-1679. 2005.

HALL, C.W. **Drying and storage of agricultural crops**. Westport: AVI, 1980. 381p.

HENDERSON, S.M. A basic concept of equilibrium moisture. **Agricultural Engineering**, v.33, p.29-32, 1952.

HENDERSON, S.M.; PABIS, S. Grain drying theory. I. Temperature effect on drying coefficient. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v.33, p.169-174.1961.

HOLANDA, J.S.; OLIVEIRA, A.J.E.; FERREIRA, A.C. Enriquecimento protéico do pedúnculo do caju com emprego de leveduras, para alimentação animal. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.3, p.79-81, 1997.

IBGE - **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística**. Disponível em: <<http://www.clickpb.com.br/artigo.php>>. Acesso em: 03 mai. 2010.

IGLESIAS, H.A.; CHIRIFE, J. Prediction of the effect of temperature on water sorption isotherms of food material. **Journal of Food Technology**, v.11, p.109-116, 1976.

JAIN, D.; PATHARE, P.B. Selection and evaluation of thin layer drying models for infrared radiative and convective drying of onion slices. **Biosystems Engineering**, v.89, p.289-296, 2004.

KAPSALIS, J.G. Influences of hysteresis and temperature on moisture sorption isotherms. In: ROCKLAND, L.B. (ed.). **Water activity: Theory and applications to food**. New York: Marcel Dekker, v.9, p.173-213, 1981.

KEEY, R.B. **Moisture: Solid relationships. Drying principle and practices**. Oxford. 1972. p.19-49.

KINSELLA, J.E. Functional proteins from yeast nucleoprotein for uses. Methods for isolation. In: KNORR, D. **Food Biotechnology**, 1987. Cap. 14, p.363-391.

LABUZA, T.P. Sorption phenomena in foods. **Food Technology**, v.22, p.15-24, 1968.

LABUZA, T.P.; KAAANANE, A.; CHEN, J.Y. Effects of temperature on the moisture sorption isotherms and water activity shift of two dehydrated foods. **Journal of Food Science**, v.50, p.385-389, 1985.

LANGMUIR, I. The adsorption of gases in a plane surfaces of glass, mica and platinum. **Journal of the American Chemical Society**, v.46, p.1361-1403, 1918.

LAUFENBERG, G.; KUNZ, B.; NYSTROEM, M. Transformation of vegetable waste into added products: (A) the upgrading concept; (B) practical implementations. **Bioresource Technology**, v.87, p.167-198, 2003.

LEHNINGER, A. L. **Princípios de bioquímica**, Editora Sarvier, São Paulo, p.42-43, 205-220, 1993.

LEHNINGER, A.L.; NELSON, D.L.; COX, M.M. **Princípios de bioquímica**. 3.ed. São Paulo: Sarvier, 2002. 839p.

LEITÃO, M.F de F. Microbiologia de frutas tropicais e seus produtos. In: **Alguns aspectos tecnológicos das frutas tropicais e seus produtos**. São Paulo: ITAL, 1980, p.83-126 (Série Frutos Tropicais).

LE POIDEVIN, N.; ROBINSON, L.A. Métodos de diagnóstico foliares utilizados nas plantações do grupo booken na Guiana Inglesa: amostragem de análises. **Fertilité**, p.3-11, 1964.

LEWIS, W.K. The rate of drying of solid materials. **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**, v.5, p.427-432, 1921.

LITCHFIELD, J.H. Single-cell proteins. **Science**, v.219, p.740-746, 1983.

LOUSADA JÚNIOR, J.E.; COSTA, J.M.C.; NEIVA, J.N.M.; RODRIGUEZ, N.M. Caracterização Físico-Química de subprodutos do processamento de frutas tropicais visando seu aproveitamento na alimentação animal. **Revista Ciência Agronômica**, v.37, p.70-76, 2006.

MARTIN, L.C.T. **Bovinos - Volumosos suplementares**. São Paulo: Nobel, 1997. 143p.

MARTINS, C.R.; FARIAS, R.M. Produção de alimentos X desperdícios: Tipos, causas e como reduzir perdas na produção agrícola - Revisão. **Revista da Faculdade de Zootecnia, Veterinária e Agronomia**, v.9, p.83-93, 2002.

McLAUGHLIN, C.P.; MAGEE, T.R.A. The determination of sorption isotherm and the isosteric heats of sorption por potatoes. **Journal of Food Engineering**, v.35, p.267-280, 1998.

MENGES, H.O.; ERTEKIN, C. Mathematical modeling of thin layer drying of Golden apples. **Journal of Food Engineering**, v.77, p.119-125, 2006.

MERTENS, D.R. Análise da fibra e sua utilização na avaliação de alimentos e formulação de rações. In: Simpósio Internacional de Ruminantes, 1992, Lavras. **Anais...** Lavras: SBZ-ESAL, 1992. p.188.

MERTENS, D.R. Using fiber and carbohydrate analyses to formulate dairy rations. Informational Conference with Dairy and Forages Industries. **US Dairy Forage Research Center**, p.81-92, 1996.

MILLER, G. Use of dinitrosalicilic acid reagent for determination of reducing sugars. **Analytical Chemistry**, v.31, p.426-428, 1959.

MISHRA, V. K.; ORAIKUL, B.; TEMELLI, F. Physical characterization and water sorption of freeze dried dulce *Palmaria palmate* powder. **Journal of Food Processing and Preservation**, Westport, v.20, p.25- 39, 1996.

MOURA, R.S.F. de; GOUVEIA, J.P.G. de; ALMEIDA, F.A. de C.; SOUSA, A. de G.; SILVA, M.M. da; OLIVEIRA, A.M.V. Modelagem matemática para isotermas em polpa de caju. *Revista de Biologia de Ciências da Terra*, v.4, p.32-40, 2004.

NICOLETTI, J.F. **Cinética de secagem e encolhimento de fatias de abacaxi**. São José do Rio Preto: UNESP, 60p. 2001. Dissertação Mestrado

NRC - **Nutrient Requirements of Horses**, Committee on Animal Nutrition, 5^a ed., 1989.

OLIVEIRA, M.M. **Enriquecimento nutricional por bioconversão de resíduos agroindustriais para utilização na alimentação animal**. Campina Grande: UFCG, 147p. 2007. Tese Doutorado

OLIVEIRA, M.M.; CAMPOS, A.R.N.; SILVA, F.L.H. da.; GOMES, J.P. Isotermas de dessecção da coroa do abacaxi. **Tecnologia & Ciência Agropecuária**, v.3, p.47-52, 2009.

OLIVEIRA, R.A.; OLIVEIRA, W.P.; PARK, K.J. Determinação da difusividade efetiva de raiz de chicória. **Engenharia Agrícola**, v.26, p.181-189, 2006.

OLIVEIRA, R.P.S. **Propriedades físicas e de transporte de suco de acerola**. Campinas: UNICAMP, 148p. 1997. Dissertação Mestrado

ORDOÑEZ, J.A. **Tecnologia de alimentos**. Tradução: MURAD, F. Porto Alegre: Artmed, p.25-31, p.201-203, 2005.

PALIPANE, K.B.; DRISCOLL, R.H. Moisture sorption characteristics of in-shell macadamia nuts. **Journal of Food Engineering**, v.18, p.63-76,1992.

PANDEY, A. Solid state fermentation. **Biochemical Engineering Journal**, v.13, p.81-84, 2003.

PARK, K.J.; YADO, M.K.M.; BROD, F.P.R. Estudo de secagem de pêra bartlett (*Pyrus* sp.) em fatias. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v.21, p.288-292, 2001a.

PARK, K. J.; BIN, A.; BROD, F. P. R. Obtenção das isotermas de sorção e modelagem matemática para pêra Bartlett (*Pyrus* sp.) com e sem desidratação osmótica. **Revista Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v.21, p.73-77, 2001b.

PARK, K.J.; NOGUEIRA, R.I. Modelos de ajuste de isotermas de sorção de alimentos. **Engenharia Rural**, Piracicaba: ESALQ/USP, v.3, p.81-86, 1992.

PARK, K.J.; OLIVEIRA, R.A.; BROD, F. P. R. Secagem de materiais biológicos: histórico e importância. **Escola de Negócios do Estado da Bahia**, Feira de Santana-BA, p.47. 2002.

PELEG, M. Assessment of a semi-empirical four parameter general model for sigmoid moisture sorption isotherms. **Journal of Food Process Engineering**, v.16, p.21-37, 1993.

PELIZER, L.H.; PONTIERI, M.H.; MORAES, I.O. Utilização de resíduos agroindustriais em processos biotecnológicos como perspectiva de redução do impacto ambiental. **Journal Technology Management & Innovation**, v.2, p.118–127 2007.

PENA, R.S.; MENDONÇA, N.B. Secagem em camada delgada da fibra residual do maracujá. **Boletim do CEPPA**, v.27, p.257-270, 2009.

PENA, R.S.; RIBEIRO, C.C.; GRANDI, J.G. Aplicação de modelos matemático bi e tripamétricos na predição das isotermas de adsorção de umidade de guaraná (*Paullinia cupuna*) em pó. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v.20, p.8-11, 2000.

PENA, R.S.; SILVA, D.M.S.; MENDONÇA, N.B.; ALMEIDA, M.D.C. Estudo da secagem da fibra residual do maracujá. **Revista Brasileira de Tecnologia Agroindustrial**, v.2, p.1-13, 2008.

PEREIRA, M.A.B.; SIEBENEICHLER, S.C.; LORENÇONI, R.; ADORIAN, G.C.; SILVA, J. C da.; GARCIA, R.B.M.; PEQUENO, D.N.L.; SOUZA, C. M de; BRITO, R. F.F de. Qualidade do fruto de abacaxi comercializado pela Cooperfruto – Miranorte – To. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v.31, p.1048-1053, 2009.

PEZZATO, L.E. Alimentação de peixes - Relação custo e benefício. In: Reunião anual da sociedade brasileira de zootecnia, 34.1999, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Zootecnia, 1999. p.109-118.

PIEIDADE, J.; CANNIATTI-BRAZACA, S.G. Comparação entre o efeito do resíduo do abacaxizeiro (caules e folhas) e da pectina cítrica de alta metoxilação no nível de colesterol sanguíneo em ratos. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**. v.23, p.149-156, 2003.

PINHEIRO, A.C.M.; VILAS BOAS, E.V. de B.; LIMA, L.C. Influência do CaCl₂ sobre a qualidade pós-colheita do abacaxi cv. Pérola. **Ciência Tecnologia de Alimentos**, v.25, p.32-36, 2005.

POTTER, N.N.; HOTCHKISS, J.H. **Food science**. Fifth edition. New York: Chapman & Hall. 1995, 169p.

PRADO, I.N.; LALLO, F.H.; ZEOULA, L.M.; CALDAS NETO, S.F.; NASCIMENTO, W.G. do.; MARQUES, J. de A. Níveis de substituição da silagem de milho pela silagem de resíduo industrial de abacaxi sobre o desempenho de bovinos confinados. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v.32, p.737-744, 2003.

PRADO, M.E.T.; PARK, K.J.; ALONSO, L.F.T. Shrinkage of dates (*Phoenix dactylifera*). **Drying Technology**, v.18, p.295–310, 2000.

PUZZI, D. **Manual de armazenamento de grãos**. São Paulo, Agronômica Ceres, 666p. 2000.

RAHMAN, M. S. **Food properties handbook**. 1^a ed. CRC Press, Boca Raton, 1995.

RATTANAPANT, O.; LEBERT, A.; LAGUERRE, J.C.; BIMBENET, J.J. Simulation of Deep Bed Drying of Particles. In: SPIES, W.E.; SCHUBERT, H. ed. **Engineering and Food**. v.1, Elsevier Applied Science, p.579-591, 1990.

REINHARDT, D.H. **A planta e o seu ciclo**. In: REINHARDT, D.H.; SOUZA, L.F. da S.; CABRAL, J.R.S. (Org.). Abacaxi. Produção: Aspectos técnicos. Cruz das almas: EMBRAPA Mandioca e Fruticultura. Brasília, DF: EMBRAPA Comunicação para Transferência de Tecnologia, 2000. p.13-14; il. (Frutas do Brasil, 7).

RIBEIRO, M.E.R.; RODRIGUES, R.C.; COSTA, N.L. Utilização de resíduos da agroindústria na alimentação animal: In: Reunião anual da sociedade brasileira de zootecnia, 30.1993, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Zootecnia, 1993. p.509.

ROMBOUTS, F.M.; PILNIK, W. Enzymes in fruit and vegetable juice technology. **Process Biochemistry**, p.9-13, 1978.

RODE, L.M.; WEAKLEY, D.C.; SATTER, L.D. Effect of forage amount and particle size in diets of lactating dairy cows on site digestion and microbial protein synthesis. **Canadian Journal Animal Science**, v.65, p.101-111, 1985.

RODRIGUES, A.M.; SANT'ANNA, E.S. Efeito do cloreto de sódio na produção de proteínas (*Saccharomyces cerevisiae*) em fermentação semi-sólida. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v.21, p.57-62, 2001.

ROGÉRIO, M.C.P.; BORGES, I.; NEIVA, J.N.M.; PIMENTEL, J.C.M.P.; CARVALHO, F.C.; PONTE, T.R.; COSTA, J.B.; CATUNDA, A.G.V. Valor nutritivo do subproduto da indústria processadora de abacaxi (*Ananas comosus*) em dietas para ovinos 3. parâmetros ruminais. In: Reunião Anual da Sociedade Brasileira de Zootecnia, 41., 2004, Campo Grande. **Anais...**Campo Grande: SBZ, 2004, 1CD ROM.

SAMAPUNDO, S.; DEVLIEGHERE, F. MEULENAER, de B.; ATUKWASE, A.; LAMBONI, Y.; DEBEVERE, J.M. Sorption isotherms and isosteric heats of sorption of whole yellow dent corn. **Journal of Food Engineering**, v.63, p.163-170, 2006.

SANTOS, D.T.; SARROUH B.F.; SANTOS J.C.; PÉREZ V.H.; SILVA S.S. Potencialidades e aplicações da fermentação semi-sólida em biotecnologia. **Janus**, n.4, p.164-183, 2006.

SARAVACOS, G.D.; TSIOURVAS, D.A. TSAMI, E. Effect of temperature on the water adsorption isotherms of Sultana raisins. **Journal of Food Science**, v.51, p.381-387, 1986.

SCHMIDELL, W.; FACCIOTTI, M.C.R **Biorreatores e processos fermentativos**. In: SCHMIDELL, W.; BORZANI, W.B.; LIMA, U.A.; AQUARONE, E. (Coord.).

Biotecnologia industrial: Engenharia bioquímica. 1.ed. v.2, São Paulo: Edgard Blücher, 2001. Cap 8. p.179-192.

SIMAL, S.; FEMENIA, A.; GARAU, M.C.; ROSSELLÓ, C. Use of exponential, Page's and diffusional models to simulate the drying kinetics of kiwi fruit. **Journal of Food Engineering**, v.66, p.323-328, 2005.

SILVA, A.J. Análise de alimentos – métodos químicos e biológicos. Viçosa, MG Imprensa Universitária–UFV. 166p. 1998.

SILVA, D. J. **Análise de alimentos: Métodos químicos e biológicos**. Viçosa: Imprensa Universitária, UFV, 1981.166p.

SILVA, E.; SASSON, A. Biotechnologies: an agenda for development. **Biotechnology Development Review**, v.4, p.37-47, 1995.

SILVA, M.M.da ; GOUVEIA, J.P.G. de.; ALMEIDA, F. de A.C. Demanda energética envolvida no processo de desorção de umidade em polpa de manga. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v.4, p.107-117, 2002.

SOPADE, P.A.; AJISEGIRI, E.S. Moisture sorption study on nigerian foods: maize and sorghum. **Journal of Food Process Engineering**, v.17, p.33-56, 1994.

SOUSA, M.B. de.; PEDROZA, J.P.; BELTRÃO, N.E. de M.; SEVERINO, L.S.; DANTAS, F.P. Cinética de secagem do farelo de mamona. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v.8, p.135-146, 2006.

STEINKRAUS, K.H. Classification of fermented foods: Worldwide review of household fermentation techniques. **Food Control**, v.8, p.311-317, 1997.

TAN, D.L.S.; MIYAMOTO, K.; ISHIBASHI, K.; MATSUDA, K.; SATOW, T. Thin-layer drying of sweet potato chips and pressed grates. **Transactions of the ASAE**, v.44, p.669-674, 2001.

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

TOGRUL, I.T.; PEHLIVAN, D. Modelling of thin layer drying kinetics of some fruits under open-air sun drying process. **Journal of Food Engineering**, v.65, p.413-425, 2004.

TOLABA, M.P.; SUAREZ, C. Simulation of the thin-layer drying of corn by means of the diffusion model. **Lebensmittel-Wissenschaft und Technologie**, v.21, p.83-85, 1995.

VAILLANT, F.; MILLAN, A.; DORNIER, M.; DECLOUX, M.; REYNES, M. Strategy for economical optimization of the clarification of pulpy fruit juices using crossflow microfiltration. **Journal of Food Engineering**, v.48, p.83-90, 2001.

VALENTE, P.P.S. da S. **Desidratação osmótica e secagem de abacaxi (*Ananas Comosus* (L.) Merrill), variedade Pérola**. Campinas: UNICAMP, 142p. 2007. Dissertação Mestrado

VAN SOEST, P.J. **Nutritional ecology of the ruminant**. 2nded. Ithaca, NY: Cornell University, 1994. 476p.

VERSTRAETE, W.; BEER, D. DE.; PENA, M.; LETTINGA, G.; LENS, P.; DEBEER, D. Anaerobic bioprocessing of organic wastes. **World Journal of Microbiology and Biotechnology**, v.12, p.221-238, 1996.

VILLAS BÔAS, S. G. **Conversão do bagaço de maçã por *Candida utilis* e *Pleurotus ostreatus* visando à produção de suplemento para ração animal**. Santa Catarina: UFSC, 125p. 2001. Dissertação Mestrado

VILLEN, R.A. **Biotecnologia: Histórico e tendências.** Disponível em: <<http://www.hottopos.com>>. Acesso em: 04 de junho de 2010.

VINIEGRA-GONZÁLEZ, G. Strategies for the selection of mold strains geared to produce enzymes on solid substrates, In: GALINDO, E.; RAMYREZ, O.T. (Eds.), **Advances in Bioprocess Engineering II, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.** p.123–136,1998.

VITOLO, M. Aplicações de enzimas na tecnologia de alimentos. In: AQUARONE, E. et al. (Coord.). **Biotecnologia industrial: biotecnologia na produção de alimentos.** 1. ed., v. 4. São Paulo: Edgard Blücher, 2001. cap. 14. p.387-418.

WAINWRIGHT, M. **Introducción a la biotecnología de los hongos.** Zaragoza, España: Acribia, 228p. 1995.

WANG, C.Y.; SINGH, R.P. A single layer drying equation for rough rice. ASAE Paper, n. 78-3001, 1978.

WANG, N.; BRENNAN, J.G. Thermal conductivity of potato as a function of moisture contents. **Journal of Food Engineering**, v.17, p.153-160, 1991.

WAUGHON, T.G.; PENA, R.S. Avaliação higroscópica da fibra residual do abacaxi. **Revista Brasileira de Tecnologia Agroindustrial**, v.1, p.83-92, 2007.

WAUGHON, T.G.; PENA, R.S. Modelagem da secagem em camada delgada da fibra residual do abacaxi. **Boletim: CEPPA**, v.26, p.297-306, 2008.

WEISS, W.P. Predicting energy values of feeds, **Journal Dairy Science**, v.76, p.1802-1811, 1993.

YOSHIDA, C.M.P. **Cinética de secagem do milho superdoce.** Campinas: UNICAMP, 149p. 1997. Dissertação Mestrado

YOSHIDA, C.M.P.; MENEGALLI, F.C. Drying of supersweet corn. In: International Drying Symposium, 12, Noordwijkerhout. **Proceedings...** Elsevier, 2000.

ZHANG, X.W.; LIU, X.; GU, D.X.; ZHOU, W.; WANG, R.L.; LIU, P. Desorption isotherms of some vegetables. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v.70, p.303-306, 1996.