



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA



**ESTUDO DA SECAGEM EM DOIS TIPOS DE
SECADORES: AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS
OPERACIONAIS E COMPORTAMENTO DO
MATERIAL SECO**

Rafael Augustus de Oliveira

Campinas, Maio de 2009.

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS – UNICAMP
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA – FEAGRI**

**ESTUDO DA SECAGEM EM DOIS TIPOS DE
SECADORES: AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS
OPERACIONAIS E COMPORTAMENTO DO
MATERIAL SECO**

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas para obtenção do título de Doutor em Engenharia Agrícola na área de concentração de Tecnologia Pós-Colheita.

Rafael Augustus de Oliveira

Orientador: Prof. Dr. Kil Jin Park

Campinas, Maio de 2009.

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNICAMP

OL41e Oliveira, Rafael Augustus de
Estudo da secagem em dois tipos de secadores:
avaliação dos parâmetros operacionais e comportamento
do material seco / Rafael Augustus de Oliveira. --
Campinas, SP: [s.n.], 2009.

Orientador: Kil Jin Park.
Tese de Doutorado - Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola.

1. Vácuo. 2. Radiação infravermelha. 3. Inulina. I.
Park, Kil Jin. II. Universidade Estadual de Campinas.
Faculdade de Engenharia Agrícola. III. Título.

Título em Inglês: Study of drying in two different types of dryers: evaluation of
operational parameters and dried material behavior

Palavras-chave em Inglês: Vacuum, Infrared radiation, Inulin

Área de concentração: Tecnologia Pós-Colheita

Titulação: Doutor em Engenharia Agrícola

Banca examinadora: Cristina Yoshie Takeiti, Felix Emílio Prado Cornejo, Inácio Maria
Dal Fabbro, João Domingos Biagi

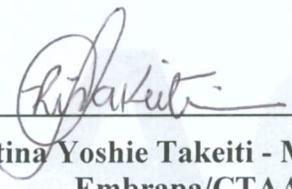
Data da defesa: 08/05/2009

Programa de Pós Graduação: Engenharia Agrícola

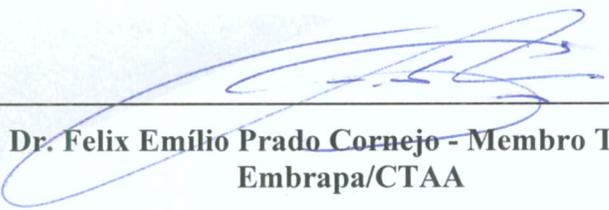
Este exemplar corresponde à redação final da **Tese de Doutorado** defendida por **Rafael Augustus de Oliveira**, aprovada pela Comissão Julgadora em 08 de maio de 2009, na Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas.



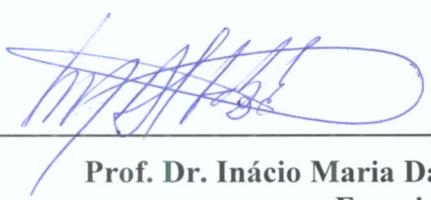
Prof. Dr. Kil Jin Park – Presidente e Orientador
Feagri/Unicamp



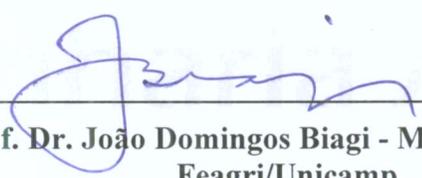
Dr.ª. Cristina Yoshie Takeiti - Membro Titular
Embrapa/CTAA



Dr. Felix Emilio Prado Cornejo - Membro Titular
Embrapa/CTAA



Prof. Dr. Inácio Maria Dal Fabbro - Membro Titular
Feagri /Unicamp



Prof. Dr. João Domingos Biagi - Membro Titular
Feagri/Unicamp

“Montanhas não podem ser vencidas, exceto por caminhos sinuosos.”

Johann Wolfgang von Goethe (1749 – 1832)

DEDICATÓRIA

À Juliana, pelo amor, cumplicidade e paciência,

Aos meus pais Antonio e Ednamar, por todo o amor e dedicação,

Aos meus irmãos Denis e Leandro, pela amizade e apoio,

À minha avó Laura e meu avô Orlando (in memoriam), que sabia desde sempre que este dia chegaria.

AGRADECIMENTOS

A Deus, que ilumina meu caminho.

À minha esposa Juliana que suportou toda esta luta sem fraquejar.

Ao Prof. Dr. Kíl Jin Park, pela orientação, amizade e respeito. Um exemplo de dignidade e competência.

Ao Major Edward A. Murphy por valorizar todo o meu trabalho.

À banca examinadora, Prof. Dr. João Domingos Biagi, Prof. Dr. Inácio Maria Dal Fabbro, Dr. Felix Emilio Prado Cornejo e Dr^a. Cristina Yoshie Takeiti, pelas valiosas contribuições.

Prof^a. Dr^a. Maria Ângela Fagnani pelo interesse ao meu trabalho e pela vontade em ajudar,

Prof. Dr. Inácio Maria Dal Fabbro pela amizade, pelas conversas, conselhos e ajuda em todo o período de convivência na faculdade.

Aos Professores Rossi, Daniella, Armando pela ajuda em momentos cruciais.

Aos funcionários Edson, André, Edgar, Francisco, Rosália, Chicão, Luiz, Leandro, Clóvis, Alexandre, Marta, Sidnei Aninha, pela boa vontade em ajudar.

Aos amigos que torceram pelo êxito em mais esta etapa, em especial ao Daniel, Rodrigo, Angel, Du, Rosa Helena, Juliana Toneli, Anna, Gra, Cris, Carmel.

Ao hoje Engenheiro Agrícola e ex-aluno de iniciação científica, Marcos Chiorato, pela ajuda nos testes no secador vibrofluidizado,

Aos alunos Bruno, Marina e Vanessa pela ajuda nos ensaios experimentais,

Luciana por ceder as batatas para os testes preliminares.

Ao CNPq, pela concessão da bolsa de estudos.

À FAPESP pelo suporte financeiro.

À CPG, à Faculdade de Engenharia Agrícola e à Universidade Estadual de Campinas.

A todos que colaboraram para a execução deste trabalho.

SUMÁRIO

RESUMO	xxii
ABSTRACT	xxiii
Capítulo I - INTRODUÇÃO.....	1
Capítulo II - TESTES DO SECADOR VIBROFLUIDIZADO.....	3
II.1 INTRODUÇÃO.....	3
II.2 OBJETIVOS.....	5
II.3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
II.3.1 Secagem em leito vibrofluidizado	5
II.3.1.1 Propriedades fluidodinâmicas.....	5
II.3.1.2 Fluidização	6
II.3.1.3 Leito vibro-fluidizado.....	8
II.3.2 Perdas friccionais.....	11
II.3.2.1 Perda de carga localizada	11
II.3.2.2 Número de Reynolds	12
II.3.3 Distribuição do Tempo de Residência - DTR	12
II.3.4 Milho	13
II.3.4.1 Produção	14
II.3.4.2 Aplicações	15
II.3.4.3 Secagem de milho.....	16
II.3.5 Planejamento Experimental.....	17
II.4 MATERIAL E MÉTODOS.....	18
II.4.1 Secador Vibrofluidizado.....	18
II.4.1.1 Monitoramento do sistema de ventilação	19
II.4.1.1.1 Pressão e velocidade operacional.....	19
II.4.1.1.2 Perfil de temperatura.....	23
II.4.1.2 Perda de carga dos sólidos em leito fluidizado.....	23
II.4.1.3 Cinética de secagem do milho	25
II.4.1.4 Determinação do teor de água das amostras.....	26
II.4.1.5 Distribuição do tempo de residência – DTR	27

II.4.1.5.1	Ensaio com grãos de milho	27
II.4.1.5.2	Ensaio com grãos de feijão preto	27
II.4.1.5.3	Análise de imagens	29
II.4.1.5.4	Ajuste do método de análise das imagens digitais para o feijão preto....	30
II.5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	32
II.5.1	Monitoramento do Secador Vibrofluidizado.....	32
II.5.1.1	Pressão e velocidade operacional	32
II.5.1.2	Perfil de temperatura	35
II.5.1.3	Levantamento da perda de carga do leito de secagem.....	36
II.5.1.3.1	Levantamento da perda de carga do leito de secagem (alimentação e descarga de sólidos abertas)	36
II.5.1.3.2	Levantamento da perda de carga do leito de secagem (alimentação e descarga de sólidos vedadas).....	37
II.5.1.4	Pressões estáticas nos ventiladores de insuflamento e exaustão	39
II.5.1.4.1	Pressões estáticas nos ventiladores de insuflamento e exaustão (alimentação e descarga de sólidos abertas).....	39
II.5.1.4.2	Pressões estáticas nos ventiladores de insuflamento e exaustão (alimentação e descarga de sólidos vedadas)	40
II.5.1.5	Perfil de velocidade	41
II.5.1.5.1	Perfil de velocidade com alimentação e descarga abertas	41
II.5.1.5.2	Perfil de velocidade com alimentação e descarga vedadas.....	44
II.5.1.6	Perda de carga dos sólidos em leito fluidizado.....	49
II.5.2	Cinética de Secagem do Milho.....	52
II.5.3	Distribuição do Tempo de Residência do Milho.....	54
II.5.4	Distribuição do Tempo de Residência do Feijão Preto	58
II.5.4.1	Por meio da massa de traçador	58
II.5.4.2	Por meio de imagens.....	61
II.5.4.3	Análise das imagens – IDRISI	65
II.5.4.4	Ajuste do método de análise das imagens digitais	67
II.6	CONCLUSÕES	71
II.7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	73

Capítulo III - CONSTRUÇÃO E TESTES DO SECADOR AGITADOR/MISTURADOR

79

III.1	INTRODUÇÃO.....	79
III.2	OBJETIVOS.....	80
III.3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	80
III.3.1	Secagem.....	80
III.3.1.1	Definições.....	80
III.3.1.2	Processos de secagem.....	81
III.3.1.3	Secadores.....	83
III.3.1.4	Cinética de secagem.....	88
III.3.1.4.1	Teoria difusional.....	88
III.3.1.4.2	Modelo de Page.....	89
III.3.2	Secador Agitador/Misturador.....	90
III.3.2.1	Secagem por radiação infravermelha.....	90
III.3.2.1.1	Definições.....	90
III.3.2.1.2	Aquecimento e Conservação de energia.....	92
III.3.2.1.3	Aplicações.....	93
III.3.2.2	Secagem a vácuo.....	95
III.3.3	Distribuição de Tempo de Residência – DTR.....	97
III.4	MATERIAL E MÉTODOS.....	99
III.4.1	Secador Agitador/Misturador.....	99
III.4.2	Distribuição do Tempo de Residência – DTR.....	101
III.4.3	Secagem.....	103
III.4.3.1.1	Preparo da matéria-prima.....	103
III.4.3.1.2	Ensaio de secagem.....	104
III.5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	106
III.5.1	Distribuição do Tempo de Residência – DTR.....	106
III.5.1.1	Curvas obtidas por meio da massa do traçador.....	106
III.5.1.2	Curvas obtidas por meio das imagens.....	108
III.5.2	Secagem.....	110
III.6	CONCLUSÕES.....	114

III.7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	115
Capítulo IV - SECAGEM DE BATATA NO SECADOR AGITADOR/MISTURADOR		
	119	
IV.1	INTRODUÇÃO.....	119
IV.2	OBJETIVOS.....	120
IV.3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	120
IV.3.1	Secagem.....	120
IV.3.1.1	Cinética de secagem	120
IV.3.2	Propriedades mecânicas dos materiais biológicos.....	123
IV.3.2.1	Rigidez.....	124
IV.4	MATERIAL E MÉTODOS.....	125
IV.4.1	Secador Agitador/Misturador	125
IV.4.2	Secagem de batata	126
IV.4.3	Testes de Compressão Uniaxial.....	128
IV.5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	128
IV.5.1	Secagem de Batata.....	128
IV.5.2	Testes de Compressão	133
IV.6	CONCLUSÕES	137
IV.7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	138
Capítulo V - SECAGEM DE YACON		
	139	
V.1	INTRODUÇÃO.....	139
V.2	OBJETIVOS.....	141
V.3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	141
V.3.1	Yacon.....	141
V.3.2	Secagem.....	143
V.3.2.1	Importância do Processamento dos Alimentos.....	143
V.3.2.2	Processo de secagem	143
V.3.3	Consumo de Energia na Secagem	146
V.3.3.1	Energia elétrica.....	146
V.3.3.2	Conservação de energia elétrica	146
V.4	MATERIAL E MÉTODOS.....	147

V.4.1	Matéria-Prima.....	147
V.4.2	Planejamento Experimental.....	147
V.4.3	Secagem.....	149
V.4.4	Consumo de energia	149
V.5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	150
V.5.1	Secagem de Raízes de yacon.....	150
V.5.2	Análise pelo Método de Superfície de Resposta	150
V.5.2.1	Taxa de secagem padronizada	150
V.5.2.2	Conservação de energia.....	158
V.6	CONCLUSÕES.....	163
V.7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	164
Capítulo VI -	EXTRAÇÃO de inulina	167
VI.1	INTRODUÇÃO.....	167
VI.2	OBJETIVOS.....	168
VI.3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	168
VI.3.1	Chicória	168
VI.3.2	Yacon.....	169
VI.3.3	Inulina.....	171
VI.3.4	Extração por Difusão	173
VI.3.4.1	Conceitos básicos	173
VI.3.4.2	Extração de inulina.....	174
VI.4	MATERIAL E MÉTODOS.....	175
VI.4.1	Raízes de Chicória.....	175
VI.4.1.1	Secagem e armazenamento.....	175
VI.4.1.2	Extração de inulina de raízes de chicória	176
VI.4.2	Raízes de Yacon	177
VI.4.2.1	Extração de inulina de raízes de yacon.....	177
VI.5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	179
VI.5.1	Extração de inulina a partir de raízes secas de chicória	180
VI.5.2	Extração de inulina a partir de raízes secas de Yacon.....	183
VI.6	CONCLUSÕES.....	186

VI.7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	187
CONCLUSÕES GERAIS	191
APÊNDICES	195
Apêndice A: Perda de carga do leito de secagem do secador vibrofluidizado - sistema aberto	195
Apêndice B: Pressões estáticas dos ventiladores de insuflamento e exaustão (sistema aberto).....	196
Apêndice C: Perda de carga do leito de secagem do secador vibrofluidizado (sistema fechado)	197
Apêndice D: Pressões estáticas dos ventiladores de insuflamento e exaustão (sistema fechado).....	198
Apêndice E: Curvas de secagem de raízes de yacon baseadas no planejamento experimental fatorial 2^4	199
Apêndice F: Curvas de secagem de batata congelada baseadas no planejamento experimental fatorial 2^4	209

LISTA DE FIGURAS

FIGURA II.1 – SECADOR VIBROFLUIDIZADO – SVF.....	19
FIGURA II.2 – POSIÇÕES USADAS NA VÁLVULA PARA REALIZAR A CALIBRAÇÃO.....	20
FIGURA II.3 – TUBO DE PITOT.	21
FIGURA II.4 – POSIÇÕES RADIAIS USADAS PARA OBTER AS VELOCIDADES.....	21
FIGURA II.5 – POSIÇÃO DAS TOMADAS DE VELOCIDADE DO AR COM TUBO DE PITOT.	22
FIGURA II.6 – DESENHO ESQUEMÁTICO DO TUBO DE VIDRO ACOPLADO AO SECADOR CONVECTIVO.	24
FIGURA II.7 – IMAGEM DE REFERÊNCIA DO FEIJÃO PRETO E RESPECTIVO HISTOGRAMA.	31
FIGURA II.8 – PERFIL DE TEMPERATURA DO ENSAIO 6.....	36
FIGURA II.9 – PERDA DE CARGA DO LEITO DE SECAGEM COM VÁLVULA DE EXAUSTÃO NA POSIÇÃO 6.....	37
FIGURA II.10 – PERDA DE CARGA DO LEITO DE SECAGEM COM VÁLVULA DE EXAUSTÃO NA POSIÇÃO 6.....	38
FIGURA II.11 – PRESSÃO ESTÁTICA DEVIDO AOS VENTILADORES - VÁLVULA DE INSUFLAMENTO NA POSIÇÃO 4 (SISTEMA ABERTO).....	39
FIGURA II.12 – PRESSÃO ESTÁTICA DEVIDO AOS VENTILADORES - VÁLVULA DE INSUFLAMENTO NA POSIÇÃO 4 (SISTEMA FECHADO).	40
FIGURA II.13 – PERDA DE CARGA DE MASSA DE GRÃOS DE FEIJÃO PRETO EM FUNÇÃO DA VELOCIDADE DO AR – CAMADA DE 12 CM.....	50
FIGURA II.14 – PERDA DE CARGA DE MASSA DE CUBOS DE RAÍZES DE CHICÓRIA SECA EM FUNÇÃO DA VELOCIDADE DO AR – CAMADA DE 8 CM.	51
FIGURA II.15 – PERDA DE CARGA DE MASSA DE CUBOS DE RAÍZES DE CHICÓRIA SECA EM FUNÇÃO DA VELOCIDADE DO AR – CAMADA DE 15 CM.	51
FIGURA II.16 – CURVA DE RESPOSTA E PERFIL PARA DIFUSIVIDADE EFETIVA EM SECAGEM DE MILHO.....	54
FIGURA II.17 – FOTOGRAFIA MOSTRANDO GRÃOS DE MILHO E TRAÇADOR (GRÃOS PINTADOS).....	55
FIGURA II.18 – HISTOGRAMA DO ENSAIO 3 EM ESCALA DE CINZA - DE 0-255 (A) E DE 0-70 (B).....	55
FIGURA II.19 – CURVAS NORMALIZADAS E ACUMULATIVAS DE DTR – AMPLITUDE MÁXIMA.	56
FIGURA II.20 – CURVAS NORMALIZADAS E ACUMULATIVAS DE DTR – AMPLITUDE MÉDIA.....	57
FIGURA II.21 – CURVAS NORMALIZADAS E ACUMULATIVAS DE DTR – AMPLITUDE MÍNIMA.....	57
FIGURA II.22 – CURVAS DE DTR PARA O FEIJÃO PRETO - AMPLITUDE 1 (MÁXIMA).	58
FIGURA II.23 – CURVAS DE DTR PARA O FEIJÃO PRETO - AMPLITUDE 2.	59
FIGURA II.24 – CURVAS DE DTR PARA O FEIJÃO PRETO - AMPLITUDE 3.	59
FIGURA II.25 – CURVAS DE DTR PARA O FEIJÃO PRETO - AMPLITUDE 4.	60
FIGURA II.26 – CURVAS DE DTR PARA O FEIJÃO PRETO - AMPLITUDE 5.	60
FIGURA II.27 – IMAGEM DE UMA AMOSTRA E SEU RESPECTIVO HISTOGRAMA.....	61
FIGURA II.28 – CURVAS DE DTR (BASE NAS IMAGENS) PARA O FEIJÃO PRETO – AMPLITUDE 1 (MÁXIMA).....	62
FIGURA II.29 – CURVAS DE DTR (BASE NAS IMAGENS) PARA O FEIJÃO PRETO – AMPLITUDE 2.....	63

FIGURA II.30 – CURVAS DE DTR (BASE NAS IMAGENS) PARA O FEIJÃO PRETO – AMPLITUDE 3.....	63
FIGURA II.31 – CURVAS DE DTR (BASE NAS IMAGENS) PARA O FEIJÃO PRETO – AMPLITUDE 4.....	64
FIGURA II.32 – CURVAS DE DTR (BASE NAS IMAGENS) PARA O FEIJÃO PRETO – AMPLITUDE 5.....	64
FIGURA II.33 – IMAGEM DE 8 BITS E SUA RECLASSIFICAÇÃO BASEADO NO LIMAR MÉDIO.	66
FIGURA II.34 – HISTOGRAMA NUMÉRICO DA FIGURA II.33.	66
FIGURA II.35 – CURVAS DE DTR (MÉTODO AJUSTADO) - AMPLITUDE 1 (MÁXIMA).....	68
FIGURA II.36 – CURVAS DE DTR (MÉTODO AJUSTADO) - AMPLITUDE 2.....	68
FIGURA II.37 – CURVAS DE DTR (MÉTODO AJUSTADO) - AMPLITUDE 3.....	69
FIGURA II.38 – CURVAS DE DTR (MÉTODO AJUSTADO) - AMPLITUDE 4.....	69
FIGURA II.39 – CURVAS DE DTR (MÉTODO AJUSTADO) - AMPLITUDE 5.....	70
FIGURA III.1 – CLASSIFICAÇÃO DOS SECADORES BASEADA NO MÉTODO DE OPERAÇÃO.	84
FIGURA III.2 – CLASSIFICAÇÃO DOS SECADORES BASEADA NA FORMA FÍSICA DA ALIMENTAÇÃO.....	85
FIGURA III.3 – CLASSIFICAÇÃO DOS SECADORES BASEADA NA ESCALA DE PRODUÇÃO.....	86
FIGURA III.4 – CLASSIFICAÇÃO DOS SECADORES BASEADA EM PROJETOS ESPECIAIS.	87
FIGURA III.5 – ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO: CLASSIFICAÇÃO DOS SECADORES BASEADA EM PROJETOS ESPECIAIS.	92
FIGURA III.6 – CURVA E DE DISTRIBUIÇÃO DO TEMPO DE RESIDÊNCIA.	99
FIGURA III.7 – DESENHO ESQUEMÁTICO DO PROTÓTIPO DO SECADOR AGITADOR/MISTURADOR.	100
FIGURA III.8 – AQUECEDOR ELÉTRICO INFRAVERMELHO DE TUBO DE QUARTZO.....	101
FIGURA III.9 – CURVAS DE DTR PARA O FEIJÃO PRETO - CORRIDA 1.....	107
FIGURA III.10 – CURVAS DE DTR PARA O FEIJÃO PRETO - CORRIDA 2.....	107
FIGURA III.11 – CURVAS DE DTR PARA O FEIJÃO PRETO - CORRIDA 1.....	108
FIGURA III.12 – CURVAS DE DTR PARA O FEIJÃO PRETO - CORRIDA 2.....	109
FIGURA III.13 – CURVAS OBTIDAS PARA O ENSAIO PRELIMINAR DE SECAGEM DE BATATA.....	110
FIGURA III.14 – CURVAS OBTIDAS PARA O ENSAIO DE SECAGEM CONVECTIVA DE SECAGEM DE BATATA.	111
FIGURA III.15 – CURVAS OBTIDAS PARA O ENSAIO COM APLICAÇÃO DE ENERGIA RADIANTE NA SECAGEM DE BATATA.	111
FIGURA III.16 – CURVAS OBTIDAS PARA O ENSAIO COM APLICAÇÃO DE PULSO DE VÁCUO NA SECAGEM DE BATATA.	112
FIGURA III.17 – CURVAS OBTIDAS PARA O ENSAIO COM APLICAÇÃO DE PULSO DE VÁCUO E ENERGIA RADIANTE NA SECAGEM DE BATATA.	112
FIGURA IV.1 – CURVA DE SECAGEM.	121
FIGURA IV.2 – CUBO ELEMENTAR DE TENSÕES.....	124
FIGURA IV.3 – SECADOR AGITADOR/MISTURADOR – SAM.....	125
FIGURA IV.4 – CURVA DE SECAGEM DA BATATA – ENSAIO 15.	129
FIGURA IV.5 – SUPERFÍCIE DE RESPOSTA E CURVAS EM NÍVEL PARA OS PARÂMETROS DA SECAGEM DE BATATAS CUBETADAS CONGELADAS – EM NÍVEL INTERMEDIÁRIO (0) DAS DEMAIS VARIÁVEIS.....	133
FIGURA IV.6 – CURVA DO TESTE DE COMPRESSÃO PARA ESPÉCIME CÚBICO DE BATATA SECA – AMOSTRA DO ENSAIO	

14.	137
FIGURA V.1 – DIAGRAMA DO PROCESSO DE SECAGEM.	144
FIGURA V.2 – GRÁFICO DOS RESÍDUOS.	155
FIGURA V.3 - SUPERFÍCIES DE RESPOSTA E CURVAS EM NÍVEL PARA OS PARÂMETROS DA SECAGEM DE RAÍZES CUBETADAS DE YACON – EM NÍVEL INTERMEDIÁRIO (0) DAS DEMAIS VARIÁVEIS.	157
FIGURA V.4 - SUPERFÍCIE DE RESPOSTA E CURVAS EM NÍVEL PARA OS PARÂMETROS DA SECAGEM DE RAÍZES CUBETADAS DE YACON – EM NÍVEL INTERMEDIÁRIO (0) DAS DEMAIS VARIÁVEIS.	163
FIGURA VI.1 - SUPERFÍCIE DE RESPOSTA E CURVAS EM NÍVEL MOSTRANDO OS EFEITOS DOS PARÂMETROS OPERACIONAIS DE SECAGEM NA EXTRAÇÃO DE INULINA DE RAÍZES CUBETADAS SECAS DE CHICÓRIA.	183

LISTA DE TABELAS

TABELA II.1 – PRODUÇÃO BRASILEIRA ANUAL DE MILHO (EM MIL TONELADAS).....	15
TABELA II.2 – POSIÇÕES ONDE O TUBO DE PITOT FOI ACOPLADO PARA CALIBRAÇÃO.	20
TABELA II.3 – POSIÇÃO DAS VÁLVULAS NA COLETA DOS DADOS.	21
TABELA II.4 – PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL FRACIONÁRIO 2^{4-1} PARA SECAGEM DE MILHO.	26
TABELA II.5 – DADOS DE PRESSÃO DINÂMICA NA SAÍDA O VENTILADOR.	32
TABELA II.6 – DADOS DE PRESSÃO DINÂMICA OBTIDOS NA ENTRADA DA CÂMARA 1.....	33
TABELA II.7 – DADOS DE PRESSÃO DINÂMICA OBTIDOS NA ENTRADA DA CÂMARA 2.....	33
TABELA II.8 – DADOS DE PRESSÃO DINÂMICA OBTIDOS NA ENTRADA DA CÂMARA 3.....	34
TABELA II.9 – DADOS DE PRESSÃO DINÂMICA OBTIDA NA SAÍDA DO EXAUSTOR.....	34
TABELA II.10 – CARACTERÍSTICAS DO AMBIENTE.....	34
TABELA II.11 – DADOS MÉDIOS DE VELOCIDADE – V [M/S] E VAZÃO – Q [M ³ /S].	35
TABELA II.12 – DADOS DE VELOCIDADE NO EXAUSTOR.	35
TABELA II.13 – VELOCIDADE, VAZÃO E NÚMERO DE REYNOLDS NAS CÂMARAS DE SECAGEM.....	42
TABELA II.14 – VELOCIDADE, VAZÃO E NÚMERO DE REYNOLDS NA SAÍDA DO VENTILADOR DE INSUFLAMENTO. ..	43
TABELA II.15 – VELOCIDADE, VAZÃO E NÚMERO DE REYNOLDS NA SAÍDA DO VENTILADOR DE EXAUSTÃO.	44
TABELA II.16 – VELOCIDADE, VAZÃO E NÚMERO DE REYNOLDS NAS CÂMARAS DE SECAGEM.....	45
TABELA II.17 – VELOCIDADE, VAZÃO E NÚMERO DE REYNOLDS NA SAÍDA DO VENTILADOR DE INSUFLAMENTO. ..	46
TABELA II.18 – VELOCIDADE, VAZÃO E NÚMERO DE REYNOLDS NA SAÍDA DO VENTILADOR DE EXAUSTÃO.	48
TABELA II.19 – PROPRIEDADES FÍSICAS DOS GRÃOS DE FEIJÃO PRETO.	50
TABELA II.20 – VALORES DE DIFUSIVIDADE EFETIVA PARA SECAGEM DE MILHO EM SECADOR VIBROFLUIDIZADO. 52	
TABELA II.21 – EFEITO ESTIMADO, ERRO PADRÃO E GRAU DE SIGNIFICÂNCIA ESTATÍSTICA (P) PARA PARA SECAGEM DE MILHO EM SECADOR VIBROFLUIDIZADO.....	53
TABELA II.22 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA) PARA SECAGEM DE MILHO EM SECADOR VIBROFLUIDIZADO... 53	
TABELA II.23 – TEMPO DE RESIDÊNCIA EM FUNÇÃO DA AMPLITUDE DE TRABALHO DO SECADOR VIBROFLUIDIZADO.	56
TABELA II.24 – TEMPO DE RESIDÊNCIA MÉDIO (MASSA).	61
TABELA II.25 – TEMPO DE RESIDÊNCIA MÉDIO (IMAGENS).....	65
TABELA II.26 – TEMPO DE RESIDÊNCIA MÉDIO (IMAGENS).....	67
TABELA II.27 – TEMPO DE RESIDÊNCIA MÉDIO (MÉTODO AJUSTADO).	70
TABELA II.28 – DESVIO MÉDIO RELATIVO DMR ENTRE TEMPO DE RESIDÊNCIA POR MEIO DA MASSA, MÉTODO DAS IMAGENS INICIAL E MÉTODO DAS IMAGENS AJUSTADO.	71
TABELA III.1 – TEMPO DE RESIDÊNCIA MÉDIO (MASSA).	108
TABELA III.2 – TEMPO DE RESIDÊNCIA MÉDIO (IMAGENS).	109
TABELA III.3 – VALORES DA DIFUSIVIDADE EFETIVA PARA CADA ENSAIO.	113

TABELA III.4 – CONSTANTES DO MODELO DE PAGE.	114
TABELA IV.1 – NÍVEIS DAS VARIÁVEIS CODIFICADAS E REAIS PARA O PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL DA SECAGEM.	127
TABELA IV.2 – TAXA DE SECAGEM PARA O PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL DA SECAGEM DE BATATA.....	130
TABELA IV.3 – EFEITO ESTIMADO, ERRO PADRÃO E GRAU DE SIGNIFICÂNCIA ESTATÍSTICA (P) PARA A TAXA DE SECAGEM DE AMOSTRAS DE BATATA.	131
TABELA IV.4 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA) PARA A TAXA DE SECAGEM PARA AMOSTRAS DE BATATA CUBETADAS E CONGELADAS.	132
TABELA IV.5 – MÓDULO DE YOUNG (E) PARA O PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL DE SECAGEM DE BATATA.	134
TABELA IV.6 – EFEITO ESTIMADO, ERRO PADRÃO E GRAU DE SIGNIFICÂNCIA ESTATÍSTICA (P) PARA O MÓDULO DE YOUNG DE AMOSTRAS DE BATATAS SECAS.	135
TABELA IV.7 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA) PARA O MÓDULO DE YOUNG (E) DE AMOSTRAS DE BATATA SECAS.	136
TABELA V.1 – NÍVEIS DAS VARIÁVEIS CODIFICADAS E REAIS PARA O PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL DA SECAGEM DE YACON.	148
TABELA V.2 – TAXAS DE SECAGEM PADRONIZADA PARA O PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL DA SECAGEM DE YACON.	151
TABELA V.3 – EFEITO ESTIMADO, ERRO PADRÃO E GRAU DE SIGNIFICÂNCIA ESTATÍSTICA (P) PARA AS TAXAS DE SECAGEM DE RAÍZES DE YACON – ERRO RESIDUAL.....	152
TABELA V.4 – EFEITO ESTIMADO, ERRO PADRÃO E GRAU DE SIGNIFICÂNCIA ESTATÍSTICA (P) PARA AS TAXAS DE SECAGEM DE RAÍZES DE YACON – ERRO PURO.	153
TABELA V.5 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA) PARA AS TAXAS DE SECAGEM DE RAÍZES DE YACON – ERRO RESIDUAL.....	154
TABELA V.6 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA) PARA AS TAXAS DE SECAGEM DE RAÍZES DE YACON – ERRO PURO.	154
TABELA V.7 – CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA PARA O PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL DA SECAGEM DE RAÍZES CUBETADAS DE YACON.	159
TABELA V.8 – EFEITO ESTIMADO, ERRO PADRÃO E GRAU DE SIGNIFICÂNCIA ESTATÍSTICA (P) PARA O CONSUMO DE ENERGIA NA SECAGEM DE RAÍZES DE YACON – ERRO RESIDUAL.	160
TABELA V.9 – EFEITO ESTIMADO, ERRO PADRÃO E GRAU DE SIGNIFICÂNCIA ESTATÍSTICA (P) PARA O CONSUMO DE ENERGIA NA SECAGEM DE RAÍZES DE YACON – ERRO PURO.	161
TABELA V.10 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA) PARA O CONSUMO DE ENERGIA NA SECAGEM DE RAÍZES CUBETADAS DE YACON.	162
TABELA VI.1 – NÍVEIS DAS VARIÁVEIS CODIFICADAS E REAIS PARA O PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL DA SECAGEM.	176
TABELA VI.2 – NÍVEIS DAS VARIÁVEIS CODIFICADAS E REAIS PARA O PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL FATORIAL 2 ⁴ DA EXTRAÇÃO.....	178
TABELA VI.3 – SÓLIDOS SOLÚVEIS EXTRAÍDOS ANTES E DEPOIS DO PERÍODO DE ESTOCAGEM.....	180

TABELA VI.4 – EFEITOS, ERROS PADRÕES E P-VALORES DOS PARÂMETROS OPERACIONAIS DE SECAGEM NA EXTRAÇÃO DE INULINA.	181
TABELA VI.5 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA) DOS PARÂMETROS DE SECAGEM NA EXTRAÇÃO DE INULINA DE RAÍZES CUBETADAS SECAS DE CHICÓRIA.	182
TABELA VI.6 – PORCENTAGEM DE SÓLIDOS SOLÚVEIS EXTRAÍDOS PARA O PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL DA SECAGEM DE YACON.	184
TABELA VI.7 – EFEITO ESTIMADO, ERRO PADRÃO E GRAU DE SIGNIFICÂNCIA ESTATÍSTICA (P) PARA O TEOR DE SÓLIDOS SOLÚVEIS NA EXTRAÇÃO DE RAÍZES DE YACON.	185
TABELA VI.8 – ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA) PARA A PORCENTAGEM DE SÓLIDOS SOLÚVEIS EXTRAÍDOS DE RAÍZES DE YACON.	186

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Descrição	Unidade
A	Amplitude de vibração	m
a, b	Constantes do modelo de Page	-
a_w	Atividade de água	-
B	Pressão barométrica	mbar
b_i	Coefficiente de regressão representativo do efeito linear da variável x_i	
b_{ii}	Coefficiente de regressão representativo do efeito quadrático da variável x_i	
b_{ij}	Coefficiente de regressão representativo do efeito da interação entre as variáveis x_i e x_j	
b_o	Coefficiente de regressão representativo do efeito da média	
C	Concentração de traçador	g/g
d	Diâmetro	-
D	Difusividade	m^2/s
d_o	Diâmetro inicial	m
D_{ef}	Difusividade efetiva	m^2/s
DRM	Módulo do desvio relativo médio	-
DTR	Distribuição de tempo de residência	
E	Módulo de elasticidade ou módulo de Young	MPa
E	Energia elétrica consumida	kWh
F	Força de compressão uniaxial	N
FOS	Fruto-oligossacarídeo	
g	Aceleração da gravidade	m/s^2
G	Módulo de elasticidade transversal	MPa
GF _n	Estrutura química da inulina, com n = número de moléculas de frutose	
GP	Grau de polimerização	
i	Número de termos na série de Fourier	-
k	Coefficiente de rigidez	N/m
K	Módulo volumétrico	MPa

L	Semiespessura – comprimento característico	m
LVF	Leito vibrofluidizado	-
m	Massa	kg
MSR	Metodologia de superfície de resposta	
m_{tr}	Massa de traçador em um instante	kg
m_{trtot}	Massa total de traçador	kg
MQ	Média quadrática	
MS	Massa de matéria seca	g
n	Número de termos	
p	Pressão parcial de vapor	Pa
Pv	Pressão dinâmica do ar de secagem	Pa
ΔP	Perda de carga	Pa
Q	Área da curva C	
R	Aplicação de energia radiante infravermelha	min/15min
Re	Número de Reynolds	-
SAM	Secador com agitador/misturador	
SQ	Soma quadrática	
SS	Concentração de sólidos solúveis	kg/kg
SVF	Secador vibrofluidizado	
t	Tempo	s
\bar{t}	Tempo de residência médio	s
T	Temperatura	°C ou K
T_a	Temperatura do precipitado na alimentação do secador	°C
T_e	Temperatura do ar de secagem	°C
u	Velocidade	m/s
U	Velocidade do ar	m/s
URE	Umidade relativa de equilíbrio	
V	Período de aplicação de vácuo	
V	Velocidade do ar	m/s
VC	Valor calculado	
VE	Valor experimental	

x	Deslocamento	m
X	Teor de água ($M_{\text{água}}/M_{\text{matéria seca}}$)	g/g
X_0	Teor de água inicial ($M_{\text{água}}/M_{\text{matéria seca}}$)	g/g
X_{eq}	Teor de água de equilíbrio ($M_{\text{água}}/M_{\text{matéria seca}}$)	g/g
x_i	Variável independente codificada	
\bar{X}	Teor de água médio ($M_{\text{água}}/M_{\text{matéria seca}}$)	g/g
X_A	Variável codificada para amplitude de vibração	-
X_I	Variável codificada para inclinação do leito	-
X_R	Variável codificada para aplicação de radiação infravermelha	-
X_T	Variável codificada para temperatura do ar	-
X_U	Variável codificada para velocidade do ar	-
X_V	Variável codificada para aplicação de pulso de vácuo	-
Y	Teor de água adimensional	-
y	Variável dependente	
z	Direção da transferência	m

LETRAS GREGAS

Símbolo	Descrição	Unidade
α	Absortividade	-
γ	Refletividade	-
τ	Transmissividade	-
ρ	Massa específica	kg/m ³
μ	Viscosidade	kg/s.m
ε	Deformação normal	-
ω	Frequência angular de vibração	1/s
Γ	Intensidade vibracional – razão adimensional de vibração	-
σ	Tensão	Pa
ν	Coefficiente de Poisson	-

RESUMO

No processo de secagem, a utilização de equipamentos que promovem um incremento nos coeficientes de transferência é de grande interesse. A secagem vibro-fluidizada se baseia na passagem de um fluxo de ar aquecido através do leito do material colocado sobre uma grade distribuidora de ar, aliado ao efeito mecânico da agitação do leito do secador. É utilizada para materiais termolábeis, que requerem tempos de residência curtos, altas taxas de secagem e baixas temperaturas de secagem, tais como: materiais granulares, pastas e pós; tanto para materiais farmacêuticos, biológicos e alimentares. Neste estudo pretendeu-se então, submeter materiais biológicos a um processo de secagem utilizando diversos dispositivos e avaliar o comportamento da secagem, consumo de energia, propriedades do material e extração de componente. Os secadores utilizados foram: secador vibrofluidizado (patente PI 9302443-6 e auxílio FAPESP n°: 00/05543-2) e secador agitador/misturador (patente PI 0506639-5). O processo de secagem foi avaliado com grãos de milho no secador vibrofluidizado e batata e raízes de yacon no secador agitador/misturador. Realizaram-se o levantamento do tempo de residência com análise de imagens e seleção manual; levantamento da perda de carga e do perfil de velocidade no secador vibrofluidizado com sistemas aberto e fechado. A partir dos testes para levantamento da distribuição do tempo de residência, foi desenvolvida uma metodologia para avaliação da quantidade de traçador na massa de produtos com base somente em imagens digitais das amostras. Com isso é possível encontrar valores de tempo de residência sem o uso de práticas manuais e, conseqüentemente, trabalhosas. Levantamento do tempo de residência foi também realizado no secador agitador/misturador que pode ser utilizado tanto como secador contínuo como secador a batelada. Esse secador permite a aplicação de vácuo e de energia radiante infravermelha durante a secagem. Foi utilizado, ainda, na secagem de batata e raiz de yacon e na avaliação destes recursos tecnológicos. A extração de inulina proveniente das raízes de yacon foi avaliada. A utilização de temperaturas de secagem mais altas resultou em um maior consumo de energia por quilograma de água retirada do produto, enquanto que a aplicação de energia infravermelha durante a secagem reduziu o tempo de secagem e, conseqüentemente, a energia elétrica gasta. A influência dos parâmetros operacionais de secagem não se mostrou significativa estatisticamente na extração de inulina a partir de raízes secas de yacon.

ABSTRACT

In the drying process, the use of equipments which promote an increment in the transfer coefficients is of great interest. The vibrofluidized drying is based on the passage of a warm air flow through the bed of the material put on an air distributing grille, allied to the mechanical effect of the agitation of the drying bed. It is used for thermo sensible materials, which request short residence times, high drying taxes and low drying temperatures, such as: granular materials, pastes and powders; so much for pharmaceutical, biological and food materials. In this project it was intended then, to submit biological materials to a drying process using several devices and to evaluate the behavior of the drying, energy consumption, material properties and component extraction. The used dryers were: vibrofluidized dryer (patent PI 9302443-6 and FAPESP financial support n°: 00/05543-2) and agitator/mixer dryer (patent PI 0506639-5). The drying process was evaluated with corn grains in the vibrofluidized dryer and potato and yacon roots in the agitator/mixer dryer. The survey of the residence time with analysis of images and manual selection; the survey of pressure drop and air velocity profile in the vibrofluidized dryer in open and closed systems were also carried out. Starting from the survey of the residence time distribution, a methodology was developed for evaluation of the tracer amount in the mass of products based on only digital images of samples. In this way, it is possible to find residence time without using manual procedures and, consequently, laborious. Survey of the residence time was accomplished also in the agitator/mixer dryer which can be used as continuous dryer as well as batch dryer. This dryer allows vacuum and infrared radiant energy application during drying. It was used, even, in potato and yacon root drying and in the evaluation of these technological devices. The extraction of inulin originated from yacon roots was also evaluated. The use of higher drying temperatures resulted in a larger consumption of energy per kilogram of removed water from product, while the infrared energy application during drying reduced the drying time and, consequently, the consumed electric energy. The influence of drying operational parameters was not statistically significant in the extraction of inulin from dried yacon roots.

“Um bom começo é a metade.”

Aristóteles

CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO

Um secador deve atender às exigências operacionais de cada processo que, por sua vez é definida pelas características do produto a ser seco. A secagem deve ser economicamente viável e garantir diversos aspectos quanto à qualidade do produto final. A escolha do secador e dos demais fenômenos e dispositivos intrínsecos ao processo devem, então, estar baseados nas propriedades do material e no comportamento deste quando submetido à secagem. Curvas de cinética de secagem e estudos exploratórios no âmbito de novas tecnologias são muito bem-vindas no dimensionamento e projetos de novos secadores.

A secagem, como processo milenar de conservação de alimentos, atinge um ponto na fronteira do conhecimento, o que garante ao menor incremento na eficiência ou melhora das condições operacionais, um resultado expressivo seja em termos econômicos e/ou de qualidade. Desta forma, a inovação tecnológica é indispensável nesse setor que tem um potencial significativo em um país de grande produção agrícola e socio-economicamente desigual.

Portanto, é possível adaptar diversos dispositivos e, conseqüentemente, aplicar conceitos dos fenômenos de transferência de calor e massa no projeto de um secador com o intuito de incrementar a evolução do processo de secagem e da qualidade do produto final, levando em consideração aspectos energéticos. Crê-se ainda na possibilidade de conjugar os mais diversos aparatos em um mesmo secador, aumentando a abrangência de utilização do equipamento. Tal intento gera, se adaptado de forma conveniente e criteriosa, a economia de se dispor de equipamento multi-uso.

Neste primeiro capítulo tem-se uma breve explanação sobre o intuito do presente trabalho de pesquisa, assim como um detalhamento do conteúdo dos demais capítulos. Seguem-se a este, capítulos que pretendem descrever o equipamento construído e adaptado neste período; que pretendem explorar as diversas possibilidades de uso de um novo equipamento; que pretendem adaptar metodologias de análise e facilitar a disseminação e uso; que pretendem verificar o comportamento de produtos agrícolas de inegável importância.

O Capítulo 2 trata dos testes realizados em secador contínuo, o secador vibrofluidizado. Neste capítulo há todo o levantamento do perfil de velocidade no secador, da perda de carga, do perfil de temperatura, da distribuição do tempo de residência e os testes de secagem com grãos de milho.

No Capítulo 3, encontram-se a descrição do projeto, construção, adaptação e testes preliminares do chamado secador agitador/misturador. Nos testes preliminares, iniciou-se a determinação da faixa de operação para os diversos mecanismos conjugados ao secador: a bomba de vácuo, os emissores de energia radiante na faixa do infravermelho, o ventilador, as resistências elétricas para aquecimento do ar e as pás rotativas.

No Capítulo 4 estão inseridos o planejamento experimental com ensaios de secagem com batata (*Solanum tuberosum* L.), a avaliação da influência dos seus parâmetros operacionais na taxa de secagem (utilizando o secador agitador/misturador) e os testes de compressão com espécimes resultantes dos ensaios.

No Capítulo 5, encontram-se o planejamento experimental da secagem de raízes de yacon (*Smallanthus sonchifolius* Poepp. & Endl.), a avaliação da influência dos parâmetros operacionais do secador agitador/misturador na taxa de secagem e a avaliação do consumo de energia elétrica em função da utilização dos dispositivos conjugados.

Finalmente, o Capítulo 6 trata da análise da extração de inulina de raízes de chicória (*Cichorium intybus* L.) após período de armazenamento em câmara fria e de raízes de yacon por meio de difusão em água quente. Ambos foram avaliados em função dos parâmetros operacionais de secagem.

"There is always a delightful sense of movement, vibration and life."

"Há sempre um encantador senso de movimento, vibração e vida."

Theodore Robinson

CAPÍTULO II - TESTES DO SECADOR VIBROFLUIDIZADO

II.1 INTRODUÇÃO

De acordo com Gupta e Mujumdar (1980a e b), que apresentaram uma das primeiras revisões sobre leitos vibrofluidizados, a primeira aplicação comercial de um secador vibrofluidizado (SVF) foi reportada nos anos de 1938 por Allis-Chalmers que operou uma unidade para a secagem de molibdênio mineral. Atualmente alguns exemplos das suas aplicações podem ser encontrados na aglomeração de leite em pó, secagem de fertilizantes, açúcar, rasps de polímeros, sais inorgânicos, produtos farmacêuticos, fibras de asbestos, etc.

O secador vibrofluidizado estudado é constituído de um leito vibrátil com três câmaras que permitem a admissão do ar em diferentes condições de secagem, com possibilidade de se variar a inclinação do leito.

A secagem vibrofluidizada consiste na passagem de um fluxo de ar aquecido através do material no leito, que está também submetido a uma agitação mecânica. Sua utilização se dá para materiais que exigem tempo de residência curto, altas taxas de secagem e baixas temperaturas de secagem (BROD, 2003).

Estudos realizados levaram aos ajustes necessários para a otimização da operação do secador, como análises do comportamento dos sólidos no leito do secador, efeitos da vibração na taxa de secagem e perda de carga. Esses parâmetros são de vital importância no dimensionamento do sistema de secagem, proporcionando a taxa de secagem adequada e uma

maior eficiência do secador.

O projeto de equipamento que envolve escoamento de fluidos exige estudos de perda de carga para otimização do dimensionamento dos mesmos. Nesse contexto, a análise da perda de carga na operação do SVF torna-se necessária para a avaliação dos parâmetros de secagem do mesmo.

O levantamento do perfil de velocidade do secador vibro-fluidizado foi feito com a utilização de tubo de Pitot em determinados pontos do SVF, e as determinações da perda de carga nas câmaras e nos ventiladores de insuflamento e exaustão foram realizadas com a utilização de manômetros diferenciais em U. Tais determinações foram feitas variando-se a configuração das válvulas de exaustão e insuflamento do SVF e estudando-se os efeitos dessa variação nas condições do ar de secagem.

Um outro parâmetro importante para o projeto de sistemas de secagem é o tempo em que o produto permanece no interior do secador, ou seja, o tempo em que permanece sob condições potenciais de secagem. Isso acontece quando o produto está em contato com o ar de secagem, durante o tempo em que passa pelo leito, no caso de secadores contínuos. A distribuição do tempo de residência se refere ao comportamento dos sólidos no leito de secagem, levando em consideração os caminhos percorridos pelos sólidos dentro do secador. Para avaliação desse parâmetro, é necessário observar o tempo que as partículas individuais permanecem no leito. O método utilizado para essa determinação é o teste do estímulo e resposta.

Com a metodologia de análise de imagens, pretendeu-se determinar a distribuição do tempo de residência no secador vibro-fluidizado, comparando os resultados obtidos por esse método com os resultados referentes à massa de sólidos das respectivas imagens, obtidos por separação manual. O método utilizado para análise das imagens e determinação do tempo de residência com base nas mesmas foi ajustado de forma a se aproximar o máximo possível do tempo obtido pela massa de sólidos.

O levantamento de todos esses parâmetros implicou no estudo do comportamento do equipamento em diferentes condições operacionais do processo de secagem de material biológico granular.

II.2 OBJETIVOS

- ✓ Levantamento dos perfis de temperatura e de velocidade do ar ao longo do sistema de secagem;
- ✓ Levantamento da perda de carga do secador vibrofluidizado;
- ✓ Levantamento de tempo de residência para produto granular (grãos de milho) em diferentes amplitudes de vibração;
- ✓ Levantamento da cinética de secagem;
- ✓ Determinação das difusividades efetivas;
- ✓ Estudo da influência de diversos parâmetros operacionais (temperatura e velocidade do ar de secagem, amplitude de vibração e inclinação do leito) na secagem de produto granular (grãos de milho).

II.3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

II.3.1 SECAGEM EM LEITO VIBROFLUIDIZADO

II.3.1.1 Propriedades fluidodinâmicas

As propriedades fluidodinâmicas das partículas envolvem correlações das características físicas das partículas e do meio em que a mesma se encontra, levando-se em conta principalmente o fluxo do fluido e a perda de carga.

A velocidade mínima de fluidização é o valor mínimo de velocidade do fluido com a qual ocorre a fluidização do material, ou seja, o valor mínimo de velocidade para que as partículas mantenham-se em suspensão.

No estudo fluidodinâmico, as relações da partícula e do sistema gás-sólido em que a mesma se encontra são estabelecidas pela Equação de Ergun (KUNII e LEVENSPIEL, 1969).

Define-se o leito fluidizado como um sistema contendo partículas sólidas através das quais um fluido escoar com uma velocidade maior que a crítica de fluidização mas menor que a de arraste (BURJAILI, 1996).

II.3.1.2 Fluidização

A fluidização é um processo em que um leito de material particulado exibe um comportamento de fluido como resultado de um fluxo de um fluido passando através dele. Esse fluido pode ser um líquido ou um gás e o leito fluidizado pode apresentar diferentes comportamentos dependendo do tipo do meio e das propriedades do material particulado (KUNII e LEVENSPIEL, 1991).

Os fenômenos normalmente associados à fluidização são a transferência de calor, massa e quantidade de momento. E devido à rápida e vigorosa mistura do leito, a troca de calor e massa entre o fluido e o sólido ocorre facilmente, significando altos coeficientes de transferência.

O método de secagem por fluidização baseia-se na passagem de ar através do leito do material colocado sobre uma grade distribuidora de ar. O aumento da taxa de ar expande o leito, e quando a força de arraste sobre as partículas iguala-se ao peso efetivo do leito, tem-se a velocidade crítica de fluidização ou velocidade mínima de fluidização. Neste estado o leito de partículas adquire propriedades similares às de fluidos, tendo um comportamento semelhante ao de um líquido ebuliente, caracterizando-se o fenômeno de fluidização (STRUMILLO & KUDRA, 1986).

Com o aumento da taxa de escoamento do ar chega-se a uma condição de expansão do leito tal que ocorre arraste das partículas, sendo a velocidade correspondente chamada velocidade de arraste.

Define-se o leito fluidizado como um sistema contendo partículas sólidas através das quais um fluido escoar com uma velocidade maior que a crítica de fluidização mas menor que a de arraste (BURJAILI, 1996).

Com os conceitos assim descritos, pode-se perceber a possibilidade da obtenção de inúmeras vantagens quando se alia o efeito mecânico da agitação do leito do secador com a ação pneumática do ar secante:

- ✓ O ar pode escoar a velocidades muito baixas que, por si só, não poderiam movimentar o leito, ocorrendo o efeito redutor da vibração sobre a velocidade mínima de fluidização (KUDRA, 1992; FINZER e KIECKBUSCH, 1992);
- ✓ O uso de vibração ou agitação adicional do leito fluidizado melhora a estrutura do leito e permite um uso econômico do agente de secagem, aumentando a taxa de secagem e

prevenindo a formação de aglomerados.

- ✓ O uso da vibração também é uma solução para o caso em que o material possui uma distribuição que abrange toda a largura do leito, o leito é feito de um material corrosivo ou existem “by-passed” no leito de secagem (BAHU, 1994).

Kuipers et al. (1996) apresentaram um equipamento que utilizavam a vibração juntamente com misturadores na secagem fluidizada de amido de batata. Com isso, houve a eliminação do *channelling* e da aglomeração do amido. Os autores apresentam combinações dos parâmetros de mistura e vibração para diferentes alturas do leito e umidades.

Para leitos não aerados, o movimento do leito é usualmente caracterizado pela razão da força mássica máxima com a gravidade, esta razão é chamada de valor da trajetória ou intensidade vibracional ou razão adimensional de vibração:

$$\Gamma = \frac{A\omega^2}{g} \quad (1)$$

Erdész (1991, citado por CAMARGO, 2003) interpretou fisicamente a intensidade vibracional como sendo a relação entre a aceleração média vibracional exercida sobre o sistema analisado e a aceleração gravitacional.

Para leitos vibrofluidizados, uma permanente perda de carga é presente, e precisa ser levada em conta:

$$\Gamma_{LVF} = \frac{A\omega^2 m}{mg - \Delta PS} = \Gamma \left(\frac{1}{1 - \frac{\Delta PS}{mg}} \right) \quad (2)$$

Claramente, na inexistência de fluxo de ar, $\Delta P = 0$, e $\Gamma_{LVF} = \Gamma$.

Baseados em observação visual, Bratu e Jinescu (1971, citados por GUPTA & MUJUMDAR, 1980 a) definiram três regimes operacionais de sistemas vibrados dependendo da magnitude da componente vertical da aceleração vibracional:

- ✓ Leito vibrátil: quando $A\omega^2/g < 1$, o leito se comporta como um leito fluidizado simples e a vibração somente aumenta a estabilidade e a homogeneidade do leito fluidizado;
- ✓ Leito vibro-fluidizado: quando $A\omega^2/g \approx 1$, o fluxo de ar e a vibração contribuem para a

fluidização e o comportamento do leito é influenciado pela magnitude dos dois;

- ✓ Leito fluidizado vibrado: quando $A\omega^2/g > 1$, o leito é essencialmente influenciado por forças vibratórias, que tendem a suspender o leito durante a secagem.

Daleffe et al. (2005) relataram que o número adimensional de vibração é adotado pela maioria dos autores como um parâmetro universal na caracterização fluidodinâmica em leitos vibro-fluidizados, sendo sua influência amplamente divulgada na literatura. Porém, decompondo a Equação 1, nota-se que o valor de Γ pode ser obtido a partir de diferentes combinações de amplitude e frequência de vibração. A observação sugere que comportamentos fluidodinâmicos diferentes podem ser obtidos com valores idênticos de Γ , o que pode explicar parcialmente as discrepâncias observadas em resultados obtidos por diversos autores.

Assim, Daleffe et al. (2005) estudaram a influência da amplitude e da frequência de vibração no número adimensional de vibração Γ na secagem vibro-fluidizada de pastas. Para mesmos valores de Γ , a amplitude e a frequência de vibração variaram, obtendo diferentes comportamentos fluidodinâmicos. Ressalta-se, assim, o cuidado que se deve ter na aplicação de Γ como parâmetro característico de vibração no leito vibro-fluidizado.

II.3.1.3 Leito vibro-fluidizado

Gupta e Mujumdar (1980a) relataram que os LVF encontram sua maior aplicação na secagem de materiais pastosos, granulares e pós, onde se pode exemplificar: sal comum, acetato de polyvinil, pastas antibióticas, concentrados de molibdênio, grânulos farmacêuticos, minério de ferro, cafeína, cascalho, raspas de madeira, caseinato de sódio, ácido hidróxido de benzóico, óxido de alumínio, nitrato de sódio, bicarbonato de sódio, óxido de cálcio, etc. A presença de um ponto ótimo nos parâmetros de vibração que proporciona uma elevada taxa de secagem é a mais marcante característica do LVF. Assim, a procura desse ponto é objeto de estudo da maior parte das pesquisas.

Mujumdar (1991) explica que uma clara tendência atualmente é a combinação de dois diferentes tipos de secadores quando as características de secagem do material permitem tal combinação. No passado somente um tipo de secador era selecionado. Por exemplo: a combinação de um secador flash (ideal para remover a umidade superficial dos sólidos

particulados em alguns segundos) seguido por um pequeno secador de leito fluidizado, com um maior tempo de residência para remover o conteúdo interno de umidade. O segundo secador poderia ser um secador de leito vibrátil ou um leito fluidizado com aquecimento indireto, dependendo das características do produto. O autor também espera que os sistemas de secagem incluam cada vez mais dois ou mais tipos do secador se as características de cinética de secagem e do produto justificarem. Tais sistemas são inerentemente mais flexíveis e podem ser justificados no âmbito da flexibilidade em processar e em manufaturar. O dimensionamento, projeto e a otimização do sistema, entretanto, será mais complexo.

Quando ocorre aumento da taxa de secagem, a mistura das partículas é mais intensa e ocorre desagregação de aglomerados (ERDÉSZ e MUJUMDAR, 1987). Os processos de transferência de calor e massa correm em maior intensidade quando a operação é realizada em regime de ressonância (ERDÉSZ, 1990).

O uso de vibração em secadores apresenta vantagens sobre os leitos de jorro ou fluidizado convencionais:

- ✓ O ar pode escoar a velocidades muito baixas que, por si só, não poderiam movimentar o leito, ocorrendo o efeito redutor da vibração sobre a velocidade mínima de fluidização (KUDRA, 1992; FINZER e KIECKBUSCH, 1992);
- ✓ Menor perda de carga e facilidade de se atingir o regime *plug-flow* (DONG et al., 1991);
- ✓ A movimentação do leito devido à vibração reduz a resistência para a transferência de calor e massa, resultando em um aumento da umidade removida durante o período de taxa constante (STRUMILLO e PAKOWSKI, 1980);
- ✓ A vibração possibilita uma melhor distribuição do conteúdo de umidade das partículas no leito e a utilização de temperaturas menores do ar devido ao aumento da transferência de calor e massa (HASATANI et al., 1991);
- ✓ A distribuição do tempo de residência das partículas é mais uniforme e a degradação térmica em regiões estagnadas pode ser evitada, além de resultar em tempos de secagem menores (STRUMILLO e PAKOWSKI, 1980);
- ✓ Através da regulagem da amplitude e da frequência, consegue-se um fácil controle do tempo de residência (HAN et al., 1991);
- ✓ O movimento do material através do secador é mais suave, o que reduz o atrito entre as

partículas, sendo portanto muito adequado ao tratamento de materiais frágeis (DANIELSEN e HOVMAND, 1980; SHILTON e NIRANJAN, 1993);

- ✓ O secador serve ao mesmo tempo como transportador dos sólidos (DANIELSEN e HOVMAND, 1980);
- ✓ Apesar da vibração, ocorre um menor consumo de potência total (DANIELSEN e HOVMAND, 1980), e, devido às menores massas vibratórias, as forças inerciais são reduzidas, ocorrendo uma economia de energia elétrica (MUJUMDAR e ERDÈSZ, 1988);
- ✓ O uso da vibração também é uma solução para o caso em que o material possui uma distribuição que abrange toda a largura do leito, o leito é feito de um material corrosivo ou existem caminhos preferenciais (*by-passed*) no leito de secagem (BAHU, 1994);
- ✓ A fluidização pode ser alcançada para materiais coesos, aderentes e pastas, nos quais a simples fluidização seria difícil de se atingir (MUJUMDAR e ERDÈSZ, 1988).

A movimentação das partículas no leito vibro-fluidizado reduz a resistência à transferência de calor e massa, aumentando a remoção de umidade das partículas através da redução das zonas de estagnação. A vibração quebra as forças interpartículas de atração promovendo uma melhor qualidade de fluidização. Como consequência, tem-se que a distribuição do tempo de residência no leito será mais uniforme e haverá uma redução significativa na degradação térmica nas zonas de estagnação (GUPTA e MUJUMDAR, 1980a e b). Ainda é importante observar-se que o aumento da altura do leito de partículas diminui o efeito da vibração.

A vibração proporciona uma redução da resistência, aumentando assim a transferência de calor e massa na fase gasosa, principalmente no período de taxa de secagem constante, sendo que, no período de taxa de secagem decrescente, a vibração auxilia também na obtenção de melhores taxas de secagem (STRUMILLO e PAKOWSKI, 1980).

A velocidade do ar de secagem para se obter uma boa movimentação das partículas nos leitos vibro-fluidizados pode ser cerca de 20% menor comparativamente aos leitos fluidizados, possibilitando uma faixa de velocidade mais ampla, impedindo o arraste de partículas e não afetando o tempo de residência do produto no leito (HOVMAND, 1987).

GUPTA e MUJUMDAR (1980a), ERDÈSZ et al (1986), DELLA TONIA JR. et al.

(1989), ERDÈZ (1990) indicam mais algumas vantagens na utilização dos leitos vibro-fluidizados:

- ✓ A redução da quantidade de ar necessária para a fluidização decorrente da vibração mecânica e, como consequência disso a diminuição do arraste de partículas;
- ✓ Redução considerável da queda de pressão e da velocidade de mínima fluidização pela agitação mecânica;
- ✓ A vibração elimina zonas mortas e formação de bolhas, resultando em operações mais uniformes;
- ✓ Possibilidade de fluidizar materiais adesivos e pastosos;
- ✓ Vários processos como a secagem, granulação, resfriamento e recobrimento podem ser realizados no mesmo equipamento.

II.3.2 PERDAS FRICCIONAIS

Nos escoamentos ocorrem as perdas de pressão em função da perda de energia mecânica. Esta queda de pressão comumente referida como perda de carga é usualmente expressa em função de características do escoamento e dos corpos sólidos (por exemplo, no caso de escoamento interno a dutos temos o diâmetro, o comprimento e a rugosidade da parede) em contato com o escoamento (WELTY et al., 1984). Esta perda de energia é mais evidente quando o fluido encontra uma barreira como, por exemplo, uma grade distribuidora do ar. Assim todo o projeto de equipamento que envolve escoamento de fluidos, necessita, necessariamente, de estudos da perda de carga para um ótimo dimensionamento dos mesmos.

II.3.2.1 Perda de carga localizada

As perdas locais, localizadas, acidentais ou singulares são assim denominadas pelo fato de decorrerem especificamente de pontos ou partes bem determinadas (peças especiais e demais singularidades) da tubulação, ao contrário do que acontece com as perdas em consequência do escoamento ao longo dos encanamentos.

Essas perdas são relativamente importantes no caso de canalizações curtas com peças especiais; nas canalizações longas, o seu valor frequentemente é desprezível, comparado ao da perda pela resistência ao escoamento.

Um fluido escoando através de um duto ou sobre uma superfície, tem o tipo de escoamento variável de acordo com a sua velocidade, suas propriedades físicas e com a geometria da superfície (COULSON e RICHARDSON, 1977).

II.3.2.2 Número de Reynolds

O número de Reynolds expressa o comportamento do escoamento do fluido, a razão entre forças inerciais e viscosas. O número de Reynolds caracteriza o regime de escoamento por meio da seguinte equação:

$$\text{Re} = \frac{\rho \cdot d \cdot u}{\mu} \quad (3)$$

Em tubos circulares de paredes consideradas lisas, o Reynolds crítico (limite de laminar para transição) é considerado 2000, sendo que para efeito de cálculos de engenharia Reynolds acima de 4000 é considerado escoamento turbulento.

II.3.3 DISTRIBUIÇÃO DO TEMPO DE RESIDÊNCIA - DTR

As partículas devem ser retidas no secador por tempo suficiente para que a umidade seja removida a uma taxa determinada pelas condições do processo (KEEY, 1992). Além disso, é necessário que o conteúdo de umidade e a temperatura do produto final estejam dentro de uma pequena faixa de variação. Isto significa que a distribuição do tempo de residência (DTR) das partículas sólidas no leito deve ser tão uniforme quanto possível. A importância da uniformidade do DTR também é verificada em reatores (HAN et al., 1991).

A aerodinâmica de um SVF pode ser caracterizada por um tempo de residência médio e por uma distribuição do tempo de residência do material particulado no leito, destacando, assim, a sua importância já que estes influem no conteúdo de água e na temperatura final do produto (HAN et al., 1991).

O tempo de residência depende das propriedades mecânicas das partículas, na intensidade de transporte e nos parâmetros geométricos do equipamento (SZALAY et al., 1995).

Conhecendo o que está acontecendo dentro do secador em estudo, isto é, tendo em

mãos um mapa completo da distribuição de velocidades do sólido, é possível prever o comportamento do sólido dentro do secador. Embora bem apurado em princípio, essa forma de ataque é impraticável, devido às suas dificuldades experimentais (LEVENSPIEL, 1974).

Em muitos casos não é necessário o conhecimento completo do escoamento do sólido, mas somente por quanto tempo as partículas individuais permanecem no leito, ou mais precisamente, qual a distribuição dos tempos de residência do sólido. Tal informação pode ser determinada por um método de investigação amplamente usado: o teste do estímulo e resposta.

Sólidos percorrendo caminhos diferentes no secador podem ter tempos diferentes para passarem através do leito. A distribuição desses tempos para o sólido que deixa o secador é chamada distribuição de idade de saída, curva E, ou a distribuição do tempo de residência (DTR) do sólido.

Por meio do acompanhamento da saída do traçador do secador é possível determinar a concentração em função do tempo, assim como as curvas E, curvas F e tempo de residência médio, conforme descrito no item III.3.3.

BROD (2003) utilizou-se de uma metodologia que consiste na análise de imagens digitais do material da saída do secador contínuo, contendo o material a ser seco e um traçador de outra cor. Esse tratamento de imagens é feito a partir de histogramas dos pixels do traçador em cada imagem (correspondendo a um determinado período de tempo) e a construção da curva de distribuição do tempo de residência.

Han et al. (1991) verificaram o efeito da intensidade da vibração, fluxo de ar, vazão de sólidos, altura do leito e do tamanho das partículas no tempo de residência de trigo e bryn (pó farmacêutico) em um SVF e concluíram que o parâmetro de maior influência foi a intensidade vibracional.

II.3.4 MILHO

O milho pertence à família das gramíneas. Tem como origem a América, da região onde se situa o México.

O milho pertence à divisão das angiospermas, classe das monocotiledôneas, família das gramíneas, com o nome científico de *Zea mays* L. É uma planta de caule reto e robusto, atingindo até 3 m de altura. Possui folhas compridas e largas, de bordas lisas, que se dispõem

alternadamente pelo caule.

A parte aérea da planta atinge a altura de até 2 m e é constituída por um colmo ereto, não ramificado, com nós e entrenós de natureza esponjosa, e por folhas, com formato lanceolado, que se inserem nesses nós. Essas folhas são constituídas de uma bainha pilosa de coloração verde-clara que envolve o colmo. Trata-se de planta monóica, isto é, o mesmo pé possui flores dos dois sexos. As flores masculinas reúnem-se em inflorescências do tipo panícula no ápice do caule, enquanto que as femininas agrupam-se em outras inflorescências situadas nos locais onde as folhas se ligam ao caule. Os óvulos, depois de fecundados, constituirão os frutos ou grãos (seiscentos a setecentos por espiga, em média), fixados em torno de um centro carnosos, chamado sabugo (GUIA RURAL, 1998).

O número de variedades do milho provavelmente ultrapassa o de qualquer outra planta cultivada. Calcula-se a existência de 100 a 150 diferentes tipos de milho em todo o mundo, embora apenas cinco sejam importantes (GUIA RURAL, 1998).

O milho é matéria-prima de larga aplicação agroindustrial, que se presta bem ao transporte e à armazenagem, o que permite um grande consumo, tanto nos países produtores como nos importadores. Mundialmente é dos cereais mais importantes, pelo volume e pelo valor de sua produção.

O milho colhido, de forma geral, não apresenta condições prontamente favoráveis para a sua efetiva utilização e conservação, exigindo desta feita eventuais secagens e processamento adequado, antes de ser conduzido diretamente à indústria de transformação (FANCELLI e LIMA, 1982).

II.3.4.1 Produção

O milho, um dos cereais mais importantes cultivados no mundo, constitui-se num produto agrícola de largo consumo, na alimentação humana e animal, sendo também matéria-prima de fácil manipulação e conservação, imprescindível para expressivo complexo industrial.

Nos últimos anos, o Brasil apresentou uma produção de milho significativa de mais de 30 milhões de toneladas anuais. A safra de milho pode ser conferida na Tabela II.1 mostrada a seguir:

Tabela II.1 – Produção brasileira anual de milho (em mil toneladas).

REGIÃO	Safr					
	2002/03	2003/04	2004/05	2005/06	2006/07	2007/08
Norte	979,2	1.089,7	1.107,8	1.129,2	1.372,9	1.372,8
Nordeste	3.277,5	3.002,6	2.969,4	3.242,4	4.407,4	4.407,4
Centro-Oeste	9.931,4	9.355,0	7.823,1	9.592,2	16.686,3	16.686,2
Sudeste	10.047,7	10.649,1	10.302,8	9.651,9	11.417,8	11.417,6
Sul	23.175,1	18.032,1	12.803,6	18.899,2	24.780,0	24.779,7
BRASIL	47.410,9	42.128,5	35.006,7	42.514,9	58.664,4	58.663,7

Fonte: Conab (2008).

II.3.4.2 Aplicações

O milho, devido a sua natureza altamente energética, é frequentemente utilizado como componente principal de rações e demais alimentos.

Da mesma forma, em decorrência de seu valor nutricional aliado ao alto conteúdo de amido e de outros componentes tais como proteínas, óleos e vitaminas, conferem ao produto relevante importância comercial.

Segundo Büll e Cantarella (1993), o milho constitui um dos principais insumos para o segmento produtivo, sendo utilizado com destaque no arraçamento de animais, em especial na suinocultura, na avicultura e na bovinocultura de leite, tanto na forma *in natura*, como na forma de farelo, de ração ou de silagem. Na alimentação humana, o milho é comumente empregado na forma *in natura*, como milho verde, e na forma de subprodutos, como pão, farinha e massas.

Mesmo assim, grãos apresentando qualidade satisfatória podem ser melhor aproveitados, bem como propiciam a obtenção de melhores preços e maior índice de conservação.

Na indústria, o milho é empregado como matéria-prima para a produção de amido, óleo, farinha, glicose, produtos químicos, rações animais e na elaboração de formulações alimentícias.

Para o milho, uma das modalidades mais comumente utilizadas é secagem do produto

na própria planta, ainda no campo. Todavia, inúmeros inconvenientes e limitações evidenciadas nesse processo o torna totalmente contraindicado, principalmente para grãos destinados à indústria, devido a sua exposição constante a condições climáticas adversas, fungos e insetos, que ocasionarão perdas significativas relacionadas ao seu valor nutritivo e peso (FANCELLI e LIMA, 1982).

II.3.4.3 Secagem de milho

O Brasil mostra nos últimos anos que é um grande produtor agrícola, sobretudo no caso de grãos. O país produziu mais de 35 milhões de toneladas anuais de milho nos últimos seis anos (CONAB, 2008). No entanto, a disponibilidade de milho poderia ser bem maior se as perdas tanto no período antes da colheita, como pós-colheita não fosse tão elevado. As perdas pós-colheita acontecem por incapacidade técnica no processo de conservação, insuficiência da rede de armazenagem, inadequação de transporte dos grãos e outros fatores.

Assim, o atraso demorado da colheita pode promover significativas perdas quantitativa e qualitativamente. Assim, o produto deverá ser retirado do campo o mais rápido possível, após ter alcançado o ponto de maturidade fisiológica. No entanto, devido ainda poder apresentar teores de umidade relativamente elevados e inadequados à sua plena conservação, a prática da secagem torna-se evidente e indispensável.

O teor de umidade, aliado à temperatura, pode afetar inúmeros processos fisiológicos tais como, respiração, deterioração e outros, além de influenciar no desenvolvimento de micro-organismos e insetos, que poderão contribuir para a alteração das propriedades físico-químicas dos grãos.

Assim, para a obtenção de teores de umidade que proporcionem conservação segura do produto colhido, a secagem deverá ser realizada imediatamente após a colheita, de forma responsável e econômica.

Secagem é o processo comercial mais utilizado para a preservação da qualidade dos produtos agrícolas. Consiste na remoção de grande parte da água inicialmente contida no produto, logo após seu amadurecimento fisiológico, a um nível máximo de umidade no qual possa ser armazenado em condições ambientais por longos períodos, sem a perda de suas propriedades nutricionais e organolépticas. Tal efeito é conseguido pela criação de condições

desfavoráveis ao desenvolvimento de micro-organismos no produto e pela quase total eliminação de suas atividades metabólicas (ROSSI e ROA, 1980).

O grão é um produto higroscópico, isto é, pode absorver ou ceder água por trocas, sob forma de vapor com o ar, segundo as características psicrométricas da atmosfera que o envolve.

O aquecimento do ar pode ser utilizado para favorecer o processo da secagem, pois, além de promover a redução da umidade relativa do ambiente, beneficiando conseqüentemente as trocas gasosas de umidade, pode também estimular transferência do vapor d'água contido no interior do grão para a sua superfície (FANCELLI e LIMA, 1982).

Fancelli e Lima (1982) recomendam efetuar a secagem dos grãos até 12-14% de teor umidade com o intuito de se evitar problemas com microrganismos, ao passo que teores de umidade próximos a 8-9%, podem dificultar sobremaneira o desenvolvimento de insetos favorecendo a conservação do produto.

II.3.5 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

A metodologia de superfície de resposta (MSR) é uma técnica que tem sido aplicada com sucesso na otimização de processos alimentícios, e consiste em um grupo de procedimentos matemáticos e estatísticos que são usados para estudar a relação entre uma ou mais respostas (variáveis dependentes) e um número de fatores (variáveis independentes). Esta metodologia gera um modelo matemático que descreve o processo em estudo de acordo com Barros Neto, Scarminio e Bruns (2002) e Diniz e Martin (1996).

O planejamento experimental fatorial associado à técnica de MSR dá informações seguras do processo, reduzindo soluções empíricas que envolvem técnicas de tentativa e erro (BOX, HUNTER e HUNTER, 1978). Usando esta técnica para realizar os ensaios experimentais, é possível estimar os efeitos principais das variáveis na resposta ou variável dependente. A tabela de análise de variância dá informações sobre o quanto o ajuste foi adequado, sendo possível propor o modelo probabilístico que correlaciona a resposta em função das variáveis estudadas, construindo a superfície de resposta para determinar a faixa ótima de operação.

Esta metodologia tem sido aplicada em muitos trabalhos científicos na análise e

otimização de processos.

A opção por um planejamento fatorial fracionário é interessante quando se está iniciando o estudo de um determinado processo, no qual o número de ensaios é reduzido a 1/2 ou a 1/4, sem perda da qualidade das informações desejadas. Neste caso, em hipótese alguma ter-se-á o modelo, mas sim a identificação das variáveis mais relevantes que deverão entrar em um planejamento completo posteriormente.

II.4 MATERIAL E MÉTODOS

II.4.1 SECADOR VIBROFLUIDIZADO

O sistema de secagem é composto por um ventilador de insuflamento, um ventilador de exaustão, um ciclone, tubulação de ar, um alimentador e o secador vibro-fluidizado (BROD, 2003).

O secador vibrofluidizado (SVF), patente industrial INPI nº 9302443-6 (UNIVERSIDADE..., 1993), consiste da base estrutural do secador, do corpo do secador, da tela do leito de secagem e dos motovibradores (Figura II.1).

A base do secador foi toda confeccionada em barras em “U” de aço carbono 1010/1020. Existem quatro parafusos de ferro fundido que regulam a altura do secador e que permitem a utilização em várias inclinações diferentes do leito de secagem. Acoplados a estes parafusos (através de suportes) existem quatro molas de sustentação; estas absorvem a vibração promovida pelos motovibradores.

O corpo do secador pode ser dividido em duas partes, a superior e a inferior, e ambas foram fabricadas em aço inox AISI 304. Na parte inferior, existem três câmaras que fazem com que o ar de secagem seja dividido em três antes de chegar ao leito, propiciando três diferentes tipos de tratamento do ar. Para suportar os motovibradores, há reforços nas laterais. Para a saída do ar (corpo superior), também existem três câmaras, unidas apenas por uma passagem de 35 mm entre a tela e a parede divisora das câmaras. Nesta parte, também existe o bocal de alimentação e de descarga. Existem bocais de encaixe na parte superior, onde foram colocados três tubos de PVC. Nestes tubos e na tubulação de entrada (na parte inferior) foram

colocados os pontos de tomada de pressão, além de sensores de temperatura do tipo PT-100.

O leito de secagem foi fabricado pela empresa PakScreens com fios em perfil “V”, de abertura 0,125 mm. Esta configuração dos fios da tela permite uma maior área livre e uma maior capacidade de não obstrução quando comparado com malhas de arame e chapas perfuradas, além de serem mais rígidas (BROD, 1999).

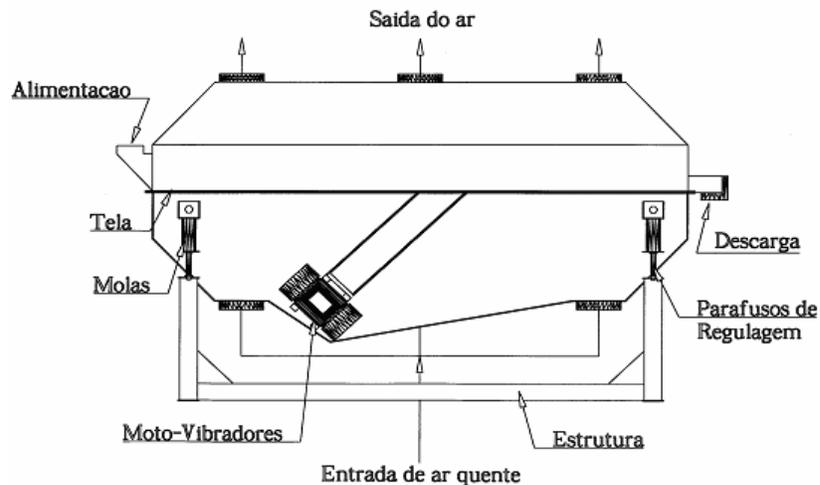


Figura II.1 – Secador vibrofluidizado – SVF.

Os dois motovibradores possuem potência de 1500 W cada. A vibração é promovida por quatro excêntricos localizados em cada eixo dos motovibradores. Variando-se a posição destes excêntricos, varia-se a amplitude de oscilação, totalizando 7 posições diferentes com 7 amplitudes de oscilação diferentes.

II.4.1.1 Monitoramento do sistema de ventilação

II.4.1.1.1 Pressão e velocidade operacional

O ventilador de insuflamento está ligado a uma tubulação principal de ar de 30cm de diâmetro, conectada às três entradas do secador através de três tubulações secundárias de 20cm de diâmetro cada uma com uma válvula do tipo borboleta para a regulagem do fluxo de ar.

Na saída das câmaras do secador existe uma tubulação de saída do ar (conectada

Tabela II.3 – Posição das válvulas na coleta dos dados.

	Válvula 1 – V1	Válvula 2 – V2	Válvula 3 – V3	Válvula 4 – V4
1º Ensaio	P1	P1	P1	P1
2º Ensaio	P2	P2	P2	P1
3º Ensaio	P3	P3	P3	P1
4º Ensaio	P4	P4	P4	P1
5º Ensaio	P1	P1	P1	P2
6º Ensaio	P1	P1	P1	P3
7º Ensaio	P1	P1	P1	P4

Para a tomada da velocidade do ar do secador com tubo de Pitot (Figura II.3), é utilizada a metodologia fornecida pela própria AirFlow: em seis posições radiais (D1 a D6) do tubo de saída (conforme indica a Figura II.4), a pressão dinâmica foi tomada com um tubo de Pitot.

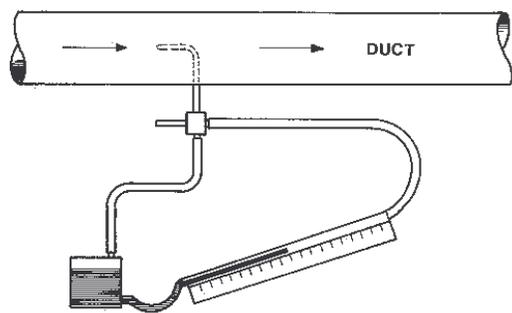


Figura II.3 – Tubo de Pitot.

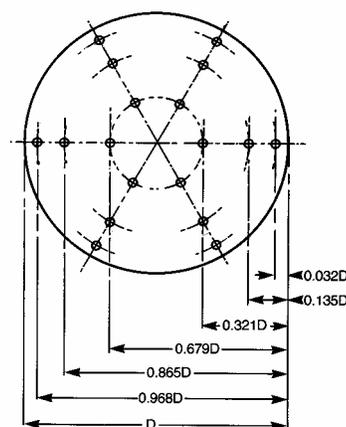
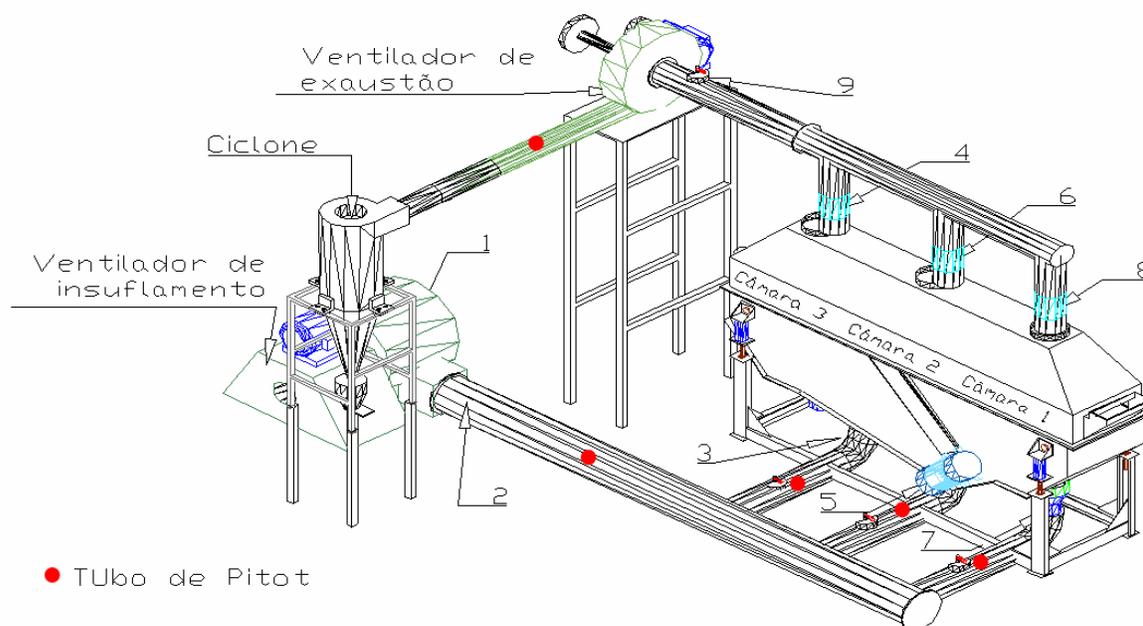


Figura II.4 – Posições radiais usadas para obter as velocidades.

Através da seguinte equação, calcula-se a velocidade do ar com a pressão dinâmica obtida por meio do tubo de Pitot:

$$V = 1,291 \sqrt{\frac{1000}{B} \cdot \frac{T}{289} \cdot P_v} \quad (4)$$

Para a determinação da perda de carga nas câmaras do secador, foram utilizados manômetros diferenciais fixos, acoplados ao secador, assim como para a determinação das pressões estáticas antes e depois do ventilador de insuflamento. Esses manômetros são permanentes e poderão ser utilizados no monitoramento do processo de secagem no secador (Figura II.5). No caso do ventilador de exaustão, as pressões foram tomadas por um manômetro diferencial móvel, ou seja, instalado somente para estes testes. Foi determinada a perda de carga para a tela do leito de secagem e para as câmaras de secagem.



Adaptado de BROD (2003).

Figura II.5 – Posição das tomadas de velocidade do ar com tubo de Pitot.

A numeração (de 1 a 9) que aparece na Figura II.5 é relativa aos pontos de coleta de temperatura do ar.

As medidas de pressão também foram feitas em manômetro em U acoplado ao secador, onde se tomaram as medidas de pressão antes e após o ventilador de insuflamento e na entrada e saída das três câmaras. No ventilador de exaustão também foi instalado um manômetro em U para medir a pressão antes e depois do mesmo.

II.4.1.1.2 Perfil de temperatura

O secador foi todo monitorado através de sensores de temperatura (PT-100) instalados em diversos pontos da tubulação e da câmara de secagem. Estes sensores enviam sinais para um sistema de aquisição de dados que registra as temperaturas. Estes dados foram então transferidos para um microcomputador, objetivando posterior análise.

Os termistores PT-100 são resistências que mudam a sua resistividade conforme a temperatura. Para obter o valor da temperatura, injeta-se uma corrente estabilizada de valor conhecido nos terminais do resistor e lê-se o valor da tensão resultante. O valor da tensão obtido é proporcional à temperatura que se deseja medir.

Todo o sistema de aquisição de dados foi testado e calibrado, o sistema de aquisição de dados é composto pelos seguintes equipamentos:

- ✓ Computador 486 com sistema operacional DOS e Microsoft Windows 3.1;
- ✓ Placa de aquisição de dados LYNX e software de aquisição de dados;
- ✓ 15 portas de recebimentos de dados;
- ✓ 10 termistores PT-100;
- ✓ Cabos com três fios.

Todo o sistema foi calibrado usando-se resistências que acompanham o próprio sistema. A correlação calculada pelo próprio software obtida entre os pontos calibrados foi de 99,98%.

As posições que foram instrumentadas com os termistores PT-100 foram:

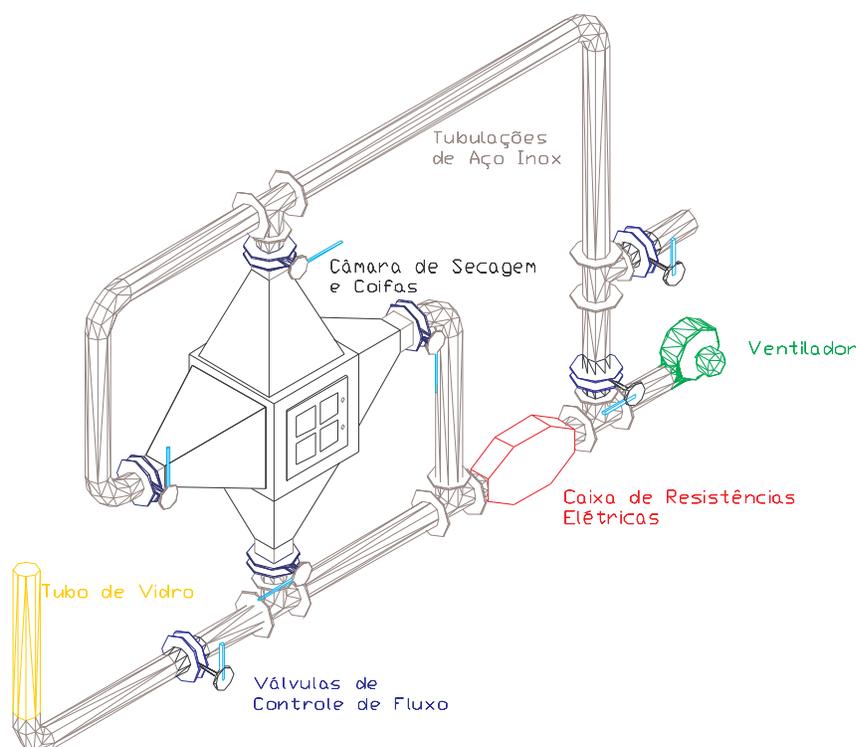
- ✓ 3 Termistores PT-100, posicionados nas entradas das câmaras;
- ✓ 3 Termistores PT-100, posicionados nas saídas das câmaras;
- ✓ 1 Termistor PT-100, posicionado na saída do ventilador de insuflamento;
- ✓ 1 Termistor PT-100, posicionado na entrada do exaustor;
- ✓ 1 Termistor PT-100, utilizado na medição da temperatura ambiente;
- ✓ 1 Termistor PT-100 é acoplado diretamente na saída do queimador para auxiliar no controle de temperatura de secagem.

II.4.1.2 Perda de carga dos sólidos em leito fluidizado

Foram realizadas as determinações da perda de carga devido às partículas em um leito

fluidizado para grãos de feijão preto, assim como para raízes de chicória cubetadas e secas. O intuito foi dispor de informações complementares para uma futura utilização destes materiais em secagens no secador vibrofluidizado.

Um aparato conjugado ao secador convectivo de fluxo perpendicular e paralelo utilizado também por Brod, Park e Oliveira (2001) foi usado nestas determinações. Este aparato consiste em um tubo de vidro acoplado à tubulação do secador e, por meio do fechamento e abertura de válvulas, é possível fazer escoar o ar de secagem de modo perpendicular a um leito contido no tubo. O tubo de vidro conjugado ao secador convectivo é mostrado na Figura II.6.



Fonte: BROD; PARK e OLIVEIRA (2001).

Figura II.6 – Desenho esquemático do tubo de vidro acoplado ao secador convectivo.

A velocidade do ar que passa pelo leito é alterada por um inversor de frequência que controla a rotação de um ventilador centrífugo. A perda de carga do leito é medida por meio de manômetros em U acoplados ao tubo de vidro.

II.4.1.3 Cinética de secagem do milho

Para matéria-prima dos ensaios de secagem, foram adquiridos grãos de milho de marca comercial, destinados a alimentação animal em loja especializada.

O tratamento estatístico das curvas experimentais de secagem foi feito com o uso de programa computacional desenvolvido no pacote computacional Microsoft Excel[®] disponibilizado na internet (CT&EA, 2005). Esse programa utiliza métodos numéricos no tratamento dos dados de secagem. As curvas de secagem foram tratadas pela equação fenomenológica da solução da segunda Lei de Fick.

Um planejamento experimental fracionário 2^{4-1} foi utilizado nos experimentos de secagem. As variáveis independentes escolhidas nesta análise inicial foram a temperatura e velocidade do ar, a amplitude de vibração e o ângulo do leito de secagem. Este planejamento estipula oito ensaios variando-se concomitantemente as grandezas a serem estudadas. Foram ainda realizados outros quatro ensaios chamados de pontos centrais.

Um planejamento experimental fracionário 2^{4-1} foi utilizado nos experimentos de secagem. As variáveis independentes, ou fatores, escolhidas nesta análise inicial foram: temperatura (X_T), velocidade do ar (X_V), amplitude de vibração (X_A) e inclinação do leito de secagem (X_I), enquanto que a variável dependente, ou resposta, foi a difusividade efetiva (D_{ef}). Este planejamento estipula oito ensaios variando-se concomitantemente as grandezas estudadas. Este planejamento requer variação em apenas dois níveis (nível -1 e nível +1) para cada variável. Estes pontos fatoriais são apenas para avaliar os efeitos de suas variáveis independentes, não sendo possível otimizar o processo. Para um planejamento completo deve-se ainda avaliar o erro puro incluindo, então, mais 4 ensaios como repetições do ponto central (nível 0), responsáveis pela avaliação do erro aleatório. Neste caso, o número total de ensaios foi de: $8 + 4 = 12$. A Tabela II.4 mostra a matriz experimental para o planejamento fatorial fracionário 2^{4-1} com suas variáveis independentes codificadas.

Tabela II.4 – Planejamento experimental fracionário 2⁴⁻¹ para secagem de milho.

Ensaio	Temperatura do ar – X_T	Velocidade do ar – X_V	Amplitude de vibração – X_A	Inclinação do leito – X_I
1	+1	+1	+1	+1
2	+1	+1	-1	-1
3	+1	-1	+1	-1
4	+1	-1	-1	+1
5	-1	+1	+1	+1
6	-1	+1	-1	-1
7	-1	-1	+1	-1
8	-1	-1	-1	+1
9	0	0	0	0
10	0	0	0	0
11	0	0	0	0
12	0	0	0	0

Os níveis das variáveis estudadas foram determinados a partir das características e limitações impostas pela estrutura física do secador e dos equipamentos envolvidos nos sistemas de aquecimento, ventilação e vibração.

II.4.1.4 Determinação do teor de água das amostras

O secador foi alimentado com aproximadamente 15 kg de grãos de milho e, conforme os grãos escoavam pelo alimentador do secador e saiam na descarga, eram coletados para uma re-alimentação, que consistia em uma nova passagem completa pelo leito de secagem. Durante essa coleta, amostras foram extraídas para posterior determinação de teor de água em cada passagem pelo leito de secagem.

A determinação da massa seca das amostras foi realizada em estufa com circulação forçada do ar de marca FANEM, modelo 320-SE, de acordo com o método nº 925.45 da ASSOCIATION OF OFFICIAL ANALYTICAL CHEMISTS – A.O.A.C. (1998).

II.4.1.5 Distribuição do tempo de residência – DTR

II.4.1.5.1 Ensaios com grãos de milho

Três ensaios foram realizados para determinar a distribuição de tempo de residência de cada amplitude de vibração escolhida. Para realizar esses ensaios foram alteradas as amplitudes de vibração dos motovibradores, originando assim as amplitudes máxima, média e mínima. Para se determinar a curva de distribuição, lançou-se mão de uma técnica experimental conhecida como técnica de estímulo e resposta: perturba-se o sistema e verifica-se como ele responde ao estímulo. Uma análise da resposta dá a informação desejada sobre o sistema. No presente caso, o estímulo é uma entrada de traçador no escoamento de sólidos que entram no leito, enquanto a resposta é um registro de tempo do traçador que deixa o recipiente. Qualquer material que possa ser detectado e que não perturbe o escoamento pode ser usado como traçador. Neste caso, grãos de milho pintados previamente com tinta de cor preta foram utilizados como traçador.

A medição da concentração de traçador na saída dos grãos do secador foi realizada pela pesagem dos grãos recolhidos em períodos previamente determinados e, em seguida, e pela imagem destes grãos obtida por meio de máquina fotográfica digital. As fotografias foram processadas em software específico para separar o produto não marcado do traçador.

O software IDRISI versão 32 foi utilizado para realizar os tratamentos das imagens. Com esse software foram obtidos os histogramas de pixels das imagens. Nas imagens tratadas na tonalidade de cor cinza, por meio do software, foram separados os pixels que representam os grãos de milho pintados de preto (tonalidades escuras de limiar 0-70, em uma escala de cinza que varia de 0 até 255, na qual os valores mais baixos representam tons escuros, enquanto que valores mais altos representa tons claros). Ao final do tratamento, pôde-se estimar as quantidades de grãos de milho pretos que estavam saindo ao longo do tempo do secador.

II.4.1.5.2 Ensaios com grãos de feijão preto

Para se fazer o levantamento da distribuição do tempo de residência no secador vibro-fluidizado utilizou-se o método de estímulo e resposta. O estímulo consistiu em um pulso de

material marcado (feijão preto pintado de branco) de massa conhecida, e a resposta foi medida através da fração de traçador (feijão preto pintado de branco) em relação ao material não marcado (feijão preto), em determinados espaços de tempo. O método apresenta o problema de se separar o material não marcado do traçador, uma vez que os dois têm que possuir características iguais de escoamento no leito.

Brod (2003) utilizou o método indireto de separação dos materiais, analisando-se a imagem digital do material e, pela diferença de cores dos materiais marcados e não marcados, determinando-se a proporção de um em relação ao outro. Este método foi utilizado, pois a separação manual para materiais de pequena granulometria torna-se inviável. O material utilizado pelo autor foi casca de ovo triturada, utilizando-se como traçador casca de ovo pintada com tinta preta brilhante.

No presente trabalho utilizou-se então feijão preto como material não marcado, enquanto que feijão preto pintado com tinta branca foi utilizado como marcador. Mediu-se a proporção do traçador no material não marcado durante o funcionamento do secador vibrofluidizado utilizando-se a separação manual e também a separação digital descrita acima.

Foram executadas 5 corridas, cada uma com uma amplitude de vibração diferente; variando-se a amplitude de vibração com mudança da posição dos excêntricos no motor de vibração do secador vibrofluidizado. Nos resultados, as amplitudes são indicadas pelos números 1 (máxima), 2, 3, 4 e 5 (mínima). As corridas com as amplitudes 6 e 7 do secador não foram realizadas, pois o feijão não se deslocou no leito vibrofluidizado para essas amplitudes, impossibilitando o experimento.

Para todas as corridas, as válvulas das câmaras 1, 2, 3 e a de exaustão estavam na posição 1, ou seja, totalmente abertas.

A distribuição do tempo de residência foi medida injetando-se um pulso de material marcado (feijão preto pintado de branco) na alimentação do secador vibrofluidizado no momento em que se atingiu o regime operacional com o material não marcado. Após o pulso de traçador ter sido injetado, no momento em que o primeiro grão de traçador passou pela saída do secador, tomaram-se amostras a intervalos de tempo igualmente espaçados, até que a maior parte do traçador saísse do secador. Para cada corrida, utilizou-se um intervalo de tempo específico para a coleta de cada amostra, devido à diferença de vazão que cada amplitude utilizada proporcionava.

Cada amostra foi pesada e homogeneizada e então distribuída em uma bandeja de plástico. Então se tirou uma foto digital de cada amostra, de uma distância fixa e suficiente para que toda a superfície do material distribuído na bandeja aparecesse na imagem.

A máquina fotográfica digital marca SONY modelo DSC-P32 possibilita a obtenção de fotografias com resolução de 2048 x 1536 pixels (3 megapixels). As fotografias das respectivas amostras foram transmitidas para o computador para posterior análise das imagens.

A seguir, executou-se a separação manual do traçador nas amostras, pesando-se a massa do traçador nas mesmas, transmitindo-se, então, essas informações para a planilha de cálculos de tempo de residência.

Com as massas de traçador (m_{tr}) e totais das amostras, calculou-se as frações em cada uma delas e, somando-se essas frações, pôde-se chegar ao valor total de traçador (m_{trtot}) que foi recolhido na corrida inteira.

Então, para cada amostra, a concentração $C(t)$, $E(t)$ e $F(t)$ foram calculadas conforme descrito no item II.3.3.

II.4.1.5.3 Análise de imagens

As imagens obtidas em laboratório eram imagens coloridas de 24 bits. Estas imagens foram então convertidas para imagens de 8 bits, em escala de cinza, utilizando-se o software GIMP versão 2.4, uma vez que o software utilizado para análise das imagens trabalha com imagem .jpeg de 8 bits.

Para a análise das imagens, utilizou-se o software IDRISI versão 32. Este aplicativo é geralmente utilizado em Sistemas de Informação Geográfica – SIG, para análises geográficas e processamento de imagens.

As fotografias digitais convertidas em imagens 8 bits em escala de cinza foram novamente convertidas do formato de imagem .jpeg para o formato Raster file (.rst), utilizado pelo software. No IDRISI, para cada imagem foi gerado seu respectivo histograma que é a representação gráfica da distribuição das tonalidades de cinza na imagem, mostrando a quantidade de pixels para cada uma das faixas de tons de cinza, que variam de 0 (preto) a 255 (branco).

Para se comparar os resultados obtidos da seleção manual do traçador nas amostras com os resultados das imagens, foi feito um estudo para se encontrar o limiar ideal na escala

de cinza, para cada imagem, onde a concentração de pixels de traçador se igualou à proporção de traçador em cada amostra. Nas corridas realizadas, cada amostra apresentava um limiar ideal diferente, sendo então calculado um limiar médio para corrida, com a média do limiar ideal de cada amostra. Sendo assim, utilizou-se esse limiar médio para calcular a quantidade de pixels do traçador nas imagens de todas as amostras, na mesma corrida.

Em cada amostra, com o software IDRISI, foi feita uma reclassificação das imagens, separando os pixels acima do limiar médio dos que estavam abaixo, na escala de cinza. Com todos os pixels divididos em duas classes (traçador e material não marcado), foi possível encontrar a quantidade de pixels referentes ao traçador em cada amostra.

Com a concentração de pixels do traçador calculada, foram realizados os mesmos cálculos do tempo de residência feitos para as proporções mássicas, obtendo-se curvas de $E(t)$, $F(t)$ e do tempo de residência médio para cada corrida.

Dessa forma, é possível comparar os tempos de residência calculados com base nas proporções de massa das amostras e com base nas imagens obtidas de cada amostra.

II.4.1.5.4 Ajuste do método de análise das imagens digitais para o feijão preto

Como o tratamento de dados apresentado apresentou um desvio médio relativo alto para algumas das corridas, propôs-se um ajuste no método, de modo a aproximar mais o tempo de residência calculado com base nas imagens do calculado com base na massa.

O objetivo do ajuste do método foi encontrar um tempo de residência médio compatível com o encontrado com base na massa do produto, utilizando apenas as imagens digitais, sem relacionar os dados do traçador da imagem com o da massa de traçador obtido pela separação manual. As imagens utilizadas nessa análise ajustada são as mesmas que foram utilizadas no método apresentado no relatório parcial de atividades.

Dessa forma, para a determinação do tempo de residência, partiu-se de uma imagem de feijão preto (tomada como imagem de referência), cujo histograma foi gerado no IDRISI versão 32.

No histograma, determinou-se o limiar que define a faixa de escala de cinza que representa feijão preto e a que representa traçador. A Figura II.7 mostra a imagem de referência do feijão preto e seu respectivo histograma.

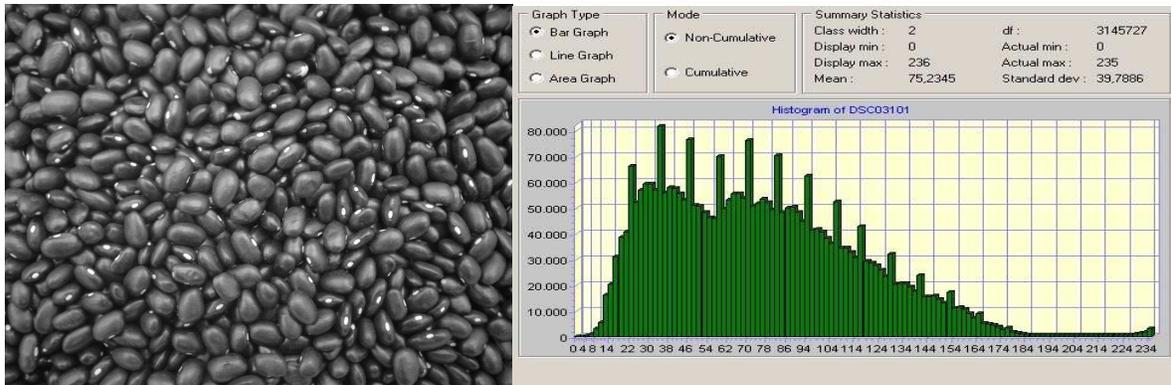


Figura II.7 – Imagem de referência do feijão preto e respectivo histograma.

O histograma mostra que para a imagem de referência do feijão preto, a maior parte dos pixels está distribuída nos valores da escala de cinza mais próximos do preto, o que naturalmente indica que estes pixels representam o feijão preto.

Observando-se a parte à direita do histograma, verifica-se um decréscimo da quantidade de pixels até se chegar à faixa próxima do valor 190, a partir de onde se tem a ocorrência de pequenas quantidades de pixels. Dessa forma, considerou-se o valor 190 como limiar, a partir de onde se tem pixels pertencentes ao traçador e abaixo do qual se tem pixels pertencentes ao feijão preto. A quantidade de pixels acima do limiar 190 que aparecem no histograma da imagem de referência é apenas interferência gerada pelo hilo do feijão.

O limiar encontrado pela imagem de referência (190) foi utilizado para a reclassificação das imagens pelo IDRISI em todas as corridas. Com os pixels de feijão preto e traçador (feijão branco) divididos em duas classes, pode-se então encontrar suas respectivas quantidades, o que permite calcular a concentração de traçador em cada imagem.

Com a concentração de pixels do traçador calculada, foram realizados os cálculos do tempo de residência, obtendo-se curvas de $E(t)$, $F(t)$ e o tempo de residência médio para cada corrida.

II.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

II.5.1 MONITORAMENTO DO SECADOR VIBROFLUIDIZADO

II.5.1.1 Pressão e velocidade operacional

As velocidades na tubulação do secador foram obtidas através de um tubo de Pitot, segundo a metodologia já descrita, encontrando os valores mostrados na tabelas abaixo, juntamente com as características do ambiente: nos ensaios 3 e 4 os dados de pressão dinâmica medida nas entradas das câmaras 1, 2 e 3 não eram significativos quando as câmaras estavam com as válvulas nas posições P3 e P4, por isso não foram medidos. As Tabelas II.5 a II.9 mostram os dados de pressão dinâmica obtidos:

Tabela II.5 – Dados de pressão dinâmica na saída o ventilador.

	1º Ensaio	2º Ensaio	3º Ensaio	4º Ensaio
D1	0,0790	0,0715	0,0690	0,0205
D2	0,0780	0,0735	0,0700	0,0210
D3	0,0865	0,0795	0,0700	0,0215
D4	0,1025	0,0990	0,0745	0,0220
D5	0,0790	0,0865	0,0600	0,0200
D6	0,0600	0,0645	0,0475	0,0150
Média	0,0808	0,0791	0,0652	0,0200
Temperatura	26 °C	26 °C	26 °C	26 °C

Tabela II.6 – Dados de pressão dinâmica obtidos na entrada da câmara 1.

	1º Ensaio	2º Ensaio	3º Ensaio	4º Ensaio
D1	0,0450	0,0390	-	-
D2	0,0450	0,0415	-	-
D3	0,0510	0,0445	-	-
D4	0,0530	0,0440	-	-
D5	0,0545	0,0460	-	-
D6	0,0515	0,0445	-	-
Média	0,0500	0,0433	-	-
Temperatura	26,5 °C	26,5 °C	26,5 °C	26,5 °C

Tabela II.7 – Dados de pressão dinâmica obtidos na entrada da câmara 2.

	1º Ensaio	2º Ensaio	3º Ensaio	4º Ensaio
D1	0,0385	0,0160	-	-
D2	0,0395	0,0170	-	-
D3	0,0430	0,0380	-	-
D4	0,0675	0,0610	-	-
D5	0,0680	0,0560	-	-
D6	0,0625	0,0395	-	-
Média	0,0532	0,0379	-	-
Temperatura	27 °C	27 °C	27 °C	27 °C

Tabela II.8 – Dados de pressão dinâmica obtidos na entrada da câmara 3.

	1º Ensaio	2º Ensaio	3º Ensaio	4º Ensaio
D1	0,0430	0,0275	-	-
D2	0,0455	0,0050	-	-
D3	0,0465	0,0150	-	-
D4	0,0490	0,0390	-	-
D5	0,0485	0,0290	-	-
D6	0,0480	0,0190	-	-
Média	0,0468	0,0224	-	-
Temperatura	28 °C	28 °C	28 °C	28 °C

Tabela II.9 – Dados de pressão dinâmica obtida na saída do exaustor.

	1º Ensaio	5º Ensaio	6º Ensaio	7º Ensaio
D1	0,9000	0,7400	0,5500	0,0540
D2	0,6800	0,7400	0,5000	0,0240
D3	0,6500	0,6400	0,4100	0,1430
D4	0,8600	0,7100	0,3900	0,1370
D5	0,6400	0,6400	0,3700	0,0860
D6	0,4300	0,4400	0,2300	0,0530
Média	0,6933	0,6517	0,4083	0,0828
Temperatura	24 °C	26,5 °C	28,5 °C	29 °C

Com os dados das tabelas acima foram calculadas as velocidades do fluxo de ar dentro das tubulações. Alguns dados ambientais são necessários (Tabela II.10):

Tabela II.10 – Características do ambiente.

Parâmetro	Valor
Pressão atmosférica B	94,4 kPa = 944mbar
Aceleração da gravidade	9,81 m/s ²

Na Tabela II.11, são mostrados os dados de velocidades medidos pelo tudo de Pitot.

Por existir diversas combinações possíveis para as posições entre de aberturas das válvulas não foram medidas todas as combinações.

Tabela II.11 – Dados médios de velocidade – V [m/s] e vazão – Q [m³/s].

Ensaio	Saída do Ventilador 1		Entrada da Câmara 1		Entrada da Câmara 2		Entrada da Câmara 3		Saída do Exaustor	
	V	Q	V	Q	V	Q	V	Q	V	Q
1	12,151	0,748	9,565	0,230	9,871	0,237	9,272	0,223	35,468	0,627
2	12,019	0,740	8,896	0,214	8,336	0,200	6,420	0,154	-	-
3	10,910	0,671	-*	-	-*	-	-*	-	-	-
4	6,044	0,372	-*	-	-*	-	-*	-	-	-

* - Dados não significativos

A diferença nos valores de vazão do ventilador 1 (0,748 m³/s) e do ventilador 2 (0,627 m³/s) é devido ao vazamento do ar pela região de alimentação e descarga dos sólidos no secador.

Nos ensaios 5, 6 e 7 não foram alteradas as posições das válvulas localizadas na entrada das câmaras. Elas permaneceram em P1. Somente foram alteradas as posições da válvula localizada na entrada do exaustor. As velocidades e vazões encontradas neste ponto são mostradas na Tabela II.12.

Tabela II.12 – Dados de velocidade no exaustor.

Ensaio	Posição	Saída do exaustor	
		Velocidade [m/s]	Vazão [m ³ /s]
5	Válvula em P2	34,530	0,610
6	Válvula em P3	27,425	0,484
7	Válvula em P4	12,362	0,218

II.5.1.2 Perfil de temperatura

Foram realizados testes para determinar a temperatura máxima alcançada. Além disso, o controlador ON/OFF instalado consegue manter a temperatura sem, no entanto, atenuar a influência do mecanismo de liga/desliga e do acionamento do queimador na

temperatura do ar, conforme é mostrado na Figura II.8.

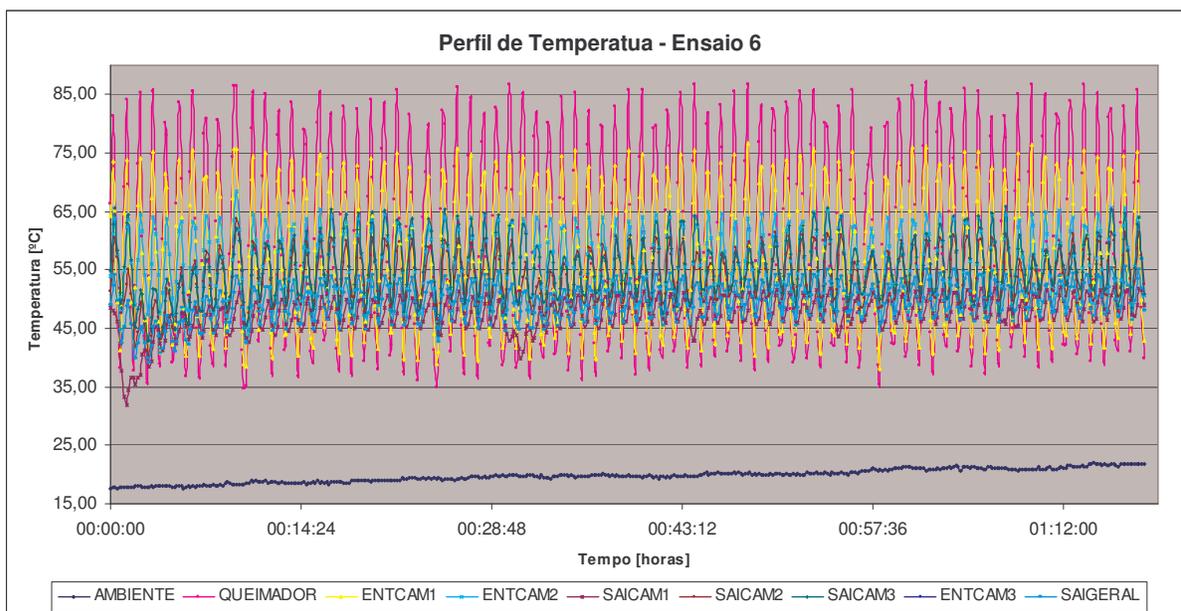


Figura II.8 – Perfil de temperatura do ensaio 6.

A partir dos dados obtidos na análise do perfil de temperatura ao longo da tubulação do secador vibrofluidizado, pode-se perceber que há uma grande amplitude de temperatura principalmente na parte inicial da tubulação, ou seja, antes de passar através do leito de secagem. Isso acontece devido à tomada de temperatura da entrada do controlador se posicionar logo na saída do ventilador de insuflamento e do queimador. Futuramente, deve-se estudar a possibilidade de se transferir essa posição para algum lugar como a tubulação de entrada de alguma das câmaras ou, ainda, se alterar os limites críticos de acionamento do sistema de controle. Tais medidas poderão atenuar a amplitude alcançada durante a ação do queimador e seu desligamento. Do ponto de vista do processo, o leito do secador faz a função da formação do plenum, pela introdução da perda de carga pelo Pakscreens® - V, minimizando esta oscilação de temperatura ao entrar em contato com a matéria a ser seca.

II.5.1.3 Levantamento da perda de carga do leito de secagem

II.5.1.3.1 Levantamento da perda de carga do leito de secagem (alimentação e descarga de sólidos abertos)

O levantamento da perda de carga do leito de secagem do ventilador foi realizado por

meio de manômetros diferenciais em U instalados entre a entrada e a saída das câmaras de secagem. A abertura das válvulas de insuflamento e exaustão foram variadas. As aberturas da alimentação e da descarga de sólidos permaneceram vedadas durante todo o levantamento. Os resultados são mostrados no Apêndice A.

Na Figura II.9 são mostrados, como exemplo, da variação da perda de carga com a válvula de exaustão na posição 6 e o fechamento da válvula de insuflamento.

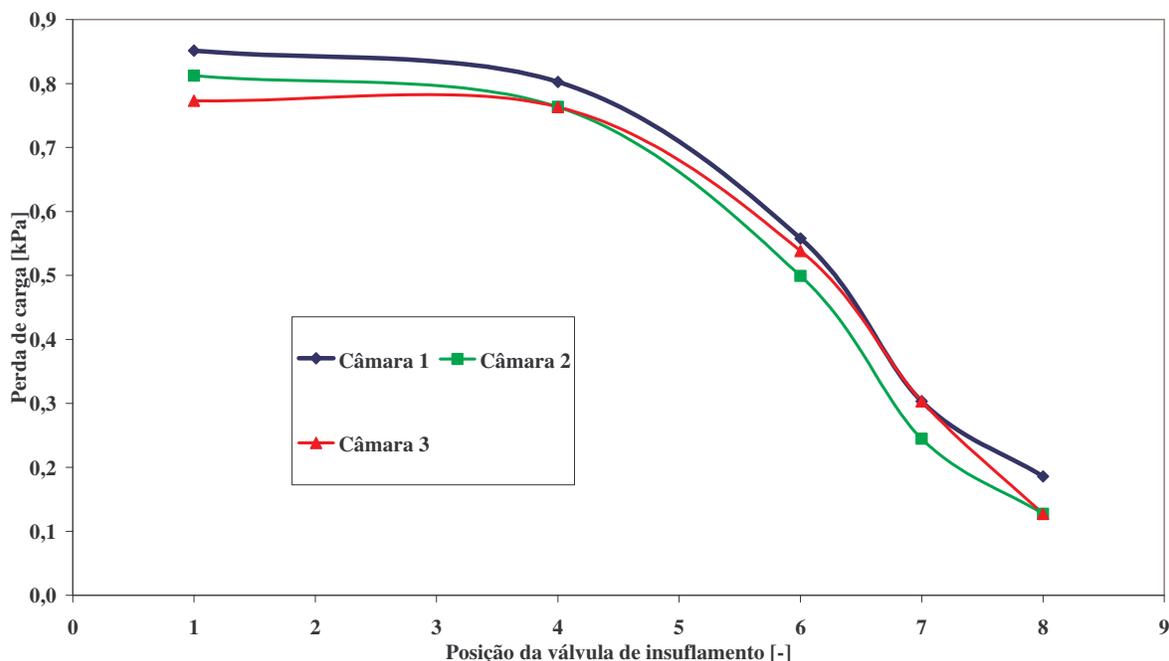


Figura II.9 – Perda de carga do leito de secagem com válvula de exaustão na posição 6.

A posição 1 corresponde à válvula totalmente aberta, seguindo de modo crescente até o seu fechamento completo na posição 9.

II.5.1.3.2 Levantamento da perda de carga do leito de secagem (alimentação e descarga de sólidos vedadas)

O levantamento da perda de carga com a alimentação e descarga fechadas foi realizado seguindo a mesma metodologia realizada para o levantamento com o secador aberto, com os manômetros diferenciais em U instalados entre as câmaras do leito de secagem. As aberturas referentes à alimentação e descarga de sólidos permaneceram fechadas durante todo o ensaio. Os resultados são mostrados no Apêndice C.

A Figura II.10 mostra a variação da perda de carga com a válvula de exaustão na posição 6 e o fechamento da válvula de insuflamento, seguindo o exemplo mostrado para o secador aberto, anteriormente.

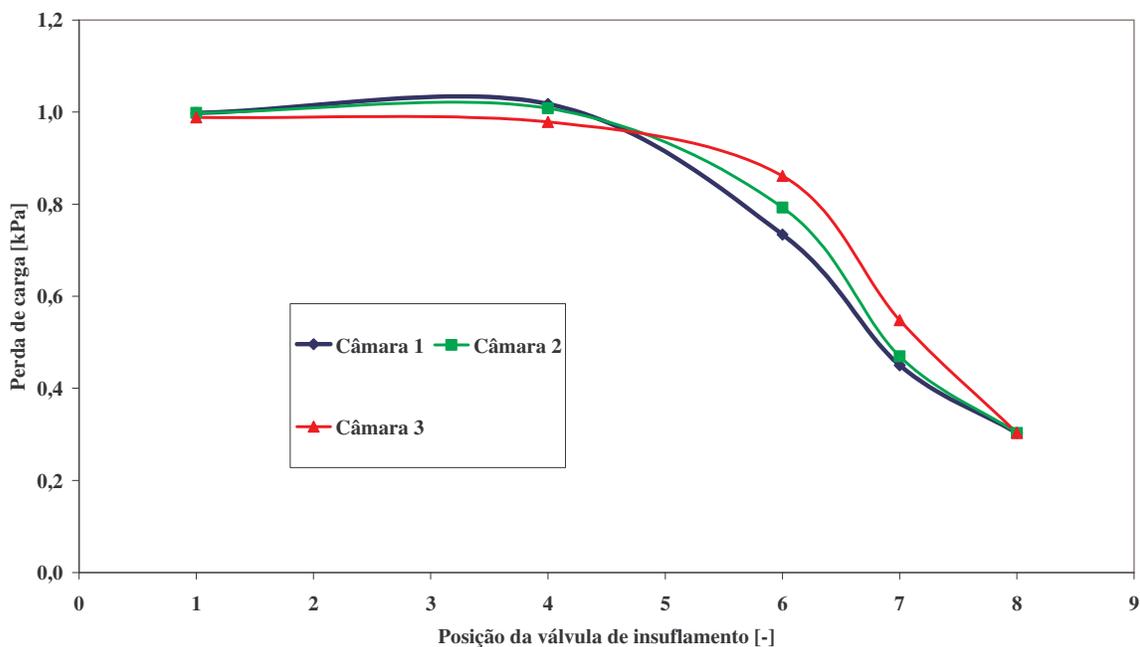


Figura II.10 – Perda de carga do leito de secagem com válvula de exaustão na posição 6.

As curvas obtidas para as três câmaras, para a situação do sistema fechado seguem o mesmo padrão das obtidas com o sistema aberto, observando-se maiores valores de perda de carga para as posições onde a válvula está mais aberta, decrescendo nas posições nas quais as válvulas estão próximas do fechamento.

Comparando-se com os resultados obtidos para o sistema aberto, observa-se que os valores de perda de carga para o sistema fechado são maiores, chegando a 1,0 kPa quando as válvulas de insuflamento estavam abertas (posição 1) e a 0,3 kPa na posição 8, enquanto para o secador aberto obteve-se valores em torno de 0,8 kPa para a posição 1 e valores abaixo de 0,2 kPa para a posição 8.

Verifica-se também que, mesmo para o sistema fechado, a perda de carga é diferente em cada uma das câmaras, o que mostra que a distribuição do ar na tubulação de insuflamento não é uniforme. As maiores diferenças de perda de carga das câmaras ocorrem nos casos onde as válvulas de insuflamento estão parcialmente fechadas; e valores mais próximos entre as três câmaras ocorrem em situações nas quais a válvula está totalmente aberta (posição 1) e no

máximo fechamento estudado (posição 8).

II.5.1.4 Pressões estáticas nos ventiladores de insuflamento e exaustão

II.5.1.4.1 Pressões estáticas nos ventiladores de insuflamento e exaustão (alimentação e descarga de sólidos abertas)

Foram avaliados os aumentos de pressão estática, proporcionados pelos ventiladores de insuflamento e exaustão. Estes ensaios foram também conduzidos por meio de manômetros diferenciais em U conectados nas tubulações anterior e posteriormente dos respectivos ventiladores.

Os resultados do aumento de pressão estática devido aos ventiladores podem ser vistos no Apêndice B. Como exemplos, são mostrados na Figura II.11 os valores de pressão estática obtidos com o sistema aberto e válvula de insuflamento na posição 4. Neste caso, a válvula de insuflamento foi mantida nesta posição, enquanto que a válvula de exaustão foi gradualmente fechada.

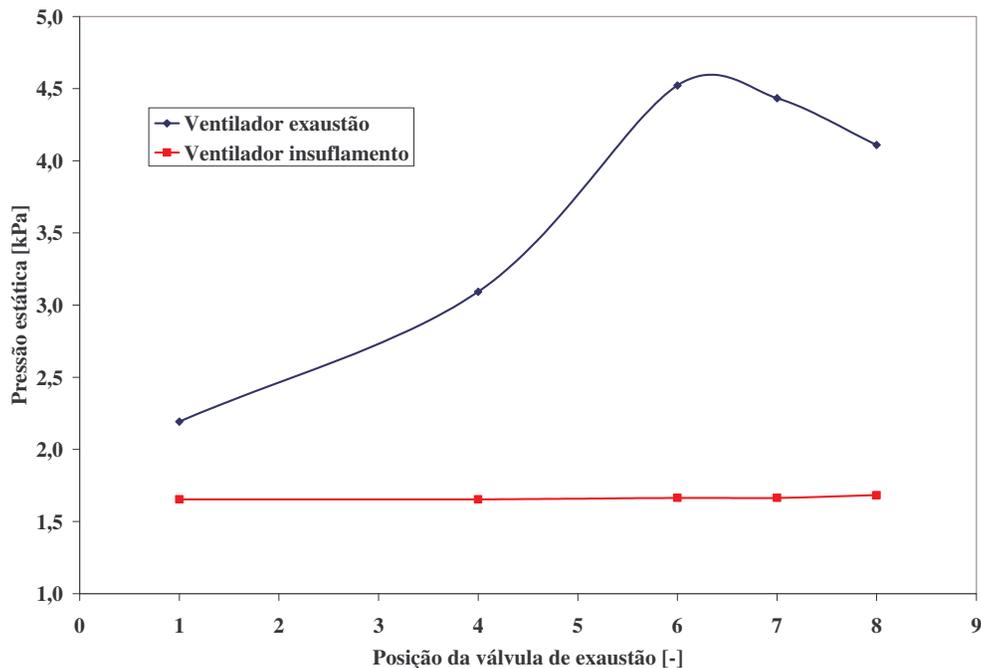


Figura II.11 – Pressão estática devido aos ventiladores - válvula de insuflamento na posição 4 (sistema aberto).

Percebe-se que o ventilador de exaustão proporciona um aumento na pressão estática

muito maior que o de insuflamento. Analisando os dados mostrados no Apêndice B, nota-se que a pressão estática do ventilador de insuflamento atinge cerca de 1,8 kPa, enquanto que o de exaustão atinge aproximadamente 4,5 kPa.

II.5.1.4.2 Pressões estáticas nos ventiladores de insuflamento e exaustão (alimentação e descarga de sólidos vedadas)

A avaliação dos aumentos de pressão estática proporcionados pelos ventiladores de exaustão e insuflamento foi realizada, para o caso das aberturas de alimentação e descarga de sólidos fechadas, da mesma forma da situação do secador com a alimentação e a descarga abertas. Utilizaram-se manômetros diferenciais em U conectados nas tubulações anteriores e posteriores dos respectivos ventiladores.

Os resultados do aumento de pressão estática devido aos ventiladores são apresentados no Apêndice D. Como exemplos, são mostrados na Figura II.12 os valores de pressão estática obtidos com a válvula de insuflamento na posição 4. Neste caso, a válvula de insuflamento foi mantida nesta posição, enquanto que a válvula de exaustão foi gradualmente fechada.

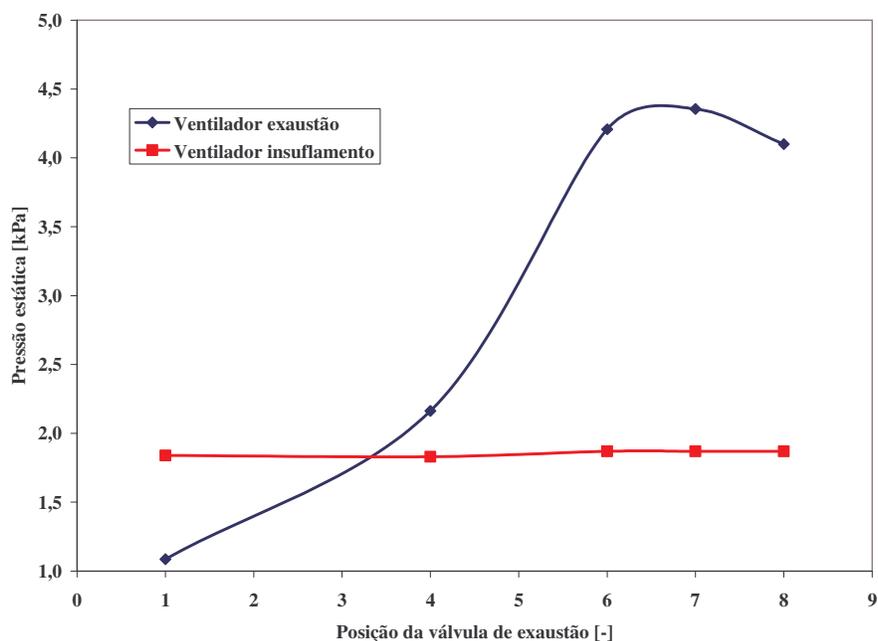


Figura II.12 – Pressão estática devido aos ventiladores - válvula de insuflamento na posição 4 (sistema fechado).

Para o sistema de alimentação e descarga fechado, com o fechamento das válvulas de exaustão, tem-se um aumento na pressão estática no ventilador de exaustão, chegando-se a valores próximos a 4,5 kPa.

Quando se variou a posição das válvulas de entrada, houve pouca variação da pressão estática no ventilador de exaustão, o que indica uma maior influência da posição da válvula de exaustão na pressão estática do ventilador.

No ventilador de insuflamento, a variação das válvulas de exaustão não gerou aumento na pressão estática. No gráfico da Figura II.12, pode-se observar que a pressão estática no ventilador de insuflamento ficou entre 1,8 kPa e 1,9 kPa. Também houve pouca variação da pressão estática no ventilador de insuflamento com a variação das válvulas de entrada.

Comparando-se os resultados para sistema de alimentação e descarga aberto e fechado, pode-se considerar que os valores de pressão estática ao longo do fechamento da válvula de exaustão foram próximos (com uma variação de 0,2 kPa).

De maneira geral, para o sistema fechado, observa-se que para o ventilador de exaustão, a pressão estática gerada ao longo da variação das válvulas de exaustão foi menor que para o sistema aberto, principalmente nos pontos onde a válvula de exaustão estava mais aberta (mais próximo da posição 1). Observa-se que para a posição 1 da válvula de exaustão, a pressão estática no ventilador de exaustão foi próxima a 1,1 kPa, bem abaixo do valor encontrado para o sistema aberto, que foi próximo a 2,2 kPa. À medida que se fechou a válvula de exaustão, a pressão estática aumentou, mas ainda assim não ultrapassou os valores obtidos para o sistema aberto.

II.5.1.5 Perfil de velocidade

II.5.1.5.1 Perfil de velocidade com alimentação e descarga abertas

Foram realizadas medições de velocidade do ar por meio de tubo de Pitot em diversos pontos da tubulação do secador: nas entradas das três câmaras de secagem (tubulação secundária – diâmetro de 20 cm), na saída do ventilador de insuflamento (tubulação primária – diâmetro de 30 cm) e na saída do ventilador de exaustão (diâmetro de 15 cm).

Na Tabela II.13 são mostrados os resultados obtidos pela medição da velocidade do ar, conforme metodologia anteriormente apresentada. As posições das válvulas de insuflamento e exaustão foram combinadas de modo a obter diversas vazões de ar.

Tabela II.13 – Velocidade, vazão e número de Reynolds nas câmaras de secagem.

Combinação das válvulas exaustão X insuflamento	Velocidade do ar [m/s]			Vazão [m ³ /s]			Número de Reynolds [-]		
	Câmara			Câmara			Câmara		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1 X 1	7,94	10,39	13,20	0,25	0,33	0,41	103362	135184	171770
1 X 4	-	5,81	9,79	-	0,18	0,31	-	75572	127397
1 X 6	-	-	5,24	-	-	0,16	-	-	68215
4 X 1	5,06	7,71	8,96	0,16	0,24	0,28	65861	100257	116619
4 X 4	-	-	7,17	-	-	0,23	-	-	89261
6 X 1	15,75	10,58	10,78	0,49	0,33	0,34	194942	131018	133463
6 X 4	-	-	9,31	-	-	0,29	-	-	115876
7 X 1	2,55	3,66	4,52	0,08	0,12	0,14	31517	45364	55905
7 X 4	-	-	9,08	-	-	0,29	-	-	113082
8 X 1	3,60	4,56	5,87	0,11	0,14	0,18	44597	56433	72703
8 X 4	-	-	9,82	-	-	0,31	-	-	122262

Todos os valores obtidos de número de Reynolds se situaram em níveis considerados em regime turbulento, o que pode ser esperado para respectivos valores de velocidade do ar garantidos por ventiladores de grande capacidade.

Na Tabela II.14 são mostrados os resultados para a saída do ventilador de insuflamento.

Tabela II.14 – Velocidade, vazão e número de Reynolds na saída do ventilador de insuflamento.

Combinação das válvulas exaustão X insuflamento	Velocidade do ar [m/s]	Vazão do ar [m³/s]	Número de Reynolds [-]
1 X 1	15,03	1,06	293306
1 X 4	14,54	1,03	283781
1 X 6	10,97	0,78	214168
1 X 7	7,90	0,56	154113
1 X 8	5,05	0,36	98656
4 X 1	14,74	1,04	273662
4 X 4	11,20	0,79	218637
4 X 6	10,84	0,77	211509
6 X 1	13,51	0,96	250967
6 X 4	14,45	1,02	269740
7 X 1	12,63	0,89	234533
7 X 4	14,48	1,02	270352
8 X 1	6,55	0,46	121581
8 X 4	14,25	1,01	265990

Comparando-se os valores das Tabelas II.13 e II.14, percebe-se que as vazões do ar são distribuídas heterogeneamente entre as três câmaras.

Na Tabela II.15 são mostrados os resultados para a saída do ventilador de exaustão.

Tabela II.15 – Velocidade, vazão e número de Reynolds na saída do ventilador de exaustão.

Combinação das válvulas exaustão X insuflamento	Velocidade do ar [m/s]	Vazão do ar [m³/s]	Número de Reynolds [-]
1 X 1	36,50	0,64	338875
1 X 4	36,90	0,65	344492
4 X 1	31,25	0,55	290151
4 X 4	32,42	0,57	301034
6 X 1	19,55	0,35	181519
6 X 4	22,14	0,39	206692
7 X 1	9,58	0,17	88943
7 X 4	15,75	0,28	147063
8 X 1	5,78	0,10	53690
8 X 4	7,73	0,14	72119

Comparando os dados de velocidade e vazão do ar dos ventiladores de insuflamento e exaustão, percebe-se uma diferença acentuada na quantidade de ar que percorre o início e a saída da tubulação do secador. Essa situação ocorre provavelmente pela passagem de ar que acontece nas aberturas de alimentação e descarga do secador. A entrada/saída de ar por essas aberturas ocorre devido ao gradiente de pressão formado entre as câmaras de secagem e o ambiente externo.

Todos os ensaios de perda de carga e de velocidade do ar foram realizados com o sistema aberto, ou seja, com as aberturas de alimentação e descarga desobstruídas. O secador opera em uma situação real com o sistema aberto para a entrada e saída do produto a ser seco. Desta forma, os ensaios foram conduzidos nesta configuração.

II.5.1.5.2 Perfil de velocidade com alimentação e descarga vedadas

O perfil de velocidade para o secador com alimentação e descarga fechadas foi feito realizando-se medições de velocidade do ar por meio de tubo de Pitot nos mesmos pontos utilizados para a medição com o sistema aberto.

Na Tabela II.16 são mostrados os resultados obtidos pela medição da velocidade do ar, conforme metodologia anteriormente apresentada. As posições das válvulas de

insuflamento e exaustão foram combinadas de modo a obter diversas vazões de ar.

Tabela II.16 – Velocidade, vazão e número de Reynolds nas câmaras de secagem.

Combinação das válvulas exaustão X insuflamento	Velocidade do ar [m/s]			Vazão [m ³ /s]			Número de Reynolds [-]		
	Câmara			Câmara			Câmara		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1 X 1	6,14	6,41	9,77	0,19	0,20	0,31	76718	80099	122115
1 X 4	0,65	2,13	5,27	0,02	0,07	0,17	8094	26688	65837
4 X 1	6,15	6,68	9,52	0,19	0,21	0,30	76865	83500	118978
4 X 4	1,11	1,25	5,52	0,03	0,04	0,17	13878	15579	69021
6 X 1	5,79	5,85	7,75	0,18	0,18	0,24	72328	73133	96853
6 X 4	1,48	3,16	5,87	0,05	0,10	0,18	18524	39467	73420
7 X 1	5,66	5,29	7,12	0,18	0,17	0,22	70793	66105	88973
7 X 4	1,61	1,51	5,02	0,05	0,05	0,16	20166	18863	62728
8 X 1	5,18	5,69	7,29	0,16	0,18	0,23	64787	71122	91193
8 X 4	1,92	1,52	4,74	0,06	0,05	0,15	24028	19004	59237

Assim como no caso do secador com a alimentação e descarga abertas, os valores de número de Reynolds obtidos para o sistema fechado se situaram em níveis de regime turbulento, o que já era esperado, pelas velocidades proporcionadas pelo ventilador.

Na Tabela II.17 são mostrados os resultados para a saída do ventilador de insuflamento.

Tabela II.17 – Velocidade, vazão e número de Reynolds na saída do ventilador de insuflamento.

Combinação das válvulas exaustão X insuflamento	Velocidade do ar [m/s]	Vazão de ar [m³/s]	Número de Reynolds [-]
1 x 1	9,48	0,67	177711
1 x 4	9,30	0,66	174348
1 x 6	7,73	0,55	144927
1 x 7	5,85	0,41	109714
1 x 8	3,99	0,28	74885
4 x 1	9,32	0,66	174725
4 x 4	9,01	0,64	168970
4 x 6	7,43	0,52	139289
4 x 7	5,72	0,40	107266
4 x 8	3,86	0,27	72367
6 x 1	8,55	0,60	160323
6 x 4	8,48	0,60	158983
6 x 6	7,20	0,51	134940
6 x 7	5,60	0,40	105024
6 x 8	3,62	0,26	67945
7 x 1	7,88	0,56	147807
7 x 4	7,85	0,56	147303
7 x 6	6,91	0,49	129563
7 x 7	4,95	0,35	92813
7 x 8	3,59	0,25	67251
8 x 1	7,92	0,56	148607
8 x 4	7,87	0,56	147578
8 x 6	6,43	0,45	120614
8 x 7	4,74	0,34	88905
8 x 8	3,26	0,23	61128

Da mesma forma que os resultados obtidos para o sistema aberto, tem-se para o

sistema fechado, observando-se os valores das Tabelas II.16 e II.17, que as vazões de ar se distribuem de forma heterogênea entre as três câmaras, apresentando maiores vazões na câmara 3 e menores vazões na câmara 1.

As velocidades obtidas para o sistema fechado foram menores que as obtidas para o sistema aberto, no caso da saída do ventilador de insuflamento. O fechamento da alimentação e descarga do secador condicionou um aumento da pressão estática dentro do secador, uma vez que o ar não tinha tanta facilidade para sair do mesmo como com o sistema aberto. Dessa forma, com uma maior pressão estática, as velocidades dentro da tubulação tendem a ser menores, pois a única saída do ar é a tubulação de exaustão.

Dessa forma, a pressão estática antes do ventilador de exaustão também é maior, podendo-se esperar também velocidades do ar menores na saída do mesmo.

Na Tabela II.18 são mostrados os resultados para a saída do ventilador de exaustão.

Tabela II.18 – Velocidade, vazão e número de Reynolds na saída do ventilador de exaustão.

Combinação das válvulas exaustão X insuflamento	Velocidade do ar [m/s]	Vazão de ar [m³/s]	Número de Reynolds [-]
1 x 1	32,75	0,58	307073
1 x 4	32,64	0,58	306031
1 x 6	32,06	0,57	300608
1 x 7	31,95	0,56	299596
1 x 8	30,27	0,53	283807
4 x 1	32,47	0,57	304445
4 x 4	31,80	0,56	298202
4 x 6	30,91	0,55	289810
4 x 7	29,86	0,53	279977
4 x 8	28,97	0,51	271696
6 x 1	21,02	0,37	197126
6 x 4	21,66	0,38	203069
6 x 6	21,41	0,38	200729
6 x 7	20,40	0,36	191333
6 x 8	20,88	0,37	195747
7 x 1	14,58	0,26	136748
7 x 4	14,83	0,26	139045
7 x 6	14,39	0,25	134953
7 x 7	13,95	0,25	130813
7 x 8	14,19	0,25	133073
8 x 1	8,05	0,14	75482
8 x 4	8,27	0,15	77542
8 x 6	7,81	0,14	73272
8 x 7	7,91	0,14	74194
8 x 8	7,61	0,13	71389

Para o ventilador de exaustão, comparando-se a tomada de pressão com sistema aberto, o sistema fechado proporcionou condições para que ocorressem menores velocidades

para os casos em que se tinha a válvula de exaustão mais aberta (posição 1). Já para os outros casos houve variação da velocidade comparando-se com as obtidas com sistema aberto, ocorrendo valores maiores e menores que os obtidos nos respectivos pontos anteriormente. Para uma mesma posição da válvula de exaustão, ocorreram valores maiores em alguns casos, de acordo com a posição das válvulas de insuflamento, como nas configurações 4x1, 6x1, 7x1, 8x1 e 8x4. A posição aberta das válvulas de insuflamento condicionou esses aumentos de velocidade, combinada ao efeito da alimentação e descarga do secador fechadas.

Esses valores maiores de velocidade ocorreram nas configurações nas quais as válvulas de insuflamento estavam abertas, possibilitando ao ventilador de exaustão succionar mais ar das câmaras, uma vez que com as válvulas de insuflamento abertas, havia maior disponibilidade de ar na chegada do ventilador de exaustão. O ventilador de exaustão, nos outros casos, nos quais as válvulas de insuflamento estavam mais fechadas, não tinha tanta disponibilidade de ar para movimentar quanto tinha com as válvulas de insuflamento abertas. Dessa forma, ele não pôde operar com maior capacidade, gerando então fluxos de ar com menores velocidades.

Com o sistema aberto, o ar saía do sistema pelas aberturas de alimentação e descarga do secador, interferindo nas medidas feitas após a passagem do ar pelas câmaras, afetando também as feitas no ventilador de exaustão. A pressão estática para o sistema fechado é maior, o que proporciona menores velocidades do ar, ou menor pressão dinâmica dentro da tubulação de exaustão do ventilador.

II.5.1.6 Perda de carga dos sólidos em leito fluidizado

Os valores de perda de carga dos grãos de feijão preto e de cubos secos de raízes de chicória foram determinados em função da velocidade do ar na tubulação. Os cubos de raízes de chicória seca apresentavam cerca de 9 mm de lado, enquanto que as propriedades físicas dos grãos de feijão preto são mostradas na Tabela II.19.

Tabela II.19 – Propriedades físicas dos grãos de feijão preto.

Propriedades físicas	
Diâmetro equivalente	$6,9 \pm 0,32$ mm
Densidade aparente	$795,9 \pm 2,19$ kg/m ³
Densidade real	$1277,5 \pm 8,14$ kg/m ³
Esfericidade	$0,701 \pm 0,03$
Porosidade	$0,377 \pm 0,0048$

Para os grãos de feijão, uma camada de 12 cm de produto foi disposta no módulo de determinação de perda de carga, enquanto que para cubos de chicória foram utilizadas camadas de 8 e 15 cm. Os dados obtidos nos ensaios são mostrados nas Figuras II.13 a III.15.

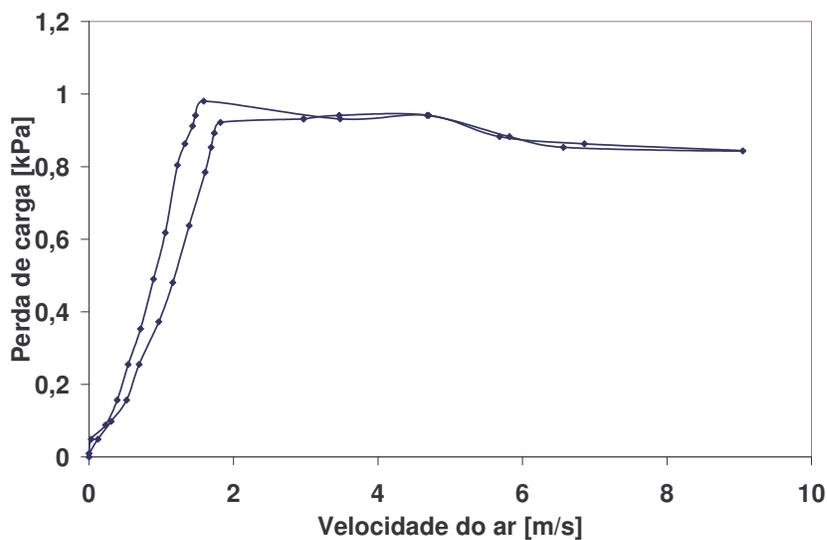


Figura II.13 – Perda de carga de massa de grãos de feijão preto em função da velocidade do ar – camada de 12 cm.

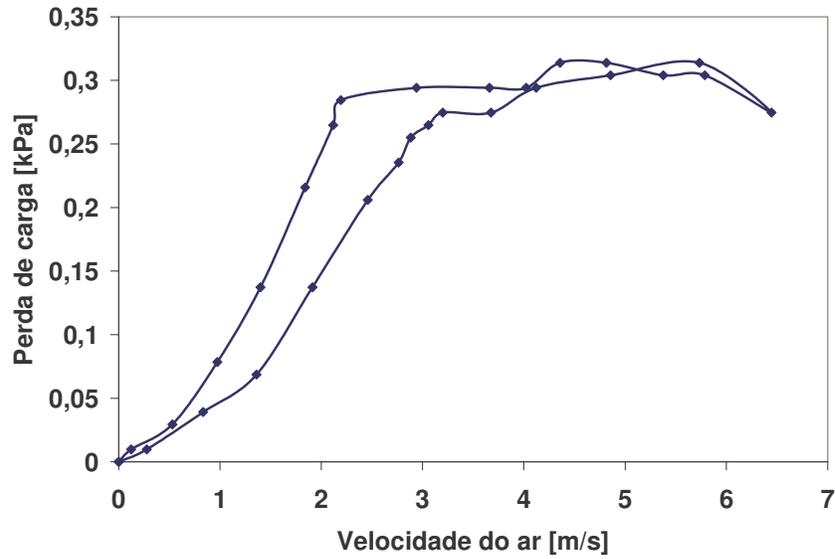


Figura II.14 – Perda de carga de massa de cubos de raízes de chicória seca em função da velocidade do ar – camada de 8 cm.

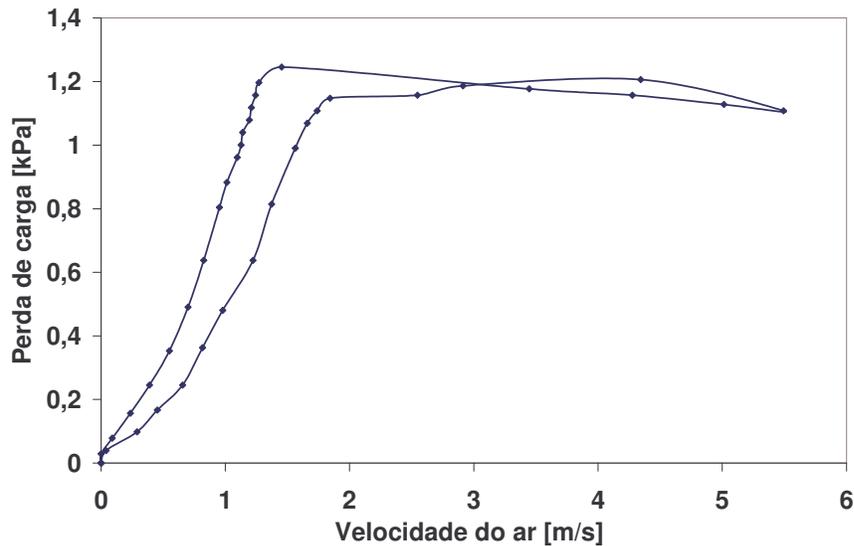


Figura II.15 – Perda de carga de massa de cubos de raízes de chicória seca em função da velocidade do ar – camada de 15 cm.

O formato das curvas corresponde ao encontrado por Della Tonia Jr., Freire e Tobinaga (1989), porém utilizando leito vibrofluidizado. Gráficos como esses possibilitam estimar a velocidade mínima de fluidização do leito de partículas.

II.5.2 CINÉTICA DE SECAGEM DO MILHO

Os resultados obtidos nos ensaios de secagem foram aplicados como dados de entrada no programa desenvolvido em Microsoft Excel[®] (CT&EA, 2005). Assumiu-se formato esférico para os grãos de milho (PARTI e DUGMANICS, 1990; KUNDU et al., 2005). Os resultados obtidos no programa os valores de difusividade efetiva (D_{ef}) para cada ensaio e os respectivos módulos de desvio relativo médio (DRM), mostrados na Tabela II.20.

Tabela II.20 – Valores de difusividade efetiva para secagem de milho em secador vibrofluidizado.

Ensaio	Temperatura do ar [°C]	Velocidade do ar	Amplitude de vibração	Inclinação do leito	Difusividade efetiva [m²/s]	DRM [%]
1	100	Máxima	Máxima	Máxima	6,40 x 10 ⁻¹⁰	0,040
2	100	Máxima	Mínima	Mínima	2,09 x 10 ⁻¹⁰	0,086
3	100	Mínima	Máxima	Mínima	4,15 x 10 ⁻¹⁰	0,055
4	100	Mínima	Mínima	Máxima	5,47 x 10 ⁻¹¹	0,070
5	60	Máxima	Máxima	Máxima	2,54 x 10 ⁻¹⁰	0,064
6	60	Máxima	Mínima	Mínima	1,81 x 10 ⁻¹⁰	0,130
7	60	Mínima	Máxima	Mínima	6,89 x 10 ⁻¹¹	0,061
8	60	Mínima	Mínima	Máxima	1,32 x 10 ⁻¹⁰	0,103
9	80	Média	Média	Média	3,14 x 10 ⁻¹⁰	0,063
10	80	Média	Média	Média	1,60 x 10 ⁻¹⁰	0,095
11	80	Média	Média	Média	3,44 x 10 ⁻¹⁰	0,032
12	80	Média	Média	Média	3,85 x 10 ⁻¹⁰	0,046

A Tabela II.21 mostra os efeitos das variáveis na análise estatística. Os valores em negrito indicam que o fator é significativo em um nível de confiança de 90% para análise de difusividade efetiva na secagem de milho em secador vibrofluidizado. As análises foram feitas utilizando o pacote estatístico STATISTICA (STATSOFT INC., 2001).

Tabela II.21 – Efeito estimado, erro padrão e grau de significância estatística (p) para para secagem de milho em secador vibrofluidizado.

Variáveis	Efeito	Erro padrão	p-value
Temperatura - X_T	1,708	0,913	0,1036
Velocidade - X_V	1,535	0,913	0,1365
Amplitude - X_A	2,004	0,913	0,0642
Inclinação - X_I	0,515	0,913	0,5906

Após a retirada dos termos não significativos foi feita uma análise de variância (ANOVA) e aplicado o teste F para se verificar a significância da regressão e gerar o modelo (Tabela II.22). Apenas a amplitude de vibração foi considerada estatisticamente significativa.

Tabela II.22 – Análise de variância (ANOVA) para secagem de milho em secador vibrofluidizado.

Fonte de variação	Soma Quadrática - SQ	Graus de Liberdade	Média Quadrática- MQ	F_{calc}	F_{tab}
Regressão	8,03	1	8,03	3,53	3,28
Resíduo	22,75	10	2,28		
Falta de ajuste	19,85	7	2,84	2,94	5,27
Erro puro	2,90	3	0,97		
Total	30,78	11			

O modelo proposto para representar os valores de difusividade efetiva na secagem de milho em secador vibrofluidizado é apresentado na equação codificada a seguir. O modelo é válido para os parâmetros operacionais utilizados nestes ensaios:

$$D_{ef} = 2,632 \times 10^{-10} + 1,002 \times 10^{-10} \times X_A \quad (5)$$

Foram geradas a superfície de resposta e as curvas em nível para a difusividade efetiva na secagem de milho em secador vibrofluidizado, mostradas na Figura II.16.

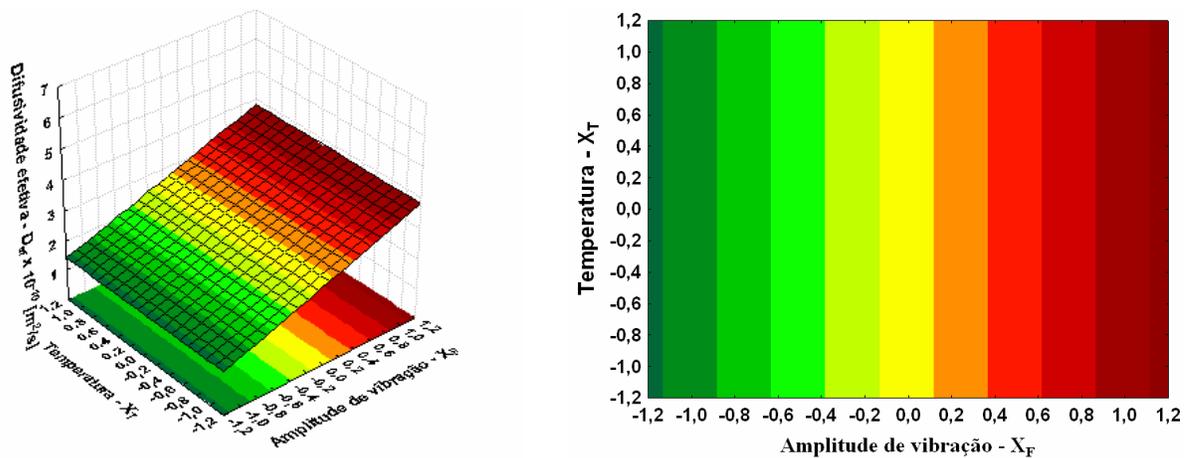


Figura II.16 – Curva de resposta e perfil para difusividade efetiva em secagem de milho.

A amplitude de vibração foi considerada estatisticamente significativa, pois sua influência está relacionada ao aumento dos coeficientes de transferência de calor e de massa. Assim, com o aumento da amplitude de vibração no leito de secagem, há o aumento da temperatura da amostra e, conseqüentemente, um aumento da difusividade efetiva de transferência de massa (PARK, VOHNIKOVA e BROD, 2002).

Na análise apresentada, não houve evidência da influência da temperatura do ar na secagem. Porém, Soponronnarit et al. (1997) estudaram a secagem de grãos de milho em secador de leito fluidizado. Os autores relatam a influência significativa da temperatura do ar de entrada e da taxa específica do fluxo de ar.

II.5.3 DISTRIBUIÇÃO DO TEMPO DE RESIDÊNCIA DO MILHO

Sivashanmugam e Sundaram (2000) utilizaram também a técnica de estímulo e resposta com a entrada de pulso de traçador no estudo de distribuição de tempo de residência em secador anular de leito fluidizado. Porém, a análise da concentração de traçador na saída do secador foi feita por meio de separação e pesagem do produto e traçador. No presente trabalho, a quantificação de traçador foi feita por meio de análise de imagens digitais do produto saído do secador. Um exemplo de imagem dos grãos juntamente com o traçador é mostrado na Figura II.17.



Figura II.17 – Fotografia mostrando grãos de milho e traçador (grãos pintados).

O histograma (Figura II.18a) mostra os pixels em escala de 0-255 dos tons de cinza da fotografia obtida em experimento. A Figura II.18b mostra o mesmo histograma mas separando os pixels considerados como referentes ao traçador. O valor numérico em tons de cinza para o traçador variou de 0-70.

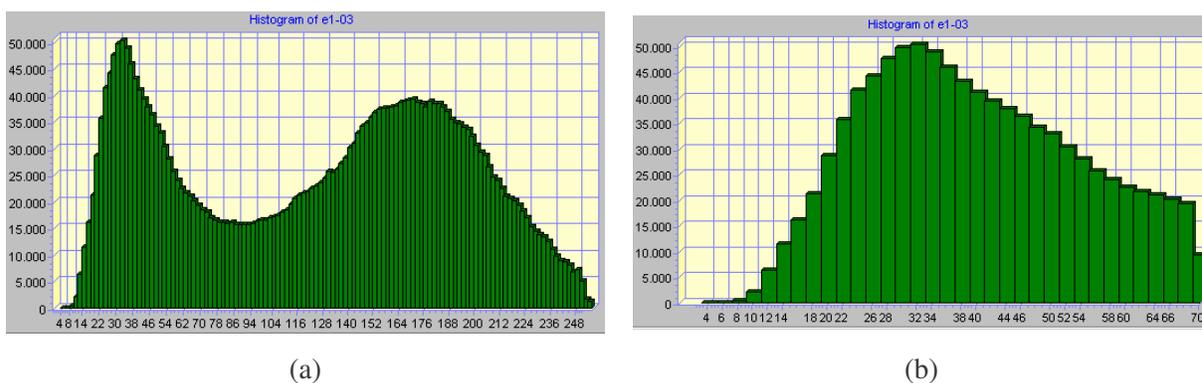


Figura II.18 – Histograma do ensaio 3 em escala de cinza - de 0-255 (a) e de 0-70 (b).

Através da curva de concentração obtida pela medição da quantidade de pixels pretos em dado tempo e da quantidade de massa da amostra e do traçador, pode-se determinar o tempo de residência nos experimentos. Assim, a partir dos histogramas analisados ao longo do tempo, pôde-se criar um histograma geral mostrando a quantidade total de pixels representativos de traçador ao longo do tempo e, assim, determinar o tempo de residência do produto no secador. Os tempos de residência médios encontrados para os diferentes valores de amplitude dos motovibradores são mostrados na Tabela II.23:

Tabela II.23 – Tempo de residência em função da amplitude de trabalho do secador vibrofluidizado.

Amplitude do secador	Tempo de residência [s]
Mínima	745,44
Média	87,86
Máxima	40,56

Nas Figuras II.19 a II.21 são mostradas as curvas de DTR normalizada e acumulativa dos três experimentos com diferentes amplitudes de vibração.

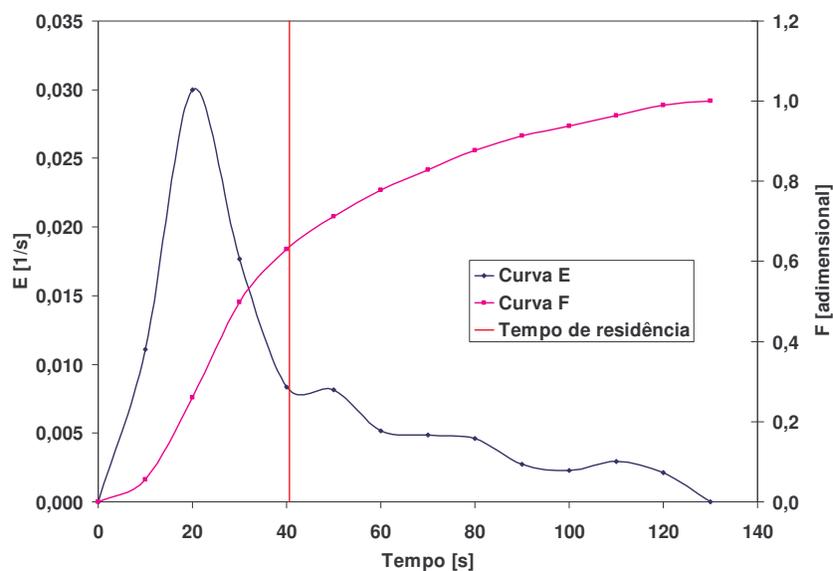


Figura II.19 – Curvas normalizadas e acumulativas de DTR – Amplitude máxima.

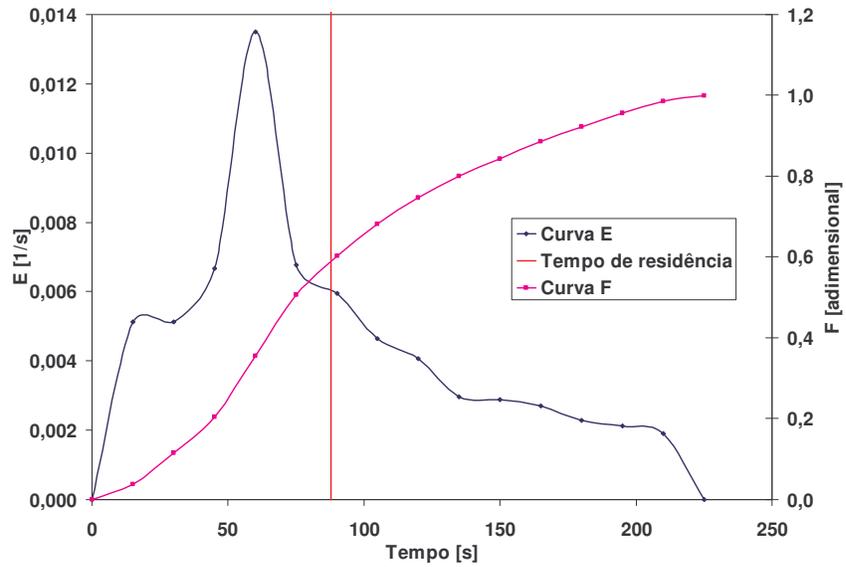


Figura II.20 – Curvas normalizadas e acumulativas de DTR – Amplitude média.

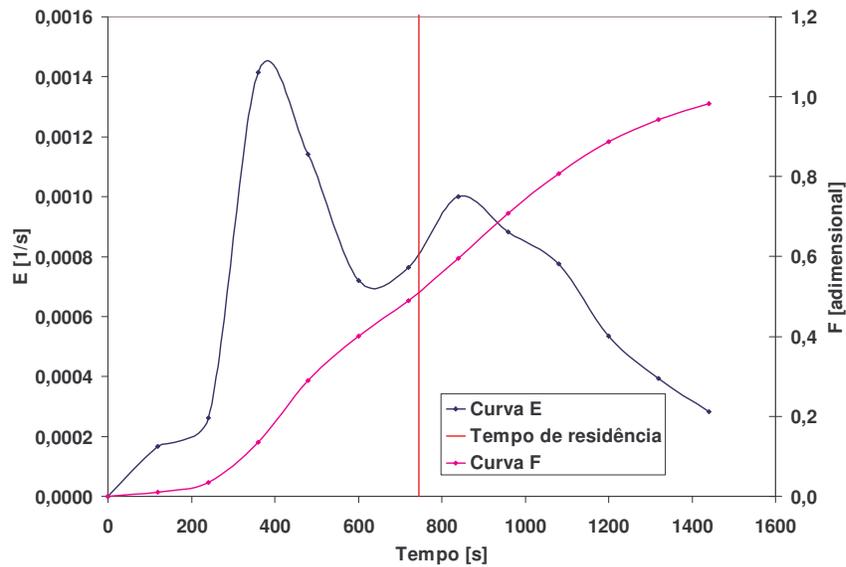


Figura II.21 – Curvas normalizadas e acumulativas de DTR – Amplitude mínima.

Brod, Park e Almeida (2004) encontraram valores de tempo de residência para casca de ovo no mesmo secador vibro-fluidizado variando de 16,70 a 147,55s. Valores mais altos de tempo de residência para grãos de milho condizem com o esperado, pois o tamanho da partícula dos grãos de milho é muito maior que o da casca de ovo. Pode-se inferir ainda que

valor muito mais alto de tempo de residência para o ensaio com amplitude mais baixa de vibração ocorreu, provavelmente pelo fato da fluidização não ter sido atingida. A ausência de fluidização acarreta um aumento do atrito entre os grãos e o leito de secagem, aumentando a permanência dos grãos no secador.

II.5.4 DISTRIBUIÇÃO DO TEMPO DE RESIDÊNCIA DO FEIJÃO PRETO

II.5.4.1 Por meio da massa de traçador

No levantamento do tempo de residência com base nas frações mássicas, foram obtidas as seguintes curvas de $E(t)$, $F(t)$ e tempo de residência médio (Figuras II.22 a II.26):

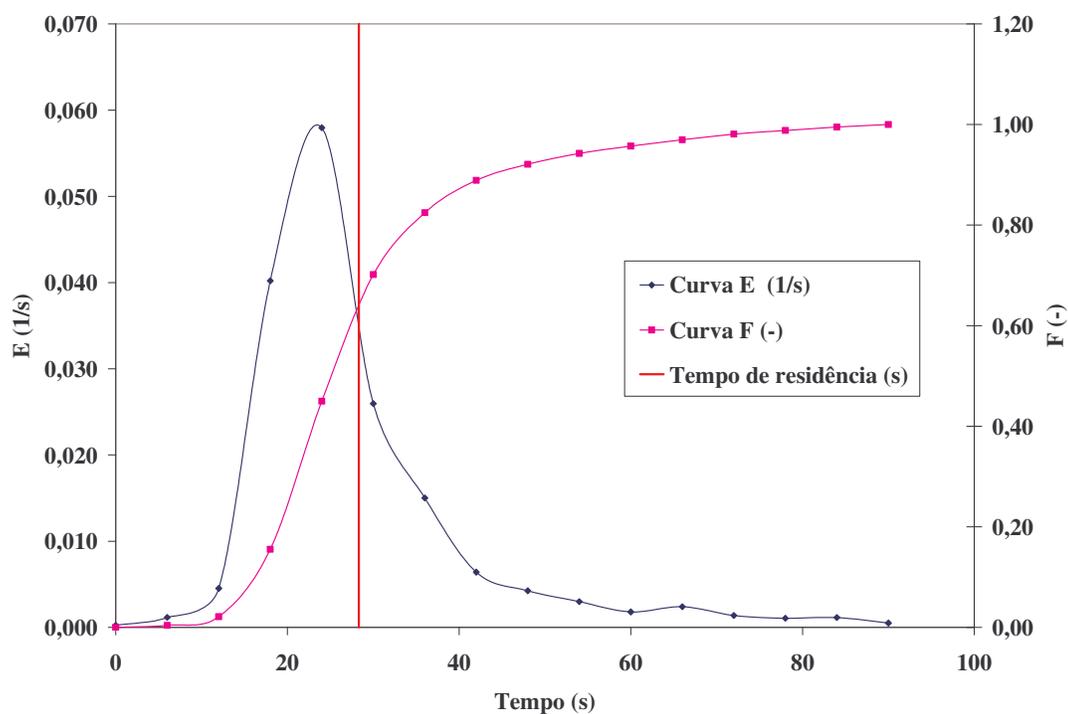


Figura II.22 – Curvas de DTR para o feijão preto - Amplitude 1 (máxima).

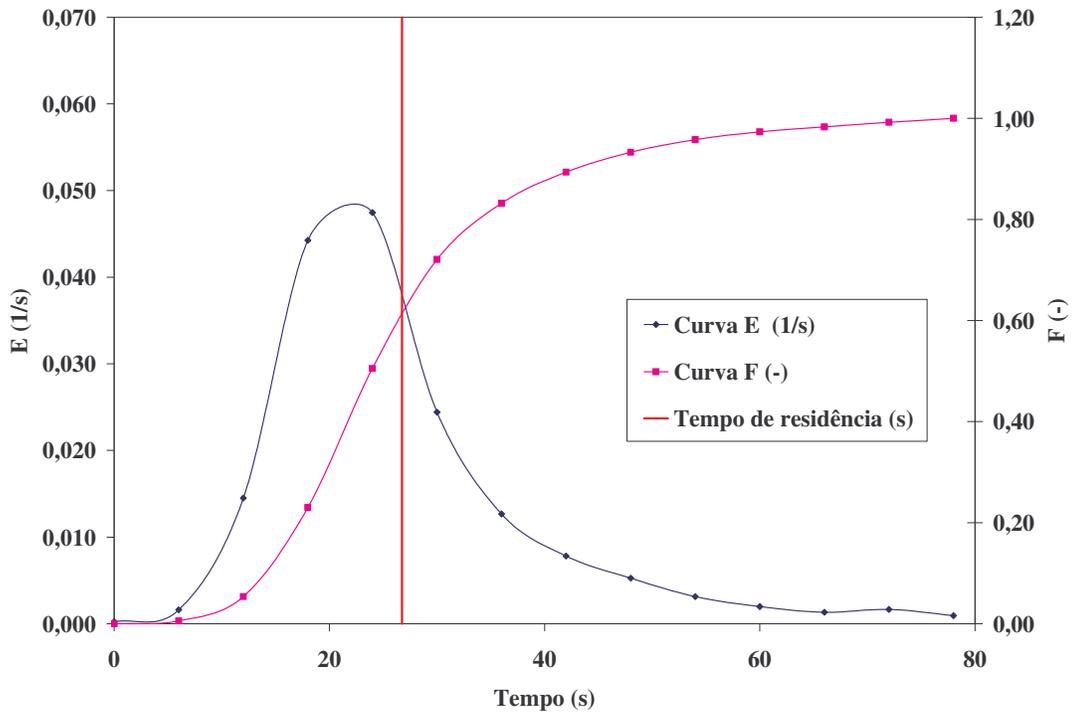


Figura II.23 – Curvas de DTR para o feijão preto - Amplitude 2.

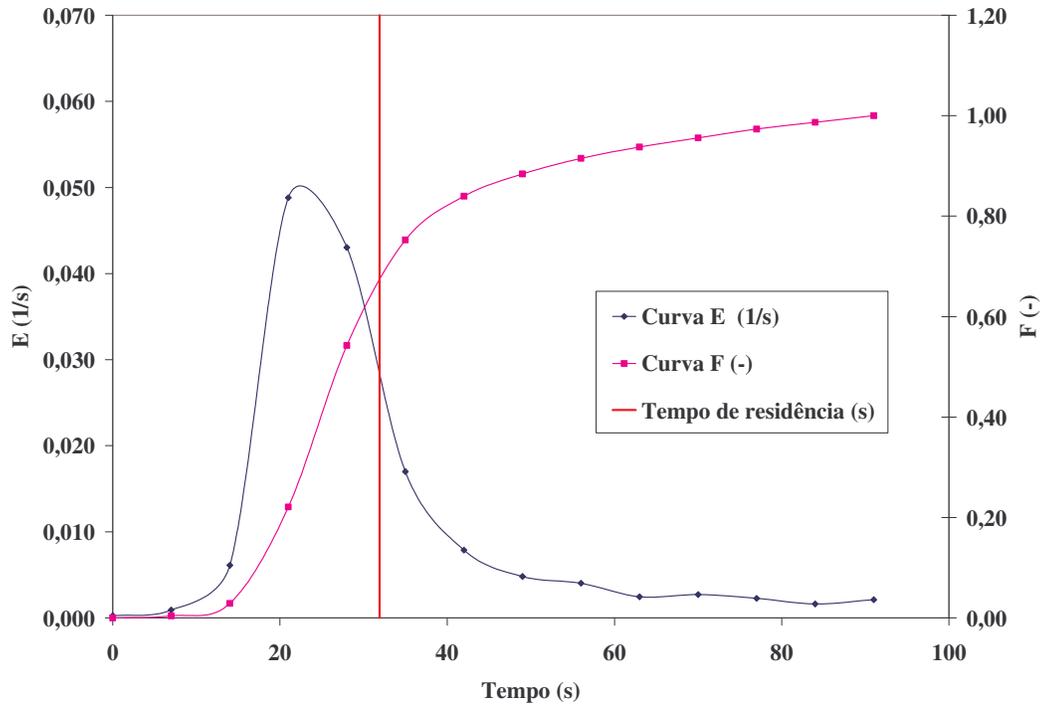


Figura II.24 – Curvas de DTR para o feijão preto - Amplitude 3.

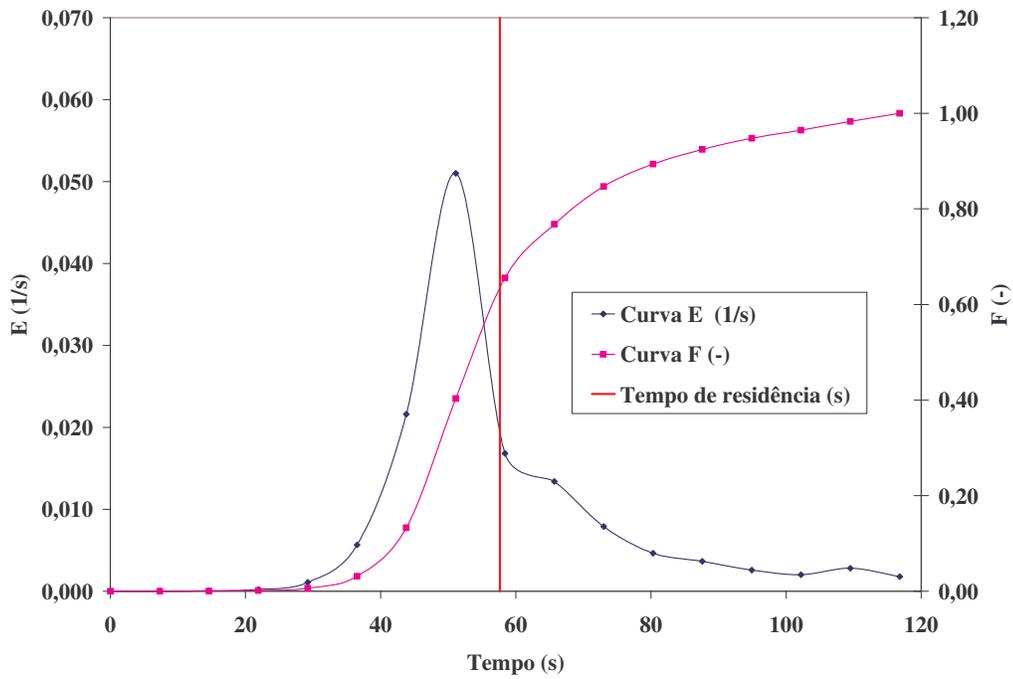


Figura II.25 – Curvas de DTR para o feijão preto - Amplitude 4.

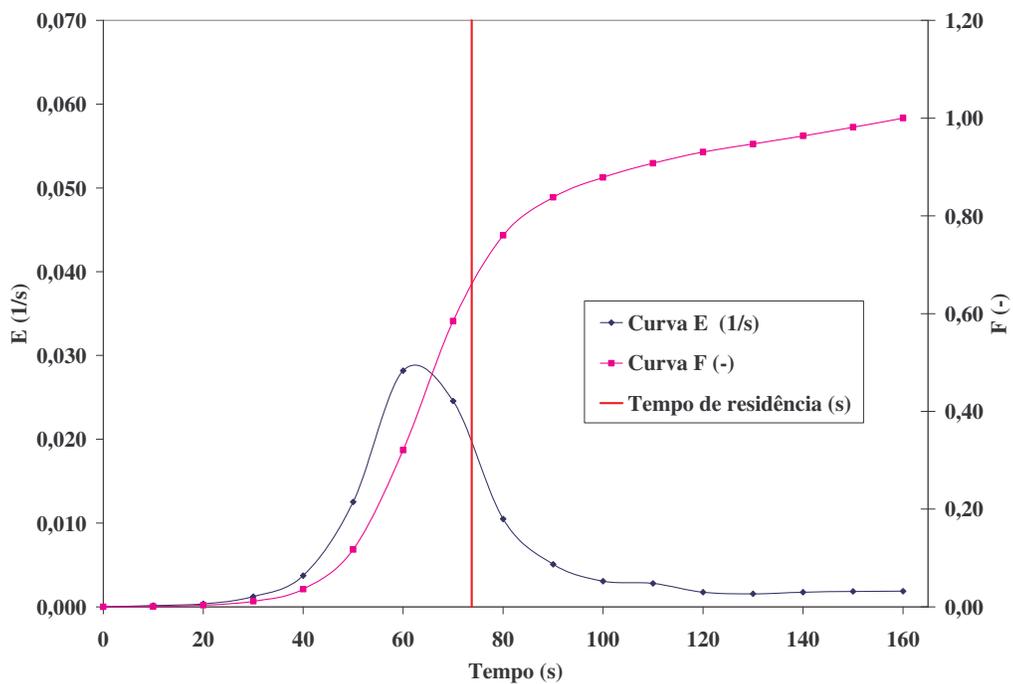


Figura II.26 – Curvas de DTR para o feijão preto - Amplitude 5.

A Tabela II.24 mostra os tempos de residência médios encontrados com as proporções de massa:

Tabela II.24 – Tempo de residência médio (massa).

Amplitude	Tempo de residência médio (s)
1	28,33
2	26,75
3	31,91
4	57,65
5	73,73

Os resultados obtidos para as cinco amplitudes utilizadas mostram que um aumento de amplitude provoca uma diminuição do tempo de residência, sendo o maior tempo de residência encontrado referente à menor amplitude de vibração, e os menores tempos de residência referentes às maiores amplitudes. Nota-se que o menor tempo de residência ocorreu na amplitude 2, o que pode ter ocorrido por melhor adequação dessa amplitude com a massa específica do feijão preto, combinado com a velocidade do ar no leito, para um deslocamento mais rápido do produto no leito.

II.5.4.2 Por meio de imagens

A Figura II.27 mostra um exemplo de imagem de uma amostra e seu respectivo histograma, gerado no IDRISI, com os tons de cinza variando de 0 a 255 na escala horizontal. A escala mostra até o tom de número 233, uma vez que não apareceram na imagem tons de cinza acima desse valor. No eixo vertical tem-se a quantidade de pixels contidos em cada nível de cinza.

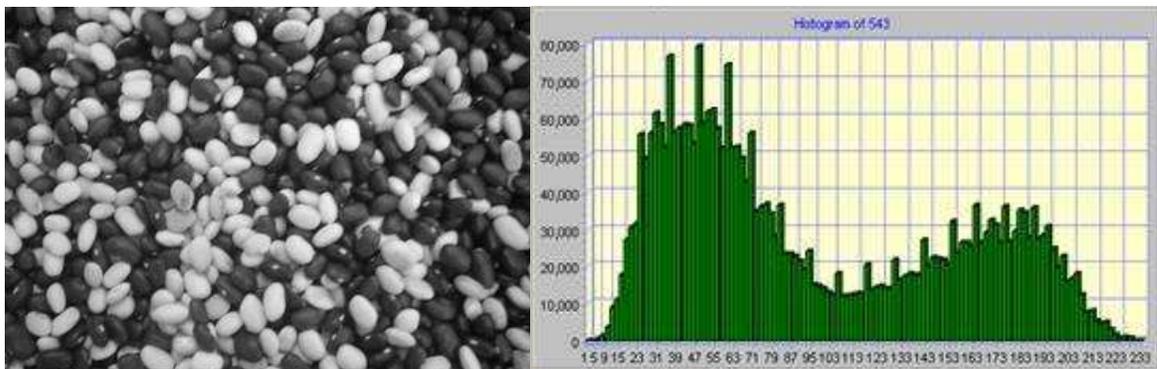


Figura II.27 – Imagem de uma amostra e seu respectivo histograma.

Com as imagens obtidas em todas as amostras em suas respectivas corridas, fez-se uma análise conforme descrito, calculando-se a concentração de pixels em cada amostra colhida, usando essa concentração de pixels nas imagens nos cálculos de tempo de residência. Os resultados obtidos com base nas imagens possibilitaram a geração das seguintes curvas de DTR (Figuras II.28 a II.32):

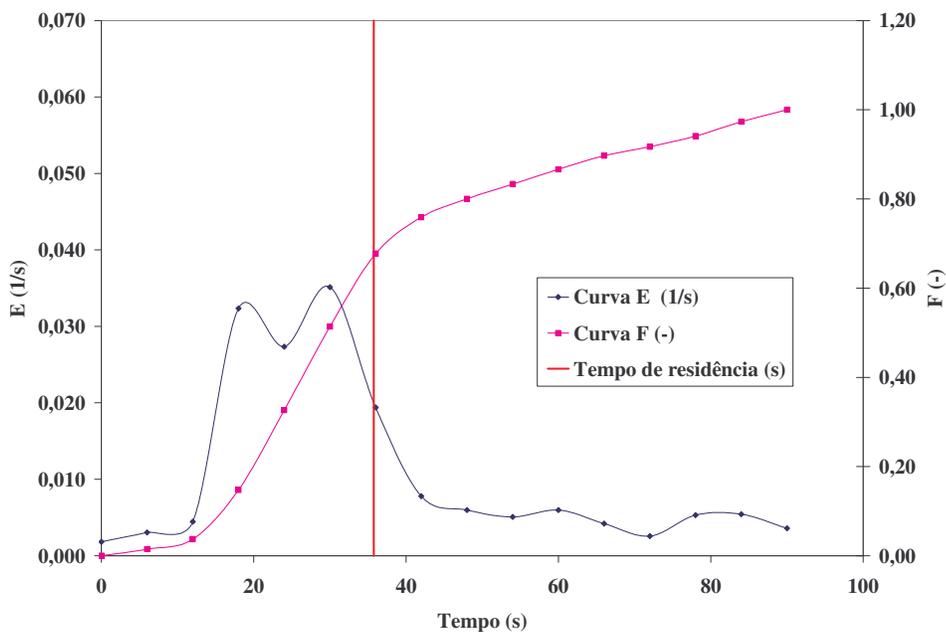


Figura II.28 – Curvas de DTR (base nas imagens) para o feijão preto – Amplitude 1 (máxima).

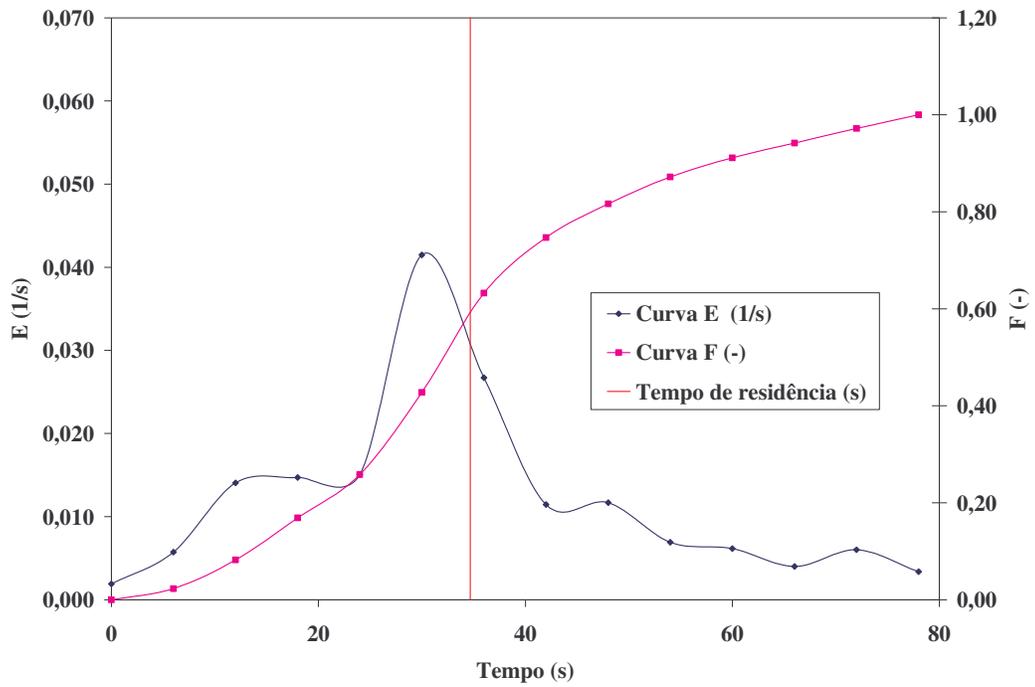


Figura II.29 – Curvas de DTR (base nas imagens) para o feijão preto – Amplitude 2.

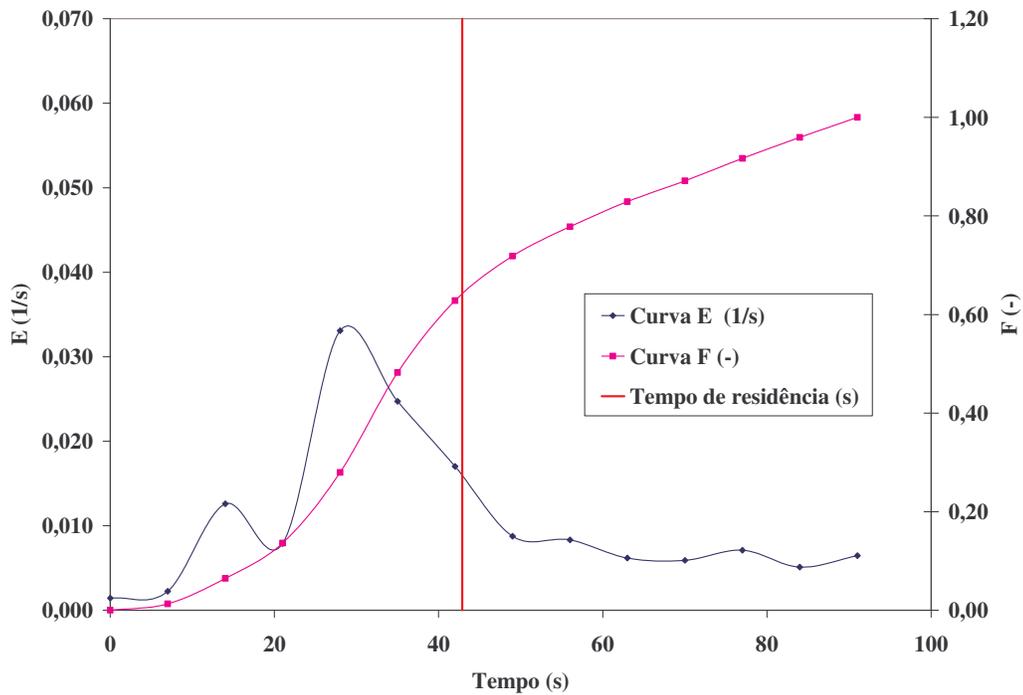


Figura II.30 – Curvas de DTR (base nas imagens) para o feijão preto – Amplitude 3.

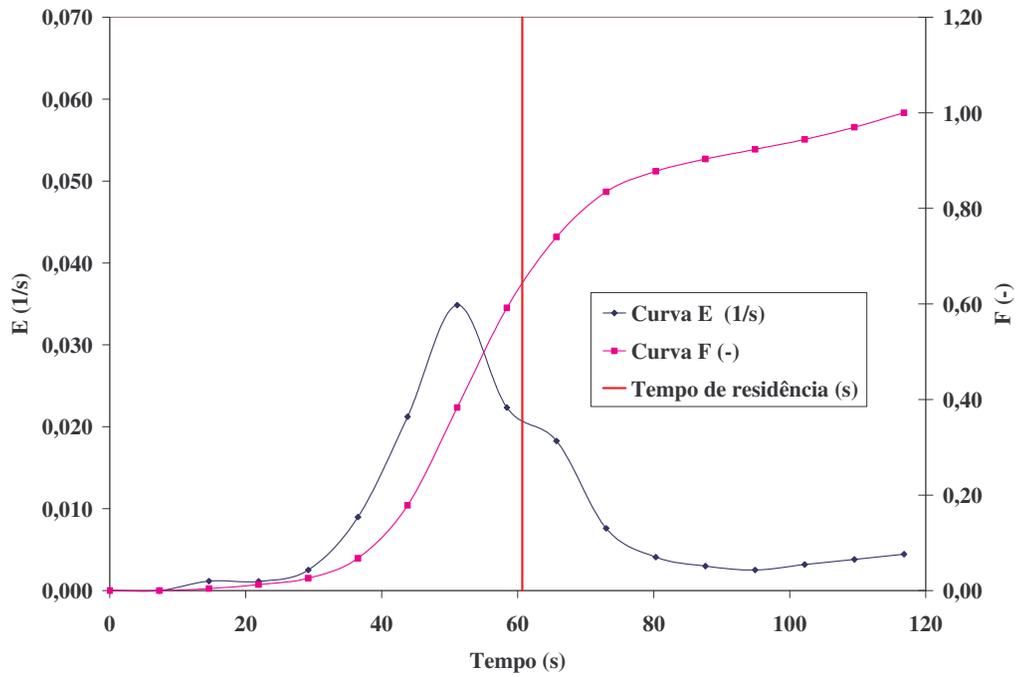


Figura II.31 – Curvas de DTR (base nas imagens) para o feijão preto – Amplitude 4.

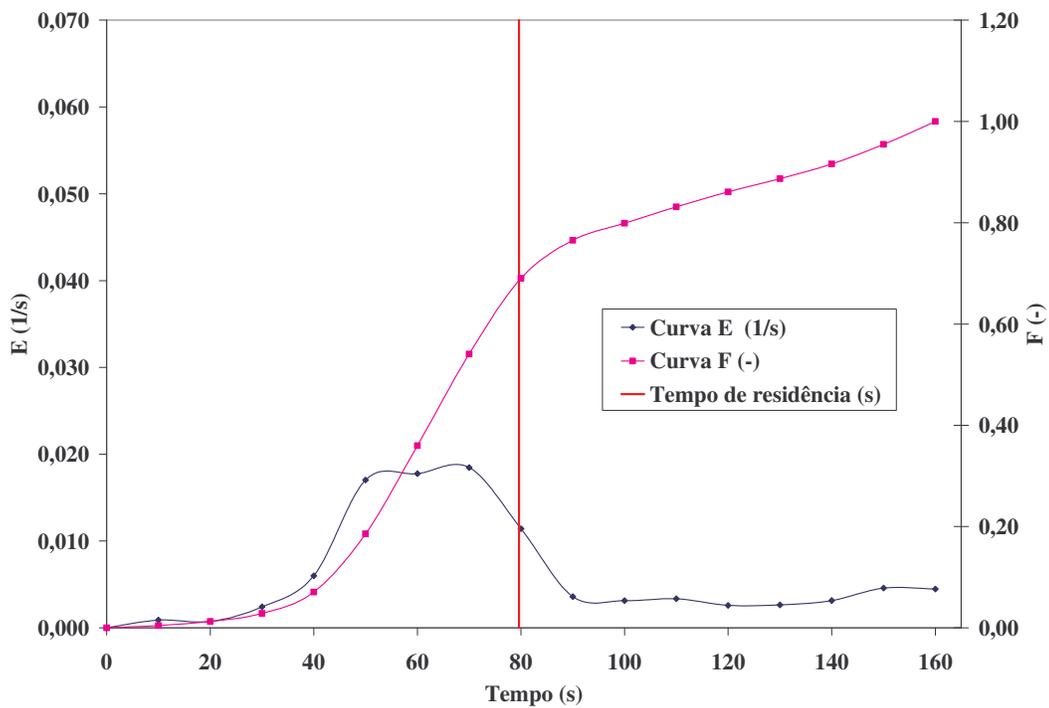


Figura II.32 – Curvas de DTR (base nas imagens) para o feijão preto – Amplitude 5.

A Tabela II.25 mostra os tempos de residência médios encontrados a partir das

proporções de pixels das imagens:

Tabela II.25 – Tempo de residência médio (imagens).

Amplitude	Tempo de residência médio (s)
1	35,77
2	34,69
3	42,88
4	60,67
5	79,64

Os tempos de residência médios calculados a partir das imagens seguiram o mesmo padrão dos calculados com as massas das amostras, sendo o menor tempo de residência o da corrida realizada com a amplitude 2, bem próximo do tempo da corrida da amplitude 1, e o maior tempo referente à amplitude 5.

Brod (2003) encontrou valores de tempo de residência que variaram de 16,70 a 147,55 s, utilizando a mesma técnica de separação por imagens, para casca de ovo no mesmo equipamento do presente trabalho. Oliveira et al. (2007) obtiveram, no mesmo secador para grãos de milho, valores variando de 40,56 s para máxima amplitude, 87,86 s para amplitude média e 745,44 s para mínima amplitude. Os autores acreditam que a vibrofluidização não foi alcançada neste último caso. Com isso, houve um aumento do atrito entre os grãos e o leito, acarretando em uma maior permanência no secador. O ensaio referente à mínima amplitude utilizada por estes autores não foi realizado no presente trabalho.

II.5.4.3 Análise das imagens – IDRISI

Na análise das imagens no IDRISI, foi feita uma reclassificação, baseando-se no limiar médio calculado para cada corrida, como descrito anteriormente. A Figura II.33 mostra uma das imagens de 8 bits utilizadas e a imagem de reclassificação:

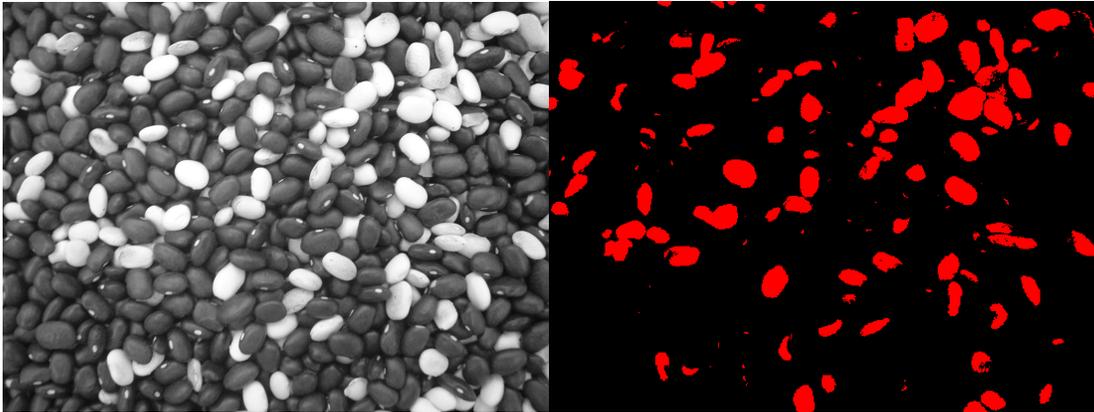


Figura II.33 – Imagem de 8 bits e sua reclassificação baseado no limiar médio.

A Figura II.33 mostra uma imagem referente à corrida realizada com a amplitude 3, como exemplo. É possível notar que o traçador, na imagem submetida à reclassificação está razoavelmente compatível com os feijões pintados de branco da imagem original, de 8 bits.

O histograma numérico gerado pelo IDRISI (Figura II.34) mostra as quantidades referentes a pixels do traçador (class 1) e do material não marcado (class 0). No caso, a proporção de traçador na imagem é de 0,1211, ou 12,11%, apresentando 381082 pixels entre os 3145727 pixels totais na imagem.

Class	Lower Limit	Upper Limit	Frequency	Prop.	Cum. Freq.	Cum. Prop.
0	1.0000	1.9999	2764646	0.8789	2764646	0.8789
1	2.0000	2.9999	381082	0.1211	3145728	1.0000

Class width	=	1.0000
Display minimum	=	1.0000
Display maximum	=	2.0000
Actual minimum	=	1.0000
Actual maximum	=	2.0000
Mean	=	1.1211
Stand. Deviation	=	0.3263
df	=	3145727

Figura II.34 – Histograma numérico da Figura II.33.

Na amostra apresentada como exemplo acima, a concentração em massa encontrada foi de 29,90%. A diferença entre a proporção de traçador nas imagens foi alta nas amostras que apresentavam grande quantidade de traçador, devido à diferença do limiar ideal para sua

respectiva imagem e o limiar médio utilizado para os cálculos.

Apesar das diferenças entre a concentração calculada pela massa e pelas imagens, o tempo de residência médio encontrado para cada corrida, sob as duas formas calculadas, teve uma proximidade, com média do módulo do desvio médio relativo de 20,72% entre as cinco corridas realizadas (Tabela II.26).

Tabela II.26 – Tempo de residência médio (imagens).

Tempo de residência médio (s)			
Amplitude	Massa	Imagem	DMR (%)
1	28,33	35,77	26,26
2	26,75	34,69	29,68
3	31,91	42,88	34,38
4	57,65	60,67	5,24
5	73,73	79,64	8,02
		Média	20,72

É possível encontrar um valor de limiar para obter-se a mínima diferença de concentração de traçador entre a medida de massa e a imagem, em cada corrida realizada.

II.5.4.4 Ajuste do método de análise das imagens digitais

Os resultados de tempo de residência do feijão preto no SVF foram obtidos utilizando-se o método ajustado de análise das imagens digitais. Encontrou-se a concentração de pixels de traçador em cada imagem, realizando-se então o cálculo das curvas $E(t)$, $F(t)$ e do tempo de residência médio para cada corrida.

As curvas obtidas pelo método ajustado de análise das imagens digitais são mostradas nas Figuras II.35 a II.39:

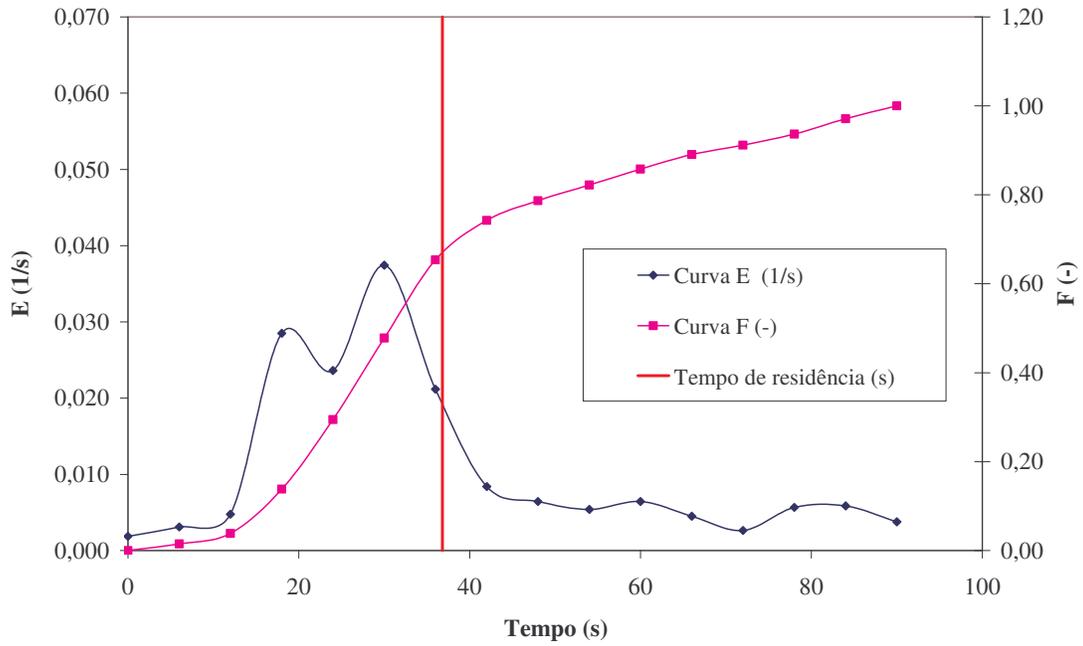


Figura II.35 – Curvas de DTR (método ajustado) - Amplitude 1 (máxima).

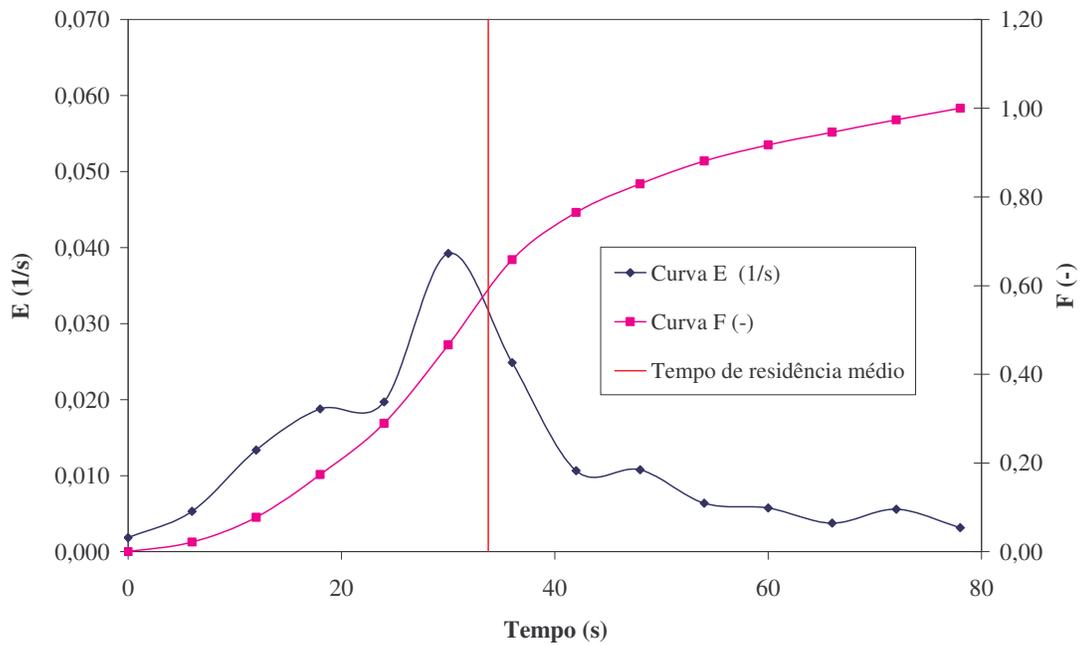


Figura II.36 – Curvas de DTR (método ajustado) - Amplitude 2.

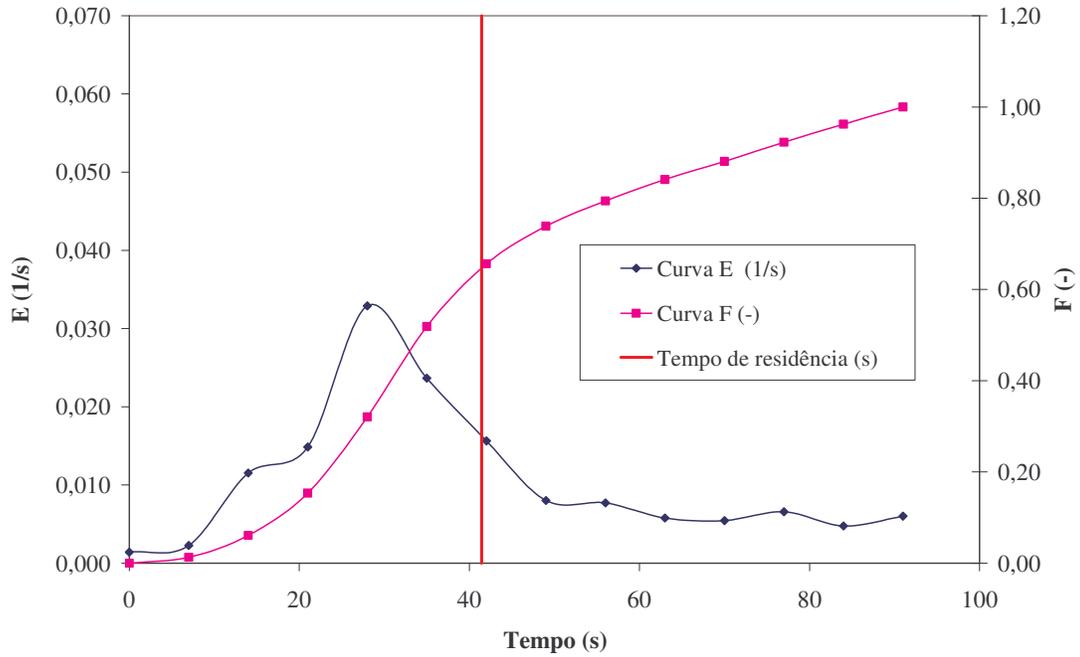


Figura II.37 – Curvas de DTR (método ajustado) - Amplitude 3.

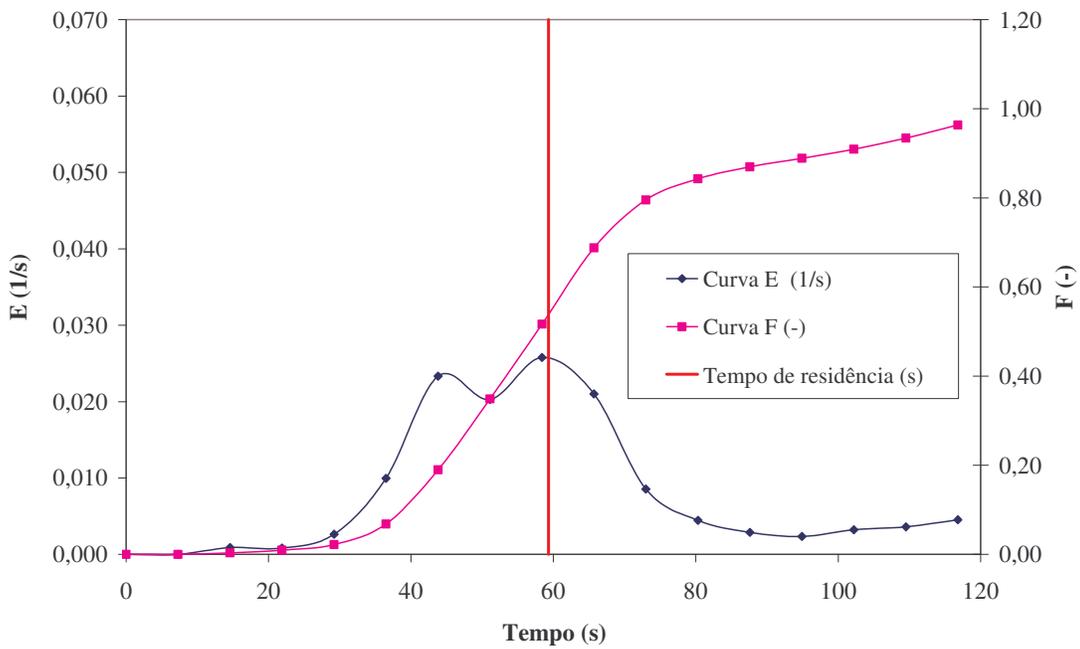


Figura II.38 – Curvas de DTR (método ajustado) - Amplitude 4.

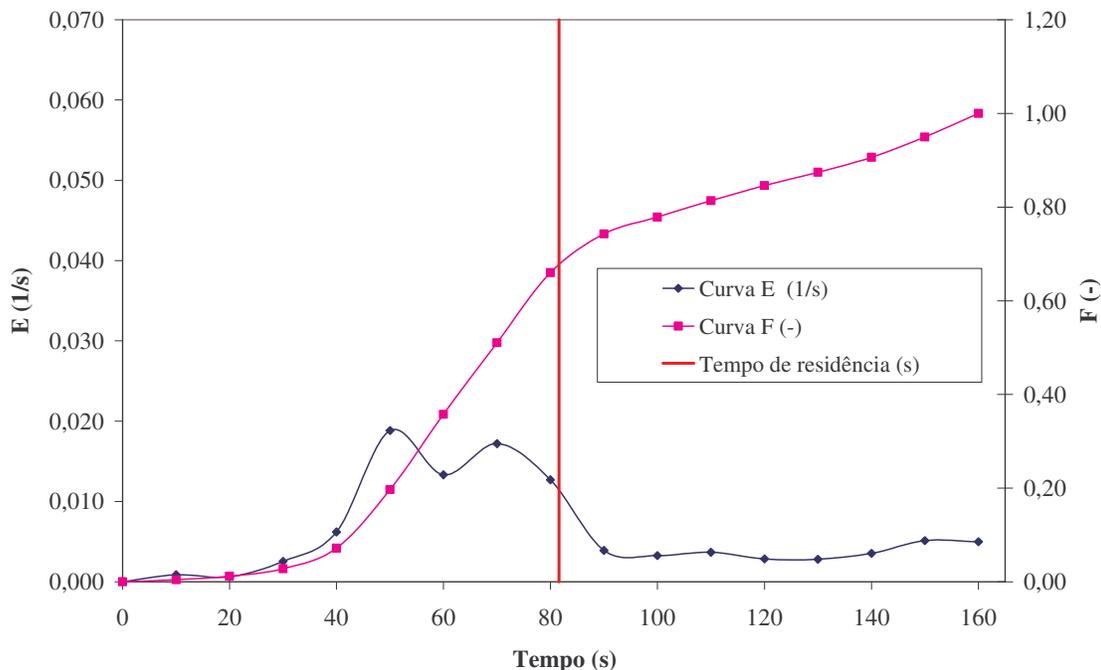


Figura II.39 – Curvas de DTR (método ajustado) - Amplitude 5.

A Tabela II.27 mostra os tempos de residência médios calculados com base na análise das imagens digitais pelo método ajustado.

Tabela II.27 – Tempo de residência médio (método ajustado).

Amplitude	Tempo de residência médio (s)
1	36,82
2	33,76
3	41,44
4	59,31
5	81,59

Para a análise do método ajustado, os valores de tempo de residência calculados com base na massa do produto foram tomados como valores reais, com a finalidade de se fazer uma comparação com o método das imagens e avaliar a validade deste. A Tabela II.28 mostra os resultados de tempo de residência médio obtidos pela massa, pelo método das imagens adotado inicialmente e o método das imagens ajustado.

Tabela II.28 – Desvio médio relativo DMR entre tempo de residência por meio da massa, método das imagens inicial e método das imagens ajustado.

Amplitude	Tempo de residência médio (s)				
	Massa	Imagem	D.M.R. (%)	Imagem ajustado	D.M.R. (%)
1	28,33	35,77	26,26	36,82	29,95
2	26,75	34,69	29,68	33,76	26,19
3	31,91	42,88	34,38	41,44	29,87
4	57,65	60,67	5,24	59,31	2,88
5	73,73	79,64	8,02	81,59	10,66
		Média	20,72	Média	19,91

Com o ajuste do método de análise das imagens digitais, conseguiu-se reduzir a média do módulo do desvio médio relativo de 20,72% para 19,91%.

Apesar da pequena diminuição do valor de desvio médio relativo, o método ajustado de análise das imagens permitiu a obtenção de valores de tempo médio de residência partindo-se apenas das imagens digitais, ou seja, sem vínculo com os dados de massa do produto. É importante lembrar que o método das imagens utilizado inicialmente partia da concentração em massa do traçador em cada ponto nas corridas para a determinação do limiar ideal em cada imagem. Dessa forma, o método estava vinculado com os dados da massa do produto. Com o ajuste do método das imagens, deixa-se de ter vínculo com os dados de massa, e conseqüentemente da necessidade da separação manual e pesagem do produto.

A redução do módulo do desvio médio relativo não foi substancial, mas o método ajustado, uma vez que permite o cálculo do tempo de residência sem os dados de massa do produto, difíceis de se obter na prática, facilita o estabelecimento deste método como procedimento prático.

II.6 CONCLUSÕES

A partir dos resultados referentes à perda de carga, ao perfil de velocidade e ao método de determinação da distribuição do tempo de residência, pode-se inferir que:

- ✓ Os resultados de perda de carga e velocidade mostram que a variação da válvula de

exaustão tem maior influência sobre as condições do ar dentro do secador;

- ✓ A perda de carga do leito de secagem e o perfil de velocidade levantados neste relatório serão de grande importância para a definição dos níveis das variáveis no planejamento experimental da secagem, em trabalhos futuros;
- ✓ A técnica de estímulo e resposta utilizando método de pulso de traçador no leito de secagem aliado à análise de imagens por meio do software IDRISI se mostrou eficiente na obtenção do tempo de residência para grãos de milho e de feijão. Os valores obtidos para o tempo de residência dos grãos condizem com os dados encontrados na literatura;
- ✓ O método ajustado para determinação do tempo de residência com base nas imagens digitais proporcionou um menor índice de desvio médio relativo comparando com o método utilizado inicialmente. Apesar de a redução não ser substancial, o método ajustado permitiu a determinação do tempo de residência médio com uso apenas das imagens digitais, sem vínculos com a massa do produto;
- ✓ O método da análise das imagens digitais é de grande ajuda no levantamento da distribuição do tempo de residência, sendo mais viável do que a seleção manual e pesagem das amostras do produto. O ajuste do método de análise das imagens possibilitou a independência de métodos manuais para o levantamento do tempo de residência. Apesar de seu erro não ter apresentado uma redução substancial, comparando-se ao método de análise das imagens com o limiar ideal, o grande benefício do método ajustado é a não necessidade de se realizar seleção manual do traçador nas amostras, facilitando o trabalho experimental;
- ✓ Para diminuição do erro, a medida a ser tomada seria realizar o método visual, que apesar de trabalhoso, ainda é viável;
- ✓ De maneira geral, para o levantamento do tempo de residência e a avaliação da metodologia utilizada, conclui-se que a análise por imagens é viável na prática, sendo necessário ainda um ajuste fino no tratamento das imagens utilizadas.

A partir dos resultados referentes ao processo de secagem de grãos de milho e aos testes preliminares, pode-se inferir que:

- ✓ Os testes preliminares foram importantes na definição da faixa de valores dos

parâmetros operacionais que deverão ser utilizados em trabalhos futuros. Além disso, pôde-se obter uma visão mais detalhada do funcionamento do sistema de controle de temperatura, possibilitando um ajuste que deverá proporcionar condições propícias ao processo de secagem;

- ✓ O processo de secagem com diferentes velocidades de ar de secagem, temperaturas, amplitudes de vibração e angulações do leito do secador forneceram os valores das difusividades efetivas variando de $5,47 \times 10^{-11}$ a $6,40 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$;
- ✓ O modelo da solução da segunda lei de Fick representou bem os dados experimentais de secagem.
- ✓ Dentre as quatro variáveis analisadas somente a amplitude de vibração foi considerada estatisticamente significativa. É importante notar o efeito que a vibração provoca nos níveis de transferência de calor e de massa.

II.7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIATION OF OFFICIAL ANALYTICAL CHEMISTS. **Official methods of analysis of A.O.A.C. international**. 16a ed. Arlington: A.O.A.C., Inc., Virginia, 1998.

BAHU, R.E. Fluidized bed dryer scale-up. **Drying Technology**, New York, v. 12, n. 1, p. 329-339, 1994.

BARROS NETO, B.; SCARMINIO, I. S.; BRUNS, R. E. **Como fazer experimentos: pesquisa e desenvolvimento na ciência e na indústria**. 2ed. Campinas: Editora da UNICAMP, 2002. 401p.

BOX, G.E.P.; HUNTER, W.G.; HUNTER, J.S. **Statistics for experimenters: an introduction to design, data analysis and model building**. 1. ed. New York: John Wiley & Sons, 1978. 653 p.

BROD, F.P.R. **Construção e teste de um secador vibro-fluidizado**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Faculdade de Engenharia Agrícola, UNICAMP, Campinas, 1999. 230 p.

BROD, F.P.R. **Avaliação de um secador vibro-fluidizado**. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Faculdade de Engenharia Agrícola, UNICAMP, Campinas, 2003, 335p.

BROD, F.P.R.; PARK, K.J.; OLIVEIRA, R.A. Secagem de raiz de chicória em um secador convectivo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 30, 2001, Foz do Iguaçu-PR. **Anais...** Foz do Iguaçu-PR: SBEA, 2001. CD-ROM.

BROD, F. P. R., PARK, K. J., ALMEIDA, R. G. de. Image analysis to obtain the vibration amplitude and the residence time distribution of a vibro-fluidized dryer. **Journal of Food and Bioproducts Processing-Trans. Institution of Chemical Engineers**, London, v.82, c2, p.157-163, 2004.

BURJAILI, M.M. **Desenvolvimento de um secador rotatório com recheio de inertes**. 1996. 218f. Tese (Doutorado em Engenharia de Alimentos) - Faculdade de Engenharia de Alimentos, UNICAMP, Campinas.

BÜLL, L. T.; CANTARELLA, H. **Cultura do milho: fatores que afetam a produtividade**. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 30p., 1993.

CAMARGO, C.F.S. **Desenvolvimento de um leito vibro-fluidizado e estudos dos coeficientes de transferência de calor de corpos submersos**. 2003. 230f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2003.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – CONAB. Central de Informações Agropecuárias: Séries Históricas. 2008. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/>. Último acesso em: 25 mar. 2009.

COULSON, J.M.; RICHARDSON, J.F. **Chemical Engineering**. Oxford, Pergamon Press, V.1, 449p., 1977.

CT&EA – CENTRO DE TECNOLOGIA & ENGENHARIA AGROINDUSTRIAL. **Manual para tratar dados de secagem utilizando o Microsoft Excel®**. Disponível em: <http://www.feagri.unicamp.br/ctea/projpesq.html>, 2005.

DALEFFE, R. V.; FERREIRA, M.C.; FREIRE, J.T. Drying of pastes in vibro-fluidized beds: Effects of the amplitude and frequency of vibration. **Drying Technology**. v. 23. p. 1765-1781. 2005.

DANIELSEN, S.; HOVMAND, S. Drying of granulated product in a vibrated fluid bed. In: MUJUMDAR, A.S. (Org.). **Drying 80**, New York: Hemisphere Publishing. v.1, p.194-199, 1980.

- DELLA TONIA JR.; V.; FREIRE, J.T.; TOBINAGA, S. Leito vibro-fluidizado I – desenvolvimento do equipamento e testes preliminares. In: ENCONTRO SOBRE ESCOAMENTO EM MEIOS POROSOS - ENEMP. 17., 1989, São Carlos-SP. **Anais...** São Carlos-SP: UFSCar, 1989. v.I, p.307-311.
- DINIZ F.M.; MARTIN, A .M. Use of response surface methodology to describe the combined effects of pH, temperature and e/s ratio on the hydrolysis of dogfish (*Squalus acanthias*) muscle. **International Journal of Food Science and Technology**, Oxford, v.31, n.5, p. 19-426, 1996.
- DONG, Z.X.; PAN, Y.K.; DENG, W.Y.; WEI, Z.; MUJUMDAR, A.S. Effect of vibration on the drying rate during the falling rate period. **Drying Technology**, New York, v. 9, n. 3, p. 723-733, 1991.
- ERDÉSZ, K. Hydrodynamic studies on vibrated fluidized beds. **Powder Handling & Processing**, Germany, v.2, n.4, p.327-339, 1990.
- ERDÉSZ, K.; MUJUMDAR, A.S.; RINGER, D.U. Hydrodynamic similarity of conventional and vibrated fluidized beds. In: INTERNATIONAL DRYING SYMPOSIUM (Drying´86), 5., 1986, Boston-USA. **Proceedings...** Boston-USA: Cambridge University, 1986. v.1, p.169-176.
- ERDÉSZ, K.; MUJUMDAR, A.S. Bibliography of literature on fundamentals and applications of vibration in particle processing. **Drying Technology**, New York, v.5, n.2, p.311-332, 1987.
- FANCELLI, A. L.; LIMA, U. A. **Milho: produção, pré-processamento e transformação agroindustrial**. FEALQ, Série Extensão Agroindustrial. 1982. 112 p.
- FINZER, J.R.D.; KIECKBUSCH, T.G. Secagem em sistemas com vibração. In: FREIRE, J.T., SARTORI, D.J.M. **Tópicos especiais em secagem**, São Carlos, SP: UFSCar, 1992. v.1, p.87-127.
- GUIA RURAL Abril. **Anuário 1998**. Editora Abril S.A. 1998.
- GUPTA, R.; MUJUMDAR, A.S. Aerodynamics and thermal characteristics of vibrated fluid beds – a review. In: MUJUMDAR, A.S. (Org.). **Drying 80**, New York: Hemisphere Publishing, v.1, p.141-1150. 1980 a.

- GUPTA, R.; MUJUMDAR, A.S. Aerodynamics of a vibrated fluid bed. **The Canadian Journal of Chemical Engineering**, Ottawa-Canada, v.58, n.3, p.332-338, 1980 b.
- HAN, W.; MAI, B.; GU, T. Residence time distribution and drying characteristics of a continuous vibro-fluidized bed. **Drying Technology**, New York, v.9, n.1, p.159-181, 1991.
- HASATANI, M.; ITAYA, Y.; MIURA, K. Drying of granular materials in an inclined vibrated fluidized bed by combined radiative and convective heating. **Drying Technology**, New York, v. 9, n. 2, p. 349-366, 1991.
- HOVMAND, S. Fluidized bed drying. In: MUJUMDAR, A. S. **Handbook of Industrial Drying**. New York: Marcel Dekker Inc., 1987. cap. 6, p. 165-225.
- KEEY, R.B. **Drying of loose and particulate materials**. New York: Hemisphere Publishing Corporation, 1992. 504 p.
- KUDRA, T. Novel drying technologies for particulates, slurries and pastes. In: **Drying 92**, [s.l.]: Elsevier Science Publishers, 1992. v. B, p. 224-239.
- KUIPERS, N.J.M.; STAMHUIS, E.J.; BEENACKERS, A.A.C.M. Fluidization of potato starch in a stirred vibrating fluidized bed. **Chemical Engineering Science**, Oxford, v. 51, n. 11, p. 2727-2732, jun. 1996.
- KUNDU, K. M.; DAS, R.; DATTA, A. B.; CHATTERJEE, P. K. On the analysis of drying process. **Drying Technology**, v. 23, n. 5, p. 1093 – 1105, 2005.
- KUNII, D.; LEVENSPIEL, O. **Fluidization engineering**. New York: John Wiley & Sons Inc., 1969. 534p.
- KUNII, D.; LEVENSPIEL, **Fluidization engineering**. 2nd ed. Washington: Butterworth-Heinemann, 1991. 491p.
- LEVENSPIEL, O. **Engenharia das reações químicas**: volume 2 – Cálculo de reatores. São Paulo: Edgard Blücher, 1974. v. 2, 211p.
- MUJUMDAR, A.S. Drying technologies of the future. **Drying Technology**, New York, v.9, n.2, p.325-347, 1991.
- MUJUMDAR, A.S.; ERDÉSZ, K. Applications of vibration techniques for drying and agglomeration in food processing. **Drying Technology**, New York, v.6, n.2, p.255-274. 1988.

- OLIVEIRA, R. A. de; CHIORATO, M.; PARK, K. J.. Tempo de residência em secador vibro-fluidizado. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 36., 2007, Bonito - MS. **Anais...** Bonito - MS: SBEA, 2007. CD-ROM.
- PARK, K.J.; VOHNIKOVA, Z.; BROD, F.P.R. Evaluation of drying parameters and desorption isotherms of garden mint leaves (*Mentha crispa* L.). **Journal of Food Engineering**, Oxford, v. 51, n. 3, p. 193-199, 2002.
- PARTI, M.; DUGMANICS, I. Diffusion coefficient for corn drying. **Transactions of the ASAE**, v. 33, n. 5, p. 1652 – 1656, 1990.
- ROSSI, S.J.; ROA, G. **Secagem e armazenamento de produtos agropecuários com uso de energia solar e ar natural**. São Paulo: Academia de Ciências do Estado de São Paulo. 1980, 295p.
- SOPONRONNARIT, S. et al. Banana fruit drying. **Reric International Energy Journal**, Pathum Thani: Regional Energy Resources Info Center, v. 19, n. 2, p. 55-62, 1997.
- SHILTON, N.C.; NIRANJAN, K. Fluidization and its applications to food processing. **Food Structure**, Chicago, v.12, n.2, p.199-215, 1993.
- SIVASHANMUGAM, P.; SUNDARAM, S. Residence time distribution studies in annular circulating fluidised bed drier. **Powder Technology**. v. 107, p. 256-258, 2000.
- STATSOFT INC. Statistica, version 6.0. **Data analysis software system**. Tulsa, StatSoft, Inc., 2001.
- STRUMIŁŁO, C.; KUDRA, T. **Drying: principles, applications and design**. Switzerland: Gordon and Breach Science Publishers, 1986. 448p.
- STRUMIŁŁO, C.; PAKOWSKI, Z. Drying of granular products in vibrofluidized beds. In: MUJUMDAR, A. S. (ed.). **Drying '80: Developments in Drying**, Washington: Hemisphere Publishing, 1980. v.1, p.211-226.
- SZALAY, A.; ERDÉSZ, K.; ZAGROUBA, F.; ROQUES, M.A. Principles for hydro dynamical and geometrical design of vibrated bed driers. **Drying Technology**, New York, v. 13, n. 5-7, p. 1249-1260, 1995.
- UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS – UNICAMP., Campinas - SP, Alexandre

W. Mazzonetto, Osvaldo A. E. Bustamante, Luís Felipe Toro Alonso, Kil Jin Park. **Processo e equipamento de secagem em leito vibro-fluidizado**. BR nº PI 9302443, 1993.

WELTY, J.R.; WICKS, C.E.; WILSON, R.E. **Fundamentals of momentum, heat and mass transfer**. 3rd ed. New York: John Wiley & Sons, 1984. 803p.

“O coração precisa encher-se de alegrias ou de dores. Tanto umas como outras o alimentam.

O que este órgão não pode suportar é o vácuo.”

Alphonse Karr

CAPÍTULO III - CONSTRUÇÃO E TESTES DO SECADOR AGITADOR/MISTURADOR

III.1 INTRODUÇÃO

O presente capítulo trata da construção e teste de um secador agitador/misturador (SAM), patente industrial PI nº 0506639-5 (UNIVERSIDADE..., 2007), construído pela empresa MMC Equipamentos Industriais, com auxílio da FAPESP.

O secador consiste em um sistema versátil e multicomposto que trabalha tanto em batelada como secador contínuo. O método de secagem utilizado é a secagem por convecção, no qual o ar de secagem impulsionado pelo sistema de ventilação passa pelo material e retira a água evaporada. No entanto, o equipamento permite empregar o método de secagem por radiação, pois possibilita a complementação do aquecimento do ar de secagem feito por resistências elétricas, por meio de módulos de emissores de radiação infravermelha. Um sistema de válvulas espalhadas por todo o secador e uma bomba de vácuo permitem ainda a utilização de pulsos de vácuo durante o processo de secagem quando este é manejado como secador a batelada. O equipamento utiliza pás rotativas como transportador do material a ser seco, assim como agitador/misturador das partículas durante o processo de secagem, com o intuito de aumentar os coeficientes de transferência de calor e massa.

Alguns dos principais parâmetros do secador agitador/misturador foram levantados, como temperatura e velocidades operacionais, tempo de residência, assim como cinética de secagem de material biológico.

Para o estudo de cinética de secagem, batatas cortadas em formato de cubos foram utilizadas para a determinação das difusividades efetivas devido à facilidade de obtenção de uma forma geométrica regular. Para as demais determinações, utilizaram-se grãos de feijão preto.

III.2 OBJETIVOS

- ✓ Construção e testes de funcionamento do secador agitador/misturador;
- ✓ Levantamento de alguns parâmetros operacionais do secador;
- ✓ Teste de comportamento do secador agitador/misturador na secagem de material biológico.

III.3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A secagem é um processo usado na preservação dos mais diversos produtos desde a Antiguidade. Técnicas elaboradas e complexas foram construídas no decorrer dos anos. Nos diversos setores da indústria moderna, podem-se encontrar diferentes métodos de secagem em diferentes equipamentos. Cada método dispõe de diferentes dispositivos (aparelhos, ferramentas) para modificar e/ou manter certas especificidades na qualidade final do produto a ser seco. Existem ainda equipamentos que conjugam diversos dessas ferramentas, contribuindo de forma combinada para atingir a qualidade desejada.

III.3.1 SECAGEM

III.3.1.1 Definições

A secagem é uma das mais antigas e usuais operações unitárias encontradas nos mais diversos processos usados em indústrias agrícolas, cerâmicas, químicas, alimentícias, farmacêuticas, de papel e celulose, mineral e de polímeros. É também uma das operações mais complexas e menos entendidas, devido à dificuldade e deficiência da descrição matemática dos fenômenos envolvidos de transferência simultânea de calor, massa e quantidade de movimento no sólido. Assim a secagem é um conjunto de ciência, tecnologia e arte, ou seja,

um *know-how* baseado em extensiva observação experimental e experiência operacional (MENON e MUJUMDAR, 1987).

Segundo KEEY (1972), a secagem durante muitos séculos foi realizada com métodos totalmente sem técnica. Durante a Revolução Industrial na França foi descrita uma das primeiras técnicas de secagem de papel em folhas em uma sala com circulação de ar. Um século depois, outra técnica foi descrita em Londres na “Grande Exibição”, também para a secagem de papel em cilindros aquecidos. Leite e vegetais também eram secos através de um pequeno aquecimento. Fornos simples eram usados para a secagem de amido e porções de sal.

KEEY (1972) define a secagem como sendo a remoção de uma substância volátil (comumente, mas não exclusivamente, água) de um produto sólido. A água presente no sólido é chamada de umidade. Em seu outro livro, KEEY (1978) afirma que esta definição de secagem exclui a concentração de uma solução e a remoção mecânica de água por filtragem ou centrifugação. Exclui também métodos térmicos relatados à destilação, tais como a desidratação azeotrópica de alguns líquidos orgânicos. Esta definição, contudo, nos leva a uma grande variedade de tipos de equipamentos, abrangendo desde simples fornos a grandes câmaras em que soluções de sólidos são vaporizadas contra uma corrente de ar quente formando um produto seco.

O desenvolvimento de novas técnicas de secagem e a adaptação das já existentes possuem grande importância econômica e mercadológica, por introduzir no meio industrial alternativas economicamente mais viáveis, além de possibilitar, em certos casos, a obtenção de produtos com características diferenciadas e aplicações potencialmente inovadoras (MARRETO, 2006).

Durante a secagem é necessário um fornecimento de calor para evaporar a umidade do material e também deve haver um sorvedor de umidade para remover o vapor d’água, formado a partir da superfície do material a ser seco (PARK et al., 2007).

A partir dessas considerações, é possível identificar diversos meios e recursos disponíveis que tem capacidade de suprir essas necessidades. A escolha e utilização destes mecanismos e recursos de forma eficiente e econômica são objetivos inerentes à atividade.

III.3.1.2 Processos de secagem

Embora a remoção da umidade de materiais úmidos possa ser feita através de

processos mecânicos de retirada de água como, por exemplo, filtração ou prensagem, o processo de secagem envolve uma desumidificação através da combinação dos mecanismos de transferência de calor e transferência de massa.

Existem vários materiais que requerem um processo de secagem, a maioria deles com propriedades químicas e físicas diferentes. Sendo assim, é bastante complicado classificar todos os métodos de secagem existentes. Entretanto, os mais comuns são (NONHEBEL e MOSS, 1971):

1. *Secagem por Convecção*: neste método, o calor sensível do meio gasoso é fornecido à superfície do material por convecção que, ao passar pelo material ou através dele, remove a água evaporada e a retira do secador.
2. *Secagem por Contato ou por Condução*: o calor é fornecido ao material úmido por condução, através da superfície de placas, cilindros ou paredes do secador. A quantidade de calor transferida para o material a ser seco não depende apenas da condutividade térmica do material de que é feita a superfície de aquecimento, mas também do coeficiente de transferência de calor do meio de aquecimento e do próprio material secante.
3. *Secagem por Radiação*: a energia térmica é fornecida ao material úmido por radiação eletromagnética na faixa de comprimento de onda de 0,76 - 400 mm. A radiação desta faixa, chamada região infravermelha, penetra através da área superficial do material causando a vibração das moléculas, criando assim o efeito térmico.
4. *Secagem Dielétrica*: a energia térmica é gerada no interior do material a ser seco (maus condutores ou isolantes), que é colocado num campo eletromagnético de alta frequência, na região de frequência de rádio ou de microondas. Devido às rápidas mudanças na direção do campo eletromagnético, os dipolos do dielétrico ou dos líquidos polares mudam sua orientação, provocando a geração de calor como resultado da fricção molecular.
5. *Secagem por Liofilização*: este método se baseia na sublimação da umidade do material, que foi previamente congelada, quando este é colocado numa câmara de secagem onde a pressão está abaixo do valor do ponto triplo. A quantidade de calor necessária, geralmente é fornecida por radiação ou condução através de placas aquecidas a uma certa taxa de aquecimento, de forma que a temperatura do produto

não ultrapasse 0°C.

6. *Secagem por Solvente*: neste método, o material é seco pelo contato com vapores superaquecidos de solventes orgânicos. Este processo é chamado de secagem por solvente superaquecido e é interessante quando o material a ser seco é umidificado por um líquido inflamável.
7. *Secagem por Vapor Superaquecido*: neste processo, o secador é preenchido com ar quente e tem início a convecção. No decorrer do processo, a umidade evaporada começa a circular juntamente com o ar quente. Isto faz com que a pressão interna aumente e ative uma válvula de controle de pressão, a qual regula qualquer sobrepressão, retirando gradualmente o ar ainda presente no secador, fazendo com que a secagem ocorra no contato com o vapor superaquecido.
8. *Secagem de Leitos Fluidizados Ativos*: a secagem por este método consiste na imersão das partículas a serem secas em um leito de uma substância dissecante, fluidizada pelo ar.

III.3.1.3 Secadores

Devido à grande variedade de tipos de produtos que devem ser secos por diferentes métodos, existe também uma variedade de projeto de secadores. Os critérios para se classificar os secadores são muitos, e segundo STRUMILLO e KUDRA (1986) podem ser classificados segundo o método de aquecimento do agente de secagem, a forma física da alimentação, se o produto seco é requerido em uma forma especial, se o material é tóxico ou termolábil, etc. O mesmo autor também afirma que usualmente os tipos de secadores podem ser divididos, basicamente, segundo o regime hidrodinâmico e o fluxo de material. KEEY (1978) divide os secadores segundo o meio de transporte do material.

NONHEBEL e MOSS (1971) também classificam os secadores segundo o método de operação (Figura III.1), a forma física da alimentação (Figura III.2), a escala da operação (Figura III.3) e projetos especiais (Figura III.4):

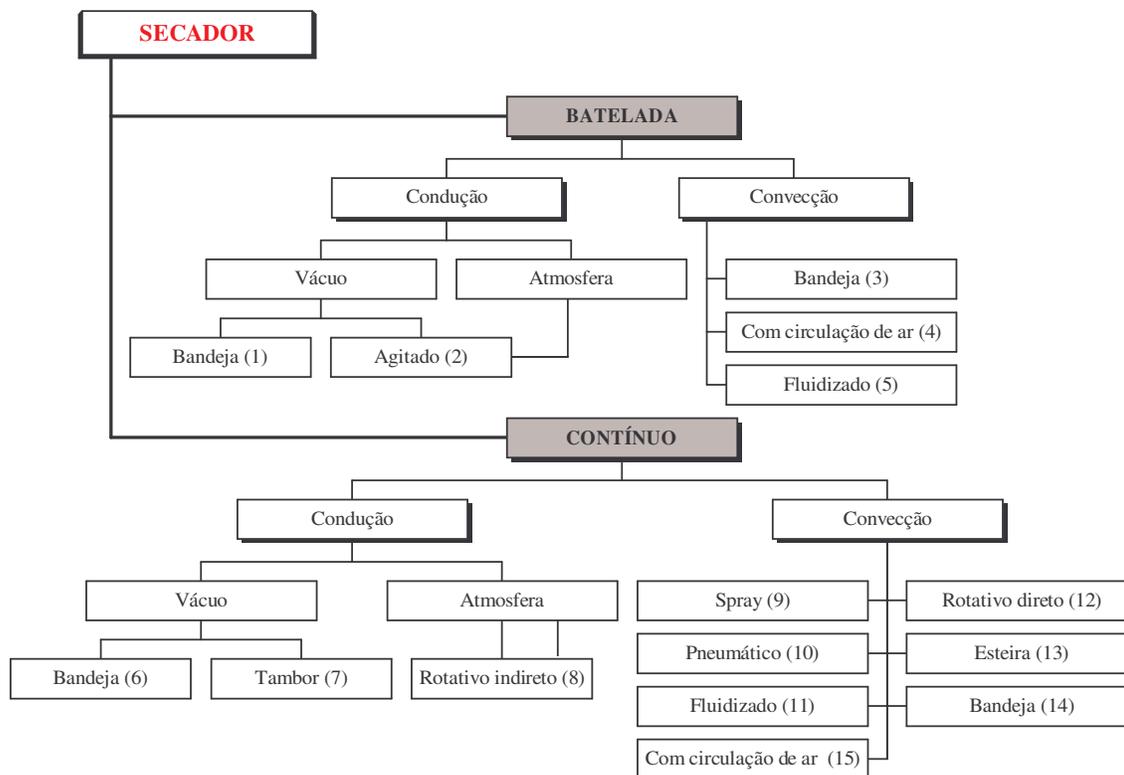


Figura III.1 – Classificação dos secadores baseada no método de operação.

A seguir estão discriminados os materiais específicos para cada secador da classificação anterior:

1. Pastas, pré-moldados, dura, granulares, fibrosos e folhas;
2. Líquidos, lama, pastas e granulares;
3. Pastas, pré-moldado, dura, granulares, fibrosos e folhas;
4. Pré-moldado, granulares e fibrosos;
5. Pré-moldado, granulares e fibrosos;
6. Lama e pastas;
7. Líquidos, lama, pastas e folhas;
8. Dura, granulares e fibrosos;
9. Líquidos, lama e pastas;
10. Pastas, pré-moldado, dura, granulares e fibrosos;
11. Pastas, pré-moldado, dura, granulares e fibrosos;
12. Granulares e fibrosos;

13. Pastas, pré-moldado, dura e folhas;
14. Pastas, pré-moldado, dura, granulares, fibrosos e folhas;
15. Pré-moldado, granulares e fibrosos.

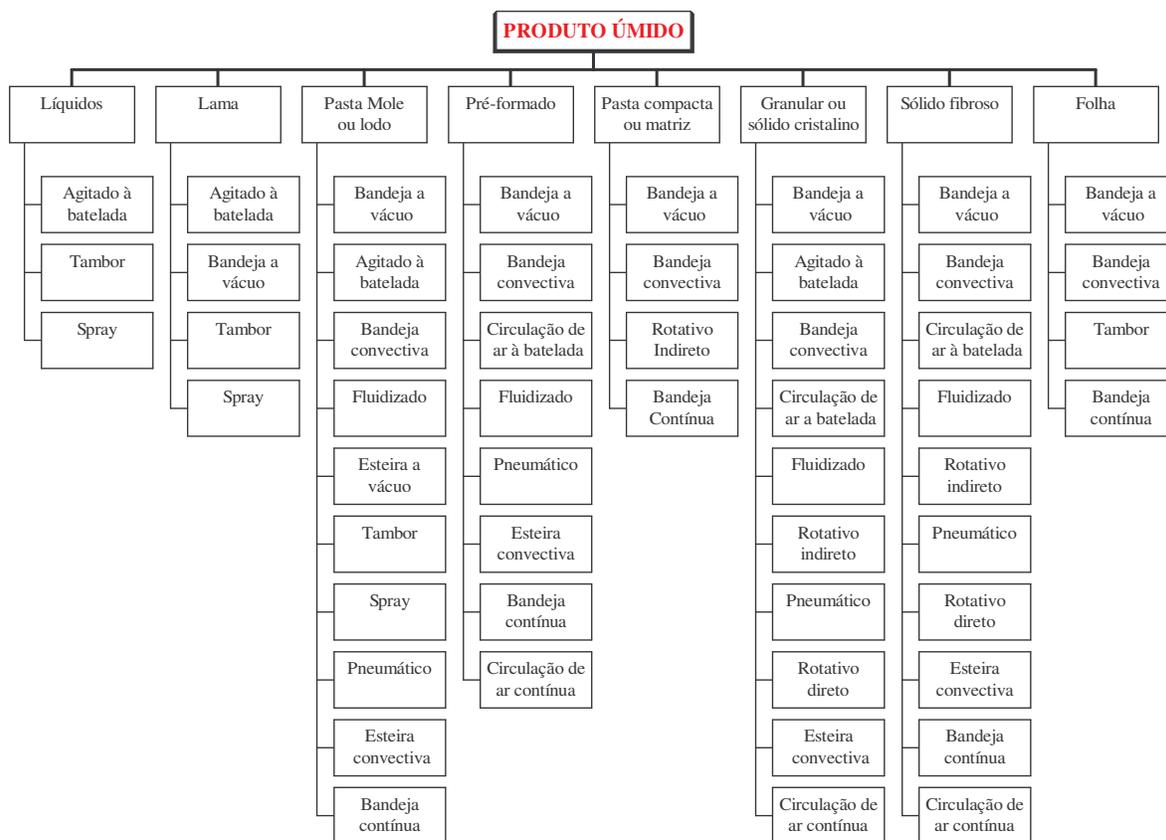


Figura III.2 – Classificação dos secadores baseada na forma física da alimentação.

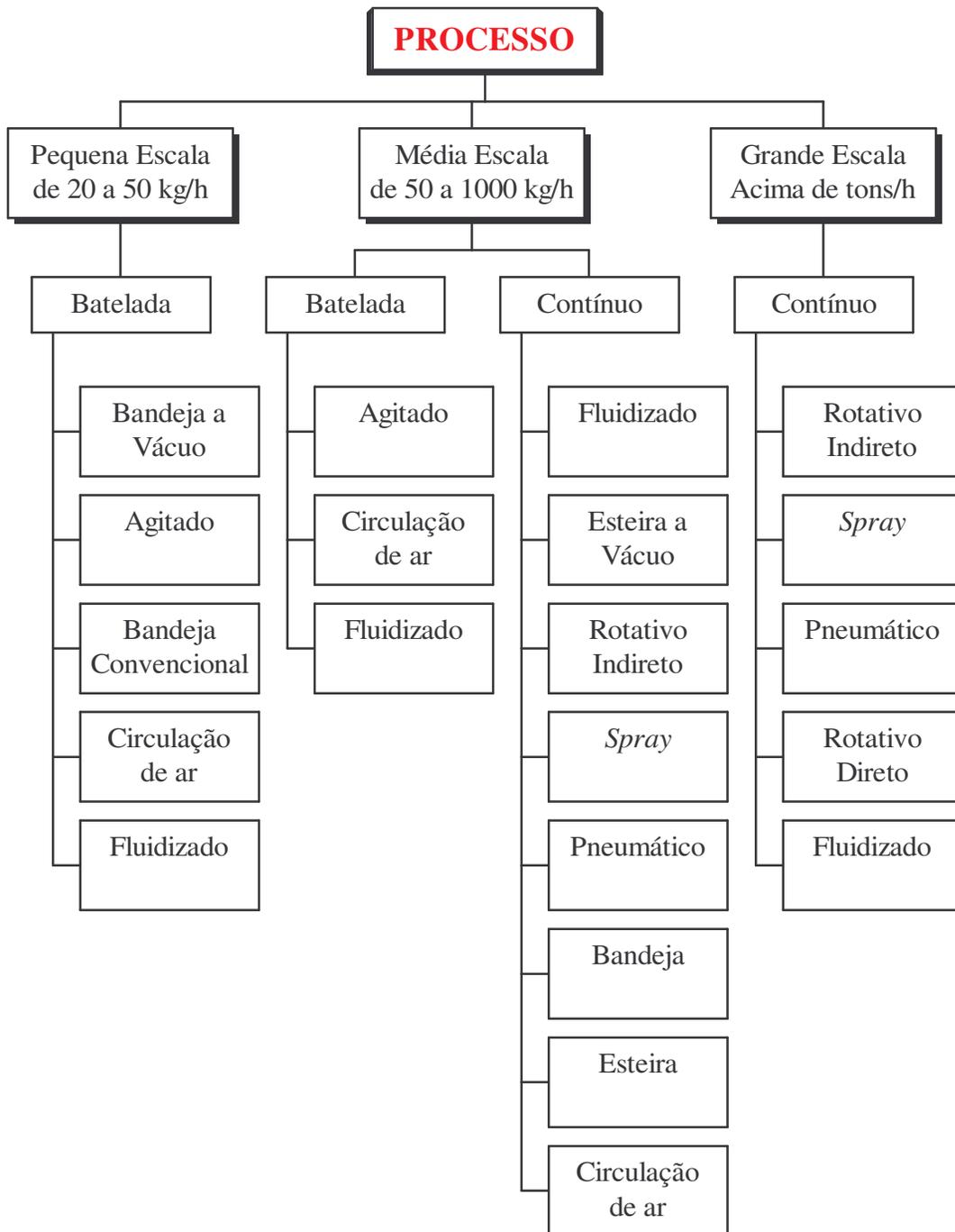


Figura III.3 – Classificação dos secadores baseada na escala de produção.

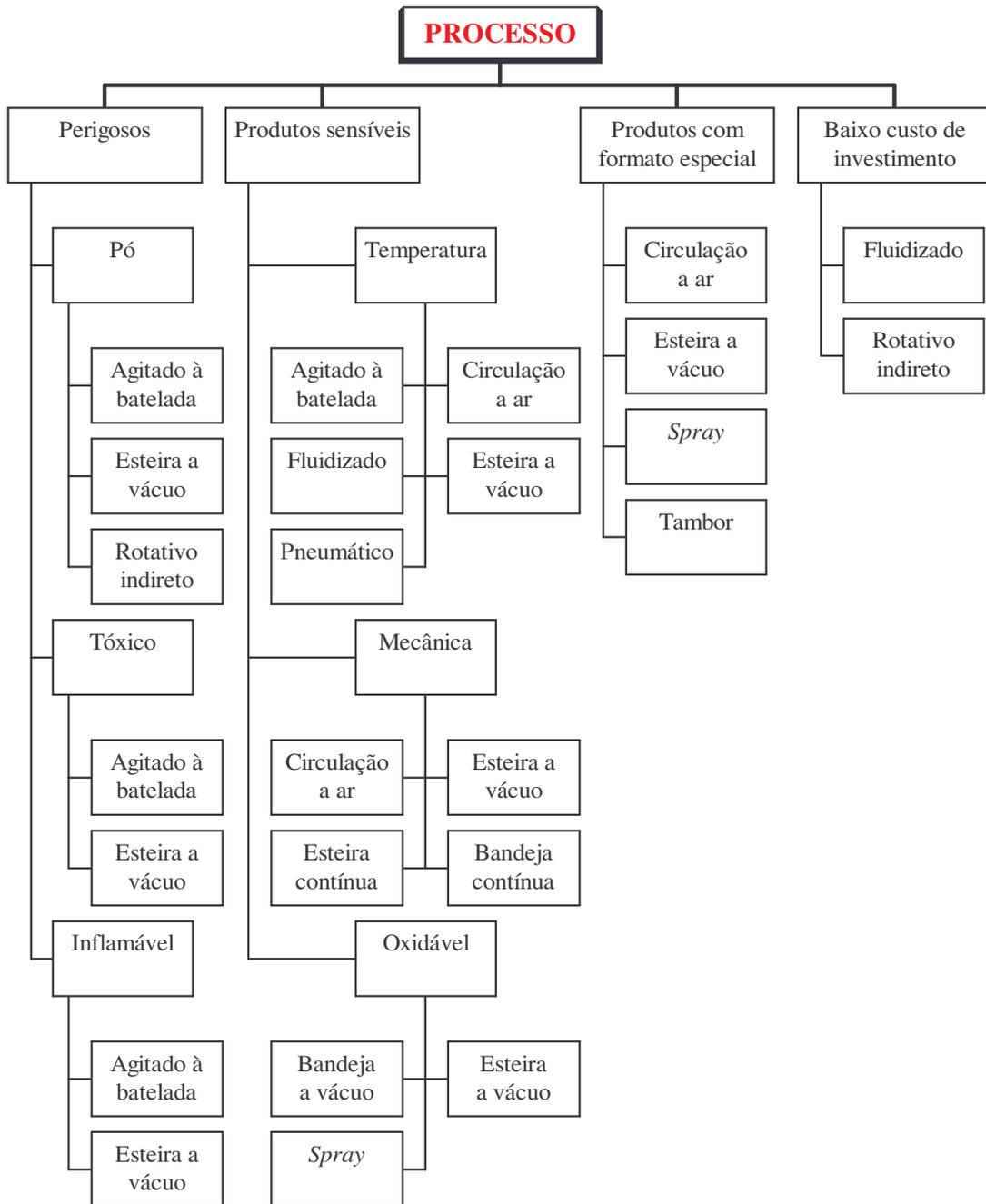


Figura III.4 – Classificação dos secadores baseada em projetos especiais.

No caso de frutas e outros produtos biológicos, Ratti e Mujumdar (1995) esclarecem que algumas características devem ser levadas em conta no momento de seleção do tipo de secador, bem como das condições operacionais:

1. Conteúdo de umidade inicial muito alto;
2. Sensibilidade à temperatura alta (cor, sabor, textura, valor nutricional sujeito a

- deterioração térmica);
3. Suscetibilidade alta ao ataque microbiano;
 4. Alto teor de açúcar (problemas de viscosidade, fermentação, etc.);
 5. Presença de uma "pele" em alguns produtos que têm baixa permeabilidade para água ou umidade (por exemplo, uvas, mirtilo).

III.3.1.4 Cinética de secagem

III.3.1.4.1 Teoria difusional

O período de taxa decrescente de secagem é quase sempre o único observado para a secagem de produtos agrícolas e alimentícios. A complexidade dos fenômenos de secagem conduz os pesquisadores a proporem numerosas teorias e múltiplas fórmulas empíricas para predizerem a taxa de secagem.

De acordo com CHIRIFE (1981), os principais mecanismos de transporte durante o período de taxa decrescente são: difusão líquida, escoamento capilar e difusão de vapor. Segundo KING (1968) a difusão de vapor é o mecanismo predominante durante a segunda fase deste período.

A teoria difusional se apoia 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, tem-se:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \nabla \cdot (D_{ef} \nabla X) \quad (6)$$

Independentemente dos trabalhos sobre secagem, CRANK (1975) apresentou um grande número de soluções da equação de difusão para condições iniciais e de contorno variadas. Entretanto, estas soluções se aplicam aos sólidos de formas geométricas simples (corpos semi-infinitos; placas, cilindros e esferas) e quando a difusividade é constante ou varia linearmente ou exponencialmente com a concentração de água. Para o caso de secagem em sistemas de coordenadas cartesianas, com direção unidirecional em uma placa de espessura $2L$:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(D_{ef} \frac{\partial X}{\partial z} \right) \quad (7)$$

A Equação 7 com as seguintes condições iniciais e de contorno:

Umidade inicial uniforme: $X(z, t) = X(z, 0) = X_o$

Umidade máxima no centro: $\left. \frac{\partial X}{\partial z} \right|_{z=0} = 0$

Umidade constante na superfície: $X(z, t) = X(L, t) = X_{eq}$

E aplicando:

$$\bar{X} = \frac{1}{L} \cdot \int_0^L X(z, t) dz \quad (8)$$

Torna-se:

$$Y = \frac{\bar{X} - X_{eq}}{X_o - X_{eq}} = \frac{8}{\pi^2} \cdot \sum_{i=0}^{\infty} \frac{1}{(2i+1)^2} \exp \left[- (2i+1)^2 \cdot \pi^2 \cdot D_{ef} \cdot \frac{t}{4L^2} \right] \quad (9)$$

Para as três dimensões do cubo, a Equação 9 fica:

$$Y = \frac{\bar{X} - X_{eq}}{X_o - X_{eq}} = \left(\frac{8}{\pi^2} \cdot \sum_{i=0}^{\infty} \frac{1}{(2i+1)^2} \exp \left[- (2i+1)^2 \cdot \pi^2 \cdot D_{ef} \cdot \frac{t}{4L^2} \right] \right)^3 \quad (10)$$

O coeficiente de difusão (D_{ef}) é uma difusividade efetiva, que engloba os efeitos de todos os fenômenos podendo intervir sobre a migração da água, e seu valor é sempre obtido pelo ajuste das curvas experimentais. A solução da equação de difusão utilizada é uma das mais simples e parece ser a principal razão de seu emprego. Podemos entender a difusividade como a facilidade com que a água é removida do material. Como a difusividade varia conforme mudam as condições de secagem (temperatura e velocidade do ar), ela não é intrínseca ao material, convencionou-se chamar de difusividade efetiva.

III.3.1.4.2 Modelo de Page

Em algumas situações, a teoria difusional não é adequada para ajustar o comportamento da taxa de secagem devido a interferências no efeito de resistência interna do

material. Para estas situações, podemos aplicar alguns modelos empíricos como o modelo de Page (PAGE, 1949):

$$Y = \frac{\bar{X} - X_{eq}}{X_o - X_{eq}} = \exp(-a \cdot t^b) \quad (11)$$

Alguns autores consideram este modelo como semi-teórico e o utilizam para expressar a perda de água em alimentos. Estes autores consideram o modelo de Page uma simplificação da solução da segunda lei de Fick com algumas considerações. O modelo considera, então, somente o primeiro termo da série, a constante de secagem como um dos parâmetros de regressão da equação e um fator de correção para o tempo t (SILVA et al., 2003).

III.3.2 SECADOR AGITADOR/MISTURADOR

Alguns dos fenômenos e ferramentas que foram incorporados ao uso do secador com agitador/misturador são tratados neste item.

III.3.2.1 Secagem por radiação infravermelha

III.3.2.1.1 Definições

A radiação é o modo pelo qual energia (calor) é transferida de uma superfície em alta temperatura para uma superfície em temperatura mais baixa sem que haja entre tais superfícies um meio interveniente. Este tipo de transferência de calor não necessita de meio material para ocorrer, ou seja, a energia pode percorrer espaços em que há somente vácuo entre os corpos. A energia transferida desta maneira é chamada radiação térmica e é feita sob a forma de ondas eletromagnéticas.

Portanto, a radiação térmica é um fenômeno ondulatório semelhante às ondas de rádio, luz visível, raios-X, raios-gama etc., diferindo apenas no comprimento de onda.

Todos os corpos quentes (que apresentam temperaturas maiores que zero absoluto) emitem energia radiante, das quais os comprimentos de onda sobrepõem sensivelmente o espectro visível da radiação eletromagnética. Para todos os materiais, a radiação térmica

ocorre em uma banda de comprimento de onda entre 0,2 μm e 800 μm , sendo que os menores comprimentos de onda correspondem às maiores temperaturas de superfície (KEEY, 1972).

A radiação que incide em uma superfície pode ser absorvida, refletida e transmitida. As frações incidentes de energia que são distribuídas destas maneiras são representadas respectivamente pela absortividade (α), refletividade (γ) e transmissividade (τ), sendo que a soma destes valores indica a relativa totalidade de energia incidente, ou seja:

$$\alpha + \gamma + \tau = 1 \quad (12)$$

Emissividade (ε), absortividade (α), refletividade (γ) e transmissividade (τ) são as quatro propriedades irradiantes indispensáveis de um material. As magnitudes relativas de α , γ e τ dependem não só do material, sua espessura e acabamento da superfície, mas também do comprimento de onda da radiação aplicada (KREITH, 1969).

Um corpo que absorve toda a radiação incidente é chamado de corpo negro, enquanto que aquele que a reflete é um corpo branco. Nenhum destes corpos existe realmente, porém representam o comportamento ideal dos limites das propriedades dos materiais existentes. Um corpo real é definido como opaco ou cinza, quando ele absorve a radiação incidente na totalidade de seus comprimentos de onda, ou definido como colorido quando o nível de absorção depende do comprimento de onda.

Embora a radiação faça parte do fornecimento de calor a um material úmido em um secador convectivo, o uso da radiação como a principal fonte de calor é limitada. Desta maneira, o calor só penetra superficialmente, exceto em certos comprimentos de onda, e irregularmente, a menos que o material seja uniforme (KEEY, 1972).

Das ondas eletromagnéticas, as que se transformam mais facilmente em calor, quando absorvidas pelo receptor, são as infravermelhas, também chamadas ondas de calor.

Ondas infravermelhas fazem parte do espectro eletromagnético, como mostrada na Figura III.5. Os exatos limites inferiores e superiores de comprimentos de onda que definem o infravermelho não são mencionados constantemente na literatura. Embora a faixa de comprimento de onda para radiação infravermelha seja mencionada como variando de 0,75 até 1000 μm , radiação térmica é geralmente considerada a que se apresenta na faixa de 0,1 a 100 μm . A faixa infravermelha inteira é dividida tipicamente em regiões do infravermelho próximo (0,75 a 3 μm), infravermelho médio (3 a 25 μm) e infravermelho distante (25 a 1000 μm) (DATTA e ALMEIDA, 2005).

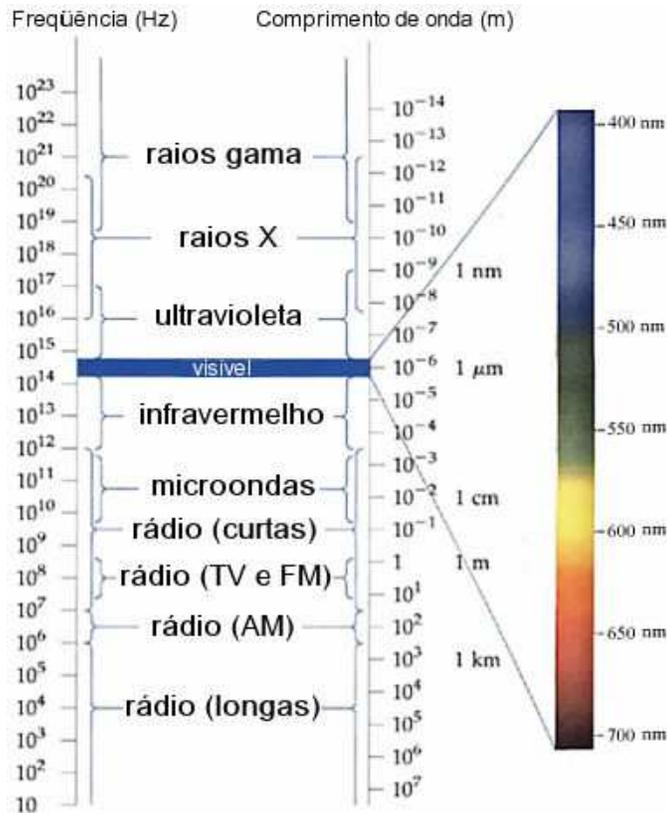


Figura III.5 – Espectro eletromagnético: classificação dos secadores baseada em projetos especiais.

Todos componentes dos alimentos têm sua contribuição individual na absorção do infravermelho. Aminoácidos, proteínas e ácidos nucleicos revelam duas importantes faixas de absorção localizadas de 3 a 4, e de 6 a 9 μm . Lipídios são grandes absorvedores de todo espectro da radiação infravermelha, com três faixas de forte absorção: de 3 a 4, 6 e de 9 a 10 μm . Açúcares apresentam duas faixas de absorção fortes centradas a 3 e de 7 a 10 μm .

Propriedades irradiantes de produtos alimentícios dependem do comprimento de onda da radiação incidente no produto que, por sua vez, depende das características de emissão da fonte da radiação. Assim, é importante conhecer as características das fontes comuns (emissores) usadas para radiação térmica, assim como as propriedades do material (RATTI e MUJUMDAR, 1995).

III.3.2.1.2 Aquecimento e Conservação de energia

Unidades de aquecimento por radiação infravermelha são efetivas para aquecimento

localizado. Os aquecedores radiantes transferem energia diretamente para os objetos sólidos. Pouca energia é perdida durante a transferência, devido à baixa absorção de calor radiante pelo ar.

Como não é necessário um meio intermediário como o ar para que a transferência de calor ocorra, ventiladores e bombas são dispensáveis nesses ambientes. Porém, Cunningham et al. (2008) citam que, na secagem de batata, observou-se um aumento significativo na taxa de secagem quando houve a integração de diferentes métodos de secagem. Esse autor avaliou a secagem por microondas e convectiva.

Quando radiação infravermelha é usada, o ambiente passa a ser caracterizado por (ASHRAE, 2001):

1. Um campo direcional radiante criado pelos aquecedores infravermelhos;
2. Um campo radiante que consiste na rerradiação e reflexão pelas paredes e/ou superfícies circundantes;
3. Temperaturas do ar frequentemente menores que as encontradas em sistemas convectivos.

Uma grande vantagem para conservação de energia e controle operacional é que os aquecedores infravermelhos se tornam efetivos em pouco tempo, facilitando a aplicação do calor em momentos específicos e intermitentes, se necessário.

Aquecedores infravermelhos devem operar em tensões específicas na entrada. Uma pequena redução na entrada causa uma grande diminuição na radiação emitida devido à dependência em quarta potência da temperatura do emissor na energia transferida.

III.3.2.1.3 Aplicações

O aquecimento por radiação infravermelha é amplamente utilizado nos mais diversos setores produtivos. Pode ser encontrado na indústria automobilística, de eletrônicos, em indústrias químicas, além das alimentícias. Neste último caso, está presente em processos como cozimento, descongelamento, pasteurização e secagem.

Secadores infravermelhos com filamentos incandescentes são comumente usados na secagem de tintas, filmes e vernizes e são particularmente apropriados na correção do perfil de umidade em materiais delgados como papel (KEEY, 1972).

A desidratação de produtos alimentícios é provavelmente o método mais antigo utilizado para preservação de alimentos. O uso de secagem artificial na preservação de produtos agrícolas tem se expandido, criando a necessidade da utilização de métodos mais rápidos e reduzindo a quantidade de energia requerida nesse processo (MONGPRANEET et al., 2002).

A secagem através da radiação infravermelha é um método que apresenta menor perda de energia quando comparado com a secagem com ar quente, já que a energia em onda eletromagnética é absorvida diretamente pelo produto (MONGPRANEET et al., 2002). Isso ocorre, pois o material é aquecido rapidamente e de maneira uniforme, já que a energia da radiação infravermelha é transferida ao produto sem aquecer o ar circundante (SWASDISEVI et al., 2007).

A secagem por infravermelho cresceu com o uso em produtos vegetais e produtos marinhos. Em secagem de vegetais, é importante a atenção dada à descoloração e à retenção de nutrientes, assim como a eficiência de secagem (SAKAI e MAO, 2006). Perda de componentes voláteis e mudanças químicas de carotenóides e outros compostos, por exemplo, são causadas pela oxidação e calor durante a secagem. Assim, a secagem por infravermelho pode ser satisfatória para produtos que têm um valor econômico alto devido às suas características nutricionais.

De acordo com Yamazaki et al. (1992, citado por MONGPRANEET et al., 2002), algumas das vantagens da utilização da radiação infravermelha quando comparada com a secagem convencional são: alta taxa de secagem (poupando energia) e distribuição uniforme de temperatura possibilitando uma melhor qualidade do produto após a secagem.

Segundo Dostie et al. (1989, citado por MONGPRANEET et al., 2002), resultados experimentais mostram que o tempo de secagem para radiação intermitente e convecção contínua, quando comparado com somente secagem convectiva, é de duas a duas vezes e meia menor, mantendo-se uma boa superfície de contato e alta eficiência energética.

A taxa de reidratação também pode ser usada como indicador de qualidade de produtos biológicos e alimentícios; materiais biológicos que são secos sob condições ótimas sofrem menos danos e reidratam mais rapidamente. Além disso, em legumes e hortaliças usadas como ingredientes em pratos instantâneos, é necessária uma reidratação rápida. A liofilização é um processo alternativo competitivo para esta aplicação, mas é

comparativamente mais caro (SAKAI e MAO, 2006).

Há uma limitação para a secagem através da utilização da radiação como principal fonte de calor, isso ocorre devido ao fato de que, exceto em certos comprimentos de onda, o calor penetra apenas superficialmente e a menos que o material seja uniforme, essa penetração ocorre irregularmente (KEEY, 1972).

III.3.2.2 Secagem a vácuo

A sensibilidade térmica dos materiais determina a máxima temperatura sob a qual a secagem deve ser conduzida durante o tempo. Essa temperatura varia inversamente com o tempo de retenção. Assim, quando o tempo de secagem é longo, a operação sob vácuo pode ser utilizada para diminuir as temperaturas de evaporação até níveis seguros (KEEY, 1972), já que na secagem a vácuo a água evapora a baixa temperatura, além de diminuir o tempo de secagem. Outra vantagem da utilização da secagem a vácuo é o rápido potencial de secagem, além de um baixo consumo de energia, já que apenas alguns minutos são suficientes.

Na secagem a vácuo, o produto é aquecido por vapor, por condução ou por radiação, enquanto permanece sob condições de baixa pressão. Esse processo de secagem oferece uma série de vantagens como, por exemplo, uma baixa temperatura de secagem e baixa oxidação.

Secagem de produtos sensíveis ao calor de origem biológica é um processo complexo que pode alterar uma variedade de características mecânicas, químicas e bioquímicas do produto a ser seco. Por exemplo, desidratação térmica de biomateriais pode afetar um ou mais das suas propriedades bioquímicas (viabilidade, atrofia das células), enzimáticas (estabilidade, habilidade catalítica), químicas (diminuição de valor nutritivo, degradação de vitaminas), físicas (solubilidade, reidratação, encolhimento, perda de aroma) e mecânicas (elasticidade, dureza, friabilidade, fragilidade) (PAN et al., 1999).

Para materiais sensíveis à injúria pelo calor excessivo, os secadores a vácuo devem ser utilizados na redução da temperatura de secagem.

Da mesma forma, a secagem utilizando baixo vácuo é usada quando se tem produtos sensíveis à oxidação ou degradação de seus componentes quando a secagem é conduzida a altas temperaturas e a pressão atmosférica. Sendo assim, a utilização de baixo vácuo ou baixas pressões de trabalho durante a secagem, aliada a temperaturas ligeiramente mais altas que as

ambientes, pode ser usada como forma de prevenção do escurecimento de certos produtos, uma vez que ocorre a diminuição na concentração de oxigênio durante o processo. Segundo FITO et al (2001), no que diz respeito aos processos de congelamento e descongelamento, a aplicação do vácuo é importante para alterar a composição inicial do produto poroso, para que este resista aos danos causados. Assim, com a redução do oxigênio evitam-se reações que causem escurecimento e oxidação, por exemplo.

Ainda de acordo com FITO et al (2001), a aplicação de pulsos de vácuo em processos de desidratação e outras operações, como a secagem, contribui em uma significativa redução do tempo de processamento, que vai depender da porosidade do produto e de suas propriedades mecânicas. Em desidratação osmótica, há uma rápida transferência de massa, que ocorre quando as estruturas porosas estão imersas em uma fase líquida. Isso envolve o fluxo do líquido externo por todos os poros capilares, controlado pela expansão/compressão do gás interno. Esse mecanismo é o responsável pela aplicação de vácuo em produtos porosos, quando baixas pressões (por meio do vácuo) são impostas em um sistema sólido-líquido, seguida com o restabelecimento da pressão atmosférica. Durante a etapa de vácuo, o gás interno nos poros do produto é expandido e impulsionado parcialmente para fora. Tudo isto se relaciona com a penetração capilar, em função da tensão interfacial do líquido e do diâmetro dos poros. Já na etapa atmosférica, o gás residual é comprimido, e o líquido externo flui dos poros em função da compressão.

Para secadores a vácuo, os custos com equipamento e operação são relativamente altos, o que pode limitar seu uso somente para produtos com alto valor agregado ou que não possam ser obtidos com viabilidade econômica por outros meios (TANG e YANG, 2004), ou ainda quando se quer produtos com baixas umidades, mas sem danos (GREENSMITH, 1971). No entanto, a pressão também pode promover deformações do produto, por causa das propriedades viscoelásticas da sua matriz sólida.

Kutovoy et al. (2005), citados por RAGHAVAN e ORSAT (2006), estudaram a secagem a vácuo de produtos processados derivados de uvas. Utilizando temperaturas abaixo de 50°C, mais de 95% dos ingredientes nutricionais, vitaminas e outros componentes biológicos ativos foram preservados.

Vários métodos de secagem foram comparados por Kwok et al.(2004) quanto à preservação das propriedades antioxidantes e funcionais contidas em um tipo de *berry*

(*Saskatoon berry*). Os melhores resultados foram obtidos para liofilização seguida pela secagem a vácuo com microondas, um método de secagem combinada e secagem convectiva.

Kompany et al. (1990, citado por PINEDO, 2003), observaram durante a secagem de frutas e legumes que a pressão e diferentes tipos de pré-tratamentos aplicados na matéria-prima aumentam a velocidade e favorecem a posterior reidratação do produto final.

Uma vez que a secagem a vácuo é normalmente executada a baixas pressões, água evapora-se a baixa temperatura; conseqüentemente, a secagem pode ser conduzida a baixa temperatura. Vários pesquisadores combinaram as vantagens da secagem por infravermelho com a secagem a vácuo para secar vários produtos alimentícios (SWASDISEVI et al., 2007).

Além disso, a secagem a vácuo oferece um potencial de secagem rápido e com baixo consumo de energia, comparado com outros métodos na secagem. Com esse propósito, Chen e Lamb (2007) utilizaram um sistema de secagem a vácuo com fornecimento de calor por condução na secagem de tábuas de carvalho.

Swasdisevi et al. (2007) estudaram a secagem de fatias de bananas em secador a vácuo combinado com aquecimento por radiação infravermelha distante.

Esses autores mostraram em seus resultados que a taxa de redução de umidade aumentou com a diminuição da pressão absoluta da câmara de secagem, já que a água evapora a uma temperatura mais baixa. Conseqüentemente, foram obtidas maiores taxas de secagem. O efeito do nível de vácuo no comportamento de secagem de fatias de banana foi mais pronunciado a temperaturas mais baixas (SWASDISEVI et al., 2007).

III.3.3 DISTRIBUIÇÃO DE TEMPO DE RESIDÊNCIA – DTR

As partículas devem ser retidas no secador por tempo suficiente para que a umidade seja removida a uma taxa determinada pelas condições do processo (KEEY, 1992). Além disso, é necessário que o conteúdo de umidade e a temperatura do produto final estejam dentro de uma pequena faixa de variação. Isto significa que a distribuição do tempo de residência (DTR) das partículas sólidas no leito deve ser tão uniforme quanto possível. A importância da uniformidade do DTR também é verificada em reatores (HAN et al., 1991).

O tempo de residência depende das propriedades mecânicas das partículas, na intensidade de transporte e nos parâmetros geométricos do equipamento (SZALAY et al.,

1995).

Conhecendo o que está acontecendo dentro do secador em estudo, isto é, tendo em mãos um mapa completo da distribuição de velocidades do sólido, é possível prever o comportamento do sólido dentro do secador. Embora bem apurado em princípio, essa forma de ataque é impraticável, devido às suas dificuldades experimentais (LEVENSPIEL, 1974).

Em muitos casos não é necessário o conhecimento completo do escoamento do sólido, mas somente por quanto tempo as partículas individuais permanecem no leito, ou mais precisamente, qual a distribuição dos tempos de residência do sólido. Tal informação pode ser determinada por um método de investigação amplamente usado: o teste do estímulo e resposta.

Sólidos percorrendo caminhos diferentes no secador podem ter tempos diferentes para passarem através do leito. A distribuição desses tempos para o sólido que deixa o secador é chamada distribuição de idade de saída, curva E, ou a distribuição do tempo de residência (DTR) do sólido.

Por meio do acompanhamento da saída do traçador (qualquer material que possa ser detectado sem que perturbe o escoamento de sólidos) do secador é possível determinar a concentração em função do tempo. Assim, enquanto a curva E é definida como a curva de distribuição do tempo de residência (Equação 13), a curva F pode ser descrita como a fração cumulativa de sólidos que passaram pelo leito de secagem em um determinado tempo t (Equação 14). Isso expressa que a curva F varia de 0 a 1.

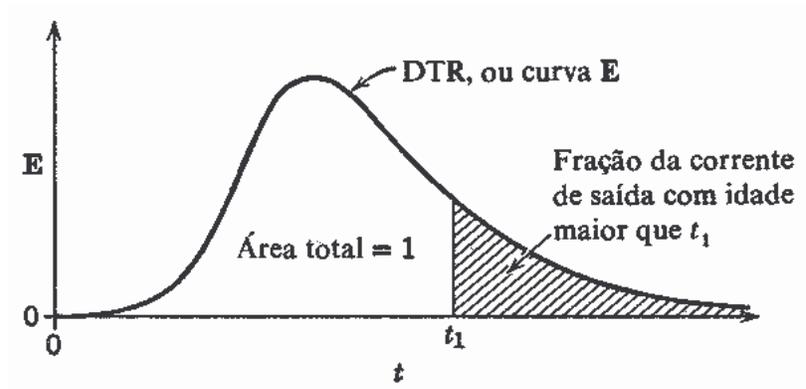
$$E(t) = \frac{C(t)}{Q} \quad (13)$$

$$F(t) = \int_0^{\infty} E(t) dt = \sum_n \left(\frac{E(t)_{n+1} + E(t)_n}{2} \right) \cdot (t_{n+1} - t_n) \quad (14)$$

Além disso, é conveniente representar a DTR de tal maneira que a área sob a curva seja unitária, ou seja:

$$\int_0^{\infty} E dt = 1 \quad (15)$$

Este procedimento é chamado normalização da distribuição. A Figura III.6 mostra a distribuição de forma normalizada:



Fonte: LEVENSPIEL (1974)

Figura III.6 – Curva E de distribuição do tempo de residência.

Finalmente, o tempo de residência médio é encontrado a partir da Equação 16:

$$\bar{t} = \sum_n t_n \cdot E(t_n) \cdot \Delta t \quad (16)$$

III.4 MATERIAL E MÉTODOS

III.4.1 SECADOR AGITADOR/MISTURADOR

O secador agitador/misturador foi inicialmente pensado como um equipamento que conjugasse diversos aparatos tecnológicos que pudessem auxiliar em um processo de secagem baseado nas características do material. A Figura III.7 mostra o desenho esquemático inicial do protótipo do secador agitador/misturador:

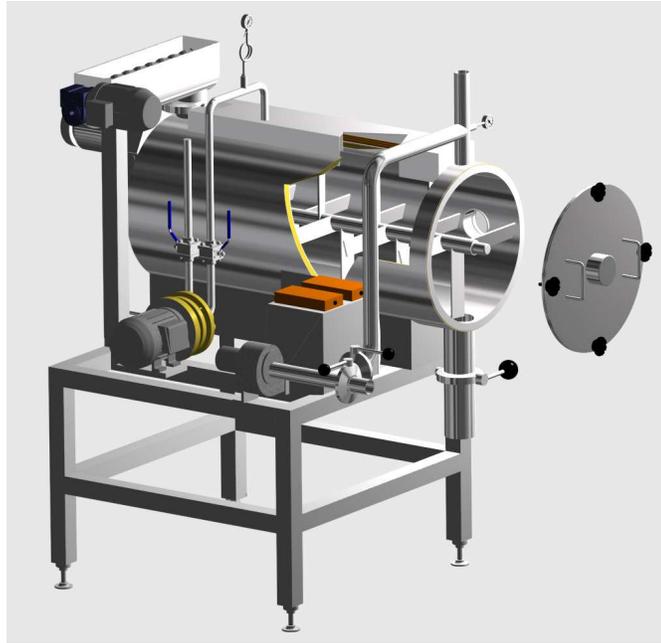


Figura III.7 – Desenho esquemático do protótipo do secador agitador/misturador.

Todo o secador foi construído em aço inox. O secador consiste em uma câmara cilíndrica provida de eixo rotativo que impulsiona pás, responsáveis pelo transporte e/ou movimentação dos sólidos contidos na câmara. Os sólidos são introduzidos no corpo do secador por meio de um sistema de alimentação dotado de um motor, uma rosca-sem-fim e uma pequena moega. A descarga dos sólidos é feita por uma abertura no final do leito de secagem, para onde todo o material é carregado pelas pás. O material a ser seco se move sobre uma placa perfurada que separa a câmara de secagem e o plenum.

O sistema de ventilação inicialmente implementado consiste de um ventilador centrífugo, da marca Asten de 50 W de potência. Como a vazão dada por este ventilador se mostrou inferior a adequada para operação satisfatória do secador, foi instalado um outro ventilador centrífugo, da marca Asten, de 1500 W de potência.

O sistema de aquecimento do ar de secagem também foi alterado devido à mudança de ventiladores. O primeiro sistema de aquecimento do ar consistia de resistências elétricas com 6000 W de potência, fixadas em uma caixa blindada. Esse sistema foi retirado e modificado para uma bateria de resistências elétricas com potência total de 5000 W.

A energia necessária no processo de secagem pode ainda ser complementada por um módulo de emissores elétricos de radiação infravermelha. Foram incorporadas ao secador

unidades radiantes infravermelhas com tubo de quartzo (modelo CQZ 10, fabricadas pela empresa Corel Aquecimento Industrial). Este módulo possui potência de 4500W e está posicionado na parte superior da câmara do secador, encobrendo todo o leito de secagem. Emissores deste tipo consistem em fios de níquel-cromo espiralados encapsulados por tubos de quartzo e encapados por porcelana ou por terminais metálicos (Figura III.8). Geralmente são montados em uma estrutura que contém refletores.

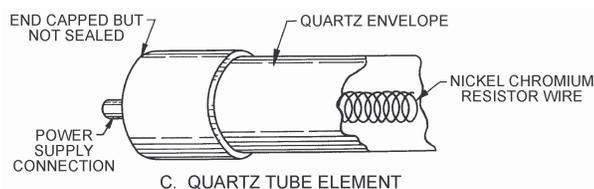


Figura III.8 – Aquecedor elétrico infravermelho de tubo de quartzo.

A radiação infravermelha pode ser acionada também na operação da secagem a vácuo, já que a radiação infravermelha não necessita de um meio para se propagar. Desta forma, o módulo pode ser acionado tanto em secagens contínuas como em batelada.

Inicialmente, o secador era provido de uma bomba de vácuo do tipo anel líquido monobloco, modelo BVM-II-120/20, marca Omel, responsável pela aplicação de vácuo na câmara de secagem. A aplicação de vácuo só é possível devido a um conjunto de válvulas borboleta, as quais estão posicionadas em todas as aberturas presentes no secador.

Nos primeiros testes, constatou-se que, se houvesse uma falha no sistema de fechamento das válvulas, o líquido utilizado na vedação da bomba era extravasado para dentro da câmara, comprometendo o processo de secagem. Desta forma, foi instalada uma bomba de vácuo do tipo rotativa de palhetas, modelo B30, marca Marvac, que não põe em risco o ambiente interno do secador. Essa bomba de vácuo atingiu valores de 470 mmHg de vácuo na câmara de secagem do secador agitador/misturador.

III.4.2 DISTRIBUIÇÃO DO TEMPO DE RESIDÊNCIA – DTR

Primeiramente estudou-se o comportamento de sólidos granulares no interior do secador agitador/misturador (patente PI 0506639-5 e construído com recursos da FAPESP processo n° 05/54615-0).

O material escolhido para a análise do tempo de residência foi grãos de feijão preto (*Phaseolus vulgaris* L.), devido à facilidade de manipulação dos grãos no momento da separação manual. Parte dos grãos foi pintada com tinta spray branca. Para os ensaios, foram utilizados aproximadamente 20 kg de feijão preto e 1,5 kg de feijão pintado de branco (massa de traçador). O método utilizado foi o de estímulo e resposta. O estímulo consistia no pulso do material marcado (feijão branco), e a resposta foi medida através da fração do feijão branco em relação ao resto dos feijões (feijão preto).

O secador foi alimentado com parte da amostra de feijão preto até obter-se um fluxo contínuo. Quando a vazão de produto entrou em regime permanente, colocou-se a amostra do traçador na rosca alimentadora do secador, seguida do resto de grãos de feijão preto. Desta forma, obteve um pulso de traçador na alimentação de sólidos no secador.

O tempo de residência pode ser definido como o tempo médio que o produto leva para atravessar todo o leito de secagem, do ponto de alimentação do secador até sua saída no bocal de descarga. Assim, após o pulso de traçador, conta-se o tempo de movimentação dos grãos a partir deste momento e coletam-se amostras destes grãos na descarga em períodos fixos e predefinidos. Neste caso, coletaram-se amostras em intervalos de 15 segundos.

Para cada amostra, pesou-se sua massa total e então a distribuiu em uma bandeja de plástico, de onde se tirou uma foto digital a uma distância fixa e suficiente para que toda a superfície do material distribuído na bandeja aparecesse na imagem. A máquina fotográfica digital utilizada é da marca SONY modelo DSC-P32, que apresenta uma resolução de 2048 x 1536 pixels (3 megapixels). Posteriormente, os grãos brancos (traçador) foram separados manualmente e pesados isoladamente. O mesmo procedimento foi realizado em um outro ensaio e utilizado como duplicata.

A seguir, executou-se a separação manual do traçador nas amostras, pesando-se a massa do traçador nas mesmas, transmitindo-se, então, essas informações para a planilha de cálculos de tempo de residência.

Com as massas de traçador (m_{tr}) e totais das amostras, calculou-se as frações em cada uma delas e, somando-se essas frações, pôde-se chegar ao valor total de traçador (m_{trtot}) que foi recolhido na corrida inteira.

Então, para cada amostra, a concentração $C(t)$ de traçador foi calculada pela seguinte equação:

$$C(t) = \frac{m_{tr}}{m_{tr_{tot}}} \quad (17)$$

Determinou-se, então, a área sob a curva de concentração versus o tempo (Q), por integração numérica:

$$Q = \int_0^{\infty} Q(t) dt \quad (18)$$

Em que:

$$Q(t) = \int_0^t C(t) dt = \sum_0^n \left(\frac{C(t)_{n+1} + C(t)_n}{2} \right) \cdot (t_{n+1} - t_n) \quad (19)$$

A curva E(t) foi calculada segundo a Equação 13, e a curva F(t) segundo a Equação 14. Assim, o tempo de residência médio foi obtido pela Equação 16, definidas anteriormente.

O método de separação manual foi comparado ao método indireto de separação dos materiais através da análise da imagem digital do material (BROD, 2003). Ele se baseia na diferença de cores dos materiais marcados e não marcados, determinando-se a proporção de um em relação ao outro. Tal método apresenta uma grande vantagem sobre a separação manual de materiais de pequena granulometria.

III.4.3 SECAGEM

III.4.3.1.1 Preparo da matéria-prima

Para os ensaios de secagem o produto escolhido foi batata. Elas foram cortadas em cubos de cerca de 1 cm de lado. Primeiramente, as batatas passaram por um cortador específico para o corte em formato “palito”. Após este procedimento, foram cortadas manualmente em cubos.

As amostras cortadas em cubos foram submetidas a um processo de conservação. Esse material foi imerso por cerca de três minutos em solução de água destilada e 1% de metabissulfito de sódio, composto inorgânico de fórmula química $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$, utilizado como antioxidante. Após a imersão, os cubos foram escorridos, e colocados em sacos plásticos,

lacrados e colocados no freezer (batata com branqueamento).

III.4.3.1.2 Ensaios de secagem

Foram realizados os ensaios de secagem, com a variação de parâmetros como a aplicação de vácuo e energia radiante. Para a realização dos ensaios, utilizou-se cerca de 1,4 kg de amostras de batata em cubos. Esta amostra foi distribuída no interior do secador, sempre verificando uma pequena espessura do produto no leito de secagem para que toda a amostra obtivesse uma secagem uniforme.

Em intervalos de tempo pré-determinados (geralmente em intervalos de 15, 30 minutos e uma hora), retiravam-se 3 amostras do produto de dentro do secador. Estas amostras, colocadas em recipientes apropriados de alumínio, foram devidamente pesadas em balança analítica, marca Scientech SA 210, ($\pm 0,0001$ g), e colocadas em uma estufa, marca Fanem Modelo 320-SE. Estas amostras foram utilizadas para se determinar a massa seca e, conseqüentemente, seus respectivos teores de água segundo a metodologia da ASSOCIATION OF OFFICIAL ANALYTICAL CHEMISTS (1998). A partir dos dados de umidade ao longo do tempo, foram calculados os valores do adimensional de umidade Y para cada momento. A umidade de equilíbrio foi obtida por meio do método dinâmico.

Os parâmetros operacionais utilizados na secagem convectiva consistiram de velocidade do ar na entrada do secador igual a 6,95 m/s e temperatura de secagem de 45 °C (± 1 °C). A velocidade do ar foi obtida por meio de anemômetro de ventoinha da marca AirFlow, enquanto que a temperatura foi determinada por termopares instalados na entrada da câmara de secagem.

Os ensaios são descritos a seguir:

1 – Ensaio preliminar

No ensaio preliminar houve a aplicação tanto de vácuo, como de energia radiante infravermelha.

A primeira amostra foi retirada logo no início do ensaio para determinação do teor de água inicial. Então, a bomba de vácuo foi ligada e, assim que o nível de 200 mmHg foi atingido no interior do secador, iniciou-se um período de 15 minutos nesse ambiente. Ao fim deste intervalo, desligou-se o sistema de vácuo, retirou-se a segunda amostra e, então, foram

ligados o ventilador e as resistências elétricas. A secagem convectiva foi mantida até o final do teste. As outras amostras foram retiradas em quatro sucessivos intervalos de 15 minutos e, posteriormente em quatro intervalos de 30 minutos. Nos intervalos de 15 minutos a energia radiante foi aplicada por 2 minutos, enquanto que nos intervalos de 30 minutos, aplicou-se a energia radiante por 1 minuto a cada 15 minutos.

2 – Ensaio de secagem convectiva

Neste ensaio, não foram utilizados o sistema de vácuo e o sistema de energia radiante. Apenas o ventilador e as resistências elétricas funcionaram durante todo o teste, ou seja, aplicou-se somente secagem convectiva. Foram utilizadas amostras de batata submetidas ao processo de branqueamento.

3 – Ensaio com aplicação de energia radiante

Este ensaio foi realizado apenas com a aplicação da energia radiante conjugado à secagem convectiva. O procedimento da utilização do material biológico no secador foi o mesmo mencionado anteriormente.

Na primeira hora de secagem foram retiradas amostras de 15 em 15 minutos. Posteriormente, as amostras foram retiradas em intervalos de 30 min até o final do teste. Aplicaram-se 2 minutos de energia radiante a cada 15 minutos de secagem durante todo o ensaio.

4 – Ensaio com aplicação de vácuo

Neste ensaio, a energia radiante não foi aplicada. Apenas o pulso de vácuo foi aplicado na parte inicial do teste. O valor definido de vácuo foi aumentado em relação ao teste preliminar e atingiu 250 mmHg. Foram utilizadas amostras de batatas submetidas ao processo de branqueamento.

No início do ensaio, uma amostra foi retirada para determinação do teor de água inicial. O secador e a bomba de vácuo foram ligados e, assim que o vacuômetro atingiu 250 mmHg, foram mantidos 15 minutos de vácuo na câmara de secagem. Após este período, o vácuo foi quebrado, desligou-se a bomba de vácuo e retirou-se a segunda amostra. Secagem convectiva foi mantida até o final do teste.

5 – Ensaio com aplicação de vácuo e energia radiante

Neste ensaio, assim como no ensaio preliminar, houve a aplicação de vácuo e de energia radiante, porém utilizaram-se amostras de batata que haviam passado pelo processo de branqueamento.

Assim como descrito anteriormente, a primeira amostra foi retirada logo no início do ensaio, e então a bomba de vácuo foi ligada e assim que atingiu 250 mmHg, manteve-se 15 minutos de vácuo. Ao fim deste intervalo, retirou-se a segunda amostra. Desligou-se o sistema de vácuo e ligou-se o ventilador e as resistências, que permaneceram ligados até o final do teste. A energia radiante foi aplicada por 2 minutos, a cada 15 minutos, durante todo o processo de secagem.

III.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

III.5.1 DISTRIBUIÇÃO DO TEMPO DE RESIDÊNCIA – DTR

III.5.1.1 Curvas obtidas por meio da massa do traçador

Para o levantamento do tempo de residência com base nas frações mássicas, obtiveram-se as seguintes curvas de $E(t)$, $F(t)$ e tempo de residência médio, mostrados nas Figuras III.9 e III.10 e

Tabela III.1:

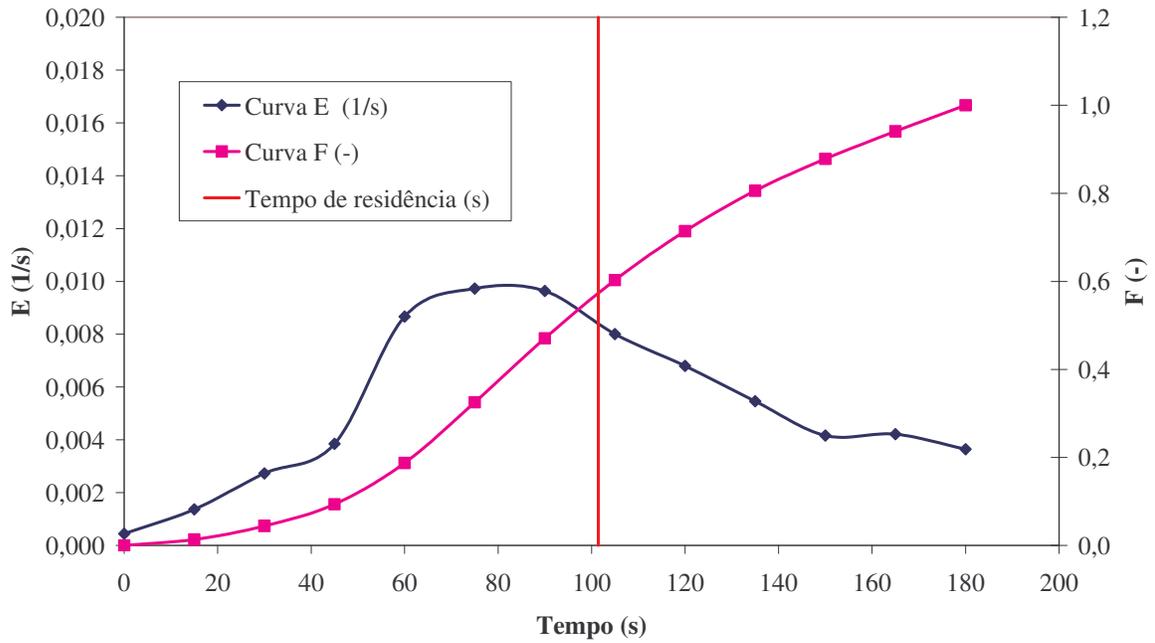


Figura III.9 – Curvas de DTR para o feijão preto - Corrida 1.

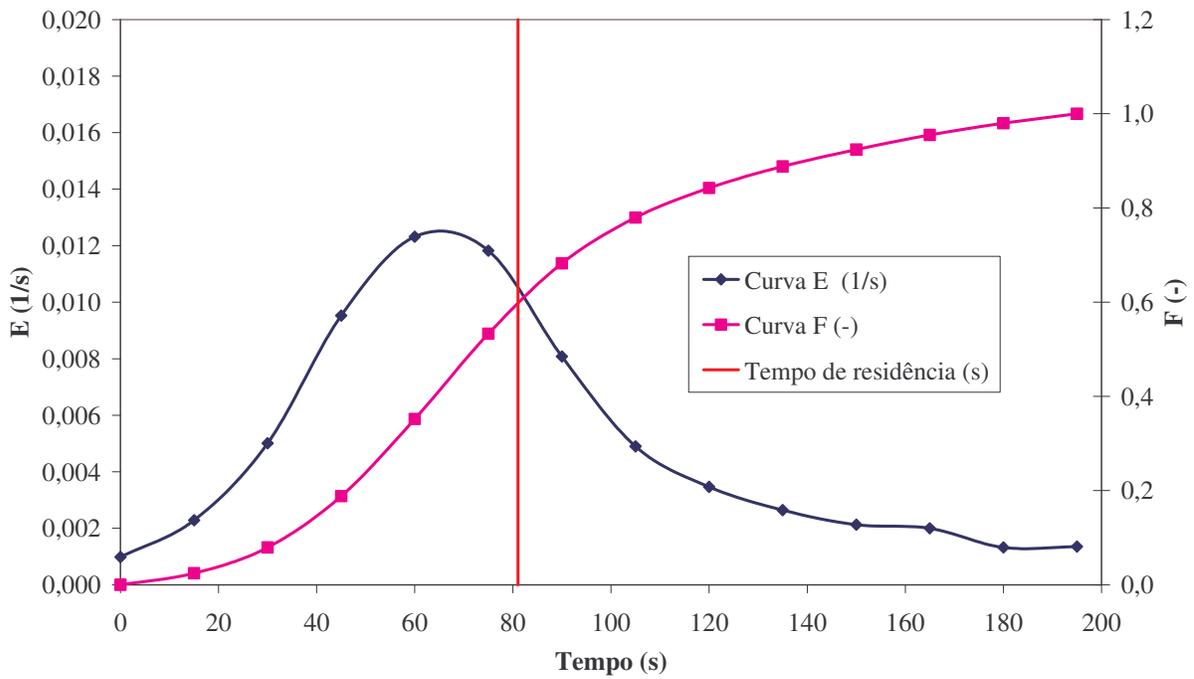


Figura III.10 – Curvas de DTR para o feijão preto - Corrida 2.

Tabela III.1 – Tempo de residência médio (massa).

Corrida	Tempo de residência médio (s)
1	101,44
2	81,06

III.5.1.2 Curvas obtidas por meio das imagens

No levantamento do tempo de residência com base nas imagens, obtiveram-se as seguintes curvas de $E(t)$, $F(t)$ e tempo de residência médio (Figuras III.11 e III.12):

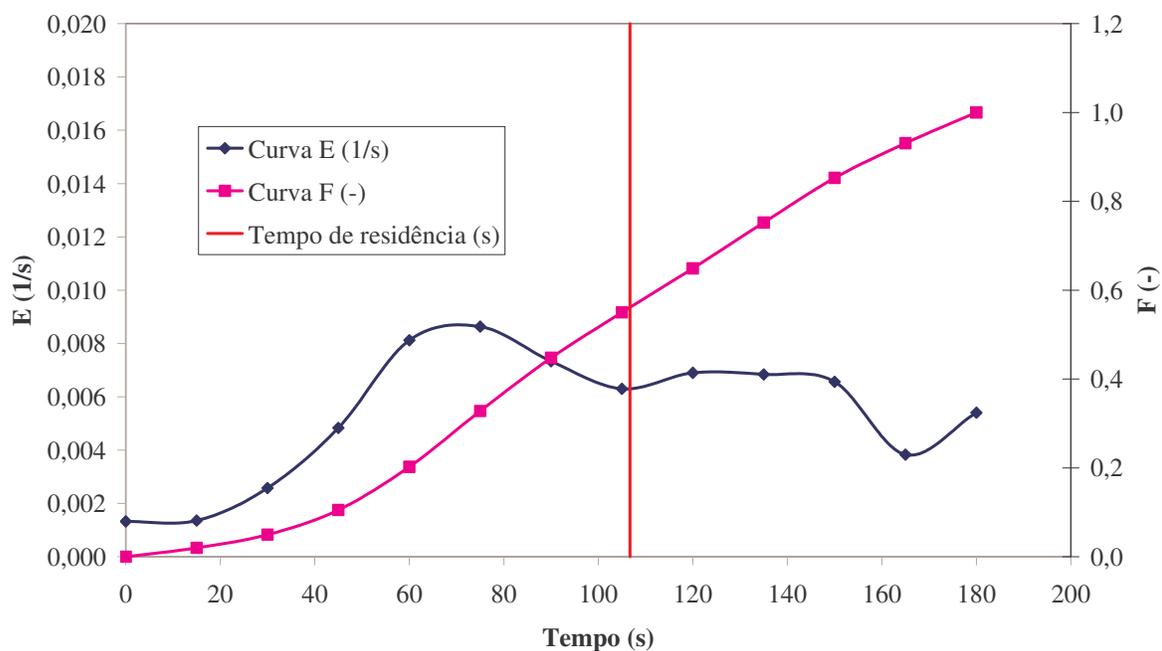


Figura III.11 – Curvas de DTR para o feijão preto - Corrida 1.

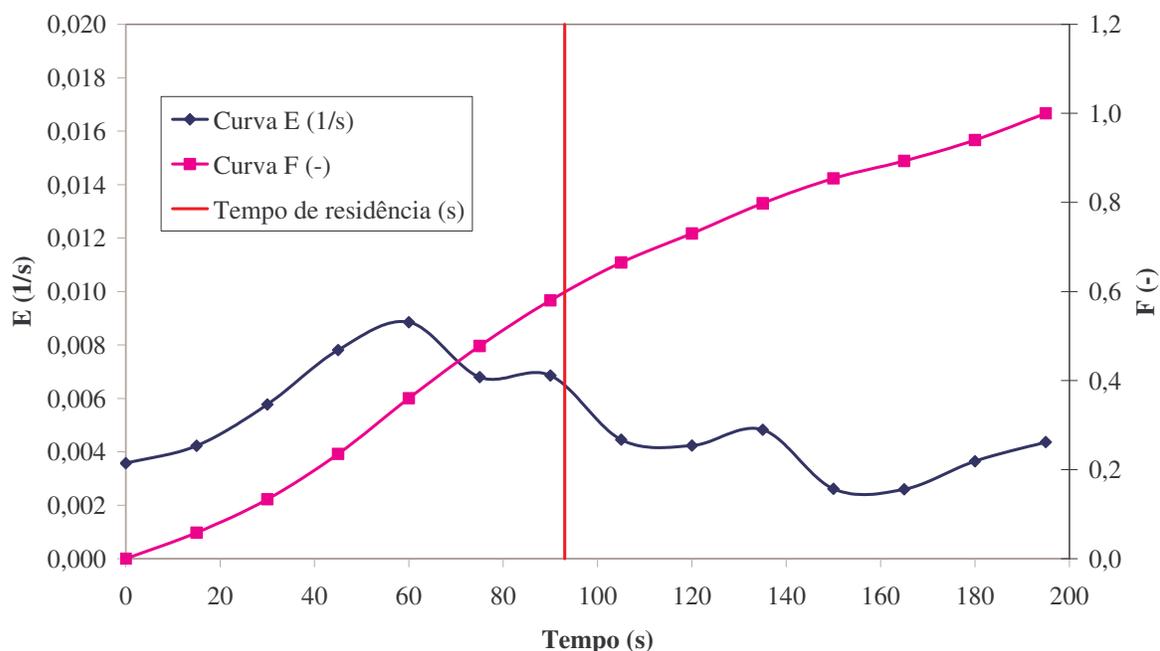


Figura III.12 – Curvas de DTR para o feijão preto - Corrida 2.

A Tabela III.2 mostra os tempos de residência encontrados com as proporções de pixels das imagens, respectivamente.

Tabela III.2 – Tempo de residência médio (imagens).

Corrida	Tempo de residência médio (s)
1	106,70
2	93,04

Comparando-se as Tabelas III.1 e III.2, verifica-se um resultado muito próximo entre os métodos, mostrando a viabilidade da análise por meio de imagens na prática.

Para o tratamento dos dados foi importante o cálculo do limiar ideal de cada amostra. No procedimento adotado, obteve-se uma média desse valor, e então este era aplicado no tratamento das imagens de cada amostra, de uma mesma corrida. Através dos resultados obtidos, observa-se que houve uma pequena diferença entre os métodos, que pode indicar um ajuste melhor do limiar a ser utilizado.

III.5.2 SECAGEM

Para cada ensaio obtiveram-se três curvas do adimensional de umidade Y ao longo do tempo. A primeira curva refere-se aos valores de Y predito para o modelo de Fick de 5 termos para batata cortada em formato de cubos, enquanto que a segunda se refere aos valores para o modelo empírico de Page. Há também a curva com os valores de Y obtidos experimentalmente. As curvas de secagem de batata para cada ensaio são mostradas nas Figuras III.13 a III.17.

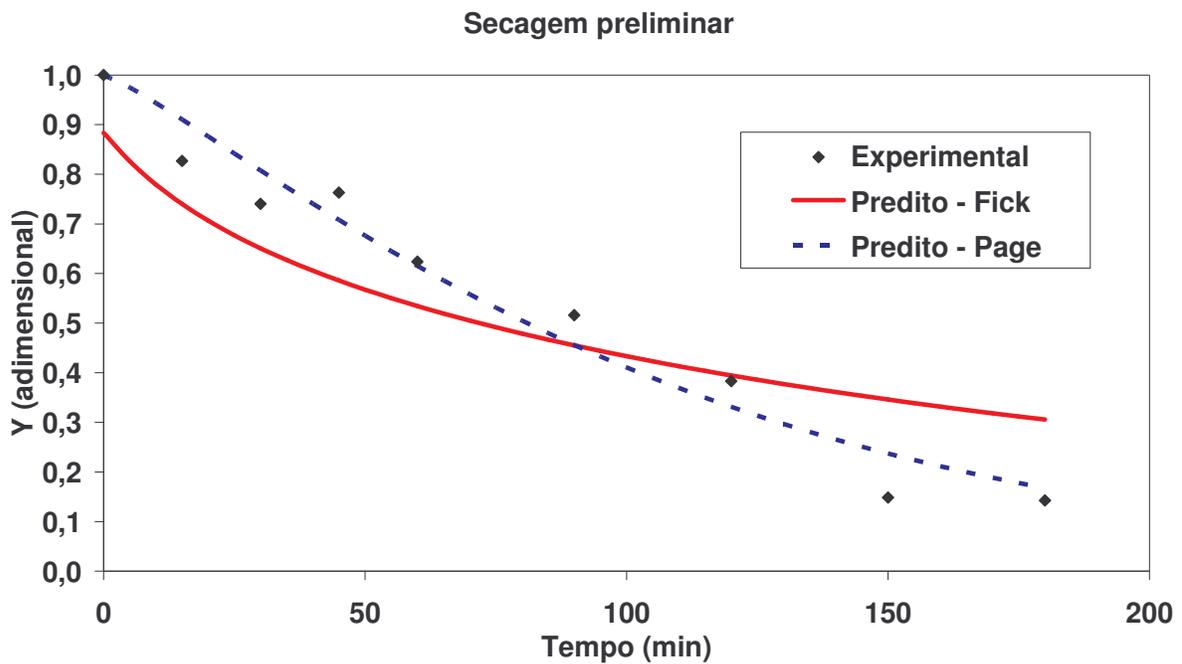


Figura III.13 – Curvas obtidas para o ensaio preliminar de secagem de batata.

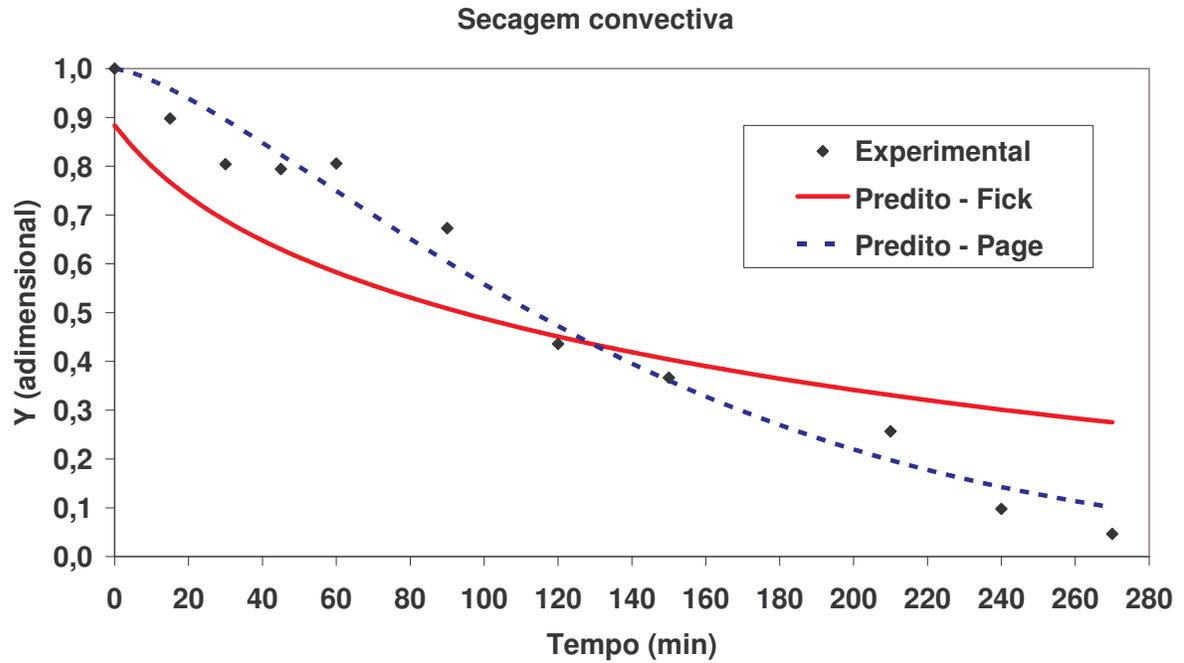


Figura III.14 – Curvas obtidas para o ensaio de secagem convectiva de secagem de batata.

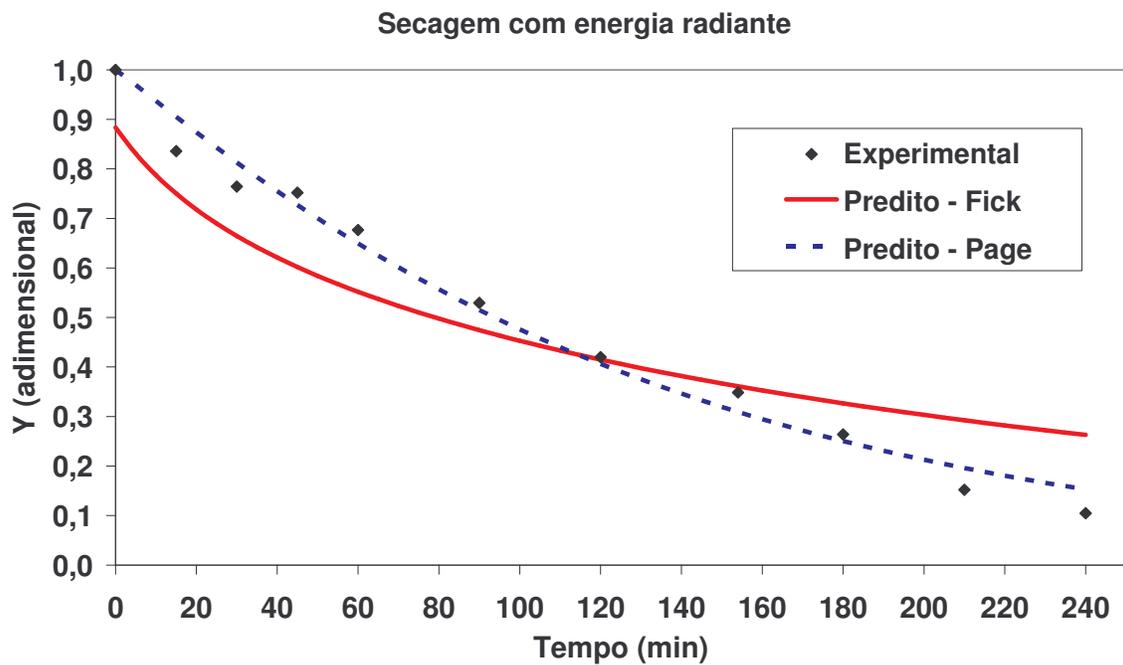


Figura III.15 – Curvas obtidas para o ensaio com aplicação de energia radiante na secagem de batata.

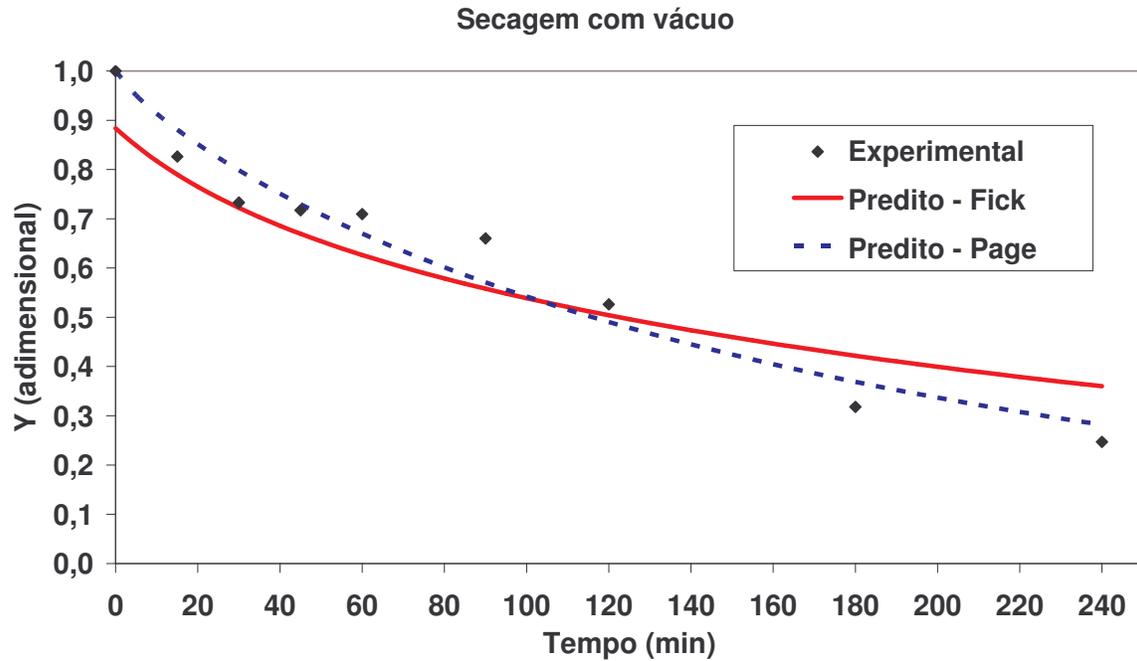


Figura III.16 – Curvas obtidas para o ensaio com aplicação de pulso de vácuo na secagem de batata.

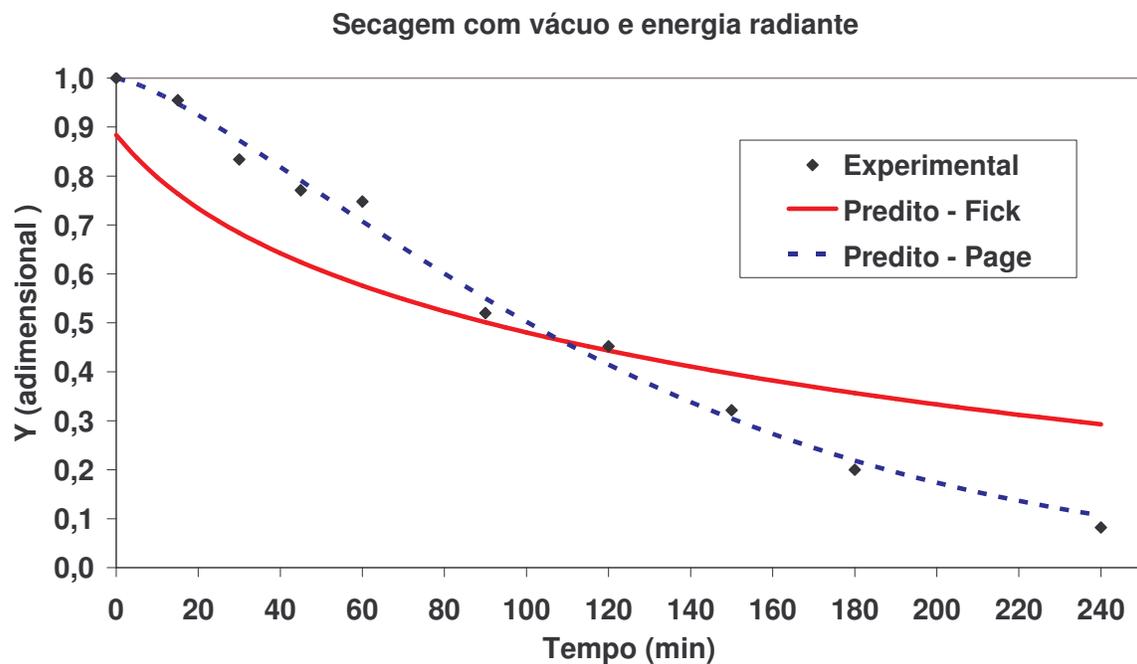


Figura III.17 – Curvas obtidas para o ensaio com aplicação de pulso de vácuo e energia radiante na secagem de batata.

Para cada ensaio de secagem obteve-se um valor para a difusividade efetiva, como pode se observar na Tabela III.3.

Tabela III.3 – Valores da difusividade efetiva para cada ensaio.

Ensaio	D_{ef} (m²/s)
Preliminar	1,58E-10
Secagem convectiva	1,21E-10
Energia radiante	1,44E-10
Aplicação de vácuo	9,26E-11
Energia radiante e vácuo	1,25E-10

Já que a difusividade efetiva está relacionada com a rapidez com que a água é evaporada, pode-se analisar que a secagem com a aplicação apenas de vácuo obteve o menor valor, enquanto que a secagem preliminar, na qual houve a aplicação de vácuo e energia radiante, obteve o maior. Mas como os valores estão na mesma ordem de grandeza, a eficiência de todos os ensaios é muito próxima.

Os dois maiores valores verificados correspondem ao ensaio preliminar e ao ensaio com aplicação de energia radiante. Percebe-se ainda que os ensaios nos quais houve complementação de energia radiante foram os que apresentaram os valores mais altos de difusividade efetiva. Isso sugere os efeitos que a aplicação de maiores quantidades de energia (o que configura em certo aumento de temperatura) e/ou, especificamente, energia radiante tem na remoção de umidade do material.

No ensaio somente com aplicação de vácuo, não houve aplicação de energia radiante por meio dos emissores. É possível que a aplicação desta energia radiante neste período possa aumentar a taxa de secagem. Tal procedimento foi testado em trabalhos mostrados nos Capítulos 4 e 5. Percebe-se ainda que o menor valor de difusividade efetiva foi obtido no ensaio com aplicação de vácuo.

Através da análise comparativa dos gráficos utilizando o modelo de Fick para cubo e o modelo de Page, para cada ensaio realizado, pode-se verificar que o melhor ajuste da curva com os pontos obtidos experimentalmente ocorre com o modelo de Page.

A Tabela III.4 mostra as constantes obtidas para o modelo de Page, para cada ensaio.

Tabela III.4 – Constantes do modelo de Page.

Modelo de Page	Ensaio preliminar	Secagem convectiva	Energia radiante	Aplicação de vácuo	Energia radiante e vácuo
a	0,003787	0,001025	0,005620	0,013359	0,001396
b	1,185522	1,377568	1,060394	0,830595	1,346549

III.6 CONCLUSÕES

Quanto ao processo de construção e adaptação de outros equipamentos no secador agitador/misturador, conclui-se que o secador é uma alternativa viável na aplicação de pulso de vácuo e energia radiante na faixa do infravermelho. Apesar de uma dificuldade inicial em se atingir a vedação hermética da câmara de secagem, conseguiu-se aplicar vácuo de cerca de 470 mmHg. Porém, nos testes de secagem de batata cubetada, foi utilizada um vácuo máximo de 250 mmHg.

A partir dos resultados referentes à determinação do tempo de residência e ao processo de secagem no secador agitador/misturador, pode-se inferir que:

- ✓ A técnica de estímulo e resposta se mostrou satisfatória na determinação da distribuição do tempo de residência no secador agitador/misturador. Esta técnica, juntamente com a análise de imagens digitais, garantem rapidez e praticidade à avaliação do tempo de residência de particulados.
- ✓ Observa-se certa dispersão apresentada pelos dados experimentais em relação aos modelos propostos. No entanto, modelo empírico de Page demonstrou melhor representação dos dados experimentais do que o modelo de Fick para cubo;
- ✓ Em relação aos valores de difusividade efetiva, notou-se que os mais altos valores foram encontrados em ensaios realizados com aplicação de energia radiante infravermelha. O menor valor de difusividade efetiva foi obtido para o ensaio em que houve apenas a aplicação de vácuo.

III.7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASSOCIATION OF OFFICIAL ANALYTICAL CHEMISTS. **Official methods of analysis of A.O.A.C. international**. 16a ed. Arlington: A.O.A.C., Inc., Virginia, 1998.
- ASHRAE, **Handbook of Fundamentals**. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Atlanta, USA, 2001.
- BROD, F.P.R. **Avaliação de um secador vibro-fluidizado**. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Faculdade de Engenharia Agrícola, UNICAMP, Campinas, 2003, 335p.
- CHEN, Z. LAMB, F.M. Analysis of the vacuum drying rate for red oak in a hot water vacuum drying system. **Drying Technology**, v. 25, n. 3, p. 497 – 500, 2007.
- CHIRIFE, J. Fundamentals of the drying mechanism during air dehydration of foods. In: MUJUMDAR, A.S. **Advances in drying**. Washington: Hemisphere Publishing Corporation, 1981. v.1, p.73-102.
- CRANK, J. **The mathematics of diffusion**. 2. ed. Oxford: Clarendon Press, 1975. 414 p.
- CUNNINGHAM, S.E.; MCMINN, W.A.M.; MAGEE, T.R.A.; RICHARDSON, P.S. Effect of processing conditions on the water absorption and texture kinetics of potato. **Journal of Food Engineering**. v. 84. p. 214-223, 2008.
- DATTA, A.K.; ALMEIDA, M. Properties relevant to infrared heating of foods. In: RAO, M.A.; RIZVI, S.S.H.; DATTA, A.K. (Ed.) **Engineering properties of foods**. 3rd ed. Taylor & Francis Group, New York, 2005.
- FITO, P.; CHIRALT, A.; BARAT, J. M.; SPIESS, W. E. L.; BEHSNILIAN, D. **Osmotic Dehydration and Vacuum Impregnation**. Lancaster, Pennsylvania: Technomic Publishing Company, Inc, 2001.
- GREENSMITH, M. **Practical Dehydration**. London: Food Trade, 1971.
- HAN, W.; MAI, B.; GU, T. Residence time distribution and drying characteristics of a continuous vibro-fluidized bed. **Drying Technology**, New York, v.9, n.1, p.159-181, 1991.
- KEEY, R. B. **Drying: principles and practice**. International Series of Monographs in Chemical Engineering, vol. 13. Oxford: Pergamon Press. 1972. 358p.

- KEEY, R. B. **Introduction to industrial drying operations**. Oxford: Pergamon Press, 1978, 376 p.
- KEEY, R. B. **Drying of loose and particulate materials**. New York: Hemisphere Publishing Corporation, 1992. 504 p.
- KING, C. J. Rates of moisture sorption and desorption in porous, dried foodstuffs. **Food Technology**, Chicago, v.22, p.165-71, 1968.
- KREITH, F. **Princípios da transmissão de calor**. Editora Edgard Blücher Ltda., São Paulo, Brasil. 1969. 641 p.
- KWOK, B.H.L., HU, C., DURANCE, T.; KITTS, D.D. Dehydration techniques affect phytochemical contents and free radical scavenging activities of Saskatoon berries (*Amelanchier alnifolia* Nutt). **Journal of Food Science**, v. 69, n. 3, 2004, S122-S126.
- LEVENSPIEL, O. **Engenharia das reações químicas: volume 2 – Cálculo de reatores**. São Paulo: Edgard Blücher, 1974. v. 2, 211p.
- MARRETO, R.N. **Estudo da técnica de leito de jorro convencional para secagem de microcápsulas de caseína e pectina**. Tese de Doutorado apresentada à Faculdade de Ciências Farmacêuticas de Ribeirão Preto/USP. 2006.
- MENON, A. S.; MUJUMDAR, A. S. Drying of solids: principles, classification, and selection of dryers. In: MUJUMDAR, A. S. **Handbook of Industrial Drying**. New York: Marcel Dekker Inc., 1987. Cap. 9, p. 295-326.
- MONGPRANEET, S.; ABE, T.; TSURUSAKI, T. Accelerated drying of welsh onion by far infrared radiation under vacuum conditions. **Journal of Food Engineering**, v. 55, n. 2, p. 147-156, 2002.
- NONHEBEL, G., MOSS, A. A. H. **Drying of solids in the chemical industry**. London: Butterworths, 1971. 301 p.
- PAGE, G.E. **Factors influencing the maximum of air drying shelled corn in thin layer**. M.Sc. Thesis, USA. Purdue University, Indiana, 1949.
- PAN, Y.K.; ZHAO, L.J.; DONG, Z.X.; MUJUMDAR, A.S.; KUDRA, T. Intermittent drying of carrot in a vibrated fluid bed: effect on product quality. **Drying Technology**, v. 17, n. 10, p.

2323 – 2340. 1999.

PARK, K.J.; ANTONIO, G.C.; OLIVEIRA, R.A. de; PARK, K.J.B. **Conceitos de processo de equipamentos de secagem**. Apostila. 121p. 2007. Disponível em:

<http://www.feagri.unicamp.br/ctea/projpesq.html> Acesso em 23 mai. 2008.

PINEDO, A.A. **Secagem a vácuo de cenoura (*Daucus carota*) e abóbora (*Cucurbita maxima*): estudo das características do processo**. 2003, 173p. Tese (Doutorado em Engenharia de Alimentos) – Faculdade de Engenharia de Alimentos, UNICAMP, Campinas.

RAGHAVAN, G.S.V.; ORSAT, V. Recent advances in drying of bio-materials for superior quality bio-products. In: INTERNATIONAL DRYING SYMPOSIUM – IDS' 2006, 15., 2006, Budapest, Hungary. **Proceedings...** Budapest: Szent István University Publisher, 2006. v. A, p. 44-53.

RATTI, C.; MUJUMDAR, A.S. Infrared drying, In: **Handbook of Industrial Drying**, 2nd Edition, edited by Mujumdar, A.S., Marcel Dekker Inc., New York, pp. 567–588, 1995.

SAKAI, N.; MAO, W. Infrared heating. In: SUN, D.W. (Ed.). **Thermal food processing: new technologies and quality issues**. Boca Raton, FL: Taylor & Francis Group, 2006. p. 493 – 525.

SILVA, F. D. da; CAVALCANTI MATA, M. E. R. M.; DUARTE, M.E.M.; SOUZA, J. A.; SILVA, Y. C. Desidratação osmótica de banana da terra (*Musa sapientum*) aplicação de modelos matemáticos. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, Especial, n.1, p.69-76, 2003.

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

SWASDISEVI, T.; DEVAHASTIN, S.; NGAMCHUM, R.; SOPONRONNARIT, S. Optimization of a drying process using infrared-vacuum drying of Cavendish banana slices. **Songklanakarin Journal of Science and Technology**, v. 29, n. 3, p. 809-816, 2007.

SZALAY, A.; ERDÉSZ, K.; ZAGROUBA, F.; ROQUES, M.A. Principles for hydrodynamical and geometrical design of vibrated bed driers. **Drying Technology**, New York, v. 13, n. 5-7, p. 1249-1260, 1995.

TANG, J.; YANG, T. Dehydrated vegetables: principles and systems. In HUI, Y. H.; GHAZALA, S.; GRAHAM, D.M.; MURRELL, K.D.; NIP, W.K. (Ed.). **Handbook of vegetable preservation and processing**. New York, NY: Marcel Dekker, Inc., 2004.

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS – UNICAMP, GOHM TECHNOLOGY.
Campinas – SP, Kil Jin Park, Kil Jin Brandini Park, Tatiane Hae Kyung Park, Rafael Augustus de Oliveira. **Equipamento e processo de secagem de líquidos, semi-sólidos e sólidos a diferentes pressões dotado de agitação e mistura dos componentes**. (PI 0506639-5). 15 de dez. de 2005, 02 de out. de 2007.

“Ao vencedor, as batatas.”

Machado de Assis

CAPÍTULO IV - SECAGEM DE BATATA NO SECADOR AGITADOR/MISTURADOR

IV.1 INTRODUÇÃO

Os produtos agrícolas são colhidos em seus pontos de maturação fisiológica que são considerados por alguns autores como o momento em que o produto detém sua maior qualidade. Após esse momento, suas características se alteram de modo significativo até sua completa deterioração.

A tecnologia pós-colheita trata da manutenção destas características iniciais por um período prolongado. A secagem é o processo responsável por diminuir a atividade de água dos produtos agrícolas com o intuito de preservá-lo da ação da respiração celular e micro-organismos.

Porém, os resultados da ação dos fenômenos envolvidos no processo de secagem alteram as propriedades físicas, químicas e sensoriais dos produtos. Busca-se, então, um processo que minimize essas alterações ao ponto em que não haja consequências aos processos e utilização subsequentes.

As propriedades mecânicas dos materiais biológicos são importantes no processamento destes produtos na indústria alimentícia. Processos como prensagem, moagem, corte, entre outros, são influenciados por estas características. Além disso, a textura dos produtos, caso sejam consumidos após a secagem, também é relacionada às suas propriedades mecânicas. Dessa forma, evidencia-se a necessidade em se determinar o comportamento destas

características após as mudanças geradas pelo processo de secagem.

IV.2 OBJETIVOS

- ✓ Avaliar a secagem de batata Bintje em secador agitador/misturador por meio de planejamento experimental;
- ✓ Avaliar o módulo de elasticidade da batata após secagem em secador agitador/misturador, utilizando secagem convectiva, pulso de vácuo e aplicação de energia radiante infravermelha.

IV.3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

IV.3.1 SECAGEM

IV.3.1.1 Cinética de secagem

Os produtos biológicos são muito diferentes entre si, devido a sua forma, estrutura, composição e suas dimensões, além das condições de secagem serem muito diversas, de acordo com 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 do calor do ar ao produto sob o efeito da diferença de temperatura existente entre eles. Simultaneamente, a diferença de pressão parcial de vapor de água existente entre o ar e a superfície do produto determina uma transferência de vapor para o ar. Uma parte do calor que chega ao produto é utilizada para vaporizar a água e a outra para elevar a temperatura do material (DAUDIN, 1983).

A evolução destas transferências simultâneas de calor e de massa no decorrer da operação de secagem faz com que esta seja dividida esquematicamente em três períodos: período de indução, período de taxa constante e período de taxa decrescente de secagem (Figura IV.1).

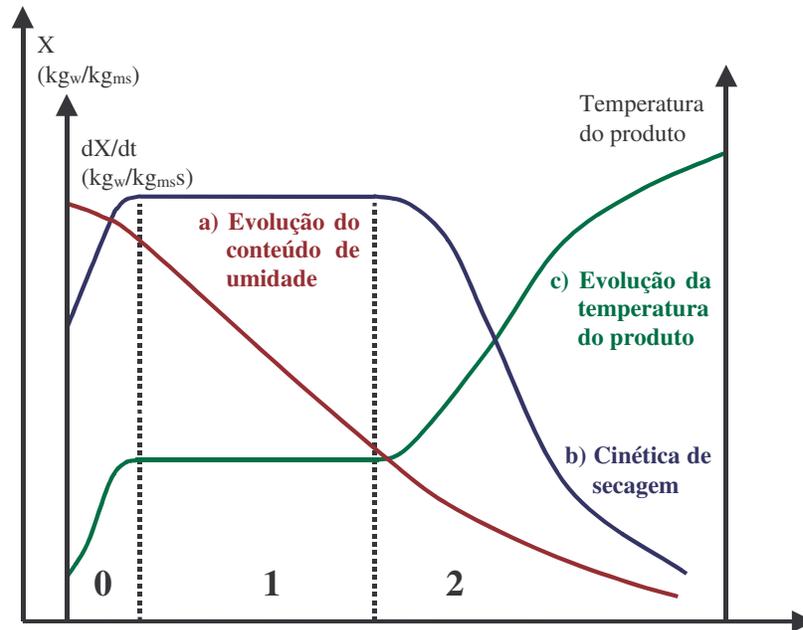


Figura IV.1 – Curva de secagem.

A curva (a) representa a diminuição do teor de água do produto durante a secagem (conteúdo de umidade do produto, $X = X_{BS}$, em relação a 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 a 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.

Descrevendo os três períodos, tem-se:

Período 0

O período de indução ou o período de se entrar em regime operacional. No começo, o produto é geralmente mais frio do que ar, e a pressão parcial de vapor da água na superfície do produto (p) é débil, e por consequência, a transferência de massa e a velocidade de secagem também são débeis. O calor chegando em excesso acarreta uma elevação da temperatura do produto ocorrendo um aumento de pressão e da velocidade de secagem. Este fenômeno continua até que a Transferência de Calor compense exatamente a Transferência de Massa. Se

a temperatura do ar for inferior àquela do produto esta última diminuirá até atingir o mesmo estado de equilíbrio. A duração deste período é insignificante em relação ao período total de secagem.

Período 1

O período de velocidade (taxa) constante de secagem. Durante este período, como no anterior, a quantidade de água disponível dentro do produto é bem grande. A água evapora-se como água livre. A pressão de vapor de água na superfície é constante e é igual à pressão de vapor de água pura à temperatura do produto. A temperatura do produto, por sua vez, é também constante e é igual à temperatura de bulbo úmido, característica do fato de que as transferências de calor e de massa se compensam exatamente. A velocidade de secagem é, por conseguinte, constante.

Este período continua, enquanto a migração de água do interior até a superfície do produto seja suficiente para acompanhar a perda por evaporação de água na superfície.

É bom ressaltar que para os materiais biológicos é difícil a existência deste período, pois as condições operacionais de secagem são tais que, as resistências de transferências de massa encontram-se essencialmente no interior do produto, fazendo com que a taxa de evaporação da superfície ao ambiente seja bem superior à taxa de reposição de umidade do interior à superfície do material.

Período 2

O período de velocidade (taxa) decrescente de secagem. Desde o momento em que a água começa a ser deficiente na superfície, a velocidade de secagem diminui.

Apesar de alguns autores definirem o valor de teor de água do produto no ponto de transição entre os períodos 1 e 2 como sendo o teor de água crítico, é conveniente denominar este ponto como o ponto de inflexão de taxa constante à taxa decrescente de secagem, pois este ponto, longe de ser uma propriedade física do material, depende inclusive das condições operacionais de secagem. Durante este período, a troca de calor não é mais compensada, conseqüentemente, a temperatura do produto aumenta e tende assintoticamente à temperatura do ar. Durante todo este período o fator limitante é a migração interna de água. Esta redução da taxa (ou velocidade) de secagem é às vezes interpretada como uma diminuição da

superfície molhada no período 2, mas a interpretação mais frequente é pelo abaixamento da pressão parcial de vapor de água na superfície. No final deste período o produto estará em equilíbrio com o ar ($X = X_{eq}$) e a velocidade de secagem é nula.

Na secagem da maioria dos produtos biológicos, somente o período de secagem à taxa decrescente está presente. Durante este período, a troca de calor não é mais compensada; conseqüentemente, a temperatura do produto aumenta e tende assintoticamente à temperatura do ar. Por todo este período o fator limitante é a migração interna de água. Esta redução da taxa (ou velocidade) de secagem é, às vezes, interpretada como uma diminuição da superfície molhada no período de taxa decrescente, mas a interpretação mais frequente é pelo abaixamento da pressão parcial de vapor de água na superfície. No final deste período o produto estará em equilíbrio com o ar e a velocidade de secagem é nula.

Sherwood (1929 a e b), descrevendo a secagem do pescado, observou que o período de taxa constante é muito mais curto do que aquele indicado para a categoria. Saravacos e Charm (1962) e Fornell, Bimbenet e Almin (1980) indicavam também, curtos períodos de taxa constante para os produtos alimentares, com a temperatura do produto evoluindo de sua temperatura inicial até a temperatura do ar, sem estabilizar na temperatura de bulbo úmido.

Os métodos de cálculo da cinética de secagem são aplicados de modo diferente dependendo do período de secagem considerado. No período de taxa constante de secagem são as transferências de calor e de massa na interface ar-produto que governam a secagem e fixam a velocidade de secagem, enquanto, que no segundo período, são as transferências internas que são limitantes (DAUDIN, 1983).

IV.3.2 PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS MATERIAIS BIOLÓGICOS

Um material é dito contínuo quando a matéria de que é constituído esse material se distribui de forma contínua por todo seu volume, ocupando todos os espaços vazios. Já um material homogêneo possui propriedades idênticas em todas as regiões, denominados isotrópicos, quando suas propriedades se mantêm em todas as direções e anisotrópicos quando suas propriedades variam com a direção (MASE, 1970).

Quando um corpo é submetido a uma deformação, forças internas atuam gerando energia potencial de deformação. Quando essa deformação é interrompida, o corpo volta ao

seu estado original. Esta característica dos corpos voltarem à forma inicial, após a retirada da carga, é chamada de elasticidade.

Muitos materiais são considerados elásticos entre determinados limites que dependem das propriedades de cada material.

O objetivo mais comum nas pesquisas dessa área é a determinação das quatro constantes elásticas: módulo de elasticidade ou módulo de Young (E), constante de Poisson (ν), módulo de elasticidade transversal (G) e módulo volumétrico (K). A determinação dessas constantes elásticas é assunto frequente devido à necessidade de informações básicas sobre as propriedades do material (LAURENTI, 2003).

O módulo de elasticidade é determinado aplicando-se tensão uniaxial em espécimes cúbicos ou longitudinalmente em espécimes cilíndricos. Isto equivale a impor as condições de contorno $\sigma_{11} \neq 0$, $\varepsilon_{11} \neq 0$, $\varepsilon_{22} = \varepsilon_{33} \neq 0$, $\sigma_{22} = \sigma_{33} = 0$, observando a Figura IV.2 – Cubo Elementar de Tensões à Lei de Hooke Generalizada, o que resulta em:

$$\sigma_{11} = E\varepsilon_{11} \tag{20}$$

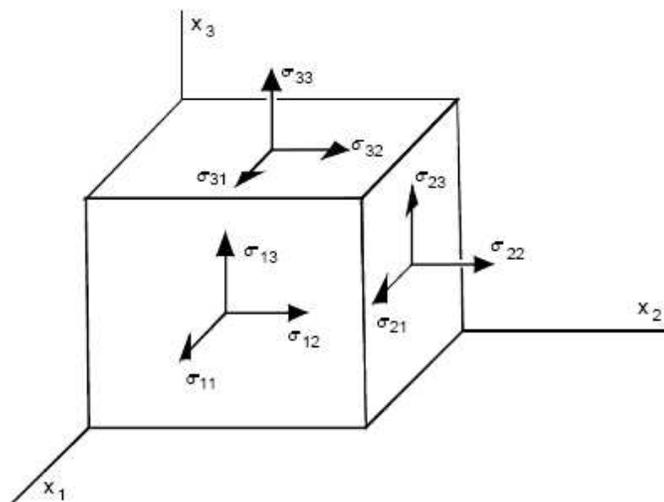


Figura IV.2 – Cubo elementar de tensões.

IV.3.2.1 Rigidez

As medidas de massa e rigidez são necessárias para o cálculo da frequência natural, para o sistema de um grau de liberdade. Sendo a rigidez definida como a força necessária para

produzir uma unidade de deslocamento específico, tem-se a seguinte equação:

$$k = \frac{F}{x} \quad (21)$$

IV.4 MATERIAL E MÉTODOS

IV.4.1 SECADOR AGITADOR/MISTURADOR

O secador contínuo utilizado neste trabalho foi o secador com agitador/misturador, que foi construído baseado na patente industrial PI 0506639-5 (UNIVERSIDADE..., 2007).

O sistema de secagem (Figura IV.3) inclui o corpo do secador (1), o sistema de ventilação (2), o sistema de aquecimento (3), o sistema de alimentação (4) e movimentação de sólidos (5) e a bomba de vácuo (6). O secador com agitador/misturador consiste em um corpo cilíndrico provido de fundo perfurado, através do qual o ar secante entra no corpo após atravessar o plenum. A movimentação do produto é dada por um eixo conectado a pás movido por um motorreductor (5).



Figura IV.3 – Secador Agitador/Misturador – SAM.

O secador faz parte de um sistema de secagem composto por um ventilador de insuflamento (2), sistema de aquecimento por resistências elétricas (3), tubulações e uma válvula de regulação do reaproveitamento do ar (7). Os emissores de radiação infravermelha estão dispostos longitudinalmente na parte superior da câmara de secagem. Dessa forma, o produto recebe a radiação infravermelha durante todo o período em que permanece sob as condições de secagem.

Os sistemas de ventilação e pressão contidos no secador agitador/misturador são munidos de válvulas de regulação que permitem variar e controlar pressão e velocidade do ar no interior do secador. É possível com isso, utilizá-lo em processo de secagem a vácuo.

IV.4.2 SECAGEM DE BATATA

Para os ensaios de secagem o produto escolhido foi batata (*Solanum tuberosum* L.) variedade Bintje. A batata foi escolhida pela facilidade em se cortar amostras homogêneas e em formato geométrico simples, condições que facilitam a avaliação das características mecânicas do produto. Primeiramente, as batatas passaram por um cortador específico para o corte em formato “palito”. Após este procedimento, foram cortadas manualmente em cubos de cerca de 1 cm de lado.

As batatas cortadas em cubos foram submetidas a um processo de conservação. Esse material foi imerso por cerca de três minutos em solução de metabissulfito de sódio a 1%. O metabissulfito de sódio, composto inorgânico de fórmula química $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$, foi utilizado como antioxidante. Após a imersão, os cubos foram escorridos, e colocados em sacos plásticos, lacrados e colocados no freezer até o momento de utilização.

Os ensaios seguiram os parâmetros operacionais definidos pelo planejamento experimental fatorial 2^4 , mostrado na Tabela IV.1, adotando-se como variáveis independentes: aplicação de vácuo (V), aplicação de energia radiante (R), temperatura de secagem (T) e velocidade do ar (U).

Tabela IV.1 – Níveis das variáveis codificadas e reais para o planejamento experimental da secagem.

Ensaio	Variável codificada				Variável real				
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	V [min]	R [min/15min]	T [°C]	U [m/s]	
Pontos fatoriais	1	-1	-1	-1	-1	0	0,0	35	0,85
	2	1	-1	-1	-1	30	0,0	35	0,85
	3	-1	1	-1	-1	0	3,0	35	0,85
	4	1	1	-1	-1	30	3,0	35	0,85
	5	-1	-1	1	-1	0	0,0	55	0,85
	6	1	-1	1	-1	30	0,0	55	0,85
	7	-1	1	1	-1	0	3,0	55	0,85
	8	1	1	1	-1	30	3,0	55	0,85
	9	-1	-1	-1	1	0	0,0	35	1,25
	10	1	-1	-1	1	30	0,0	35	1,25
	11	-1	1	-1	1	0	3,0	35	1,25
	12	1	1	-1	1	30	3,0	35	1,25
	13	-1	-1	1	1	0	0,0	55	1,25
	14	1	-1	1	1	30	0,0	55	1,25
	15	-1	1	1	1	0	3,0	55	1,25
	16	1	1	1	1	30	3,0	55	1,25
Pontos centrais	17	0	0	0	0	15	1,5	45	1,05
	18	0	0	0	0	15	1,5	45	1,05
	19	0	0	0	0	15	1,5	45	1,05
	20	0	0	0	0	15	1,5	45	1,05

Em intervalos previamente definidos, amostras eram retiradas e, em estufa de convecção forçada, seus respectivos teores de água foram determinados.

IV.4.3 TESTES DE COMPRESSÃO UNIAXIAL

Foram empregados espécimes cúbicos secos de batata (*Solanum tuberosum* L.) variedade Bintje, como corpos de prova. Esses espécimes eram oriundos dos ensaios de secagem no secador agitador/misturador, armazenados em geladeira por cerca de 10 dias e colocados em ambiente com sílica-gel para que todas as amostras atingissem um mesmo teor de água. O teor de água apresentado pelas amostras foi de $0,20 \pm 0,04$ em base seca.

Para os ensaios de compressão utilizou-se uma Máquina Universal de Ensaios ou Texturômetro, modelo LOYD TA 500, fabricado pela Lloyd Instruments, de origem inglesa, munido de um software “NEXYGEN” para aquisição e cálculo dos dados coletados. Trata-se de uma prensa clássica equipada com uma célula de carga de capacidade de 500 N. Esse equipamento possibilita impor força ou deformação em função do tempo.

Os dados obtidos pelos ensaios de compressão foram analisados estatisticamente pelo pacote estatístico embutido no programa Nexygen.

IV.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

IV.5.1 SECAGEM DE BATATA

Os ensaios foram realizados conforme planejamento experimental fatorial anteriormente descrito. Os resultados podem ser visualizados no Apêndice F. Como exemplo, a Figura IV.4 mostra curvas características encontradas nos ensaios de secagem.

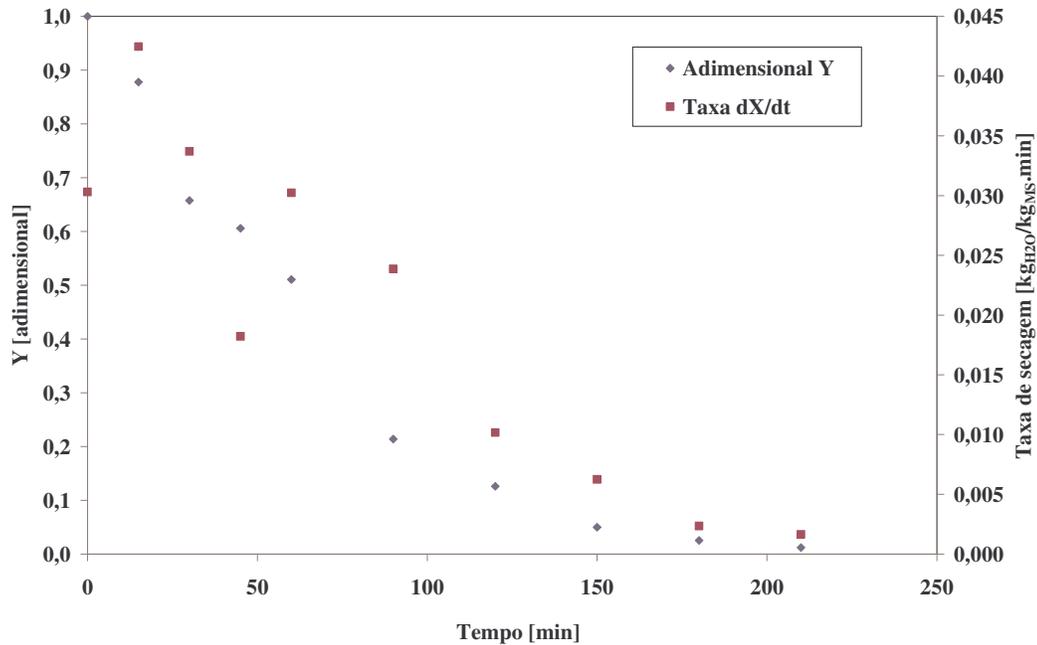


Figura IV.4 – Curva de secagem da batata – ensaio 15.

Em alguns casos, notam-se a presença de períodos de taxa constante, taxa linearmente decrescente e taxa decrescente. Dessa forma, optou-se em aplicar, como forma de se obter uma resposta regular a ser usada como variável dependente, um intervalo de análise. A taxa de secagem média para todo o tempo experimental de secagem foi escolhida como variável dependente, ou seja, foi contabilizado todo o período de secagem, assim como, a diferença total de teor de água das amostras. Como período de secagem foi definido o período compreendido entre o ponto experimental inicial ($Y = 1$) até a última medição do teor de água no processo de secagem (final do ensaio experimental).

Na Tabela IV.2 estão apresentados os valores de taxa de secagem (dX/dt), obtidos experimentalmente do processo de secagem de batatas cubetadas congeladas, seguindo o planejamento experimental fatorial completo 2^4 com quatro pontos centrais

Tabela IV.2 – Taxa de secagem para o planejamento experimental da secagem de batata.

	Ensaio	Variáveis independentes				Variável dependente
		X _V	X _R	X _T	X _U	dX/dt [kg _{H2O} /kg _{MS} .min]
Pontos fatoriais	1	-1	-1	-1	-1	0,0077
	2	1	-1	-1	-1	0,0064
	3	-1	1	-1	-1	0,0151
	4	1	1	-1	-1	0,0181
	5	-1	-1	1	-1	0,0178
	6	1	-1	1	-1	0,0121
	7	-1	1	1	-1	0,0131
	8	1	1	1	-1	0,0151
	9	-1	-1	-1	1	0,0083
	10	1	-1	-1	1	0,0125
	11	-1	1	-1	1	0,0137
	12	1	1	-1	1	0,0118
	13	-1	-1	1	1	0,0115
	14	1	-1	1	1	0,0115
Pontos centrais	15	-1	1	1	1	0,0175
	16	1	1	1	1	0,0149
	17	0	0	0	0	0,0129
	18	0	0	0	0	0,0141
	19	0	0	0	0	0,0164
	20	0	0	0	0	0,0155

Os resultados da análise estatística aplicada aos dados experimentais de taxa de secagem (dX/dt) na secagem de batata cubetada foram determinados através do erro puro, e estão apresentados na Tabela IV.3. Os efeitos dos fatores lineares e da interação estão em negrito e são significativos a 5% de significância ($p \leq 0,05$).

Tabela IV.3 – Efeito estimado, erro padrão e grau de significância estatística (p) para a taxa de secagem de amostras de batata.

Variáveis	Efeito	Erro padrão	p
Média	0,01330	0,00035	0,0000
Vácuo V (linear)	-0,00029	0,00078	0,7355
Radiação R (linear)	0,00395	0,00078	0,0147
Temperatura T (linear)	0,00248	0,00078	0,0495
Velocidade U (linear)	-0,00046	0,00078	0,5951
Interação V x R	0,00041	0,00078	0,6359
Interação V x T	-0,00128	0,00078	0,1977
Interação V x U	0,00020	0,00078	0,8093
Interação R x T	-0,00202	0,00078	0,0801
Interação R x U	-0,00041	0,00078	0,6356
Interação T x U	-0,00022	0,00078	0,7984

Os efeitos lineares da aplicação de energia radiante infravermelha (R) e da temperatura do ar (T) exercem influência sobre a variável dependente, apresentando efeito positivo nos valores obtidos para taxa de secagem (dX/dt). Um efeito positivo indica que o aumento desta variável independente acarreta em um aumento da variável dependente, enquanto que um efeito negativo indica o inverso, ou seja, o aumento do valor da variável independente ocasiona a diminuição da resposta.

Os efeitos de interação não foram significativos a 5% de significância. Os fatores da aplicação de radiação infravermelha intermitente e da temperatura do ar de secagem apresentaram efeito positivo para a taxa de secagem, ou seja, um aumento nestes fatores acarreta num aumento da taxa de secagem. A aplicação de radiação infravermelha apresentou maior efeito sobre a taxa de secagem de batata, comparativamente à temperatura de secagem.

Após eliminar os efeitos não significativos, foi verificada, através da Análise de Variância (ANOVA), a significância da regressão e da falta de ajuste a 5% de significância, utilizando um teste F para o planejamento estudado. Na Tabela IV.4 mostra a análise de variância do modelo gerado pela análise do erro puro.

Tabela IV.4 – Análise de variância (ANOVA) para a taxa de secagem para amostras de batata cubetadas e congeladas.

Fonte de variação	Soma Quadrática	Graus de Liberdade	Média Quadrática	F _{calc}	F _{tab}	R ²
Regressão	8,71E-05	2	4,35E-05	6,43	3,59	0,431
Resíduo	1,15E-04	17	6,77E-06			
Falta de ajuste	1,08E-04	14	7,71E-06	3,19	8,71	
Erro puro	7,25E-06	3	2,42E-06			
Total	2,02E-04	19				

Analisando os valores obtidos na Tabela IV.4, observa-se que o modelo apresentou regressão significativa (F_{calc} maior que F_{tab}). Apesar do modelo não apresentar os requisitos propostos por Box e Wetz (1993) para torná-lo um modelo preditivo, não há evidência de falta de ajuste e, portanto, o modelo é válido para representar os resultados obtidos. É necessário lembrar que o coeficiente de determinação (R^2) obtido foi de apenas 0,431, indicando que o modelo explicou somente 43,1% da variação dos dados experimentais.

O modelo proposto para representar a taxa de secagem de batatas cubetadas congeladas está apresentado na equação codificada mostrada a seguir:

$$\frac{dX}{dt} \left[\frac{\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}}{\text{kg}_{\text{MS}} \cdot \text{min}} \right] = 0,01330 + 0,00197 X_R + 0,00124 X_T \quad (22)$$

Considerando que o desvio relativo médio encontrado para este modelo foi de cerca de 16%, pode-se considerar que o modelo de superfície de resposta é válido para as condições do processo estudadas (Equação 22). Assim, foram geradas as superfícies de resposta e as curvas em nível para a taxa de secagem, como mostradas na Figura IV.5.

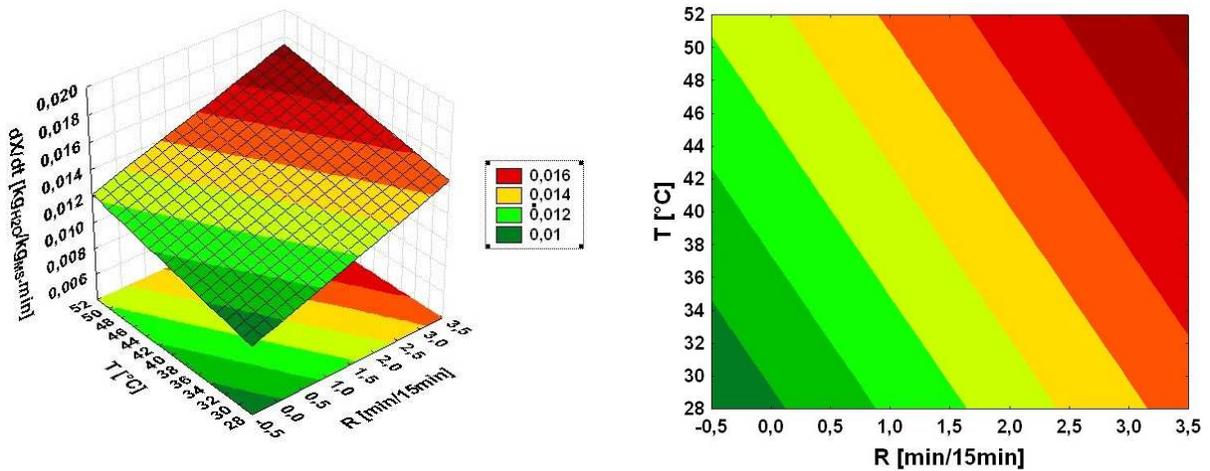


Figura IV.5 – Superfície de resposta e curvas em nível para os parâmetros da secagem de batatas cubetadas congeladas – em nível intermediário (0) das demais variáveis.

Em todos os casos, o aumento dos valores das variáveis independentes acarreta um aumento na variável dependente.

IV.5.2 TESTES DE COMPRESSÃO

Na Tabela IV.5 estão apresentados os resultados da compressão dos espécimes de batata secos. Esses resultados são oriundos da compressão do material resultante do processo de secagem de batata.

Tabela IV.5 – Módulo de Young (E) para o planejamento experimental de secagem de batata.

	Ensaio	Variáveis independentes				Variável dependente
		X _V	X _R	X _T	X _U	E [MPa]
Pontos fatoriais	1	-1	-1	-1	-1	40
	2	1	-1	-1	-1	52
	3	-1	1	-1	-1	53
	4	1	1	-1	-1	100
	5	-1	-1	1	-1	46
	6	1	-1	1	-1	52
	7	-1	1	1	-1	46
	8	1	1	1	-1	68
	9	-1	-1	-1	1	58
	10	1	-1	-1	1	67
	11	-1	1	-1	1	45
	12	1	1	-1	1	106
	13	-1	-1	1	1	74
	14	1	-1	1	1	50
	15	-1	1	1	1	48
	16	1	1	1	1	52
Pontos centrais	17	0	0	0	0	37
	18	0	0	0	0	37
	19	0	0	0	0	37
	20	0	0	0	0	41

O planejamento experimental foi realizado a fim de se obter a influência das variáveis independentes do processo de secagem (aplicação do pulso de vácuo – V, aplicação de radiação infravermelha – R, temperatura – T e velocidade do ar – U) sobre a variável dependente que foi o módulo de elasticidade ou módulo de Young (E) da batata seca.

Os resultados da análise estatística aplicada aos dados experimentais do módulo de elasticidade resultantes da compressão da batata seca são apresentados na Tabela IV.6. Em negrito, estão os efeitos dos fatores lineares e de interação significativos, admitindo um intervalo de confiança de 95%, ou seja, um nível de significância de 5% ($p \leq 0,05$), para a análise por meio do erro puro.

Tabela IV.6 – Efeito estimado, erro padrão e grau de significância estatística (p) para o módulo de Young de amostras de batatas secas.

Variáveis	Efeito	Erro padrão	p
Média	55,307	0,448	0,0000
Vácuo V (linear)	17,326	1,001	0,0004
Radiação R (linear)	9,700	1,001	0,0023
Temperatura T (linear)	-10,557	1,001	0,0018
Velocidade U (linear)	5,361	1,001	0,0127
Interação V x R	16,247	1,001	0,0005
Interação V x T	-15,147	1,001	0,0006
Interação V x U	-4,490	1,001	0,0207
Interação R x T	-11,697	1,001	0,0013
Interação R x U	-9,332	1,001	0,0026
Interação T x U	-2,329	1,001	0,1025

Todos os efeitos lineares e de interação das variáveis exercem influência sobre a variável dependente, exceto a interação entre temperatura e velocidade do ar. Um efeito positivo indica que o aumento desta variável independente acarreta em um aumento da variável dependente, enquanto que um efeito negativo indica o inverso, ou seja, o aumento do valor da variável independente ocasiona a diminuição da resposta.

O parâmetro que exerceu maior influência foi a aplicação do vácuo.

Após a retirada dos termos não significativos foi feita uma análise de variância (ANOVA) e aplicado o teste F para se verificar a significância da regressão e gerar os modelos preditivos. A Tabela IV.7 mostra a análise de variância do modelo gerado pela análise do erro puro.

Tabela IV.7 – Análise de variância (ANOVA) para o Módulo de Young (E) de amostras de batata secas.

Fonte de variação	Soma Quadrática	Graus de Liberdade	Média Quadrática	F_{calc}	F_{tab}	R^2
Regressão	5,11E+03	10	5,11E+02	2,33	3,14	0,721
Resíduo	1,97E+03	9	2,19E+02			
Falta de ajuste	1,96E+03	6	3,27E+02	81,45	8,94	
Erro puro	1,20E+01	3	4,01E+00			
Total	7,08E+03	19				

Por meio da análise de variância verifica-se que o modelo apresentou regressão não significativa (F_{calc} inferior ao F_{tab}) e o coeficiente de determinação (R^2) obtido para o modelo ajustado foi de 0,721, indicando que o modelo explicou 72,1% da variação dos dados observados.

Apesar do coeficiente de determinação relativamente alto, a variabilidade (foram realizados seis ensaios de compressão para cada ensaios de secagem) dos resultados possivelmente inviabilizou a análise. Possivelmente, esse acontecimento foi potencializado pela variabilidade intrínseca aos produtos biológicos com relação à heterogeneidade do material. Porém, somente este motivo não evidencia tal variabilidade. Dessa forma, recomenda-se uma maior amostragem em trabalhos futuros.

Na Figura IV.6 está um exemplo de teste de compressão.

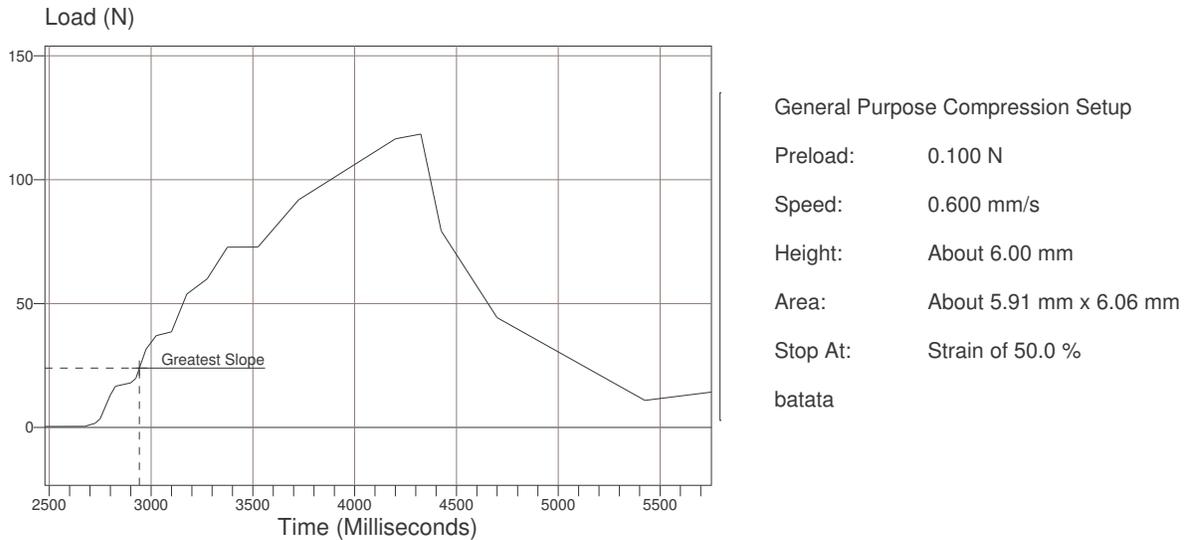


Figura IV.6 – Curva do teste de compressão para espécime cúbico de batata seca – amostra do ensaio 14.

IV.6 CONCLUSÕES

A variação do comportamento da secagem de batata em relação às taxas de secagem inviabilizou o tratamento das curvas de cinética de secagem baseado nos períodos específicos de diminuição de teor de água. A análise destas curvas por meio das taxas de secagem em todo o período se mostrou satisfatória na obtenção da velocidade de diminuição do teor de água. Na secagem de batata, somente os efeitos lineares da aplicação da radiação infravermelha intermitente e da temperatura do ar de secagem foram considerados estatisticamente significativos.

Quanto aos ensaios de compressão, evidencia-se a independência do módulo de elasticidade da batata após a secagem, perante os parâmetros operacionais escolhidos, que foram: aplicação de pulso de vácuo, aplicação de energia radiante infravermelha, temperatura e velocidade do ar de secagem.

IV.7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

DAUDIN, J.D. **Calcul des cinétiques de séchage par l'air chaud des produits biologiques solides**. Sciences des Aliments, Paris, v.3, p.1-36, 1983.

FORNELL, A.; BIMBENET, J.J.; ALMIN, Y. Experimental-study and modelization for air drying of vegetable products. **Lebensmittel-Wissenschaft & Technologie**, London, v. 13, n. 2, p. 96-100, 1980.

LAURENTI, R. **Efeito de esforços vibracionais na estrutura do tecido vegetal**. Tese (Tese de Doutorado). Faculdade de Engenharia Agrícola – Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2003.

MASE, G. E. **Theory and Problems of Continuum Mechanics**. New York: McGrawHill, 1970. 221p. (Schaum's Outline Series).

SARAVACOS, G.D.; CHARM, S.E. **A study of the mecanism of fruit and vegetable dehydration**. Food Technology, Chicago, v.16, p.78-81, 1962.

SHERWOOD, T.K. **The Drying of Solids (I)**. Industrial and Engineering Chemistry, Washington, v. 21, n. 1, p. 12-16, 1929 a.

SHERWOOD, T.K. **The Drying of Solids (II)**. Industrial and Engineering Chemistry, Washington, v. 21, n. 10, p. 976-980, 1929 b.

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS – UNICAMP, GOHM TECHNOLOGY. Campinas – SP, Kil Jin Park, Kil Jin Brandini Park, Tatiane Hae Kyung Park, Rafael Augustus de Oliveira. **Equipamento e processo de secagem de líquidos, semi-sólidos e sólidos a diferentes pressões dotado de agitação e mistura dos componentes**. (PI 0506639-5). 15 de dez. de 2005, 02 de out. de 2007.

“The drying up a single tear has more of honest fame, than shedding seas of gore.”

“Secar uma só lágrima merece mais honesta fama, do que verter mares de sangue.”

Lord Byron

CAPÍTULO V - SECAGEM DE YACON

V.1 INTRODUÇÃO

A alimentação constitui uma das atividades humanas mais importantes, não só por razões biológicas evidentes, mas também por envolver aspectos sociais, psicológicos e econômicos fundamentais na dinâmica da evolução das sociedades. Os recursos envolvidos em alimentação, em termos de mercado, são consideráveis, perfazendo um montante bastante superior a setores como o automobilístico, eletrônico ou de armamento.

Notam-se mudanças expressivas nos padrões de consumo alimentar das populações urbanas, em dois diferentes sentidos. Num primeiro, a valorização de produtos são, limpos de resíduos de insumos, e frescos, que levam à demanda de produtos “naturais”. E num sentido contrário, desenvolve-se uma valorização dos aspectos de praticidade e funcionalidade dos produtos (rapidez de cozimento, longa conservação, adaptabilidade a diversas necessidades, acessibilidade, informação e diferenciação) (SOUZA, 1998).

A tendência de agregação crescente de valor aos produtos primários, no sentido de oferecer maior diversidade de opções e praticidade de consumo, implica em uma elevação do custo deste produto alimentar, após sucessivas agregações de valor na cadeia produtiva e também em uma redução nos efeitos das oscilações de preços pagos ao produtor sobre o custo final dos alimentos. A produção, então, pode ser completamente absorvida pela indústria e pelos canais de circulação e distribuição.

Com esta visão, a obtenção de novas possibilidades de aproveitamento dos produtos

agropecuários permitiu que as exportações tivessem participação mais expressiva de produtos com valor agregado mais elevado.

Estudos têm mostrado que, além da integração da agroindústria com a agricultura (entendimento da cadeia), a grande dificuldade para a indústria de alimentos aumentar a competitividade via produtividade e qualidade é a adequação das matérias-primas (ABIA, 1993).

As perdas pós-colheita, quantitativas e qualitativas - atingem proporções preocupantes e que, via de regra, são causadas quer pela escolha de cultivares inadequados, quer pela não utilização ou disponibilidade de técnicas adequadas de pós-colheita, principalmente quanto ao acondicionamento, transporte e conservação das matérias-primas agropecuárias, fases que antecedem a sua industrialização (ABIA, 1993).

Além disso, a necessidade de diversificação permanente de linha de produção confere à tecnologia de produto/processo uma importância fundamental nas estratégias de concorrência das empresas.

Os produtos agrícolas são classificados em dois grandes grupos. Do ponto de vista das perdas pós-colheita, os grãos são classificados como deterioráveis, pois se enquadram nos produtos que deterioram lentamente. Já os produtos que deterioram rapidamente, são classificados como produtos perecíveis.

Há vários processos que podem ser utilizados na conservação de produtos agrícolas. Dentre estes, a secagem é o processo comercial mais utilizado para a preservação da qualidade desses produtos.

O método mais antigo e ainda usado na secagem de alimentos é expô-los ao sol.

Embora os métodos de secagem natural sejam ainda usados em lugares em que o clima é favorável, a mera exposição dos alimentos é um processo muito lento e incerto para secagem destes produtos. Assim, foram adotados métodos de secagem forçada.

Dentre as contribuições que os avanços tecnológicos podem atender de imediato, está a utilização de um melhor processo e equipamento de secagem, pertinente a cada produto agrícola.

As razões para a secagem são tantas quantos são os materiais que podem ser secos. Keey (1978) descreve que um produto tem que estar capacitado para um processo subsequente ou para ser vendido. Assim, existem materiais que necessitam de uma determinada umidade

para poderem ser prensados, moídos ou peletizados. Pós necessitam ser secos a baixos conteúdos de umidade, para permitir um armazenamento satisfatório. Custos de transportes também são reduzidos pela remoção de grande parte de água contida no produto. Vegetais desidratados são também utilizados em pratos rápidos (*fast food*) e caros (PAN et al., 1997).

Yacon é uma planta andina que tem raízes tuberosas de gosto semelhante ao de frutas. O consumo destas raízes tem se mostrado crescente no mercado brasileiro. Suas raízes contêm frutooligossacarídeos, razão pela qual a raiz é conhecida como batata *diet*. Seu alto teor de água revela um produto perecível e estabelece uma curta vida de prateleira e curto período de utilização para a indústria alimentícia. Dessa forma, a secagem aparece como uma alternativa para ampliar o período de armazenamento do produto e possibilitar sua utilização pela indústria durante a entressafra.

V.2 OBJETIVOS

- ✓ Avaliar os efeitos dos parâmetros operacionais do secador agitador/misturador na cinética de secagem de raízes de yacon;
- ✓ Avaliar consumo de energia elétrica durante a secagem de raízes de yacon.

V.3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

V.3.1 YACON

Segundo Santana e Cardoso (2008), yacon designa tanto a planta como suas raízes. É originária dos Andes e faz parte da família *Asteraceae* – também denominada de *Compositae* – e seu nome científico é *Smallanthus sonchifolius* (Poepp. & Endl.). Na literatura científica, também é encontrado sob o nome *Polymnia sonchifolia* Poepp. & Endl. e *Polymnia edulis* Wedd.

Segundo Grau e Rea (1997), o yacon foi classificado originalmente como pertencente ao gênero *Polymnia* (*Compositae*, *Heliantheae*, subtribo *Melampodinae*), o qual foi criado por Linnaeus em 1751. Na primeira revisão moderna do gênero realizada por Wells, em 1967, o yacon foi mantido neste gênero e, posteriormente, uma diferente perspectiva foi adotada por

Robinson em 1978. Este autor determinou que muitas das espécies do gênero *Polymnia*, entre as quais se encontrava o yacon, na realidade, pertenciam a um gênero que Mackensie havia proposto em 1933: o gênero *Smallanthus*.

De acordo com Grau e Rea (1997), existem diferenças importantes entre os gêneros *Polymnia* e *Smallanthus* (padrão de estrias na superfície do fruto, ausência de glândulas no apêndice da antera, entre outros). No entanto, apesar de muitos autores referirem-se ao yacon como parte do gênero *Polymnia*, o ponto de vista de Robinson vem ganhando aceitação.

Sua raiz tuberosa possui sabor semelhante ao de frutas como o melão, com polpa levemente amarelada, crocante e aquosa (VALENTOVÁ e ULRICHOVÁ, 2003).

O yacon foi introduzido no Brasil no início dos anos 90 (MOSCATTO et al., 2004). Entretanto, seu consumo expressivo iniciou-se em meados dos anos 2000 e a raiz tornou-se conhecida popularmente como batata yacon ou batata “diet”.

O percentual de água das raízes situa-se em torno de 83 a 90% em base úmida. Devido ao alto conteúdo de água, o valor energético da raiz é baixo (LACHMAN et al., 2004). As raízes contêm inulina de cadeias pequenas, variando de 2 a 10. Desta forma, alguns autores preferem empregar o termo fruto-oligossacarídeo para descrever esta substância. Ohyama et al. (1990) sugerem que as raízes de yacon contem fruto-oligossarídeos do tipo da inulina, que compõem polímeros (polimerização β -2,1) e oligossarídeos de baixa polimerização (frutanas de 3 a 10 GP).

Segundo Vilhena (2001), aos oito meses as raízes de yacon apresentam as maiores quantidades de fruto-oligossacarídeos, sendo essa a melhor época de colheita visando à produção de raízes para a extração de frutanos.

Asami et al. (1991) descrevem o período de armazenamento de raízes de yacon, verificando que as frutanas contidas nas raízes foram hidrolisadas e se tornaram frutose, glucose e sacarose durante seu crescimento e armazenamento. Os autores recomendam que, para utilizar esses fruto-oligossarídeos, as raízes devem ser armazenadas por um longo período, possibilitando a sua utilização pela indústria e seu consumo como produto fresco. Recomendam ainda o pré-tratamento destas raízes com fumigação, irradiação, secagem ou pré-resfriamento etc.

Doo et al. (2000) armazenaram raízes tuberosas de yacon sob diferentes temperaturas e umidades relativas após um período de cura de 30 dias. Foram analisados sua vida de

prateleira, mudanças no teor de água, °Brix e açúcares. As raízes foram armazenadas por mais tempo nas condições de 4°C e 85% de umidade relativa. Enquanto o teor de água das raízes de yacon diminuiu gradualmente, o °Brix aumentou, durante o período de armazenamento de 6 meses.

Vilhena (2001) descreve que raízes mantidas em temperatura ambiente, após 6 dias de armazenamento podem tornar-se inviáveis ao consumo *in natura*, pois apresentam estágio avançado de oxidação e degradação dos tecidos, mostrado pela maior atividade da enzima peroxidase.

V.3.2 SECAGEM

V.3.2.1 Importância do Processamento dos Alimentos

Os alimentos, por serem produtos complexos orgânicos, são como os seres vivos - nascem e morrem. Neste quadro os produtos biológicos estão incluídos, devido ao fato de se deteriorarem facilmente quando não submetidas a nenhum processo de conservação. Essa deterioração e a perda do teor nutritivo do alimento devem-se a quatro causas fundamentais:

- ✓ Presença de uma população microbiana;
- ✓ Presença de enzimas;
- ✓ Presença de insetos e larvas;
- ✓ Desenvolvimento de reações químicas (principalmente oxidativas).

A tecnologia de conservação de alimentos visa justamente evitar, diminuir ou retardar a ocorrência de tais fenômenos.

V.3.2.2 Processo de secagem

Secagem é comumente descrita como a retirada de substâncias voláteis (comumente água) de um material sólido. Essa água pode estar contida no sólido de duas maneiras distintas, conforme as características físicas e termodinâmicas de suas ligações moleculares.

A velocidade com que a água é retirada do sólido é função do comportamento destes dois processos. A energia transferida para o sólido pode ocorrer por meio de efeitos de condução, convecção e radiação ou ainda por meio da aplicação destes efeitos de modo conjunto.

Inicialmente, a remoção de água de alimentos sólidos surgiu como uma forma de reduzir a atividade de água, para inibir o crescimento microbiano; mas posteriormente passou a ter grande importância na redução dos custos energéticos, de transporte, embalagem, e armazenagem destes alimentos, que possuem grande quantidade de água em sua composição. Keey (1972) define a secagem como sendo a remoção de uma substância volátil (comumente, mas não exclusivamente, água) de um produto sólido. A água presente no sólido é chamada de umidade.

Em seu outro livro, Keey (1978) afirma que esta definição de secagem exclui a concentração de uma solução e a remoção mecânica de água por filtragem ou centrifugação. Exclui também métodos térmicos relacionados à destilação, tais como a desidratação azeotrópica de alguns líquidos orgânicos. Esta definição, contudo, nos leva a uma grande variedade de tipos de equipamentos, abrangendo desde simples fornos a grandes câmaras em que soluções de sólidos são vaporizadas contra uma corrente de ar quente formando um produto seco.

Quando um sólido é submetido à secagem, dois processos ocorrem simultaneamente:

- ✓ Transferência de energia do ambiente circundante para evaporação da umidade na superfície do sólido.
- ✓ Transferência da massa de água do interior do sólido para sua superfície e a consequente evaporação devido ao processo descrito anteriormente.

Desta forma, durante a secagem é necessário um fornecimento de calor para evaporar a umidade do material e também deve haver um sorvedor de umidade para remover o vapor d'água, formado a partir da superfície do material a ser seco, conforme indica a Figura V.1 (BROD, ALONSO e PARK, 1999).

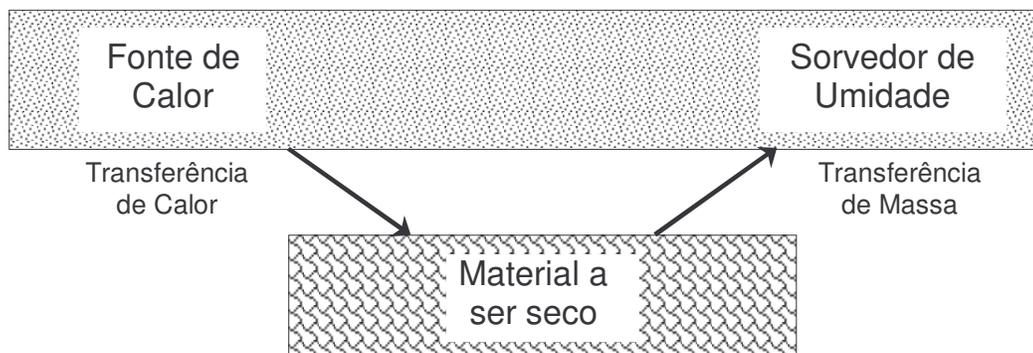


Figura V.1 – Diagrama do processo de secagem.

É este processo de fornecimento de calor da fonte quente para o material úmido que promoverá a evaporação da água do material e em seguida a transferência de massa arrastará o vapor formado.

Do ponto de vista de fornecimento de calor, os mecanismos básicos de transferência de calor empregados indicam os possíveis equipamentos necessários. A retirada do vapor de água formado na superfície do material é analisada do ponto de vista de movimento do fluido (mecânica dos fluidos), indicando também os possíveis equipamentos para esta finalidade (PARK et al., 2007).

Assim, observa-se que dois fenômenos ocorrem simultaneamente quando um sólido úmido é submetido à secagem (MENON e MUJUMDAR, 1987):

- ✓ Transferência de energia (comumente calor) do ambiente para evaporar a umidade superficial. Esta transferência depende de condições externas de temperatura, umidade do ar, fluxo e direção de ar, área de exposição do sólido (forma física) e pressão.
- ✓ Transferência de massa (umidade), do interior para a superfície do material e sua subsequente evaporação devido ao primeiro processo. O movimento interno da umidade no material sólido é função da natureza física do sólido, sua temperatura e conteúdo de umidade.

Deve-se levar em conta algumas considerações para determinar o processo de secagem:

A primeira consideração está relacionada a higroscopicidade do material biológico. Os diferentes materiais são classificados como higroscópicos ou não higroscópicos (hidrofóbicos), sendo estes últimos mais fáceis de secar.

A segunda consideração está relacionada as propriedades físico-químicas e termodinâmicas das ligações das moléculas de água nas estruturas dos sólidos dos materiais biológicos.

Se a água não estiver ligada (ligação física e/ou química) nas estruturas dos sólidos, esta se caracteriza como água livre, e a energia envolvida no processo será correspondente ao calor latente de vaporização. E, se a água estiver ligada, a energia necessária para sua evaporação será maior (BROD, ALONSO e PARK, 1999).

V.3.3 CONSUMO DE ENERGIA NA SECAGEM

V.3.3.1 Energia elétrica

Nas décadas de 1950, 1960 e início da década de 1970, o aumento na demanda por eletrodomésticos, aquecimento elétrico de ambientes a conversão para processos elétricos nas indústrias (em substituição ao carvão ou gás natural) fizeram com que o consumo de energia elétrica aumentasse de modo significativo.

A energia elétrica é gerada em usinas elétricas centrais que convertem a energia potencial química, nuclear ou gravitacional das fontes (carvão, gás natural, óleo combustível, urânio e água) em energia elétrica.

V.3.3.2 Conservação de energia elétrica

O equilíbrio entre oferta e demanda não é alcançado apenas aumentando a oferta. É possível e desejável atuar também pelo lado da demanda. Nesse sentido, é de grande relevância a busca da eficiência energética. O conceito de eficiência energética é baseado no melhor aproveitamento da energia elétrica, assim como, no combate ao uso desnecessário de energia.

A cobrança para o uso residencial de energia elétrica é feita a partir da energia utilizada e não pela potência fornecida. A energia utilizada é a potência (em Watts) gasta multiplicada pelo período de tempo (em horas), expressa em unidades de quilowatt-hora (kWh).

A vantagem da utilização de emissores de energia radiante nos processos de secagem é que, apesar de uma potência instalada significativa, a energia se transfere diretamente para o produto (aquecimento apenas do produto) e isso é feito em um tempo consideravelmente menor que o aquecimento por convecção.

A secagem de produtos agrícolas representa em torno de 12% de toda a energia gasta nos sistemas de beneficiamento do produto depois da colheita. No entanto, é através da secagem que se prepara o produto para a armazenagem, exercendo uma forte influência na manutenção da sua qualidade durante o tempo que vai da estocagem ao consumo.

V.4 MATERIAL E MÉTODOS

V.4.1 MATÉRIA-PRIMA

Foram utilizadas raízes de yacon compradas de um mesmo fornecedor na CEASA/Campinas. Até o momento de utilizá-las nos ensaios, foram armazenadas em câmara fria a aproximadamente 17°C. As raízes foram cortadas em formato “palito” com cortador manual apropriado e depois cortadas em cubos de cerca de 1 cm de lado, momentos antes do início do processo de secagem.

As raízes de yacon, no momento de utilização no processo de secagem, apresentaram valores médios de teor de água de aproximadamente $89,6\% \pm 0,9$ em base úmida ($8,66 \pm 0,84$ em base seca).

V.4.2 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

No planejamento experimental foram utilizadas quatro variáveis independentes (fatores): aplicação de pulso de vácuo, aplicação de energia radiante, temperatura e velocidade do ar; e como duas variáveis dependentes (respostas): a taxa de secagem e a quantidade de energia consumida na secagem em intervalo específico de teor de água das amostras.

Para se determinar os níveis de cada variável foram realizados testes preliminares e encontrada a faixa disponível operacionalmente no secador para os parâmetros estudados. Esses testes foram descritos detalhadamente no Capítulo 3 deste trabalho. Posteriormente, foi gerado um planejamento experimental com dois níveis para cada variável independente, totalizando $2^4 = 16$ experimentos. Estes pontos fatoriais são apenas para avaliar os efeitos de suas variáveis e suas interações, não sendo possível otimizar o processo. Para um planejamento completo, deve-se ainda avaliar o erro puro incluindo 4 repetições dos pontos centrais. Neste caso, o número total de ensaios foi de: $16 + 4 = 20$. A Tabela V.1 mostra a matriz experimental para o planejamento fatorial completo 2^4 :

Tabela V.1 – Níveis das variáveis codificadas e reais para o planejamento experimental da secagem de yacon.

Ensaio	Variável codificada				Variável real				
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	V [min]	R [min/15min]	T [°C]	U [m/s]	
Pontos fatoriais	1	-1	-1	-1	-1	0	0,0	35	0,85
	2	1	-1	-1	-1	30	0,0	35	0,85
	3	-1	1	-1	-1	0	3,0	35	0,85
	4	1	1	-1	-1	30	3,0	35	0,85
	5	-1	-1	1	-1	0	0,0	55	0,85
	6	1	-1	1	-1	30	0,0	55	0,85
	7	-1	1	1	-1	0	3,0	55	0,85
	8	1	1	1	-1	30	3,0	55	0,85
	9	-1	-1	-1	1	0	0,0	35	1,25
	10	1	-1	-1	1	30	0,0	35	1,25
	11	-1	1	-1	1	0	3,0	35	1,25
	12	1	1	-1	1	30	3,0	35	1,25
	13	-1	-1	1	1	0	0,0	55	1,25
	14	1	-1	1	1	30	0,0	55	1,25
	15	-1	1	1	1	0	3,0	55	1,25
	16	1	1	1	1	30	3,0	55	1,25
Pontos centrais	17	0	0	0	0	15	1,5	45	1,05
	18	0	0	0	0	15	1,5	45	1,05
	19	0	0	0	0	15	1,5	45	1,05
	20	0	0	0	0	15	1,5	45	1,05

A análise possibilita obter modelo estatístico matemático capaz de prever o comportamento da variável dependente em função das variáveis independentes, na faixa adotada. Esta metodologia segue um modelo contendo termos de primeira ordem e de interação entre os termos, conforme a Equação 23.

$$A = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 X_3 + b_4 X_4 + b_{12} X_1 X_2 + b_{13} X_1 X_3 + b_{14} X_1 X_4 + b_{23} X_2 X_3 + b_{24} X_2 X_4 + b_{34} X_3 X_4 \quad (23)$$

Para cada resposta (variável dependente) avaliada, foram obtidos um modelo matemático com variáveis codificadas e um com variáveis reais.

V.4.3 SECAGEM

Foram utilizadas amostras de cerca de 500g de raízes de yacon em cubos em camada única em cada experimento. A amostra foi posicionada na parte dianteira do secador, ocupando cerca de 2/5 da área total do plenum o que corresponde a 0,12 m². Isso foi necessário devido à impossibilidade de manipulação da amostra em todo o comprimento do secador. Foi utilizado o secador agitador/misturador descrito nos Capítulos 3 e 4 em todos os ensaios de secagem.

Os dados experimentais foram obtidos a partir da pesagem consecutiva das amostras colocadas no secador nas condições operacionais definidas pelo planejamento experimental.

As curvas de secagem foram construídas com o conteúdo adimensional de umidade (Y) da raiz de yacon no decorrer do tempo de secagem e indicam a marcha de diminuição do conteúdo de umidade do material. Essas curvas de secagem podem ser vistas no Apêndice E. Os teores de água de equilíbrio das amostras de yacon para cada temperatura de secagem foram determinados quando atingidos o equilíbrio dinâmico das amostras.

Terminada a secagem no secador, uma amostra de raiz de yacon seca foi utilizada para se determinar a massa seca segundo a metodologia da ASSOCIATION OF OFFICIAL ANALYTICAL CHEMISTS (1998). O restante do material foi armazenado a temperatura média de 5°C para ser utilizado posteriormente nas análises de extração de inulina.

No caso dos ensaios de secagem, a taxa de secagem dX/dt foi a variável resposta medida. Os resultados obtidos nos ensaios foram analisados por múltipla regressão por meio do método que utiliza erro padrão para ajustar a Equação 23, no software estatístico STATISTICA versão 6.0 (STATSOFT INC., 2001).

V.4.4 CONSUMO DE ENERGIA

O consumo de energia elétrica foi determinado por meio do uso de analisadores de grandezas elétricas, equipamentos apropriados e comumente utilizados para esta função na

indústria e no setor de serviços, além das concessionárias. Foram utilizados analisadores da marca Embrasul (modelos RE6000 e RE6081) e da marca ESB (modelo SAGA 4000).

Tais equipamentos possibilitam obter dados sobre a tensão, corrente, demanda, potência momentânea, fator de potência dos motores etc. Na presente pesquisa, foi avaliada somente a quantidade total de energia elétrica consumida durante os períodos avaliados.

Os dados obtidos pela leitura destes analisadores foram armazenados em planilhas de cálculo e sofreram tratamento para filtrar os intervalos do processo de secagem utilizados.

V.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

V.5.1 SECAGEM DE RAÍZES DE YACON

Primeiramente, fez-se a determinação dos coeficientes adimensionais de umidade Y para todos os ensaios de secagem. Foram considerados os menores valores de teor de água encontrados para cada nível de temperatura de secagem como umidade de equilíbrio, parâmetro importante na construção das respectivas curvas de secagem, utilizadas no planejamento experimental.

Este planejamento experimental objetivou o estudo da influência das variáveis envolvidas no processo de secagem. Para melhor compreensão dos efeitos, os resultados foram analisados por meio do método de superfície de resposta.

Na análise da superfície de resposta, a taxa de secagem encontrada na variação de uma faixa determinada de teor de água foi a variável dependente, pois em alguns ensaios ficou evidente o estágio de taxa constante de secagem. Esta faixa de teor de água analisada em cada curva foi fixada previamente e aplicada em todos os ensaios, seguindo a mesma metodologia. Ao final deste tratamento de dados, resultaram valores de taxa de secagem (dX/dt) que correspondiam à velocidade de diminuição do teor de água distintos a cada ensaio na faixa avaliada, sendo chamadas de taxas de secagem padronizadas.

V.5.2 ANÁLISE PELO MÉTODO DE SUPERFÍCIE DE RESPOSTA

V.5.2.1 Taxa de secagem padronizada

Na Tabela V.2 estão apresentados os valores da taxa de secagem padronizadas

(dX/dt) entre 7,0 e 3,9 kg_{H2O}/kg_{M_S}, obtidos experimentalmente do processo de secagem de cubos de yacon, seguindo as determinações contidas no planejamento experimental completo 2⁴ com quatro pontos centrais.

Tabela V.2 – Taxas de secagem padronizada para o planejamento experimental da secagem de yacon.

	Ensaio	Variáveis independentes				Variável dependente
		X _V	X _R	X _T	X _U	dX/dt [kg _{H2O} /kg _{M_S}]
Pontos fatoriais	1	-1	-1	-1	-1	0,0146
	2	1	-1	-1	-1	0,0120
	3	-1	1	-1	-1	0,0260
	4	1	1	-1	-1	0,0254
	5	-1	-1	1	-1	0,0196
	6	1	-1	1	-1	0,0227
	7	-1	1	1	-1	0,0382
	8	1	1	1	-1	0,0414
	9	-1	-1	-1	1	0,0141
	10	1	-1	-1	1	0,0129
	11	-1	1	-1	1	0,0303
	12	1	1	-1	1	0,0303
	13	-1	-1	1	1	0,0292
	14	1	-1	1	1	0,0332
	15	-1	1	1	1	0,0395
	16	1	1	1	1	0,0570
Pontos centrais	17	0	0	0	0	0,0269
	18	0	0	0	0	0,0287
	19	0	0	0	0	0,0263
	20	0	0	0	0	0,0281

Os resultados da análise estatística aplicada aos dados experimentais de cinética de

secagem foram determinados através do erro residual e erro puro. A Tabela V.3 apresenta os efeitos lineares e de interação entre os parâmetros na avaliação da taxa de secagem por meio do erro residual, enquanto que a Tabela V.4 apresenta os mesmos efeitos para o erro puro. Os valores em negrito indicam que o fator ou a interação é significativo para um nível de confiança de 95% ($p \leq 0,05$).

Tabela V.3 – Efeito estimado, erro padrão e grau de significância estatística (p) para as taxas de secagem de raízes de yacon – erro residual.

Variáveis	Efeito	Erro padrão	p
Média	0,0278	0,0005	0,000
Vácuo V (linear)	0,0029	0,0012	0,040
Radiação R (linear)	0,0162	0,0012	0,000
Temperatura T (linear)	0,0144	0,0012	0,000
Velocidade U (linear)	0,0058	0,0012	0,001
Interação V x R	0,0021	0,0012	0,117
Interação V x T	0,0041	0,0012	0,009
Interação V x U	0,0022	0,0012	0,108
Interação R x T	0,0016	0,0012	0,209
Interação R x U	0,0007	0,0012	0,575
Interação T x U	0,0034	0,0012	0,020

Tabela V.4 – Efeito estimado, erro padrão e grau de significância estatística (p) para as taxas de secagem de raízes de yacon – erro puro.

Fatores	Efeito	Erro padrão	p
Média	0,0278	0,0002	0,000
Vácuo V (linear)	0,0029	0,0005	0,013
Radiação R (linear)	0,0162	0,0005	0,000
Temperatura T (linear)	0,0144	0,0005	0,000
Velocidade U (linear)	0,0058	0,0005	0,002
Interação V x R	0,0021	0,0005	0,031
Interação V x T	0,0041	0,0005	0,005
Interação V x U	0,0022	0,0005	0,029
Interação R x T	0,0016	0,0005	0,058
Interação R x U	0,0007	0,0005	0,288
Interação T x U	0,0034	0,0005	0,008

Os efeitos lineares e de interação das variáveis indicam quanto estes fatores exercem influência sobre a variável dependente. Um efeito positivo indica que o aumento desta variável independente acarreta em um aumento da variável dependente, enquanto que um efeito negativo indica o inverso, ou seja, o aumento do valor da variável independente ocasiona a diminuição da resposta.

Percebe-se que, tanto para o erro residual quanto para o erro puro, os efeitos lineares dos fatores foram significativos. Quanto aos efeitos de interação, para o erro residual as interações V x T e T x U foram significativas, enquanto que para o erro puro soma-se a elas ainda a interação V x U.

Após a retirada dos termos não significativos foi feita uma análise de variância (ANOVA) e aplicado o teste F para se verificar a significância da regressão e gerar os modelos preditivos. A Tabela V.5 mostra a análise de variância do modelo gerado pela análise do erro residual e a Tabela V.6 mostra a análise do modelo gerado pelo erro puro.

Tabela V.5 – Análise de variância (ANOVA) para as taxas de secagem de raízes de yacon – erro residual.

Fonte de variação	Soma Quadrática	Graus de Liberdade	Média Quadrática	F_{calc}	F_{tab}	R^2
Regressão	2,13E-03	5	4,26E-04	44,10	2,96	0,940
Resíduo	1,35E-04	14	9,67E-06			
Falta de ajuste	1,32E-04	11	1,20E-05	10,03	8,765	
Erro puro	3,58E-06	3	1,19E-06			
Total	2,27E-03	19				

Tabela V.6 – Análise de variância (ANOVA) para as taxas de secagem de raízes de yacon – erro puro.

Fonte de variação	Soma Quadrática	Graus de Liberdade	Média Quadrática	F_{calc}	F_{tab}	R^2
Regressão	2,16E-03	6	3,61E-04	46,17	2,92	0,955
Resíduo	1,02E-04	13	7,81E-06			
Falta de ajuste	9,80E-05	10	9,80E-06	8,21	8,79	
Erro puro	3,58E-06	3	1,19E-06			
Total	2,27E-03	19				

Percebe-se que o teste F para falta de ajuste do modelo gerado tendo como base o erro residual mostra um valor de F_{calc} maior que F_{tab} . Portanto, há evidência de falta de ajuste. Diante desta circunstância, optou-se por utilizar o modelo gerado pelo erro puro. Daqui por diante, será analisado somente o modelo gerado pela variância devida ao erro puro, ou seja, o modelo que leva em consideração os efeitos lineares da aplicação de pulso de vácuo.

O coeficiente de determinação é 0,955, ou seja, 95,5% da variação é explicada pelo modelo da superfície de resposta. Com relação à regressão, o valor de F_{calc} (MQ_R/MQ_T) é cerca de 15 vezes maior que F_{tab} ($46,17 > 2,92$) e, assim, o modelo é válido. O teste F para falta de ajuste mostra que F_{calc} (MQ_{faj}/MQ_{ep}) é menor que F_{tab} . Portanto não há evidência de falta de ajuste.

A análise de variância realizada mostrou que o modelo ajustado foi significativo e preditivo satisfazendo o critério sugerido por Box e Wetz (1973, citado por BARROS NETO, SCARMINIO e BRUNS, 2002) para o teste F da regressão (MQ_R/MQ_f).

As distribuições dos resíduos para a taxa de secagem padronizada na secagem de raízes cubetadas de yacon são mostradas na Figura V.2. Observa-se que os resíduos estão distribuídos de forma aleatória, mostrando que o modelo é adequado.

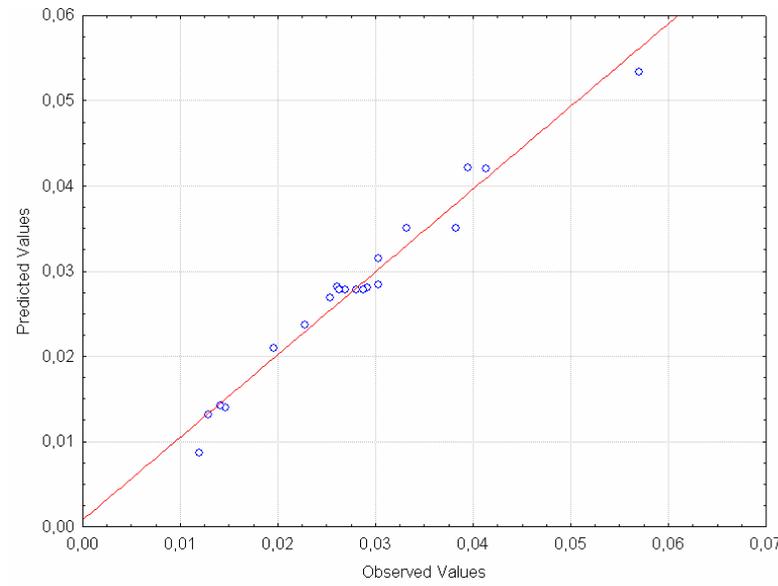


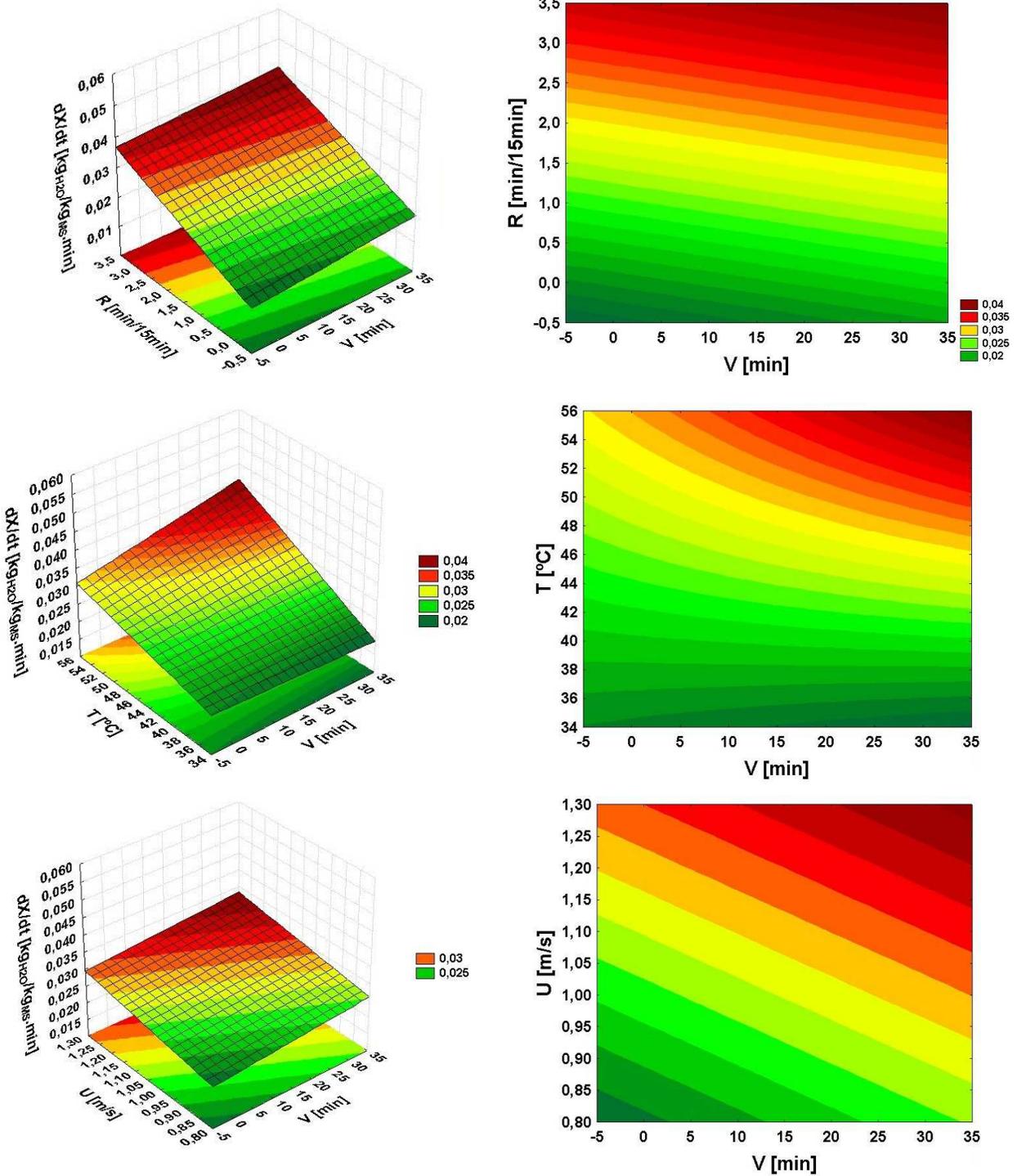
Figura V.2 – Gráfico dos resíduos.

O modelo proposto para representar a taxa de secagem padronizada na secagem de raízes cubetadas de yacon está apresentado na equação codificada mostrada a seguir:

$$\frac{dX}{dt} \left[\frac{\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}}{\text{kg}_{\text{MS}} \cdot \text{min}} \right] = 0,0278 + 0,0015 X_V + 0,0081 X_R + 0,0072 X_T + 0,0029 X_U + 0,0020 X_V X_T + 0,0017 X_T X_U \quad (24)$$

Considerando que o desvio relativo médio encontrado para este modelo foi de 6,08%, que o coeficiente de determinação ficou em torno de 95,5% e que o teste F foi válido, pode-se afirmar que o modelo de superfície de resposta é realmente preditivo para as condições do processo estudadas (Equação 24). Assim, foram geradas as superfícies de resposta e as curvas

em nível para a taxa de secagem padronizada, como mostradas na Figura V.3.



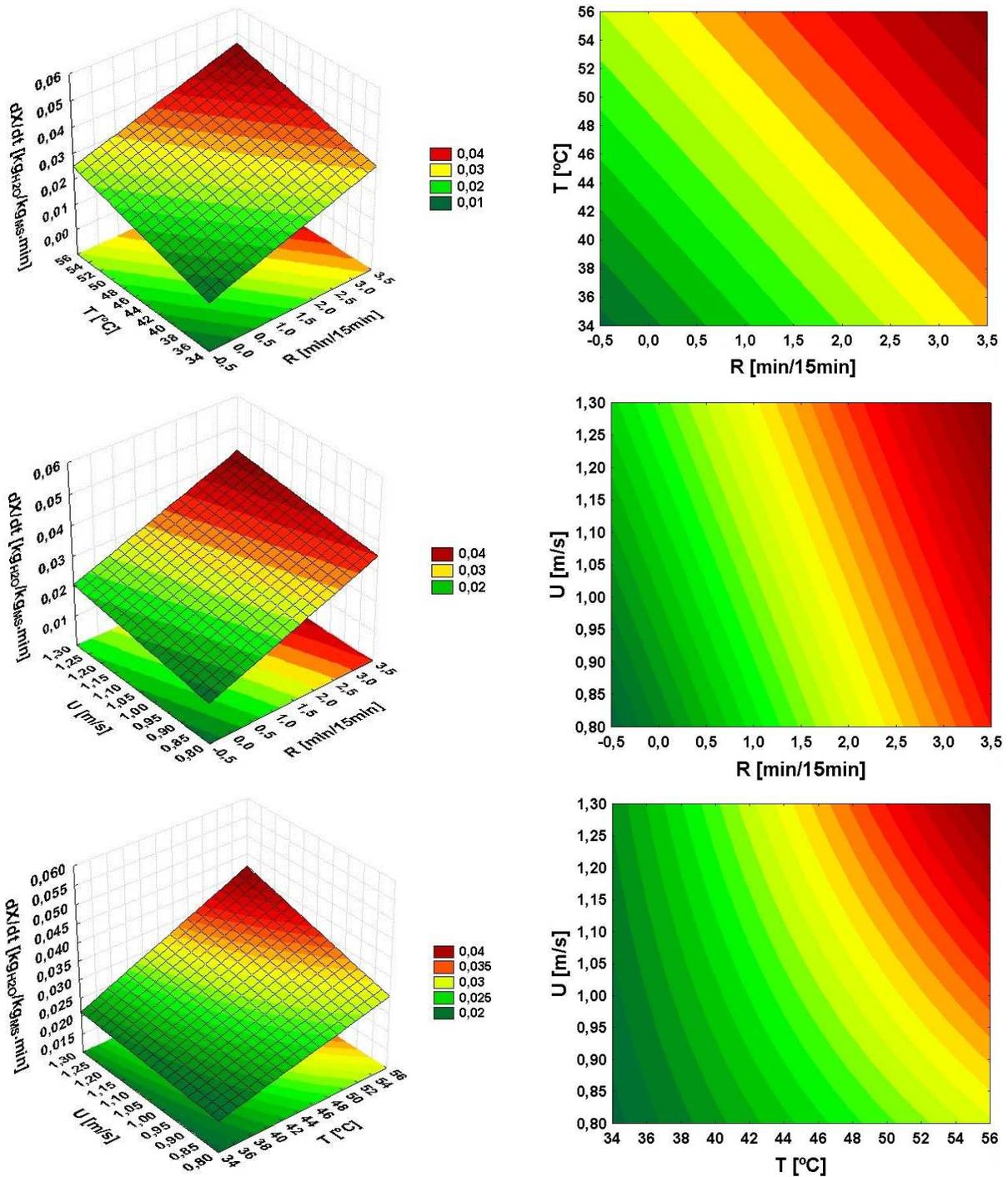


Figura V.3 - Superfícies de resposta e curvas em nível para os parâmetros da secagem de raízes cubetadas de yacon – em nível intermediário (0) das demais variáveis.

Em todos os casos, o aumento dos valores das variáveis independentes acarreta um aumento na variável dependente.

A aplicação dos pulsos de vácuo, que antecedeu a secagem convectiva, auxiliou na diminuição do tempo de secagem convectiva para atingir a mesma umidade. Essa diminuição ocorreu provavelmente em razão da amostra iniciar a secagem com menor teor de água e pelo fato dos pulsos de vácuo favorecerem a formação de estrutura porosa, facilitando a secagem (DROUZAS e SCHUBERT, 1996). Boeira, Stringari e Laurindo (2007), além deste fenômeno, evidenciaram a possibilidade de atingir a mesma a_w mantendo maior umidade no produto, o que pode representar melhores propriedades de textura para as frutas desidratadas.

V.5.2.2 Conservação de energia

O planejamento experimental foi realizado a fim de avaliar a influência dos parâmetros operacionais do processo de secagem (aplicação do pulso de vácuo – V, aplicação de radiação infravermelha – R, temperatura – T e velocidade do ar – U), considerados como variáveis independentes, sobre a quantidade de energia consumida no processo (no caso, a variável dependente). Para padronizar os resultados obtidos de energia consumida, optou-se por fixar uma faixa de teor de água, na qual se computou os dados de consumo. Ou seja, levaram-se em conta os dados de consumo de energia no intervalo de tempo que foi necessário para a diminuição do teor de água das amostras de 7,0 para 3,9 (em base seca). Essa faixa de teor de água foi fixada anteriormente à análise dos dados e foi necessária devido à diferença de teor de água das amostras no início da secagem.

Para a análise de conservação de energia, a intenção é que se obtenha um menor consumo de energia para a retirada de determinada massa de água do produto, considerando a utilização dos diversos recursos tecnológicos disponíveis no processo de secagem.

Na Tabela V.7 estão apresentados os resultados da medição do consumo de energia na secagem de raízes cubetadas de yacon. Esses resultados são oriundos da determinação momentânea regular dos parâmetros de energia em intervalos que variaram de 10 a 30 segundos, dependendo do equipamento medido, durante o período do processo. Essas medições foram realizadas por meio de analisadores de energia, equipamentos existentes no mercado com esta finalidade.

Tabela V.7 – Consumo de energia elétrica para o planejamento experimental da secagem de raízes cubetadas de yacon.

	Ensaio	Variáveis independentes				Variável dependente
		X _V	X _R	X _T	X _U	E [Wh]
Pontos fatoriais	1	-1	-1	-1	-1	2296,71
	2	1	-1	-1	-1	2964,54
	3	-1	1	-1	-1	4371,81
	4	1	1	-1	-1	4995,32
	5	-1	-1	1	-1	8992,74
	6	1	-1	1	-1	7089,23
	7	-1	1	1	-1	4887,23
	8	1	1	1	-1	5263,53
	9	-1	-1	-1	1	3643,79
	10	1	-1	-1	1	3806,03
	11	-1	1	-1	1	4132,01
	12	1	1	-1	1	4611,89
	13	-1	-1	1	1	7904,67
	14	1	-1	1	1	4152,48
	15	-1	1	1	1	7034,26
	16	1	1	1	1	4354,74
Pontos centrais	17	0	0	0	0	7202,55
	18	0	0	0	0	5141,18
	19	0	0	0	0	6304,78
	20	0	0	0	0	5875,05

Os resultados da análise estatística aplicada aos dados experimentais de consumo de energia na secagem de raízes cubetadas de yacon no secador agitador/misturador foram determinados por meio de software estatístico STATISTICA versão 6 (STATSOFT INC., 2001). Os efeitos foram todos estimados a um nível de significância de 5% ($p \leq 0,05$), ou seja,

admitindo um intervalo de confiança de 95%, por meio do erro residual (Tabela V.8) e do erro puro(Tabela V.9). Em negrito, estão os efeitos dos fatores lineares e de interação significativos nesse intervalo de confiança.

Tabela V.8 – Efeito estimado, erro padrão e grau de significância estatística (p) para o consumo de energia na secagem de raízes de yacon – erro residual.

Variáveis	Efeito	Erro padrão	p
Média	5251,23	259,17	0,0000
Vácuo V (linear)	-753,18	579,53	0,2260
Radiação R (linear)	-149,92	579,53	0,8017
Temperatura T (linear)	2357,10	579,53	0,0028
Velocidade U (linear)	-152,66	579,53	0,7982
Interação V x R	453,23	579,53	0,4543
Interação V x T	-1236,55	579,53	0,0616
Interação V x U	-694,22	579,53	0,2615
Interação R x T	-1499,92	579,53	0,0293
Interação R x U	306,41	579,53	0,6098
Interação T x U	-543,99	579,53	0,3724

Tabela V.9 – Efeito estimado, erro padrão e grau de significância estatística (p) para o consumo de energia na secagem de raízes de yacon – erro puro.

Variáveis	Efeito	Erro padrão	p
Média	5251,23	192,51	0,0001
Vácuo V (linear)	-753,18	430,47	0,1785
Radiação R (linear)	-149,92	430,47	0,7506
Temperatura T (linear)	2357,10	430,47	0,0120
Velocidade U (linear)	-152,66	430,47	0,7463
Interação V x R	453,23	430,47	0,3697
Interação V x T	-1236,55	430,47	0,0639
Interação V x U	-694,22	430,47	0,2052
Interação R x T	-1499,92	430,47	0,0399
Interação R x U	306,41	430,47	0,5280
Interação T x U	-543,99	430,47	0,2956

De acordo com as Tabelas V.8 e V.9, observa-se que para o consumo de energia, somente o efeito linear da temperatura e o efeito de interação entre a aplicação de radiação infravermelha e temperatura foram significativos a 5% de significância. Tal fato pode ser explicado pela potência instalada nos dispositivos referentes a estas duas variáveis. A potência dos emissores de energia infravermelha é de 4500 W, enquanto que as resistências elétricas responsáveis pelo aquecimento do ar de secagem têm potência instalada de 5000 W. Comparando todos os dispositivos utilizados, estes são os dois maiores quanto à potência instalada. Ressalta-se o efeito positivo da variável temperatura e o efeito negativo da interação entre as variáveis radiação infravermelha e temperatura. O maior efeito foi o da temperatura, fato explicado pelo aumento do período de utilização das resistências elétricas com o aumento da temperatura de secagem aplicada. Apesar de potências instaladas parecidas, as resistências elétricas permanecem ligadas por períodos maiores.

Após a retirada dos termos não significativos foi feita uma análise de variância (ANOVA) e aplicado o teste F para se verificar a significância da regressão e gerar os modelos preditivos. A Tabela V.10 mostra a análise de variância do modelo gerado pela análise do erro puro.

Tabela V.10 – Análise de variância (ANOVA) para o consumo de energia na secagem de raízes cubetadas de yacon.

Fonte de variação	Soma Quadrática	Graus de Liberdade	Média Quadrática	F _{calc}	F _{tab}	R ²
Regressão	3,12E+07	2	1,56E+07	10,63	3,59	0,556
Resíduo	2,50E+07	17	1,47E+06			
Falta de ajuste	2,27E+07	14	1,62E+06	2,19	8,71	
Erro puro	2,22E+06	3	7,41E+05			
Total	5,62E+07	19				

Pela Tabela V.10, observa-se que os modelos apresentaram regressão significativa com o valor de F_{calc} sendo maior que o F_{tab}.

Segundo Barros Neto, Scarmínio e Bruns (2003), uma regressão, embora significativa do ponto de vista do teste F, pode não ser útil para realizar previsões, por cobrir uma faixa de variação pequena dos fatores estudados. Box e Wetz (1973, citado por BARROS NETO, SCARMINIO e BRUNS, 2002) sugeriram que para uma regressão ser significativa e também útil para fins preditivos, o valor de F_{calc} para a regressão deva ser, no mínimo de quatro a cinco vezes maior que o valor de F_{tab}. Esta condição não é plenamente satisfeita neste estudo, porém o F_{calc} é aproximadamente 3 vezes maior que o F_{tab}.

Conforme a Tabela V.10, o coeficiente de determinação R² obtido para o modelo ajustado foi de 0,556, ou seja, a percentagem da variação explicada pelo modelo foi de apenas 55,6%.

O modelo proposto para representar o consumo de energia na secagem de raízes cubetadas de yacon está apresentado na equação codificada mostrada a seguir:

$$E [Wh] = 5251,23 + 1178,55X_T - 749,96 X_R X_T \quad (25)$$

As superfícies de resposta e as curvas de nível geradas pelos modelos de consumo de energia se encontram representadas na Figura V.4. Tais figuras expressam a interação entre duas variáveis independentes sobre a perda de peso. Neste caso, as outras variáveis

independentes foram mantidas no ponto central do planejamento.

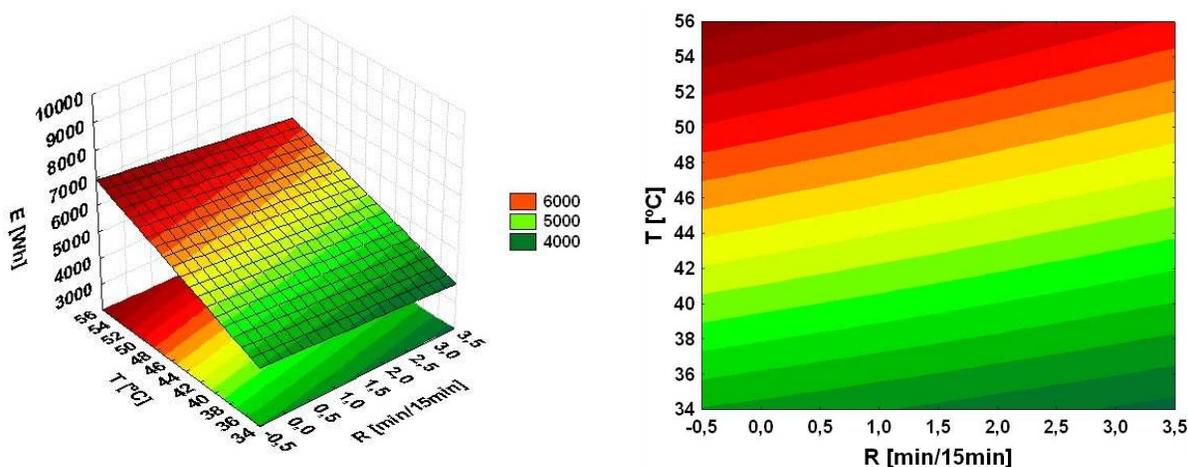


Figura V.4 - Superfície de resposta e curvas em nível para os parâmetros da secagem de raízes cubetadas de yacon – em nível intermediário (0) das demais variáveis.

Observa-se que a utilização de energia radiante, de fato, reduz o consumo total de energia durante a secagem. O aumento da temperatura de secagem convectiva aumenta o consumo de energia devido ao maior período de tempo que as resistências elétricas permanecem ligadas a fim de manter a temperatura desejada. A aplicação de energia radiante promove uma diminuição do tempo total de secagem e, conseqüentemente, do período em que as resistências elétricas permanecem ligadas a fim de manter a temperatura do ar de secagem no valor configurado.

V.6 CONCLUSÕES

A secagem das raízes de yacon é influenciada por todos os parâmetros operacionais de secagem analisados. A metodologia de superfície de resposta foi considerada satisfatória na análise desta influência. A taxa de secagem pode ser expressa em função da aplicação do vácuo, da aplicação de radiação infravermelha, da temperatura e velocidade do ar de secagem.

As duas maiores potências instaladas no secador (emissores radiantes e resistências elétricas), geraram os maiores efeitos no consumo de energia. Enquanto a temperatura do ar de secagem tem efeito positivo para o consumo de energia, a interação entre a temperatura e aplicação de energia infravermelha tem efeito negativo. A influência da aplicação de energia

infravermelha se reflete na diminuição do tempo de secagem do produto e, conseqüentemente, no período em que os equipamentos (principalmente as resistências elétricas) permanecem ligados.

Portanto, as melhores condições de secagem quanto ao uso racional de energia elétrica para secagem de raízes de yacon são as que empregam temperaturas baixas e períodos intermitentes maiores de aplicação de energia de radiação infravermelha.

V.7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS DA ALIMENTAÇÃO – ABIA.

Compêndio de Legislação de Alimentos. São Paulo: ABIA, 1989/1993.

ASSOCIATION OF OFFICIAL ANALYTICAL CHEMISTS. **Official methods of analysis of A.O.A.C. international.** 16a ed. Arlington: A.O.A.C., Inc., Virginia, 1998.

BARROS NETO, B.; SCARMINIO, I. S.; BRUNS, R. E. **Como fazer experimentos: pesquisa e desenvolvimento na ciência e na indústria.** 2ed. Campinas: Editora da UNICAMP, 2002. 401p.

BOX, G.E.P.; WETZ, J. Criteria for judging adequacy of estimation by an approximate response function. University of Wisconsin Technical Report 9, 1973. apud BARROS NETO, B.; SCARMINIO, I. S.; BRUNS, R. E. **Como fazer experimentos: pesquisa e desenvolvimento na ciência e na indústria.** 2ed. Campinas: Editora da UNICAMP, 2002. 401p.

BOEIRA, J. B.; STRINGARI, G. B.; LAURINDO, J. B. Estudo da desidratação de pêssegos por tratamento osmótico e secagem. **B.CEPPA**, Curitiba, v. 25, n. 1, p. 77-90, jan./jun. 2007.

BROD, F.P.R., ALONSO, L.F.T., PARK, K.J. **Secagem de produtos agrícolas.** XI SEMEAGRI – Semana de Engenharia Agrícola da Unicamp. Campinas: Agrológica – Empresa Júnior de Eng. Agrícola. 1999, 122 p.

DOO, H.S.; LI, H.L.; KWON, T.O.; RYU, J.H. Changes in sugar contents and storability of yacon under different storage conditions. **Korean Journal of Crop Science.** v. 45, n. 5, p.

300-304, 2000.

DROUZAS, A. E.; SCHUBERT, H. Microwave application in vacuum drying of fruits. **Journal of Food Engineering**, v. 28, p. 203-209, 1996.

GRAU, A; REA, J. Yacon. *Smallanthus sonchifolius* (Poep. & Endl.) H. Robinson. In: HERMANN, M.; HELLER, J. (Eds.). **Andean roots and tubers: ahipa, arracacha, maca and yacon**. Promoting the conservation and use of underutilized and neglected crops. (Institute of Plant Genetics and Crop Plant Research). Gatersleben/International Plant Genetic Resources Institute. Rome, Italy, 1997. p.199- 242.

KEEY, R. B. **Drying: principles and practice**. Oxford: Pergamon Press, 1972, 358 p.

KEEY, R. B. **Introduction to industrial drying operations**. Oxford: Pergamon Press, 1978, 376 p.

LACHMAN, L. et al. Saccharides of yacon [*Smallanthus sonchifolius* (Poepp. et Endl.) H. Robinson] tubers and rhizomes and factors affecting their content. **Plant soil environment**, Czech Republic, v.50, n.9, p.383-390, 2004.

MENON, A. S.; MUJUMDAR, A. S. Drying of solids: principles, classification, and selection of dryers. In: MUJUMDAR, A. S. **Handbook of Industrial Drying**. New York: Marcel Dekker Inc., 1987. Cap. 9, p. 295-326.

MOSCATTO, J.A. et al. Farinha de yacon e inulina como ingredientes na formulação de bolo de chocolate. **Ciência Tecnologia Alimentos**, Campinas, v.24, n.4, p.634-640, 2004.

OHYAMA, T.; ITO, O.; YASUYOSHI, S.; IKARASHI, T.; MINAMIZAWA, K.; KUBOTA, M.; ASAMI, T.; TSUKHASHI, T. Composition of storage carbohydrate in tuber of yacon (*Polymnia sonchifolia*). **Soil Science and Plant Nutrition**, v. 36, p.167-71, 1990.

PAN, Y.K.; WU, H.; LI, Z.Y.; MUJUMDAR, A.S.; KUDRA, T. Effect of a tempering period on drying of carrot in a vibro-fluidized bed. **Drying Technology**, New York, v. 15, n. 6-8, p. 2037-2043, 1997.

SANTANA I., CARDOSO, M. H. Raiz tuberosa de yacon (*Smallanthus sonchifolius*): potencialidade de cultivo, aspectos tecnológicos e nutricionais. **Ciência Rural**. V. 38, n. 3, p. 898-905, 2008.

STATSOFT INC. Statistica, version 6.0. **Data analysis software system**. Tulsa, StatSoft, Inc., 2001.

SOUZA, R.S. O custo da alimentação no Brasil: evolução e controvérsias. **Agronegócio Brasileiro: Desafios e Perspectivas**, Brasília: Sociedade Brasileira de Economia e Sociologia Rural – SOBER, 1998, v. 1, n. 1, p.679-691, 1998.

VALENTOVÁ, K.; ULRICHOVÁ, J. *Smallanthus sonchifolius* and *Lepidium meyenii* – prospective Andean crops for the prevention of chronic diseases. **Biomedical Papers**, Czech Republic, v.147, n.2, p.119-130, 2003.

VILHENA, S.M.C. **Ciclo de cultivo e técnicas pós-colheita de Yacon (*Polymnia sonchifolia* Poep. Endl.) em função do conteúdo de frutose total nos órgãos subterrâneos**. Botucatu, 2001. 73 p. Tese (Doutorado em Agronomia/Horticultura) - Faculdade de Ciências Agronômicas, Campus de Botucatu.

“A ciência tem as raízes amargas, mas os frutos são muito doces.”

Aristóteles

CAPÍTULO VI - EXTRAÇÃO DE INULINA

VI.1 INTRODUÇÃO

A inulina é um carboidrato de reserva presente em diversos produtos vegetais, formado por uma cadeia de moléculas de frutose e uma molécula de glicose terminal. Dentre os vegetais que produzem a inulina destacam-se as raízes de chicória (*Cichorium intybus* L.), a alcachofra de Jerusalém (*Helianthus tuberosus* L.) e o yacon (*Smallanthus sonchifolius* Poepp. & Endl.). Em países europeus, como Bélgica, França e Holanda, a chicória tem sido mais utilizada para a produção industrial de inulina, principalmente devido à sua estabilidade na produção de cadeias longas de glicose e frutose (GFn) e produção constante, mesmo em condições de clima moderado.

A aplicação da inulina na indústria alimentícia, a princípio, resumia-se à produção de bebidas similares ao café, devido ao seu sabor amargo. Entretanto, recentemente descobriu-se que a inulina pode atuar como substituto do açúcar ou da gordura, com a vantagem de não resultar em incremento calórico.

Além de atuar como substituto do açúcar ou da gordura, a inulina apresenta também algumas propriedades funcionais. Ela atua no organismo de maneira similar às fibras dietéticas, contribuindo para melhorar as condições do sistema gastrointestinal. Essa substância tem sido utilizada na composição dos mais diversos produtos alimentícios, como pães, doces, sorvetes, ração animal etc.

Além disso, tanto as raízes de chicória quanto as de yacon são um produto altamente

perecível, exigindo, do ponto de vista industrial, um curto período de processamento, ou seja, equipamentos superdimensionados e com grande tempo ocioso durante a entressafra. Assim, para permitir um melhor dimensionamento de uma planta de processamento para obtenção de inulina e garantir um fornecimento contínuo do produto, é necessário estudar uma maneira de disponibilizar as raízes ao longo do ano. A secagem entraria, então, como uma alternativa para diminuir a atividade de água da matéria prima e conseqüentemente prolongar a sua vida útil.

VI.2 OBJETIVOS

- ✓ Avaliar o decréscimo de sólidos solúveis extraídos a partir de raízes secas de chicória armazenadas por um período de estocagem em câmara fria em função dos parâmetros de secagem;
- ✓ Analisar a quantidade de sólidos solúveis extraídos como avaliação para a concentração de inulina extraída raízes de yacon secas no secador agitador/misturador.

VI.3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

VI.3.1 CHICÓRIA

Alzugaray e Alzugaray (1983) descrevem a chicória; também conhecida por almeirão, chicória amarga ou escarola; como uma planta vivaz e de altura média. Suas folhas são lanceoladas e dentadas, seus talos pubescentes e suas flores apresentam uma cor azul viva. As folhas, assim como as raízes, apresentam um sabor amargo.

A chicória é uma planta que cresce espontaneamente por toda a Europa e Ásia, em lugares secos, às margens dos caminhos e em terrenos baldios (ALZUGARAY e ALZUGARAY, 1983). Talvez por esse motivo, alguns autores considerem, em alguns trabalhos científicos, a *Cichorium intybus* L. como uma espécie invasora.

De acordo com Galvão (1995), a chicória é uma planta nativa da Europa, que pode ser cultivada em praticamente todo o mundo. As variedades cultiváveis de chicória se adaptam bem ao clima temperado ou frio. Em nossa região, podem ser plantadas durante o ano todo, porém, desenvolvem-se melhor no inverno. As plantas são colhidas no outono e na primavera

(ALZUGARAY e ALZUGARAY, 1983; GALVÃO, 1995).

Figueira (2000) realizou um estudo agrotecnológico da espécie *Cichorium intybus* L., e verificou que, no Brasil, a chicória pode ser cultivada tanto na primavera quanto no outono. Entretanto, a produtividade (kg/m^2) se mostrou maior no ciclo do outono.

Van Loo et al. (1995) relatam que a chicória tem sido utilizada como alimento por humanos desde os primórdios. Os egípcios antigos (4000 a.C.), os gregos (450 a.C.) e os romanos utilizavam a chicória como alimento, sendo consumida crua, cozida ou torrada. Também era considerada como remédio contra diversos males.

As folhas de chicória podem ser consumidas como hortaliças de folhas verdes ou ainda como hortaliças mais finas, produzidas a partir dos seus brotos (endívia) (FIGUEIRA, 2000). Na medicina caseira, as folhas de chicória são aplicadas como estimulantes da secreção gástrica e como redutores da taxa de glicose do sangue (GALVÃO, 1995).

O látex da raiz seca de chicória é conhecido por apresentar propriedades tônicas, depurativas, diuréticas e laxantes (GALVÃO, 1995).

As raízes de chicória apresentam sabor particularmente amargo, provocado pela presença de um carboidrato de reserva chamado inulina. Devido a esse sabor amargo, as raízes de chicória costumavam ser torradas e utilizadas por holandeses e egípcios para a produção de bebidas com propriedades similares ao café. Desde o final do século XVIII, o “café chicória” tem sido preparado em escala industrial, sendo bastante consumido na Europa até os dias de hoje (VAN LOO et al., 1995).

Mais recentemente, a inulina foi identificada como um ingrediente capaz de substituir a gordura ou o açúcar, com baixa contribuição calórica (ROBERFROID, GIBSON e DELZENNE, 1993; APPLIED TECHNOLOGY, 1993), passando a ser empregada como ingrediente na produção de alimentos conhecidos no mercado como *light*, *no fat* ou *low fat*.

Por atuar junto ao organismo de maneira similar às fibras dietéticas, a inulina, presente nas raízes de chicória, pode ainda ser utilizada na produção de alimentos funcionais.

VI.3.2 YACON

Segundo Santana e Cardoso (2008), yacon designa tanto a planta como suas raízes. É originária dos Andes e faz parte da família *Asteraceae* – também denominada de *Compositae*

– e seu nome científico é *Smallanthus sonchifolius* (Poepp. & Endl.) H. Robinson. Na literatura científica, também é encontrado sob o nome *Polymnia sonchifolia* Poepp. & Endl. e *Polymnia edulis* Wedd.

Segundo Grau e Rea (1997), o yacon foi classificado originalmente como pertencente ao gênero *Polymnia* (*Compositae*, *Heliantheae*, subtribo *Melampodinae*), o qual foi criado por Linnaeus em 1751. Na primeira revisão moderna do gênero realizada por Wells, em 1967, o yacon foi mantido neste gênero e posteriormente uma diferente perspectiva foi adotada por Robinson em 1978. Este autor determinou que muitas das espécies do gênero *Polymnia*, entre as quais se encontrava o yacon, na realidade, pertenciam a um gênero que Mackensie havia proposto em 1933: o gênero *Smallanthus*.

De acordo com Grau e Rea (1997), existem diferenças importantes entre os gêneros *Polymnia* e *Smallanthus* (padrão de estrias na superfície do fruto, ausência de glândulas no apêndice da antera, entre outros). No entanto, apesar de muitos autores referirem-se ao yacon como parte do gênero *Polymnia*, o ponto de vista de Robinson vem ganhando aceitação.

Sua raiz tuberosa possui sabor semelhante ao de frutas como o melão, com polpa levemente amarelada, crocante e aquosa (VALENTOVÁ e ULRICHOVÁ, 2003).

O yacon foi introduzido no Brasil no início dos anos 90 (MOSCATTO et al., 2004). Seu consumo expressivo iniciou-se em meados dos anos 2000 e a raiz tornou-se conhecida popularmente como batata yacon ou batata “diet”.

O percentual de água das raízes situa-se em torno de 83 a 90% em base úmida. Devido ao alto conteúdo de água, o valor energético da raiz é baixo (LACHMAN et al., 2004). As raízes contêm inulina de cadeias pequenas, variando de 2 a 10. Desta forma, alguns autores preferem empregar o termo fruto-oligossacarídeo para descrever esta substância. Ohyama et al. (1990) sugerem que as raízes de yacon contêm fruto-oligossarídeos do tipo da inulina, que compõem polímeros (polimerização β -2,1) e oligossarídeos de baixa polimerização (frutanas de 3 a 10 GP).

Segundo Vilhena (2001), aos oito meses as raízes de yacon apresentam as maiores quantidades de fruto-oligossacarídeos, sendo essa a melhor época de colheita visando à produção de raízes para a extração de frutanos.

Asami et al. (1991) descrevem o período de armazenamento de raízes de yacon, verificando que as frutanas contidas nas raízes foram hidrolisadas e se tornaram frutose ,

glucose e sucrose durante seu crescimento e armazenamento. Os autores recomendam que, para utilizar esses fruto-oligossarídeos, as raízes devem ser armazenadas por um longo período, possibilitando a sua utilização pela indústria e seu consumo como produto fresco. Recomendam ainda o pré-tratamento destas raízes com fumigação, irradiação, secagem ou pré-resfriamento etc.

Doo et al. (2000) armazenaram raízes tuberosas de yacon sob diferentes temperaturas e umidades relativas após um período de cura de 30 dias. Foram analisados sua vida de prateleira, mudanças no teor de água, °Brix e açúcares. As raízes foram armazenadas por mais tempo nas condições de 4°C e 85% de umidade relativa. Enquanto o teor de água das raízes de yacon diminuiu gradualmente, o °Brix aumentou, durante o período de armazenamento de 6 meses.

Vilhena (2001) descreve que raízes mantidas em temperatura ambiente, após 6 dias de armazenamento podem tornar-se inviáveis ao consumo *in natura*, pois apresentam estágio avançado de oxidação e degradação dos tecidos, mostrado pela maior atividade da enzima peroxidase.

VI.3.3 INULINA

A inulina é um carboidrato pertencente ao grupo de polissacarídeos chamados frutanas, composto por uma cadeia principal de unidades de frutose, unidas por ligações β -(2,1)-frutofuranosídicas, com uma unidade de glicose terminal. Sua fórmula pode ser descrita como GF_n, onde G representa a molécula de glicose, F a molécula de frutose e n o número de unidades de frutose (SILVA, 1996; VAN LOO et al., 1995; ROBINSON, 1995).

Os fruto-oligossacarídeos (FOS) são definidos como polímeros de D-frutose, terminando com uma molécula de glicose, de forma que a inulina pode ser classificada como um fruto-oligossacarídeo (SILVA, 1996).

Laurenzo, Navia e Neiditch (1999) e Silva (1996) definem a inulina como um FOS composto por uma mistura de oligômeros de diferentes graus de polimerização (GP) que ocorre naturalmente em produtos vegetais tais como cebola, alho, alcachofra de Jerusalém, dahlia, raízes de chicória e yacon.

O teor de inulina nas raízes de chicória, bem como o grau de polimerização dos

mesmos, é variável com uma série de fatores, tais como: época de plantio, época de colheita, espaçamento entre plantas, período de armazenagem, dentre outros. A inulina extraída de raízes de chicória é uma mistura de oligômeros com diferentes graus de polimerização, com um comprimento médio de cadeia de aproximadamente 9.

Embora a composição molecular da inulina seja bem conhecida, as publicações divergem quanto a sua solubilidade. Merck Index descreve a inulina como levemente solúvel em água fria e solúvel em água quente, enquanto que um estudo quantitativo (PHELPS, 1965 citado por COOPER, 1990) sugere que nas duas formas da inulina ser extraída – a primeira obtida pela precipitação na água, a segunda pela precipitação no etanol – nas quais são substancialmente solúveis em água a 37°C. Sabe-se também que as suspensões de inulina são menos solúveis quando não agitadas. A forma obtida pela precipitação em água é chamada de alfa-inulina e a forma obtida pela precipitação em etanol é chamada de beta-inulina.

Entretanto, Cooper (1990) admite que as diferenças de conformação entre as duas formas não foram determinadas, nem tampouco foram estabelecidas as metodologias que possam distingui-las quanto às diversas formas polimórficas de inulina.

Considerando que a polidispersão e o grau de polimerização dependem do período de colheita e dos métodos de preparo, as propriedades físico-químicas fundamentais das inulinas ainda não são bem conhecidas (GENNARO et al., 2000).

Uma propriedade físico-química importante da inulina pura é o fato de que é quase insolúvel em água fria, mas facilmente solúvel em água quente (VENDRELL-PASCUAS et al., 2000).

De acordo com Silva (1996) e Teeuwen, Thoné e Vandorpe (1992), os povos aborígenes australianos consumiam “murnong” (*Microseris scapigera*) no século XIX como principal fonte vegetal de alimento, com média diária de 200 a 300 gramas. Trata-se de uma planta tuberosa rica em inulina. O mesmo é verdade para os tubérculos de “yacon” (*Polymnia sonchifolia*), que são vegetais tradicionais para algumas tribos indígenas latino-americanas e o novo alimento da moda para os japoneses contemporâneos. Já na Europa Ocidental, a alcachofra de Jerusalém foi a principal fonte de carboidratos até o advento da batata.

A dose diária aceitável para inulina é estabelecida em 40 gramas. Entretanto, não existem evidências de toxicidade ou distúrbios gastrointestinais associados ao consumo de inulina. A média diária de consumo per capita varia de 1 a 10 gramas em populações da parte

ocidental dos EUA e da Europa (VAN LOO et al., 1995).

A inulina pode ser considerada como um ingrediente funcional, com baixa contribuição calórica, devido às seguintes propriedades nutricionais:

- ✓ Após a ingestão, a inulina não é quebrada no sistema digestivo humano, devido à resistência à hidrólise oferecida pelas ligações β -(2,1) entre as molécula de frutose (ROBINSON, 1995). Por esse motivo, não resulta em contribuição calórica nesse processo. Apenas no cólon ocorre a degradação de inulina por fermentação de bactérias e, conseqüentemente, vai ocorrer uma baixa contribuição calórica indireta (ROBERFROID, GIBSON, DELZENNE, 1993; e RANHOTRA, GELROTH e GLASER, 1993).
- ✓ A inulina afeta os parâmetros fisiológicos do sistema digestivo, como esvaziamento gástrico, tempo de trânsito, pH, e massa fecal de forma similar às fibras dietéticas (ROBERFROID, GIBSON e DELZENNE, 1993). Pelo efeito benéfico no sistema digestivo, a inulina é considerada um “alimento funcional”.
- ✓ A ingestão de inulina resulta em um significativo incremento dos benefícios das bifidobactérias. A flora *Bifidus* estimula o sistema imunológico, a absorção de minerais e inibe o crescimento de bactérias nocivas ao organismo (HEWITT, 1994). Este tipo de substância são não-digestíveis na área intestinal superior e alcançam o intestino grosso onde eles são fermentados seletivamente (propriedade prebiótica) pela microflora local (ROBERFROID, 1993; VAN LOO et al., 1995; COUDRAY et al., 2003);
- ✓ Muitos outros efeitos benéficos à saúde relacionados a diabetes, metabolismo de lipídios e redução de risco de câncer tem sido reportados (ROBERFROID, 1993; FLAMM et al, 2001).

Várias investigações demonstraram que ratos alimentados com prebióticos de frutanos absorveram mais Ca e Mg que ratos controle (COUDRAY et al., 2003).

VI.3.4 EXTRAÇÃO POR DIFUSÃO

VI.3.4.1 Conceitos básicos

A difusão é um fenômeno de transporte de massa no qual um soluto é transportado devido a um gradiente de concentração desta substância e aos movimentos das moléculas do

fluido no qual está inserido. Esse soluto irá se dispersar até o momento em que toda a solução esteja a uma mesma concentração.

A extração por difusão é um processo muito comumente utilizado nas indústrias químicas e de alimentos. Esse processo incumbe-se de extrair de matrizes sólidas um soluto específico para posterior processamento e/ou emprego, além de muitas outras finalidades. Também chamada de extração sólido-líquido, neste caso, componentes que estavam na fase sólida passam para a fase líquida. O fenômeno fundamenta-se em aspectos relacionados com a solubilidade do soluto que varia em função do solvente, da temperatura, pressão, potencial químico etc.

VI.3.4.2 Extração de inulina

A extração inicial da inulina é efetuada com a solubilização da inulina contida nos tubérculos. A extração é convenientemente efetuada utilizando água. Hoehn, McKay e Murray (1983) descrevem que a inulina é moderadamente solúvel em água a temperaturas abaixo de 50°C. Em temperaturas mais altas, entretanto, a solubilidade aumenta substancialmente, assim é preferível que a extração ocorra em temperaturas acima de 50°C, preferencialmente entre 80 e 90°C. A utilização de temperatura alta também aumenta a taxa de solubilização da inulina, inativa qualquer enzima presente que possa interferir nos processos subsequentes e resulta na extração de quantidades menores de compostos nitrogenados.

Para raízes cortadas em fatias, encontrou-se que espessuras menores que aproximadamente 0,5 cm não aumentam o potencial de extração da inulina e, assim, prefere-se utilizar fatias entre 0,5 e 2,0 cm de espessura, aproximadamente. Para raízes cubetadas, encontrou-se que as dimensões abaixo de 0,5 cm não aumentam o potencial de extração de inulina e, assim, prefere-se utilizar raízes cubetadas com dimensões entre 0,5 e 1 cm, aproximadamente (HOEHN, MCKAY e MURRAY, 1983).

Os mesmo autores também descrevem parte do processo na qual a solução de inulina filtrada é sujeita a uma etapa simultânea de concentração e purificação na qual os aminoácidos, peptídeos, minerais e outros contaminantes de peso molecular mais baixo que a inulina são removidos da solução. Esta etapa simultânea de concentração e purificação pode ser efetuada por técnica de membrana adequada na qual é permitida a passagem dos

contaminantes com parte da fase aquosa, enquanto que a inulina é retida na solução concentrada.

VI.4 MATERIAL E MÉTODOS

VI.4.1 RAÍZES DE CHICÓRIA

Chicória da variedade *Orchies* foi plantada nas dependências do Campo Experimental da Faculdade de Engenharia Agrícola da UNICAMP, na segunda quinzena de março (outono – 20 de março a 21 de junho de 2004), por se tratar do período de maior produtividade para as condições climáticas da região (FIGUEIRA, 2000).

Depois de colhidas, as raízes foram lavadas e submetidas a dois tipos de corte: um corte em fatias e um corte em cubos homogêneos. Essa diferenciação objetivou analisar o comportamento da cinética de secagem e de rendimento na extração de inulina destes dois processos de redução de tamanho (OLIVEIRA, 2005).

VI.4.1.1 Secagem e armazenamento

A secagem do material já cortado foi realizada em um secador convectivo conjugado de fluxo paralelo e perpendicular de acordo com a metodologia aplicada e descrita por Oliveira (2005). Os parâmetros operacionais do processo de secagem seguiram as condições estabelecidas pelo planejamento experimental central composto com duas variáveis independentes (temperatura e velocidade do ar), mostrado na Tabela VI.1. O processo de secagem foi finalizado quando as amostras atingiram o equilíbrio dinâmico.

Após a secagem, as amostras foram armazenadas a 17°C em uma câmara fria por aproximadamente 36 meses, quando foram então utilizadas no presente experimento.

Tabela VI.1 – Níveis das variáveis codificadas e reais para o planejamento experimental da secagem.

	ensaio	Variável codificada		Variável real	
		X ₁	X ₂	T _{sec} [°C]	V [m/s]
Pontos fatoriais	1	-1	-1	50,0	0,50
	2	-1	+1	50,0	1,30
	3	+1	-1	90,0	0,50
	4	+1	+1	90,0	1,30
Pontos centrais	5	0	0	70,0	0,90
	6	0	0	70,0	0,90
	7	0	0	70,0	0,90
Pontos axiais	8	-1,41	0	41,7	0,90
	9	+1,41	0	98,3	0,90
	10	0	-1,41	70,0	0,34
	11	0	+1,41	70,0	1,46

VI.4.1.2 Extração de inulina de raízes de chicória

Tanto o processo de secagem como de extração foram realizados e otimizados seguindo um planejamento experimental central composto e a Metodologia de Superfície de Resposta – MSR (OLIVEIRA, 2005). Esta metodologia segue um modelo contendo termos de primeira ordem, de segunda ordem e da interação entre os termos, conforme a Equação 26.

$$SS[\%] = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_{11} X_1^2 + b_{22} X_2^2 + b_{12} X_1 X_2 \quad (26)$$

Assim, os ensaios de extração no presente trabalho seguiram o citado planejamento experimental e respectivo tratamento das amostras, ou seja, as variáveis independentes foram os parâmetros operacionais de secagem. Esse procedimento foi assim realizado com o intuito de se avaliar os efeitos da secagem na extração da inulina.

Portanto, no planejamento experimental foram utilizadas duas variáveis independentes: temperatura e velocidade do ar, e como variável resposta (dependente), a quantidade de sólidos solúveis extraídos como avaliação para a concentração de inulina

extraída.

O processo de difusão por água quente foi o método empregado nos ensaios experimentais de extração de inulina de raízes secas de chicória. Para esses ensaios, as amostras fatiadas e cubetadas originadas de diferentes ensaios experimentais de secagem foram retiradas da câmara fria após o período de estocagem.

Para cada ensaio, as amostras eram pesadas de acordo com seus respectivos teores de água e relação água:massa seca de raiz (12,0 kg_{H2O}/kg_{MS}). Subsequentemente, uma porção específica de raízes secas foi imersa em água destilada em um Becker (250 ml) e colocada em banho térmico com temperatura fixa. Os valores dos parâmetros de extração como relação água:massa seca e temperatura do banho foram definidos previamente (OLIVEIRA, 2005).

Foi definido o tempo de 15 min de reidratação acrescidos de 90 min para cada extração. Foi definido o tempo de 90 min para cada extração como resultado de ensaio de curva crescente de sólidos solúveis extraídos, enquanto que o tempo de reidratação definido corresponde ao ponto de inflexão da curva de reidratação, ambas realizadas por OLIVEIRA (2005).

A quantidade de sólidos solúveis extraída foi determinada usando um refratômetro digital de bancada com amostra do extrato final, segundo o método nº 13.6.1 (INSTITUTO ADOLFO LUTZ, 1976).

O software STATISTICA versão 6 (STATSOFT INC., 2001) foi usado na geração do planejamento experimental, na análise estatística dos resultados e na regressão do modelo matemático.

VI.4.2 RAÍZES DE YACON

VI.4.2.1 Extração de inulina de raízes de yacon

O processo de extração de inulina a partir de raízes de yacon foi estudado mediante planejamento experimental fatorial completo com quatro variáveis independentes (aplicação de pulso de vácuo, aplicação de radiação infravermelha, temperatura e velocidade do ar de secagem), avaliadas em dois níveis (-1 e +1) e quadruplicata nos pontos centrais (0), totalizando 20 experimentos. A variável dependente do planejamento foi a porcentagem de sólidos solúveis extraídos no processo em função da quantidade de matéria seca. A Tabela VI.2 mostra o planejamento experimental fatorial 2⁴ com as variáveis codificadas e reais do

processo de secagem. Como o intuito foi avaliar a influência dos parâmetros operacionais do secador agitador/misturador na quantidade de sólidos solúveis extraídos, utilizaram-se as variáveis relativas ao processo de secagem.

Tabela VI.2 – Níveis das variáveis codificadas e reais para o planejamento experimental fatorial 2⁴ da extração.

Ensaio	Variável codificada				Variável real				
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	V [min]	R [min/15min]	T [°C]	U [m/s]	
Pontos fatoriais	1	-1	-1	-1	-1	0	0,0	35	0,85
	2	1	-1	-1	-1	30	0,0	35	0,85
	3	-1	1	-1	-1	0	3,0	35	0,85
	4	1	1	-1	-1	30	3,0	35	0,85
	5	-1	-1	1	-1	0	0,0	55	0,85
	6	1	-1	1	-1	30	0,0	55	0,85
	7	-1	1	1	-1	0	3,0	55	0,85
	8	1	1	1	-1	30	3,0	55	0,85
	9	-1	-1	-1	1	0	0,0	35	1,25
	10	1	-1	-1	1	30	0,0	35	1,25
	11	-1	1	-1	1	0	3,0	35	1,25
	12	1	1	-1	1	30	3,0	35	1,25
	13	-1	-1	1	1	0	0,0	55	1,25
	14	1	-1	1	1	30	0,0	55	1,25
	15	-1	1	1	1	0	3,0	55	1,25
	16	1	1	1	1	30	3,0	55	1,25
Pontos centrais	17	0	0	0	0	15	1,5	45	1,05
	18	0	0	0	0	15	1,5	45	1,05
	19	0	0	0	0	15	1,5	45	1,05
	20	0	0	0	0	15	1,5	45	1,05

A análise possibilitou obter modelo estatístico matemático capaz de prever o

comportamento da variável dependente em função das variáveis independentes, na faixa adotada. Esta metodologia segue um modelo contendo termos de primeira ordem e de interação entre os termos, conforme a Equação 27.

$$\begin{aligned} SS[\%] = & b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 X_3 + b_4 X_4 + b_{12} X_1 X_2 + b_{13} X_1 X_3 + b_{14} X_1 X_4 + \\ & + b_{23} X_2 X_3 + b_{24} X_2 X_4 + b_{34} X_3 X_4 \end{aligned} \quad (27)$$

As raízes de yacon secas resultantes do processo de secagem descrito no Capítulo 5 foram utilizadas na extração de inulina por difusão em água quente. Essas amostras foram armazenadas em geladeira a cerca de 5 °C até o momento de utilização nos ensaios. Da mesma forma que o processo descrito no item VI.4.1.2, as amostras foram pesadas buscando atingir uma relação água:massa seca de raiz (12,0 kg_{H2O}/kg_{MS}) considerando o teor de água das amostras. Foi fixado um volume de 200 ml de solução.

Diferentemente da metodologia aplicada no processo de extração a partir de raízes de chicória, as amostras de yacon ficaram imersas apenas 90 min. O período considerado como período de reidratação não foi aplicado porque os teores de água das amostras de yacon encontrados no final do processo de secagem foram superiores ao de raízes de chicória. Assim, não houve necessidade de se reidratá-las.

Os extratos foram analisados por refratômetro digital de bancada (modelo Arias 500 da marca Reichert) conforme método nº 13.6.1 (INSTITUTO ADOLFO LUTZ, 1976).

VI.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram realizadas extrações de inulina por difusão em água quente para raízes de chicória secas armazenadas em câmara fria, além das extrações com raízes de yacon secas, ou seja, o material oriundo dos ensaios de secagem, seguindo as combinações de parâmetros operacionais indicado pelo planejamento experimental descrito no Capítulo 5. Para estudar os efeitos das variáveis envolvidas no processo de secagem de raiz de chicória após período de estocagem, foi realizado um delineamento central composto tendo como variáveis a temperatura e velocidade do ar de secagem. Esses resultados foram comparados com os obtidos por Oliveira (2005). Quanto às análises de extração do material seco, foram utilizadas as mesmas variáveis do delineamento fatorial 2⁴ utilizado no Capítulo 5 com o intuito de se

avaliar os efeitos da secagem na extração. Cada análise será feita separadamente para melhor compreensão dos resultados.

VI.5.1 EXTRAÇÃO DE INULINA A PARTIR DE RAÍZES SECAS DE CHICÓRIA

A fim de estabelecer uma base uniforme para comparação dos resultados, os dados de sólidos solúveis extraídos foram tratados, obtendo a razão entre a massa de sólidos solúveis extraídos e a massa seca de raiz de chicória usada em cada experimento. Os resultados de sólidos solúveis – SS para raízes fatiadas e cubetadas são mostrados na Tabela VI.3. Os dados obtidos antes do período de estocagem foram apresentados por Oliveira (2005) e Park et al. (2007).

Tabela VI.3 – Sólidos solúveis extraídos antes e depois do período de estocagem.

Ensaio	Variáveis codificadas		Variáveis reais		Sólidos solúveis SS [g _{SS} /g _{MS}]				
	X _T	X _V	T [°C]	V [m/s]	Fatiadas		Cubetadas		
					Antes	Depois	Antes	Depois	
1	-1	-1	50	6,0	0,750	0,629	0,600	0,646	
Pontos	2	-1	+1	50	11,0	0,660	0,594	0,585	0,577
fatoriais	3	+1	-1	90	6,0	0,720	0,609	0,630	0,618
	4	+1	+1	90	11,0	0,735	0,636	0,634	0,600
Pontos	5	0	0	70	8,5	0,675	0,597	0,599	0,590
centrais	6	0	0	70	8,5	0,693	0,655	0,585	0,595
	7	0	0	70	8,5	0,636	0,662	0,615	0,558
	8	-1,41	0	42	8,5	0,660	0,659	0,573	0,659
Pontos	9	+1,41	0	98	8,5	0,675	0,580	0,641	0,621
axiais	10	0	-1,41	70	5,0	0,690	0,664	0,600	0,634
	11	0	+1,41	70	12,0	0,660	0,602	0,630	0,592
	Média de SS dos pontos centrais					0,668	0,638	0,600	0,581
	Desvio padrão					0,0290	0,0357	0,0149	0,0201

A Tabela VI.4 mostra os efeitos lineares e quadráticos dos parâmetros de secagem, assim como suas interações nos sólidos solúveis extraídos. Oliveira (2005), trabalhando com

raízes de chicória fatiadas antes do período de estocagem, verificaram que o modelo polinomial de segunda ordem não foi estatisticamente significativos com nível de confiança de 95%. Da mesma forma, não houve parâmetros significativos estatisticamente para extração de inulina de raízes fatiadas secas de chicória após a estocagem.

Quanto à extração de raízes cubetadas após a estocagem, o efeito quadrático da temperatura e o efeito linear da velocidade do ar foram considerados estatisticamente significativos, embora somente o efeito linear da temperatura de secagem tenha sido significativo nos resultados obtidos por Park et al. (2007).

Tabela VI.4 – Efeitos, erros padrões e p-valores dos parâmetros operacionais de secagem na extração de inulina.

Variável	Efeito	Erro padrão	p-valor
Amostras fatiadas			
T (linear)	0,017	0,024	0,5252
T (quadrático)	0,022	0,029	0,4776
V (linear)	-0,029	0,024	0,2802
V (quadrático)	0,029	0,029	0,3550
Interação T x V	0,052	0,034	0,1874
Amostras cubetadas			
T (linear)	-0,015	0,013	0,3155
T (quadrático)	0,051	0,016	0,0226
V (linear)	-0,037	0,013	0,0381
V (quadrático)	0,024	0,016	0,1867
Interação T x V	0,025	0,019	0,2302

Após a remoção dos fatores não significativos, a análise de variância (ANOVA) foi gerada (Tabela VI.5) e os efeitos e os coeficientes de regressão foram determinados. A significância de todos os termos do modelo polinomial foi avaliada estatisticamente, considerando-se o *F-value* na probabilidade (p) de 0,05. Para amostras fatiadas, nenhuma das variáveis foi considerada estatisticamente significativa.

Tabela VI.5 – Análise de variância (ANOVA) dos parâmetros de secagem na extração de inulina de raízes cubetadas secas de chicória.

Fonte de variação	Soma quadrática	Graus de liberdade	Média quadrática	F _{calc}	F _{tab}	R ²
Regressão	5,63x 10 ⁻⁰³	2	2,81 x 10 ⁻⁰³	6,29	4,46	0,61
Resíduo	3,58 x 10 ⁻⁰³	8	4,47 x 10 ⁻⁰⁴			
Falta de ajuste	2,77 x 10 ⁻⁰³	6	4,62 x 10 ⁻⁰⁴	1,15	19,33	
Erro puro	8,05 x 10 ⁻⁰⁴	2	4,02 x 10 ⁻⁰⁴			
Total	9,20 x 10 ⁻⁰³	10				

O modelo estatístico foi obtido a partir dos níveis codificados dos fatores. O modelo matemático dos sólidos solúveis extraídos (SS) considerando amostras cubetadas para variáveis codificadas é mostrado na Equação 28. Este modelo é válido somente para a faixa experimental considerada. Para comparação, o modelo nas mesmas condições para os resultados de antes do período de estocagem apresentado por Park et al. (2007) é mostrado na Equação 29.

$$SS = 5.923 \times 10^{-1} + 2.184 \times 10^{-2} X_T^2 - 1.830 \times 10^{-2} X_V \quad (28)$$

$$SS = 0.608 + 0.022 X_T \quad (29)$$

Os coeficientes de regressão foram usados na manipulação estatística para gerar a superfície de contorno e as curvas em nível do modelo de regressão. A superfície de resposta e as curvas em nível para a extração de inulina de raízes cubetadas secas de chicória são mostradas na Figura VI.1.

Apesar do baixo valor do coeficiente de determinação ($R^2 = 0,61$), o módulo do desvio médio relativo deste modelo foi de apenas 3,14%. Além disso, observou-se que os resíduos estão distribuídos de forma aleatória. Isto significa que o modelo é adequado na faixa de valores estudada.

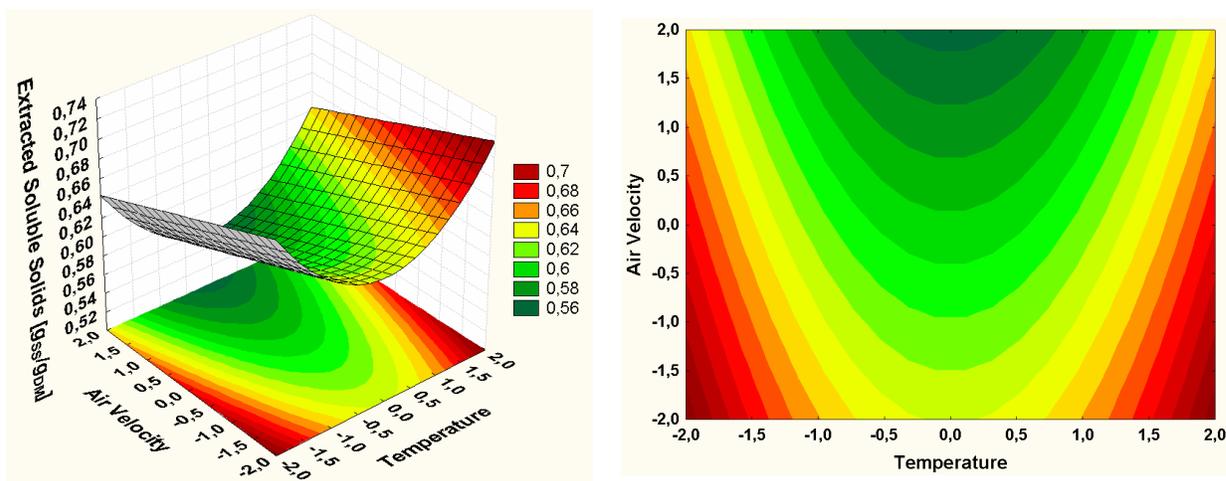


Figura VI.1 - Superfície de resposta e curvas em nível mostrando os efeitos dos parâmetros operacionais de secagem na extração de inulina de raízes cubetadas secas de chicória.

Na maior parte dos níveis do planejamento experimental, a quantidade de sólidos solúveis extraídos depois da estocagem foi menor que das amostras de antes da estocagem. Para confirmar estes resultados, as médias dos valores de sólidos solúveis obtidos antes e depois do período de armazenamento foram comparados por um teste de média. Os valores de sólidos solúveis relativos aos pontos centrais do planejamento experimental foram escolhidos por causa da similaridade de seus parâmetros operacionais de secagem (níveis). As médias foram consideradas estatisticamente diferentes com nível de confiança de 95% para as amostras de raízes fatiadas e cubetadas.

VI.5.2 EXTRAÇÃO DE INULINA A PARTIR DE RAÍZES SECAS DE YACON

Na Tabela VI.6 estão apresentados os resultados da extração de inulina a partir de raízes secas de yacon. Esses resultados são oriundos da determinação do teor de sólidos solúveis (°Brix) do extrato resultante do processo de extração por difusão em água quente por meio de refratômetro digital de bancada. Nesses ensaios, os valores de sólidos solúveis variaram de 5,8 a 9,1 °Brix, condizentes com os valores encontrados por Gibertoni (2003). Esse autor mediu °Brix da solução proveniente do processo de branqueamento e dos sucos oriundos da trituração, prensagem e lavagens de raízes de yacon, encontrando valores entre 5,4 e 10,2 °Brix.

Tabela VI.6 – Porcentagem de sólidos solúveis extraídos para o planejamento experimental da secagem de yacon.

	Ensaio	Variáveis independentes				Variável dependente
		X _V	X _R	X _T	X _U	SS [x100 kg _{SS} /kg _{MS}]
Pontos fatoriais	1	-1	-1	-1	-1	1,099
	2	1	-1	-1	-1	0,824
	3	-1	1	-1	-1	0,882
	4	1	1	-1	-1	0,706
	5	-1	-1	1	-1	0,696
	6	1	-1	1	-1	0,742
	7	-1	1	1	-1	0,944
	8	1	1	1	-1	0,822
	9	-1	-1	-1	1	0,711
	10	1	-1	-1	1	0,740
	11	-1	1	-1	1	0,869
	12	1	1	-1	1	0,756
	13	-1	-1	1	1	0,873
	14	1	-1	1	1	0,926
	15	-1	1	1	1	0,800
	16	1	1	1	1	0,742
Pontos centrais	17	0	0	0	0	0,835
	18	0	0	0	0	0,843
	19	0	0	0	0	0,781
	20	0	0	0	0	0,841

Para o processo de extração por difusão é interessante obter uma matriz sólida que tenha uma facilidade na embebição do solvente utilizado e uma maior quantidade de sólidos solúveis disponíveis à extração.

Desta forma, o planejamento experimental foi realizado a fim de se obter a influência

das variáveis independentes do processo de secagem (aplicação do pulso de vácuo – V, aplicação de radiação infravermelha – R, temperatura – T e velocidade do ar – U) sobre a variável dependente que foi o teor de sólidos solúveis extraídos por massa seca de raiz – SS.

Os resultados da análise estatística aplicada aos dados experimentais do teor de sólidos solúveis resultantes da extração em água quente de raízes cubetadas de yacon são apresentados na Tabela VI.7. Em negrito, estão os efeitos dos fatores lineares e de interação significativos, admitindo um intervalo de confiança de 95%, ou seja, um nível de significância de 5% ($p \leq 0,05$), para a análise por meio do erro puro.

Tabela VI.7 – Efeito estimado, erro padrão e grau de significância estatística (p) para o teor de sólidos solúveis na extração de raízes de yacon.

Variáveis	Efeito	Erro padrão	p
Média	0,8216	0,0066	0,000
Vácuo V (linear)	-0,0770	0,0148	0,014
Radiação R (linear)	-0,0112	0,0148	0,505
Temperatura T (linear)	-0,0051	0,0148	0,753
Velocidade U (linear)	-0,0373	0,0148	0,086
Interação V x R	-0,0401	0,0148	0,074
Interação V x T	0,0564	0,0148	0,032
Interação V x U	0,0545	0,0148	0,035
Interação R x T	0,0288	0,0148	0,147
Interação R x U	-0,0094	0,0148	0,570
Interação T x U	0,0714	0,0148	0,017

Os efeitos lineares e de interação das variáveis indicam quanto estes fatores exercem influência sobre a variável dependente. Um efeito positivo indica que o aumento desta variável independente acarreta em um aumento da variável dependente, enquanto que um efeito negativo indica o inverso, ou seja, o aumento do valor da variável independente ocasiona a diminuição da resposta.

Observa-se que para a porcentagem de sólidos solúveis extraídos, os efeitos dos parâmetros de aplicação de pulso de vácuo e das interações entre vácuo e temperatura; vácuo e

velocidade; e temperatura e velocidade foram significativos a 95% de confiança e, portanto, devem ser utilizados no modelo de predição.

O parâmetro que exerceu maior influência foi a interação entre temperatura e velocidade do ar de secagem, seguido da aplicação de pulso de vácuo.

Após a retirada dos termos não significativos foi feita uma análise de variância (ANOVA) e aplicado o teste F para se verificar a significância da regressão e gerar os modelos preditivos. A Tabela VI.8 mostra a análise de variância do modelo gerado pela análise do erro puro.

Tabela VI.8 – Análise de variância (ANOVA) para a porcentagem de sólidos solúveis extraídos de raízes de yacon.

Fonte de variação	Soma Quadrática	Graus de Liberdade	Média Quadrática	F_{calc}	F_{tab}	R²
Regressão	0,0687	4	0,0172	2,33	3,06	0,383
Resíduo	0,1105	15	0,0074			
Falta de ajuste	0,1079	12	0,0090	10,20	8,74	
Erro puro	0,0026	3	0,0009			
Total	0,1792	19				

Por meio da análise de variância verifica-se que o modelo apresentou regressão não significativa (F_{calc} inferior ao F_{tab}) e o coeficiente de determinação (R^2) obtido para o modelo ajustado foi de apenas 0,383, indicando que o modelo explicou somente 38,3% da variação dos dados observados. Oliveira (2005) encontrou modelo não significativo para a influência dos parâmetros de secagem na extração de raízes de chicória fatiadas secas.

VI.6 CONCLUSÕES

A partir dos resultados referentes à análise do período de estocagem de raízes secas de chicória para extração de inulina, pode-se inferir que:

- ✓ O estudo comprovou o efeito positivo da temperatura e da velocidade do ar de secagem

na extração de inulina de raízes de chicória cubetadas após período de armazenamento das amostras em câmara fria;

- ✓ Apesar da diferença estatisticamente significante entre as quantidades de sólidos solúveis extraídos obtidas de amostras de antes e depois do período de estocagem, é possível notar que somente cerca de 4% da substância é perdida em aproximadamente 36 meses de estocagem;
- ✓ Fica evidente a possibilidade de armazenamento frigorificado das raízes de chicória combinado com um processo de secagem para posterior extração de inulina. É necessária uma análise de custos para viabilizar tal procedimento na produção comercial da inulina. Porém, tecnicamente é possível armazenar estas raízes em ambiente refrigerado durante seu armazenamento.

A partir dos resultados referentes à análise do processo de secagem de raízes de yacon para extração de inulina, pode-se inferir que:

- ✓ O modelo gerado pela análise de superfície de resposta não foi considerado estatisticamente significativo para os parâmetros operacionais da secagem. Em estudos anteriores, tais resultados já foram encontrados para raízes de chicória. Isso mostra certa independência dos valores de sólidos solúveis extraídos do processo de secagem.
- ✓ Considerando que os valores de sólidos solúveis extraídos são independentes dos parâmetros operacionais de secagem, a decisão da faixa de utilização destes parâmetros pode ser tomada baseada somente no comportamento do produto perante a secagem ou outro parâmetro de qualidade.

VI.7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALZUGARAY, D.; ALZUGARAY, C. **Chicória Amarga. Plantas que curam – A natureza a serviço da saúde.** sl. v. 40, n.11, p.153-154, 1983.

APPLIED TECHNOLOGY. Converting chicory - not just a cup of coffee, **Dairy Foods**, Chicago: Cahners, v.94, n.11, p.112, Oct. 1993.

ASAMI, T.; MINAMISAWA, K.; TSUCHIYA, T.; KANO, K.; HORI, I.; OHYAMA, T.;

- KUBOTA, M.; TSUKIHASHI, T. Fluctuation of oligofructan contents in tuber of yacon (*Polymnia sonchifolia*) during growth and storage. **Japanese Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 62, p. 621-7, 1991.
- COOPER, P. D. **Pharmaceutical composition and method containing gamma inulin or derivative thereof**. USA Patent number 4,954,622. September 4, 1990.
- COUDRAY, C., TRESSOL, J.C., GUEUX, E. AND RAYSSIGUIER, Y., 2003, Effects of inulin-type fructans of different chain length and type of branching on intestinal absorption and balance of calcium and magnesium in rats, **European Journal of Nutrition**, 42: 91–98.
- DOO, H.S.; LI, H.L.; KWON, T.O.; RYU, J.H. Changes in sugar contents and storability of yacon under different storage conditions. **Korean Journal of Crop Science**. v. 45, n. 5, p. 300-304, 2000.
- FIGUEIRA, G. M. **Desenvolvimento agrotecnológico da espécie Cichorium intybus L.** Campinas, 2000. 68f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola), Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.
- FLAMM, G.; GLINSMANN, W.; KRITCHEVSKY, D.; PROSKY, L.; ROBERFROID, M., Inulin and oligofructose as dietary fiber: a review of the evidence. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, v. 41, p. 353–362, 2001.
- GALVÃO, G. **Almeirão**. Natureza. São Paulo. v.8, n.7, p.53-55, 1995.
- GENNARO, S.; BIRCH, G.G.; PARKE, S.A.; STANCHER, B. Studies on the physicochemical properties of inulin and inulin oligomers. **Food Chemistry**, v. 68, n.2, p. 179-183, 2000.
- GRAU, A; REA, J. Yacon. *Smallanthus sonchifolius* (Poep. & Endl.) H. Robinson. In: HERMANN, M.; HELLER, J. (Eds.). **Andean roots and tubers: ahipa, arracacha, maca and yacon**. Promoting the conservation and use of underutilized and neglected crops. (Institute of Plant Genetics and Crop Plant Research). Gatersieben/International Plant Genetic Resources Institute. Rome, Italy, 1997. p.199- 242.
- HEWITT, L. Fight the good fat. **Food Manufacture**, London. v.69, n.10, p.20, 1994.
- HOEHN, E.; McKAY, C. J.; MURRAY, E. D. **Production of high fructose syrup from**

inulin involving ultrafiltration. USA Patent number 4,421,852. December 20, 1983.

LACHMAN, L. et al. Saccharides of yacon [*Smallanthus sonchifolius* (Poepp. et Endl.) H. Robinson] tubers and rhizomes and factors affecting their content. **Plant soil environment**, Czech Republic, v.50, n.9, p.383-390, 2004.

LAURENZO, K. S.; NAVIA; J. L.; NEIDITCH; D. S. **Preparation of inulin products.** USA Patent number 5,968,365. October 19, 1999.

MOSCATTO, J.A. et al. Farinha de yacon e inulina como ingredientes na formulação de bolo de chocolate. **Ciência Tecnologia Alimentos**, Campinas, v.24, n.4, p.634-640, 2004.

OHYAMA, T.; ITO, O.; YASUYOSHI, S.; IKARASHI, T.; MINAMIZAWA, K.; KUBOTA, M.; ASAMI, T.; TSUKHASHI, T. Composition of storage carbohydrate in tuber of yacon (*Polymnia sonchifolia*). **Soil Science and Plant Nutrition**, v. 36, p.167-71, 1990.

OLIVEIRA, R.A. de, **Efeito da secagem de raiz de chicória na obtenção de inulina.** (Dissertação de mestrado), Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, Brasil. 2005.

PARK, K.J.; ANTONIO, G.C.; OLIVEIRA, R.A. de; PARK, K.J.B. Conceitos de processo de equipamentos de secagem. Apostila. 121p. 2007. Disponível em:

<http://www.feagri.unicamp.br/ctea/projpesq.html> Acesso em 23 mai. 2007.

RANHOTRA, G.S.; GELROTH, J.A.; GLASER, B.K. Usable energy value of selected bulking agents. **Journal of Food Science**. Chicago. v.58, n.5, p. 1176-1178. 1993.

ROBERFROID, M. Dietary fiber, inulin, and oligofructose: a review comparing their physiological effects. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, Boca Raton, v. 33, n.2, p.103-148, 1993.

ROBERFROID, M.; GIBSON, G.R.; DELZENNE, N. The biochemistry of oligofructose, a nondigestible fiber: na approach to calculate its caloric value. **Nutrition Reviews**. Lawrence. v.51, n.5, p.137-146, 1993.

ROBINSON, R. K. The potential of inulin as a functional ingredient. **British Food Journal**, Bradford. v. 97, n. 4, p. 30-32, 1995.

SANTANA I., CARDOSO, M. H. Raiz tuberosa de yacon (*Smallanthus sonchifolius*):

potencialidade de cultivo, aspectos tecnológicos e nutricionais. **Ciência Rural**. v. 38, n. 3, p. 898-905, 2008.

SILVA, R.F. Use of inulin as a natural texture modifier. **Cereal Foods World**. St. Paul. v. 41, n. 10, p.792-795, 1996.

STATSOFT INC. Statistica, version 6.0. **Data analysis software system**. Tulsa, StatSoft, Inc., 2001.

VALENTOVÁ, K.; ULRICHOVÁ, J. *Smallanthus sonchifolius* and *Lepidium meyenii* – prospective Andean crops for the prevention of chronic diseases. **Biomedical Papers**, Czech Republic, v. 147, n.2, p.119-130, 2003.

VAN LOO, J.; COUSSEMENT, P.; LEENHEER, L. de; HOEBREGS, H.; SMITS, G. On the presence of inulin and oligofructose as natural ingredients in the western diet. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**. Boca Raton. v.35, n.6, p.525-552, 1995.

VENDRELL-PASCUAS, S., CASTELLOTE-BARGALLÓ, A.I. AND LÓPEZ-SABATER, M.C. Determination of inulin in meat products by high-performance liquid chromatography with refractive index detection, **Journal of Chromatography A**, v. 881, 591–597, 2000.

VILHENA, S.M.C. **Ciclo de cultivo e técnicas pós-colheita de Yacon (*Polymnia sonchifolia* Poep. Endl.) em função do conteúdo de frutose total nos órgãos subterrâneos**. Botucatu, 2001. 73 p. Tese (Doutorado em Agronomia/Horticultura) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Campus de Botucatu.

“Quod laboriosius acquiritur, magis diligitur.”

“Tem-se mais amor ao que se conseguiu com mais trabalho.”

Aristóteles

CONCLUSÕES GERAIS

Com relação aos resultados obtidos nas análises contidas no Capítulo 2, pode-se concluir que:

- ✓ Os resultados de perda de carga e velocidade mostram a influência da abertura das válvulas no comportamento do escoamento do ar no interior da câmara e das tubulações do secador vibrofluidizado e a importância destas informações para trabalhos futuros neste equipamento;
- ✓ A técnica de estímulo e resposta utilizando método de pulso de traçador no leito de secagem aliado à análise de imagens por meio do software IDRISI se mostrou eficiente na obtenção do tempo de residência para grãos de milho e de feijão;
- ✓ O método ajustado para determinação do tempo de residência com base nas imagens digitais proporcionou determinação do tempo de residência médio com uso apenas das imagens digitais, sem vínculos com a massa do produto, facilitando o trabalho experimental;
- ✓ De maneira geral, para o levantamento do tempo de residência e a avaliação da metodologia utilizada, conclui-se que a análise por imagens é viável na prática, sendo necessário ainda um ajuste fino no tratamento das imagens utilizadas. Neste ajuste fino, pode-se tentar utilizar o método por ajuste visual, que é trabalhoso, porém viável;
- ✓ O processo de secagem com diferentes velocidades de ar de secagem, temperaturas, amplitudes de vibração e angulações do leito do secador forneceram os valores das difusividades efetivas variando de $5,47 \times 10^{-11}$ a $6,40 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$;

- ✓ Dentre as quatro variáveis analisadas somente a amplitude de vibração foi considerada estatisticamente significativa. É importante notar o efeito que a vibração provoca nos níveis de transferência de calor e de massa.

A partir dos resultados referentes ao Capítulo 3, pode-se inferir que:

- ✓ Após construção e adaptação do secador agitador/misturador, o secador é uma alternativa viável na aplicação de pulso de vácuo e energia radiante na faixa do infravermelho;
- ✓ Houve dificuldade em se trabalhar experimentalmente com vácuo e atingir a vedação hermética da câmara de secagem em um protótipo;
- ✓ Observa-se certa dispersão apresentada pelos dados experimentais em relação aos modelos propostos. No entanto, modelo empírico de Page demonstrou melhor representação dos dados experimentais do que o modelo de Fick para cubo;
- ✓ Em relação aos valores de difusividade efetiva no processo de secagem de batata, foram obtidos valores mais altos em ensaios realizados com aplicação de energia radiante, o que pode ser exemplificado com a obtenção do menor valor de difusividade efetiva para o ensaio em que houve apenas a aplicação de vácuo.

A partir dos resultados referentes ao Capítulo 4, pode-se inferir que:

- ✓ A variação do comportamento da secagem de batata em relação aos diferentes parâmetros de secagem inviabilizou o tratamento das curvas de cinética de secagem baseado nos períodos específicos de diminuição de teor de água;
- ✓ Na análise por meio das taxas de secagem de batata, somente os efeitos lineares da aplicação da radiação infravermelha intermitente e da temperatura do ar de secagem foram considerados estatisticamente significativos;
- ✓ Quanto aos ensaios de compressão, evidencia-se a independência do módulo de elasticidade da batata após a secagem, perante os parâmetros operacionais escolhidos.

A partir dos resultados referentes ao Capítulo 5 referentes ao processo de secagem de raízes de yacon, pode-se inferir que:

- ✓ A secagem das raízes de yacon é influenciada por todos os parâmetros operacionais de

secagem: aplicação de vácuo, aplicação de energia radiante infravermelha, temperatura e velocidade do ar de secagem;

- ✓ A metodologia de superfície de resposta foi considerada satisfatória na análise desta influência. A taxa de secagem pode ser expressa em função da aplicação do vácuo, da aplicação de radiação infravermelha, da temperatura e velocidade do ar de secagem.

Quanto aos resultados apresentados no Capítulo 5 referentes ao consumo de energia elétrica, pode-se concluir que:

- ✓ As duas maiores potências instaladas no secador (emissores radiantes e resistências elétricas) geraram os maiores efeitos no consumo de energia;
- ✓ A temperatura de secagem tem efeito positivo no consumo de energia elétrica, enquanto que a interação entre temperatura e aplicação de energia infravermelha apresentou efeito negativo.

A partir dos resultados mostrados no Capítulo 6, referentes à análise do período de estocagem de raízes secas de chicória para extração de inulina, pode-se inferir que:

- ✓ O estudo comprovou o efeito positivo da temperatura e da velocidade do ar de secagem na extração de inulina de raízes de chicória cubetadas após período de armazenamento das amostras em câmara fria;
- ✓ Apesar da diferença estatisticamente significativa entre as quantidades de sólidos solúveis extraídos obtidas de amostras de antes e depois do período de estocagem, é possível notar que somente cerca de 4% da substância é perdida em aproximadamente 36 meses de estocagem.

A partir dos resultados mostrados no Capítulo 6, referentes à análise do processo de secagem de raízes de yacon para extração de inulina, pode-se inferir que:

- ✓ O modelo gerado pela análise de superfície de resposta não foi considerado estatisticamente significativo para os parâmetros operacionais da secagem. Em estudos anteriores, tais resultados já foram encontrados para raízes de chicória. Isso mostra certa independência dos valores de sólidos solúveis extraídos do processo de secagem.
- ✓ Considerando que os valores de sólidos solúveis extraídos são independentes dos

parâmetros operacionais de secagem, a decisão da faixa de utilização destes parâmetros pode ser tomada baseada somente no comportamento do produto perante a secagem ou outro parâmetro de qualidade.

APÊNDICES

APÊNDICE A: PERDA DE CARGA DO LEITO DE SECAGEM DO SECADOR VIBROFLUIDIZADO - SISTEMA ABERTO

Posição vertical de medida de pressão	Valores de entrada															
	Válvula de entrada Perfil 1			Válvula de entrada Perfil 4			Válvula de entrada Perfil 6			Válvula de entrada Perfil 7			Válvula de entrada Perfil 8			
	Câmara 1	Câmara 2	Câmara 3	Câmara 1	Câmara 2	Câmara 3	Câmara 1	Câmara 2	Câmara 3	Câmara 1	Câmara 2	Câmara 3	Câmara 1	Câmara 2	Câmara 3	
1	Infância	-44	-43	-42	-42	-40	-42	-31	-29	-32	-19	-16	-20	-12	-10	-11
	Superior	42	41	40	40	40	41	30	28	31	17	13	20	11	10	10
	DR(mmH ₂ O)	86	84	82	82	80	88	61	57	63	36	29	40	23	20	21
4	DP(kPa)	0,84	0,82	0,80	0,80	0,78	0,81	0,60	0,56	0,62	0,35	0,28	0,39	0,23	0,20	0,21
	Infância	-45	-44	-42	-43	-42	-43	-30	-27	-29	-18	-16	-20	-11	-10	-11
	Superior	43	43	41	42	40	42	29	27	29	16	14	18	10	9	10
6	DR(mmH ₂ O)	88	87	83	85	82	85	59	54	58	34	30	38	21	19	21
	DP(kPa)	0,86	0,85	0,81	0,83	0,80	0,83	0,58	0,53	0,57	0,28	0,29	0,37	0,21	0,19	0,21
	Infância	-44	-42	-40	-41	-39	-39	-29	-26	-28	-16	-13	-16	-10	-7	-7
7	Superior	43	41	39	41	39	39	28	25	27	15	12	15	9	6	6
	DR(mmH ₂ O)	87	83	79	82	78	78	57	51	55	31	25	31	19	13	13
	DP(kPa)	0,85	0,81	0,77	0,80	0,76	0,76	0,56	0,50	0,54	0,20	0,24	0,30	0,19	0,13	0,13
8	Infância	-42	-40	-38	-40	-38	-38	-28	-25	-26	-16	-13	-15	-9	-7	-6
	Superior	41	39	37	39	37	37	28	24	25	15	12	14	8	6	5
	DR(mmH ₂ O)	83	79	75	79	75	75	57	49	51	31	25	29	17	13	11
9	DP(kPa)	0,81	0,77	0,73	0,77	0,73	0,73	0,56	0,48	0,50	0,20	0,24	0,28	0,17	0,13	0,11
	Infância	-41	-39	-36	-39	-36	-36	-28	-24	-25	-15	-12	-14	-9	-6	-5
	Superior	41	38	36	38	36	35	27	28	24	14	11	13	8	5	4
10	DR(mmH ₂ O)	82	77	72	77	72	71	55	47	49	29	23	27	17	11	9
	DP(kPa)	0,80	0,75	0,70	0,75	0,70	0,69	0,54	0,46	0,48	0,28	0,23	0,26	0,17	0,11	0,08

APÊNDICE B: PRESSÕES ESTÁTICAS DOS VENTILADORES DE INSUFLAMENTO E EXAUSTÃO (SISTEMA ABERTO)

Posição válvula de exaustão	Leituras no manômetro (mmH ₂ O)	Valores de entrada														
		Posição 1			Posição 4			Posição 6			Posição 7			Posição 8		
		Ventilador Exaustão	Ventilador Insuflamento													
1	inferior	-107	-83	-107	-84	-106	-94	-109	-91	-110	-90					
	superior	117	82	117	85	116	92	118	92	119	89					
	DP(mmH ₂ O)	224	165	224	169	222	186	227	183	229	179					
4	DP(kPA)	2,19	1,61	2,19	1,65	2,17	1,82	2,22	1,79	2,24	1,75					
	inferior	-147	-82	-153	-85	-149	-91	-153	-92	-151	-90					
	superior	157	83	163	84	160	92	163	90	161	89					
6	DP(mmH ₂ O)	304	165	316	169	309	183	316	182	312	179					
	DP(kPA)	2,97	1,61	3,09	1,65	3,02	1,79	3,09	1,78	3,05	1,75					
	inferior	-224	-84	-224	-85	-224	-93	-223	-91	-223	-90					
7	superior	239	84	238	85	238	93	239	89	238	89					
	DP(mmH ₂ O)	463	168	462	170	462	186	462	180	461	179					
	DP(kPA)	4,53	1,64	4,52	1,66	4,52	1,82	4,52	1,76	4,51	1,75					
8	inferior	-219	-84	-219	-85	-219	-92	-219	-90	-220	-89					
	superior	234	84	234	85	234	92	234	90	235	89					
	DP(mmH ₂ O)	453	168	453	170	453	184	453	180	455	178					
9	DP(kPA)	4,43	1,64	4,43	1,66	4,43	1,80	4,43	1,76	4,45	1,74					
	inferior	-203	-85	-203	-86	-202	-92	-202	-90	-201	-88					
	superior	217	85	217	86	216	92	216	90	215	87					
10	DP(mmH ₂ O)	420	170	420	172	418	184	418	180	416	175					
	DP(kPA)	4,11	1,66	4,11	1,68	4,09	1,80	4,09	1,76	4,07	1,71					

APÊNDICE C: PERDA DE CARGA DO LEITO DE SECAGEM DO SECADOR VIBROFLUIDIZADO (SISTEMA FECHADO)

Posição válvula de exatidão	Leituras no manômetro (mmH ₂ O)	Válvulas de entrada Posição 1			Válvulas de entrada Posição 4			Válvulas de entrada Posição 6		
		Câmara 1	Câmara 2	Câmara 3	Câmara 1	Câmara 2	Câmara 3	Câmara 1	Câmara 2	Câmara 3
1	Inferior	-63	-63	-63	-64	-63	-61	-47	-55	-54
	Superior	65	65	65	67	66	64	50	53	57
	DP(mmH ₂ O)	128	128	128	131	129	125	97	108	111
	DP(kPa)	1,25	1,25	1,25	1,28	1,26	1,22	0,95	1,06	1,09
4	Inferior	-59	-59	-59	-56	-57	-59	-43	-47	-50
	Superior	61	62	62	60	61	63	46	50	53
	DP(mmH ₂ O)	120	121	121	116	118	122	89	97	103
	DP(kPa)	1,17	1,18	1,18	1,14	1,15	1,19	0,87	0,95	1,01
6	Inferior	-49	-49	-49	-50	-49	-48	-35	-38	-42
	Superior	53	53	52	54	54	52	40	43	46
	DP(mmH ₂ O)	102	102	101	104	103	100	75	81	88
	DP(kPa)	1,00	1,00	0,99	1,02	1,01	0,98	0,73	0,79	0,86
7	Inferior	-45	-45	-44	-43	-43	-44	-30	-33	-35
	Superior	48	48	46	48	48	47	33	36	39
	DP(mmH ₂ O)	93	93	90	91	91	91	63	69	74
	DP(kPa)	0,91	0,91	0,88	0,89	0,89	0,89	0,62	0,68	0,72
8	Inferior	-43	-42	-41	-40	-41	-41	-27	-30	-32
	Superior	46	45	44	43	44	44	31	34	36
	DP(mmH ₂ O)	89	87	85	83	85	85	58	64	68
	DP(kPa)	0,87	0,85	0,83	0,81	0,83	0,83	0,57	0,63	0,67

APÊNDICE D: PRESSÕES ESTÁTICAS DOS VENTILADORES DE INSUFLAMENTO E EXAUSTÃO (SISTEMA FECHADO)

Posição Válvula de exaustão	Leituras no manômetro (mmH ₂ O)	Válvulas de entrada											
		Posição 1			Posição 4			Posição 6			Posição 7		
		Ventilador Exaustão	Ventilador insuflamento										
1	inferior	-54	-95	-55	-95	-61	-97	-80	-94				
	superior	56	92	56	93	64	95	76	93				
4	DP(mmH ₂ O)	110	187	111	188	125	192	158	187				
	DP(kPA)	1,08	1,83	1,09	1,84	1,22	1,88	1,55	1,83				
6	inferior	-108	-94	-109	-94	-110	-97	-127	-93				
	superior	111	92	112	93	112	95	123	92				
7	DP(mmH ₂ O)	219	186	221	187	222	192	250	185				
	DP(kPA)	2,14	1,82	2,16	1,83	2,17	1,88	2,45	1,81				
8	inferior	-211	-96	-211	-96	-218	-97	-219	-93				
	superior	219	93	219	96	210	95	210	92				
9	DP(mmH ₂ O)	430	189	430	191	428	192	429	185				
	DP(kPA)	4,21	1,85	4,21	1,87	4,19	1,88	4,20	1,81				
10	inferior	-217	-96	-218	-96	-226	-95	-223	-93				
	superior	226	95	227	95	217	94	215	92				
11	DP(mmH ₂ O)	443	191	445	191	443	189	438	185				
	DP(kPA)	4,34	1,87	4,35	1,87	4,34	1,85	4,29	1,81				
12	inferior	-206	-96	-206	-96	-218	-95	-218	-93				
	superior	213	95	213	95	210	94	209	92				
13	DP(mmH ₂ O)	419	191	419	191	428	189	427	185				
	DP(kPA)	4,10	1,87	4,10	1,87	4,19	1,85	4,18	1,81				

APÊNDICE E: CURVAS DE SECAGEM DE RAÍZES DE YACON BASEADAS NO PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL FATORIAL 2^4 .

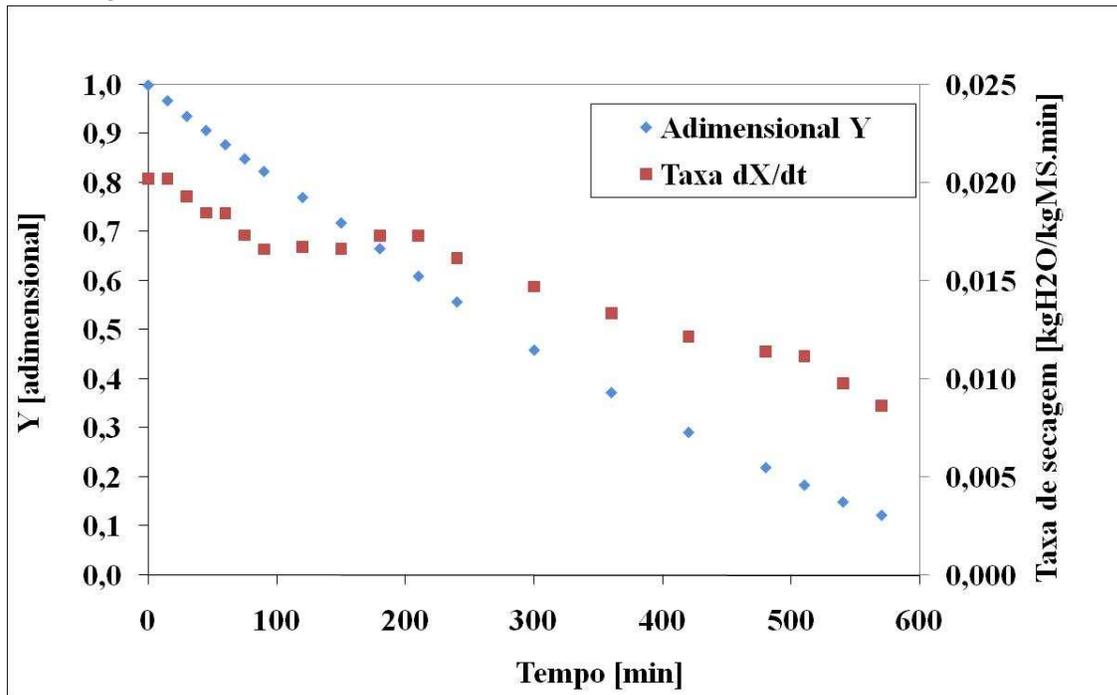


Figura E. 1 – Curvas de secagem de raiz de yacon - Ensaio 1.

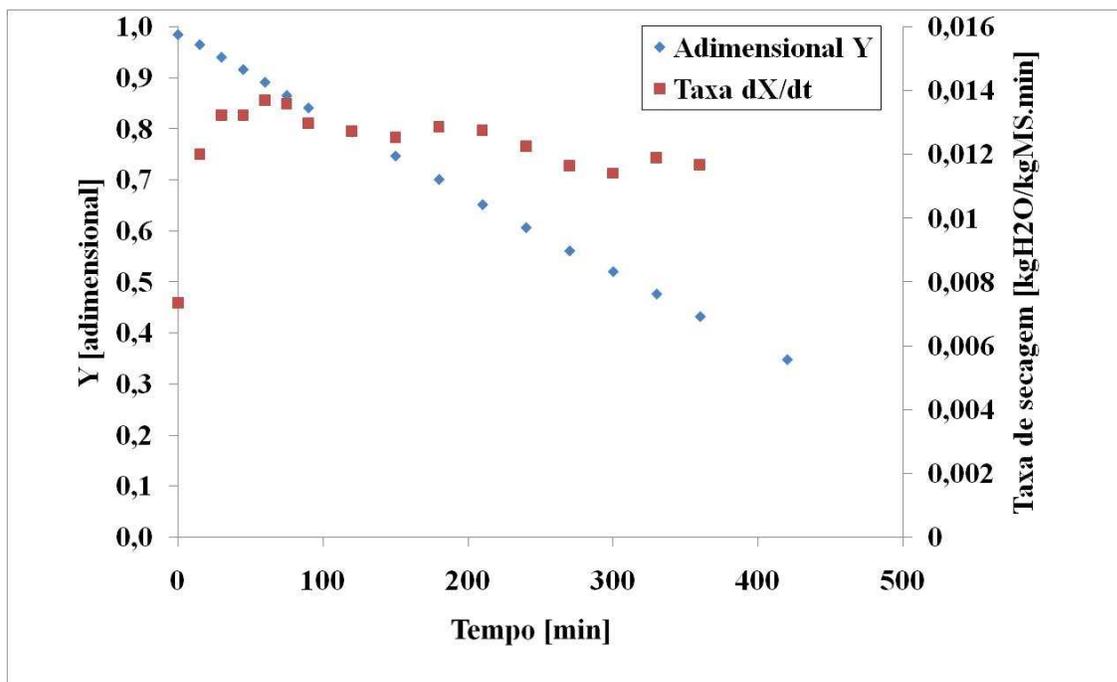


Figura E. 2 – Curvas de secagem de raiz de yacon - Ensaio 2.

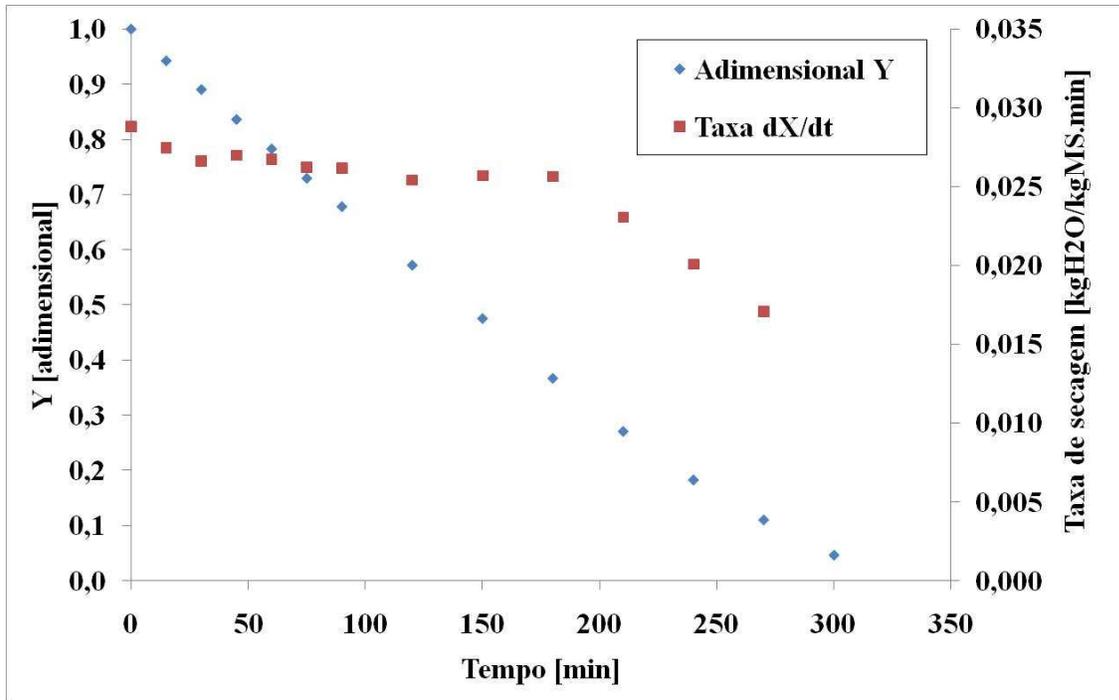


Figura E. 3 – Curvas de secagem de raiz de yacon - Ensaio 3.

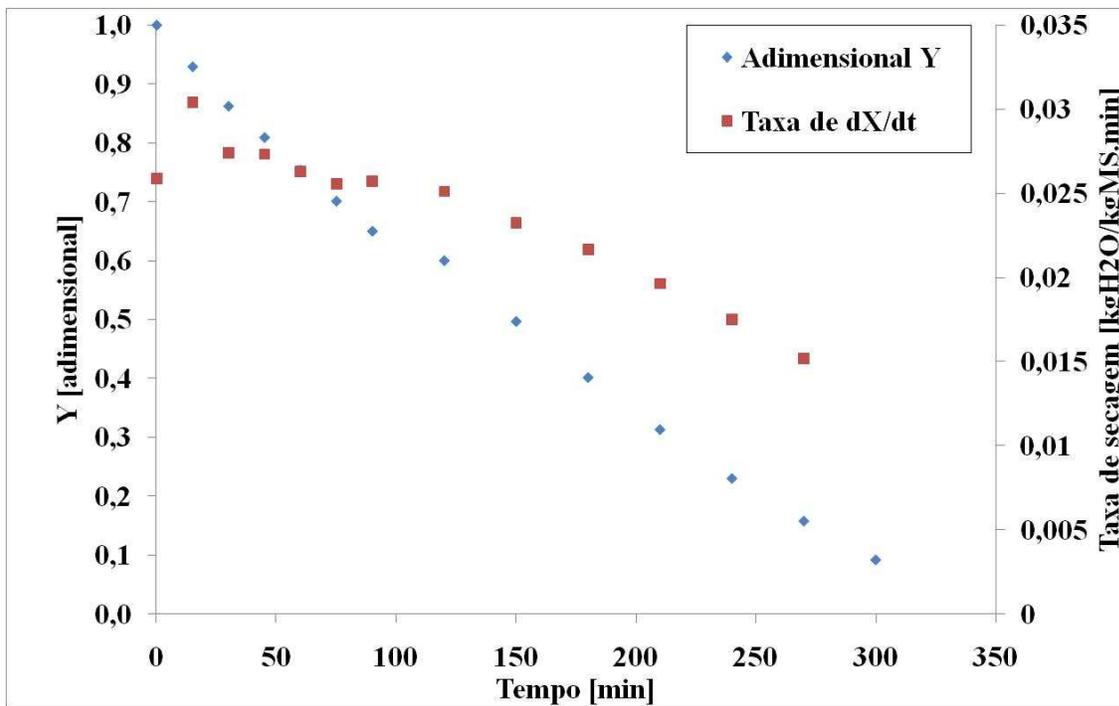


Figura E. 4 – Curvas de secagem de raiz de yacon - Ensaio 4.

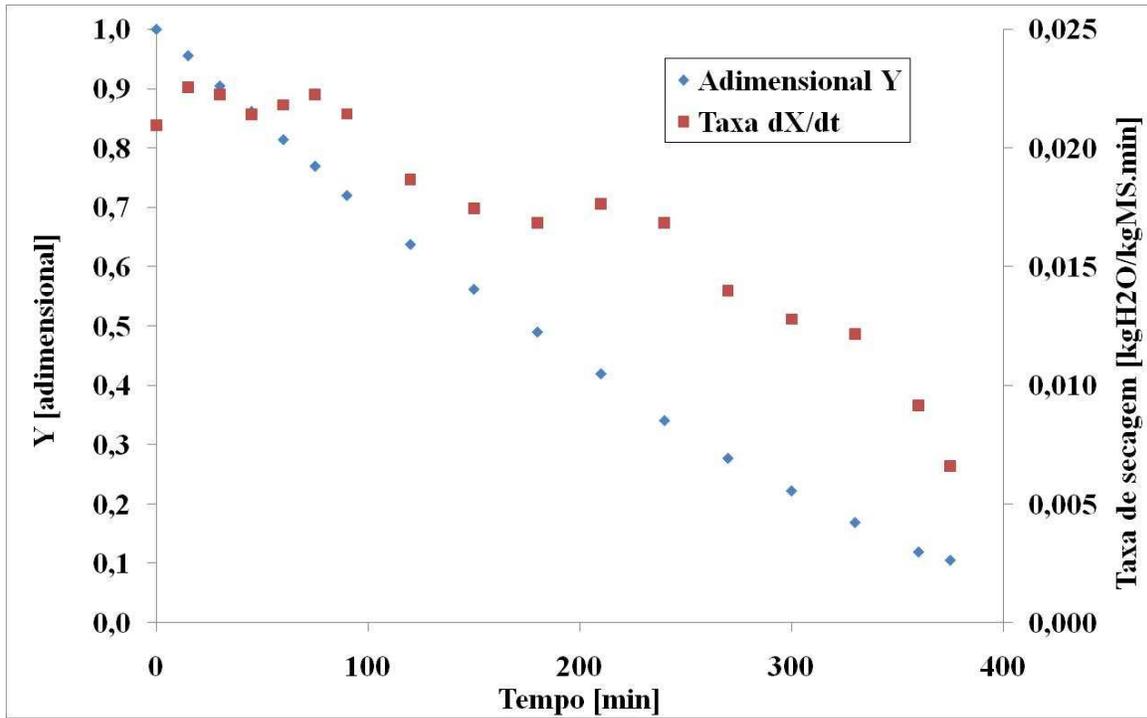


Figura E. 5 – Curvas de secagem de raiz de yacon - Ensaio 5.

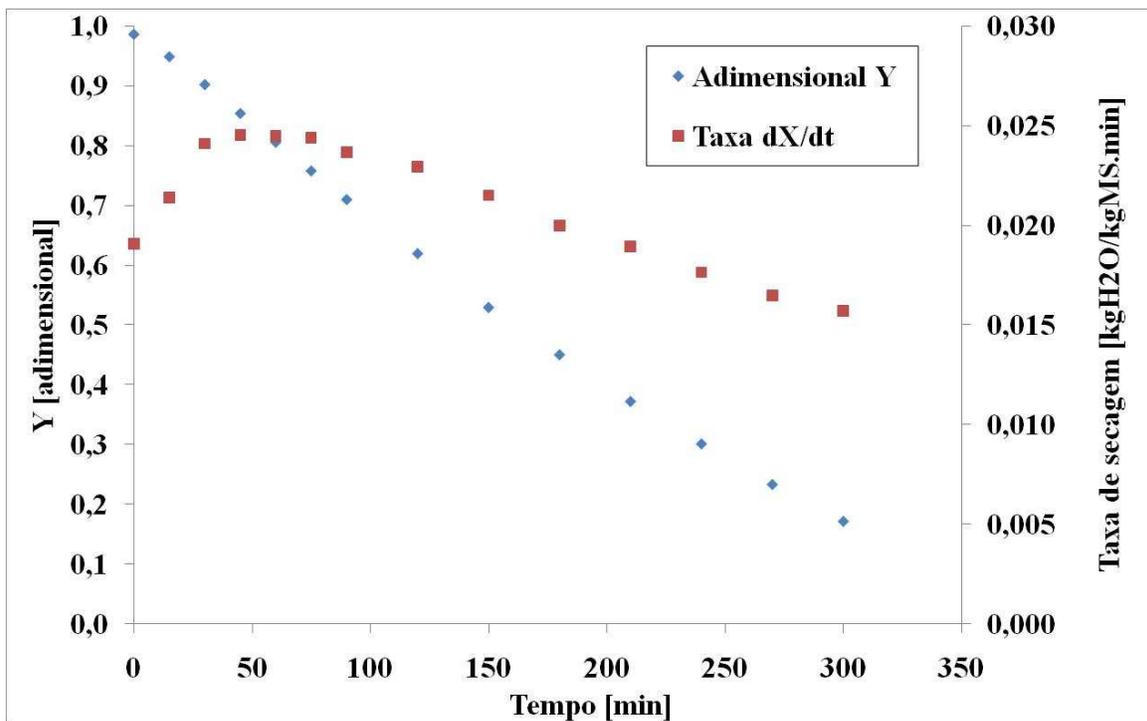


Figura E. 6 – Curvas de secagem de raiz de yacon - Ensaio 6.

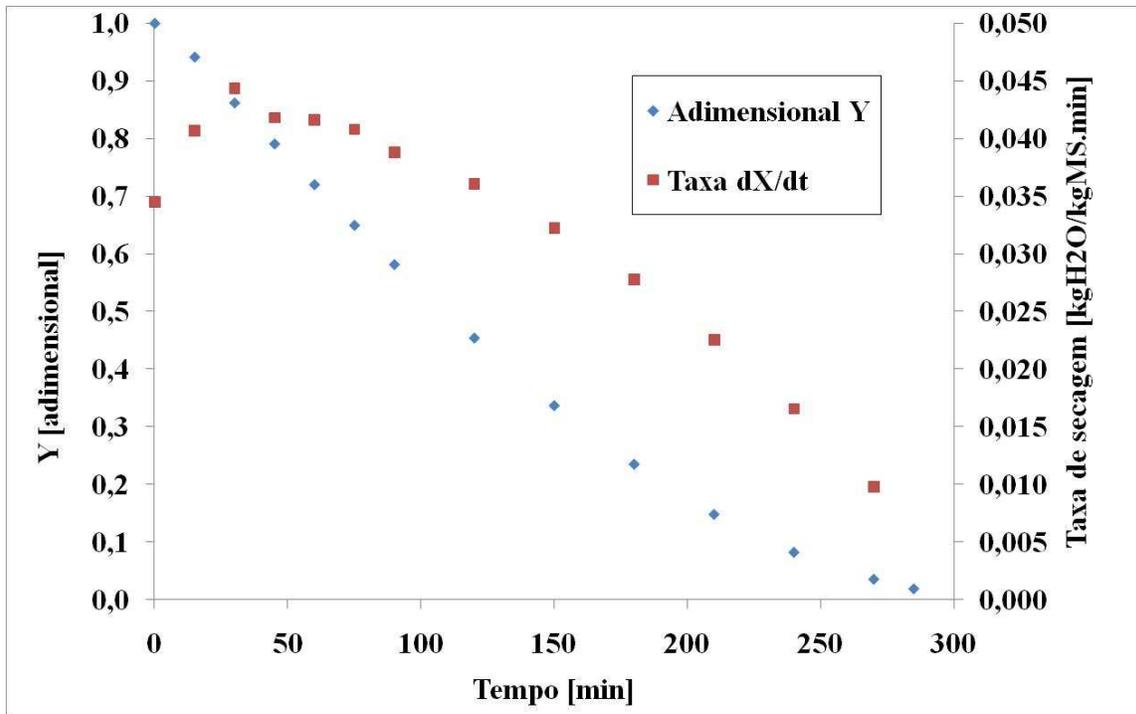


Figura E. 7 – Curvas de secagem de raiz de yacon - Ensaio 7.

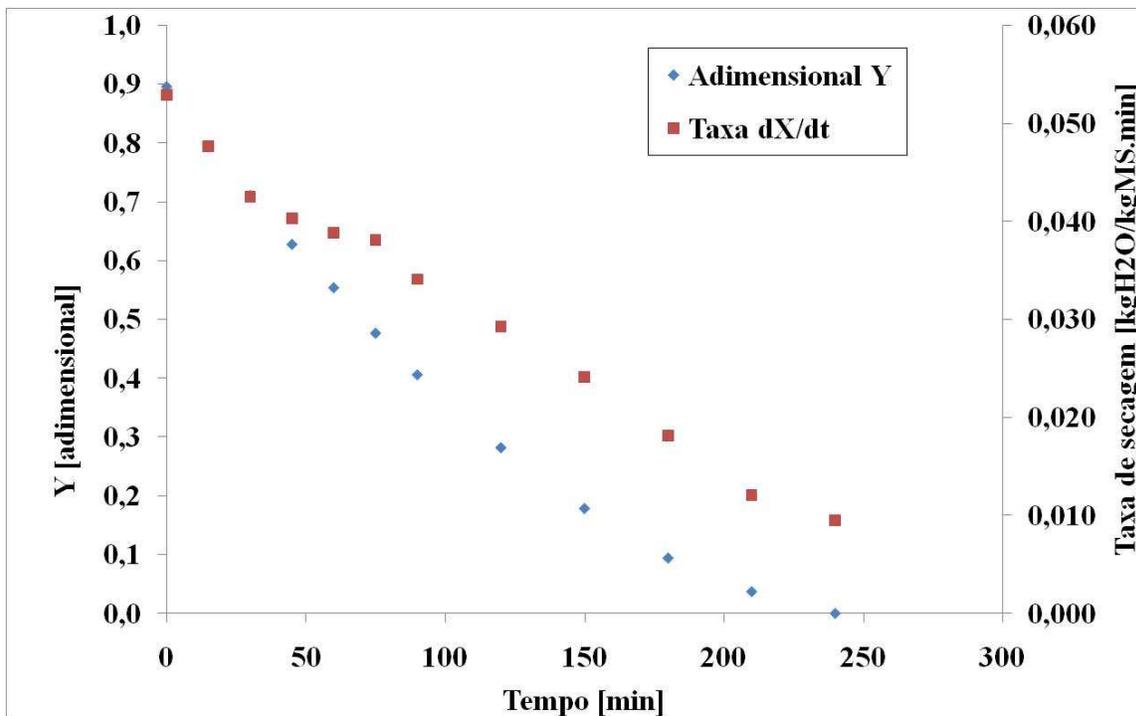


Figura E. 8 – Curvas de secagem de raiz de yacon - Ensaio 8.

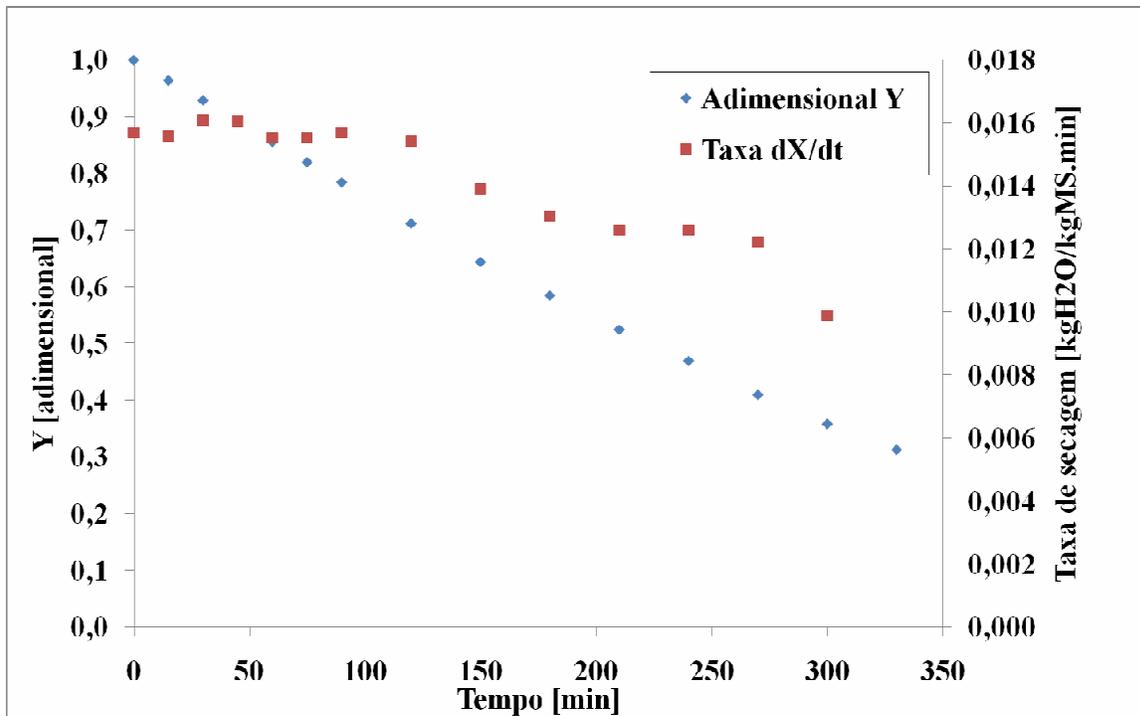


Figura E. 9 – Curvas de secagem de raiz de yacon - Ensaio 9.

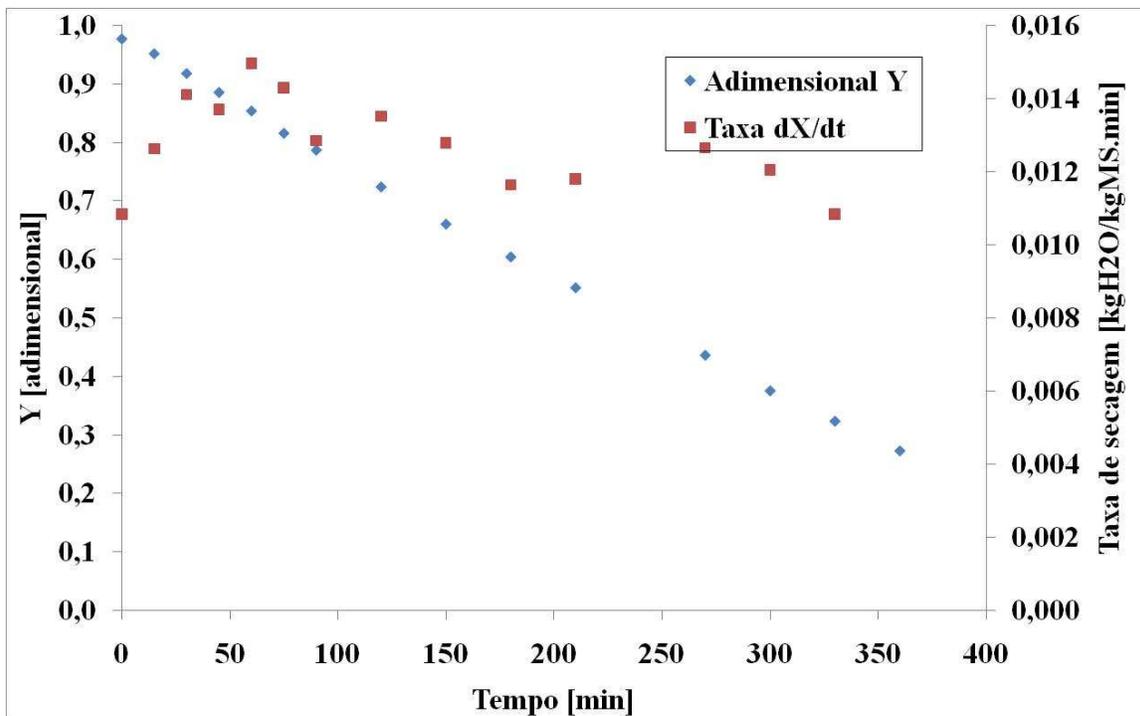


Figura E. 10 – Curvas de secagem de raiz de yacon - Ensaio 10.

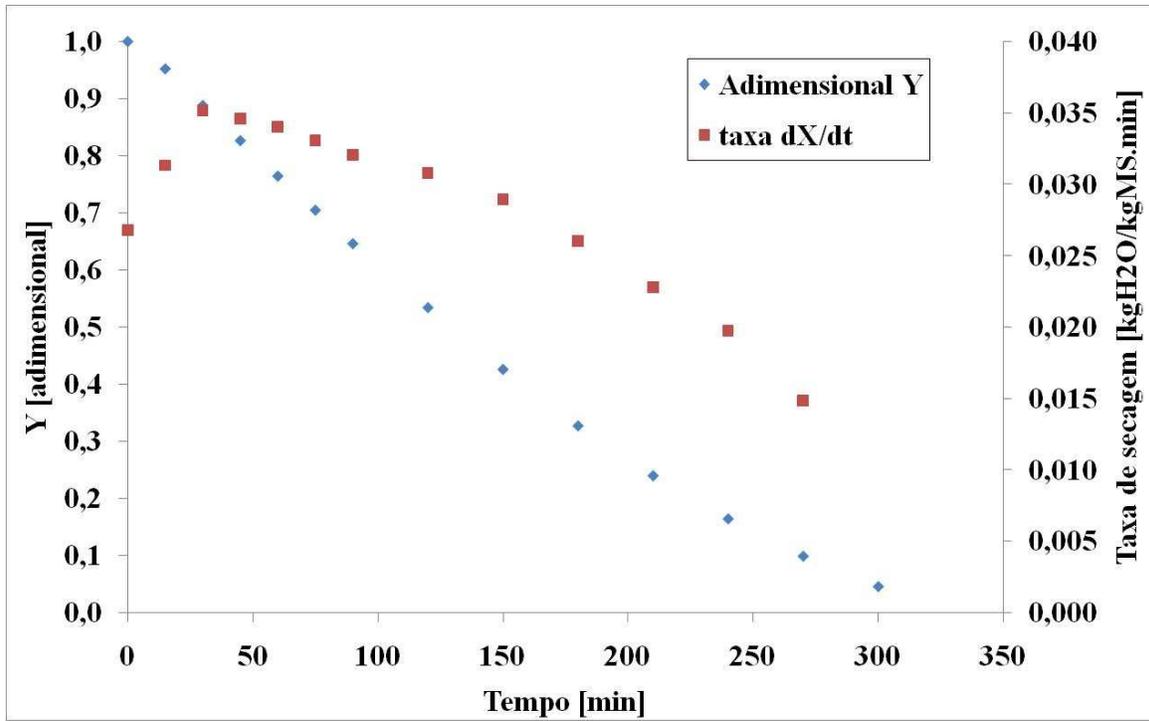


Figura E. 11 – Curvas de secagem de raiz de yacon - Ensaio 11.

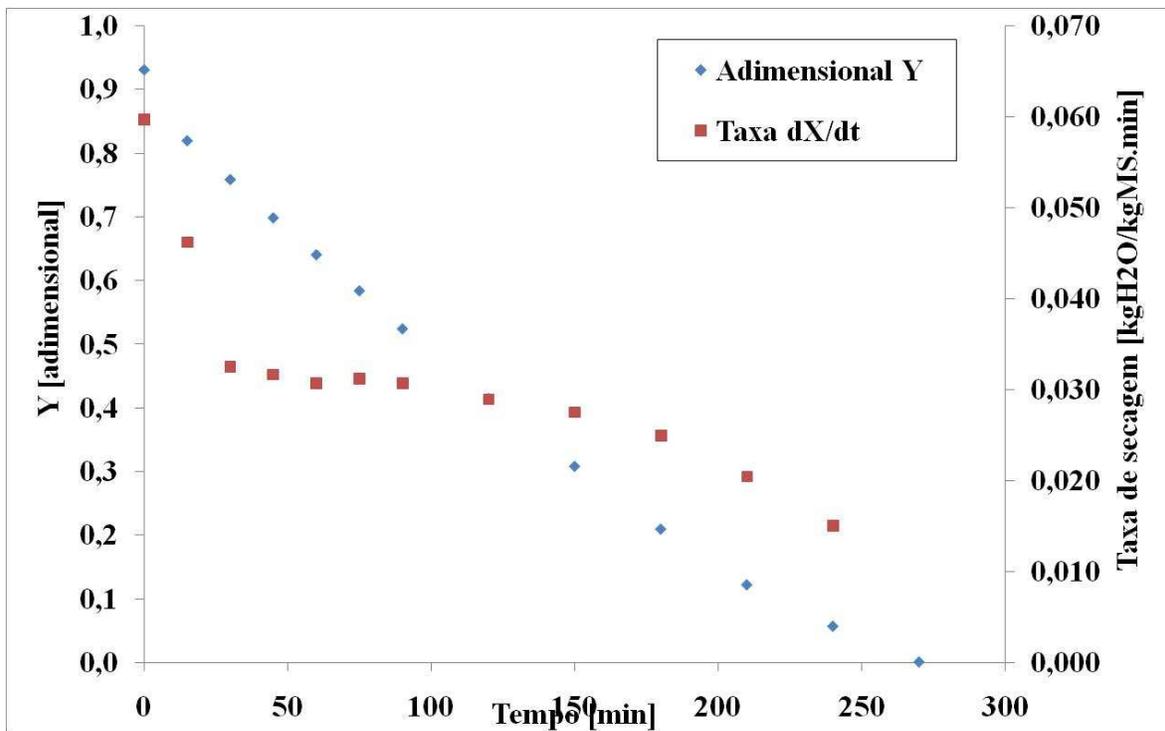


Figura E. 12 – Curvas de secagem de raiz de yacon - Ensaio 12.

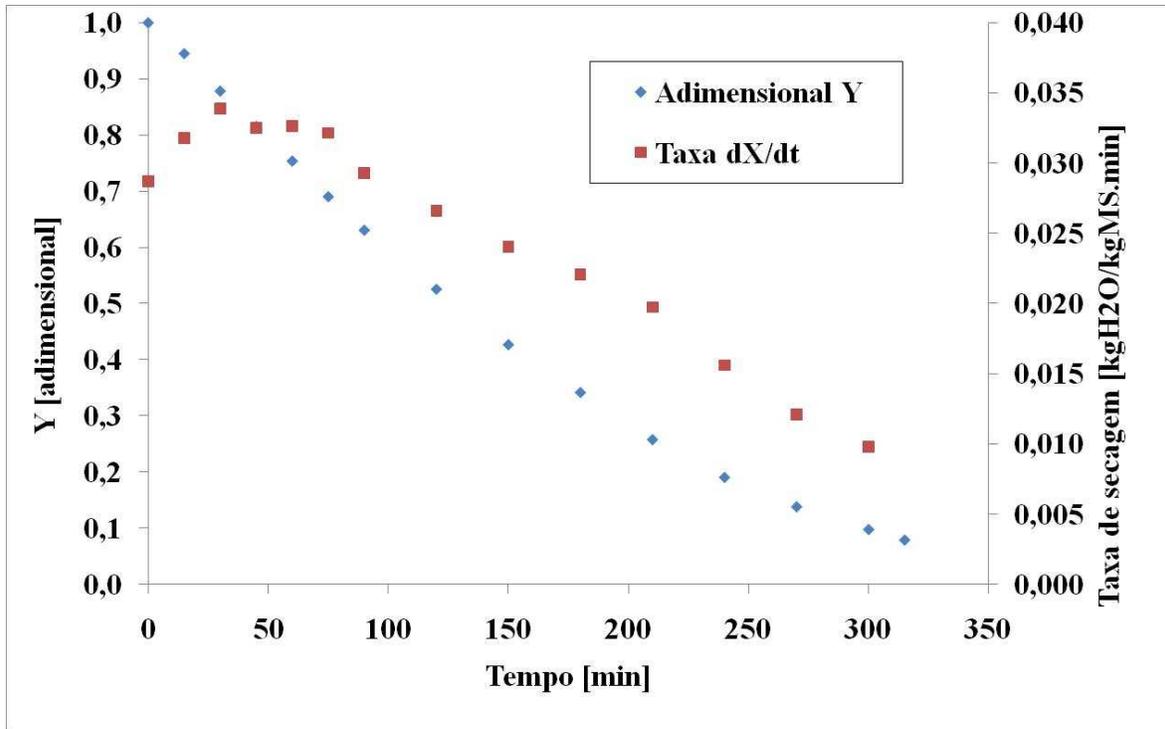


Figura E. 13 – Curvas de secagem de raiz de yacon - Ensaio 13.

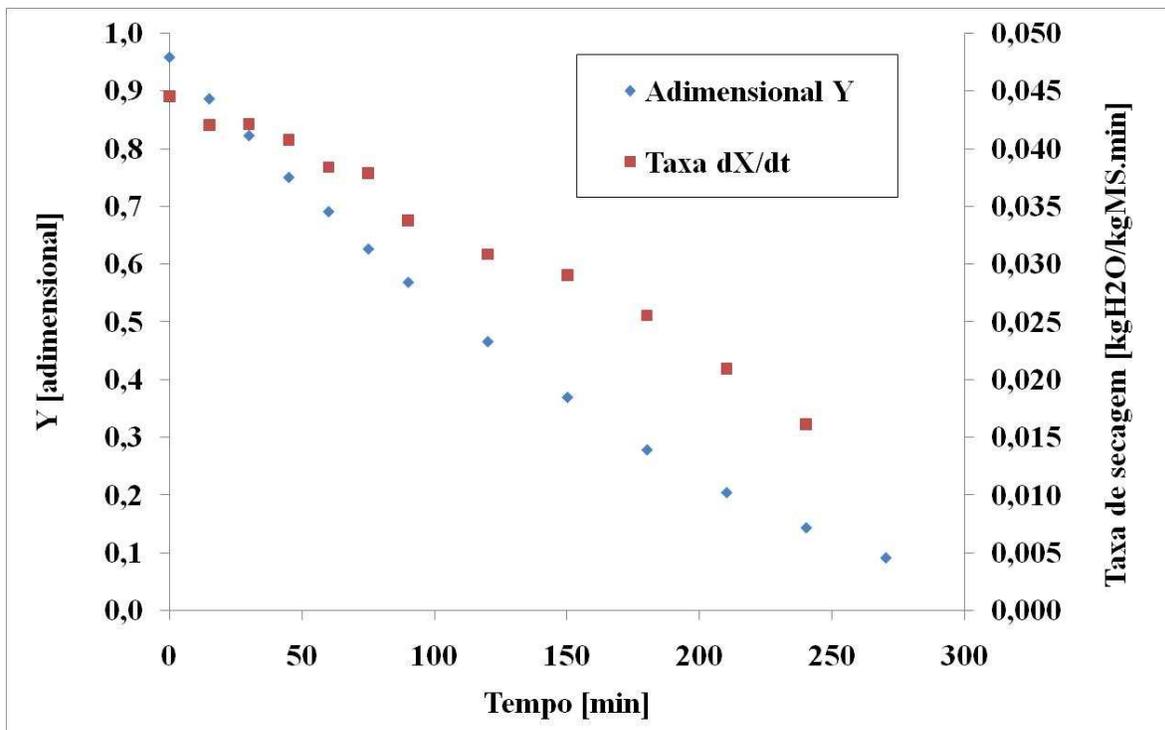


Figura E. 14 – Curvas de secagem de raiz de yacon - Ensaio 14.

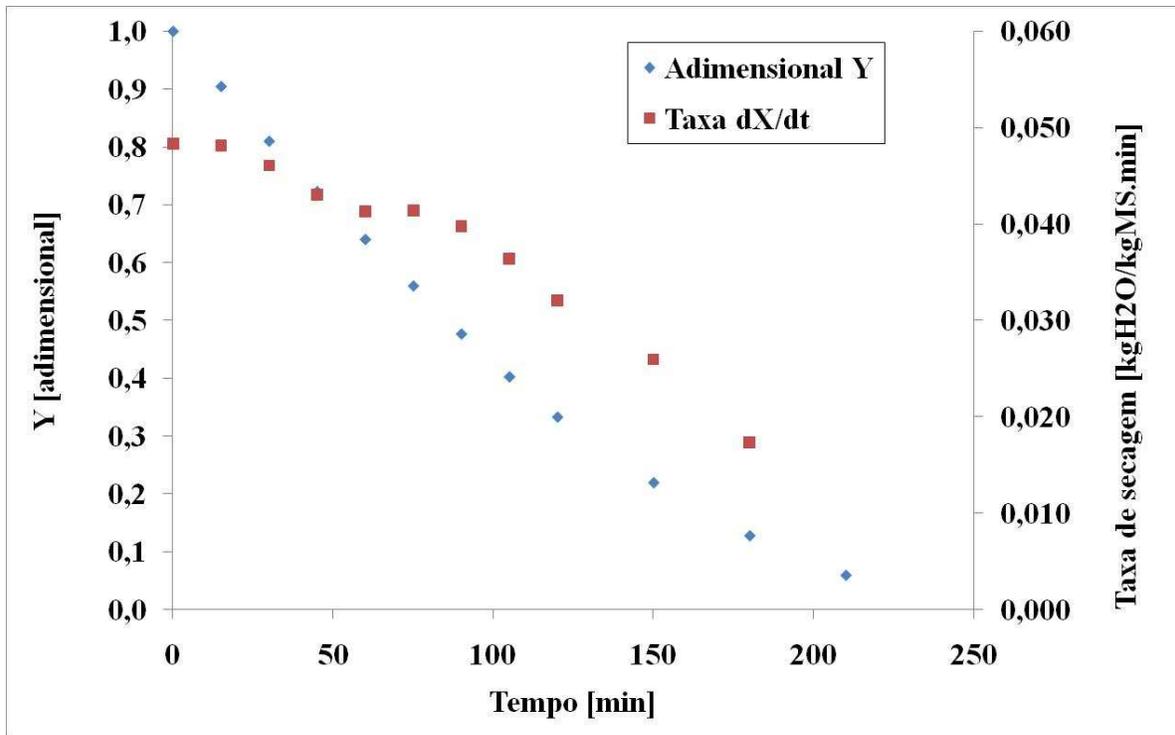


Figura E. 15 – Curvas de secagem de raiz de yacon - Ensaio 15.

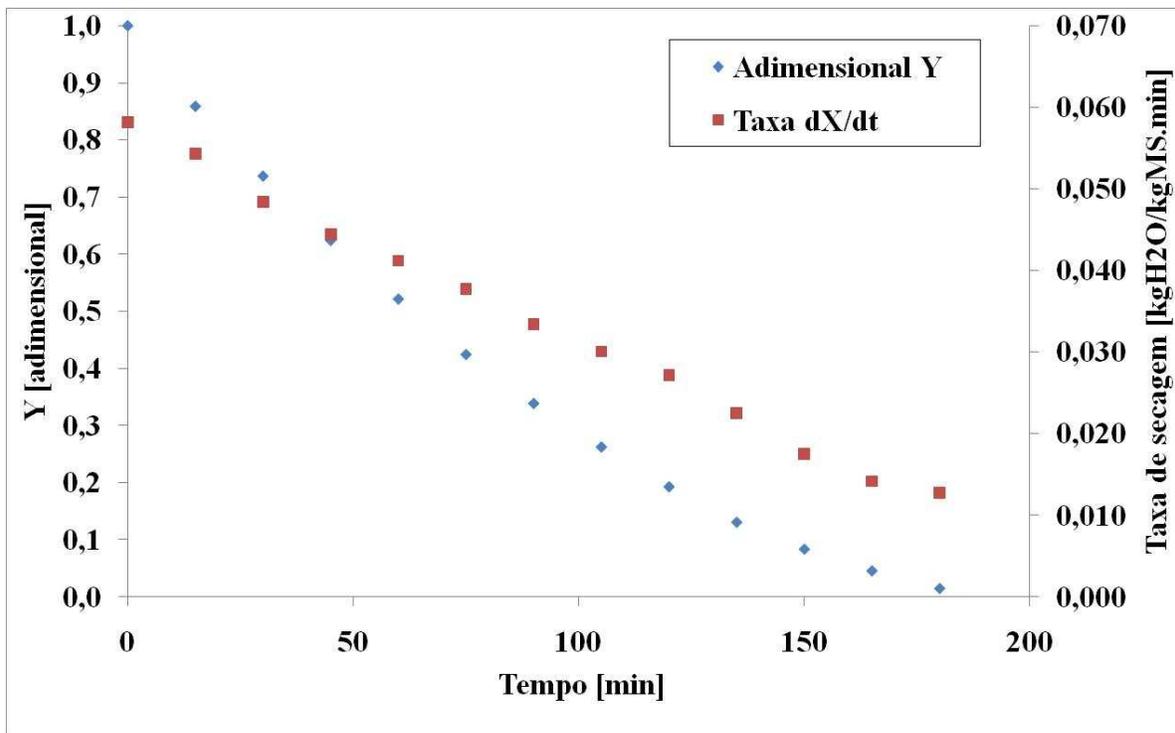


Figura E. 16 – Curvas de secagem de raiz de yacon - Ensaio 16.

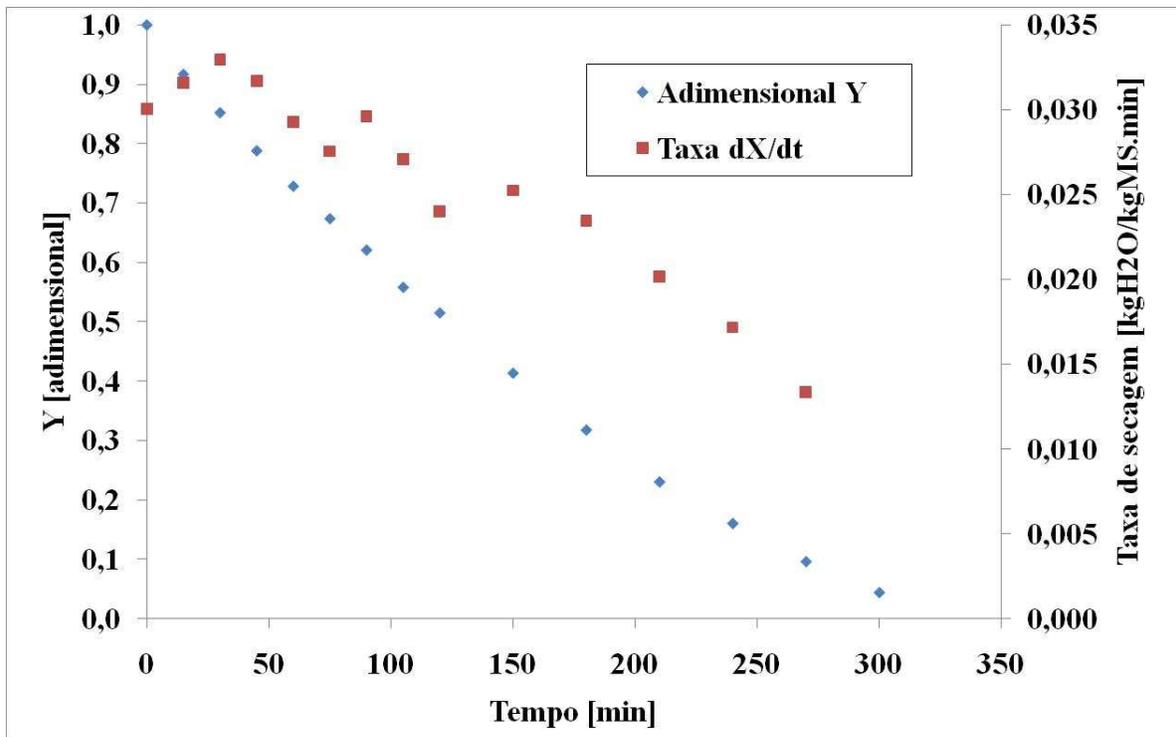


Figura E. 17 – Curvas de secagem de raiz de yacon - Ensaio 17.

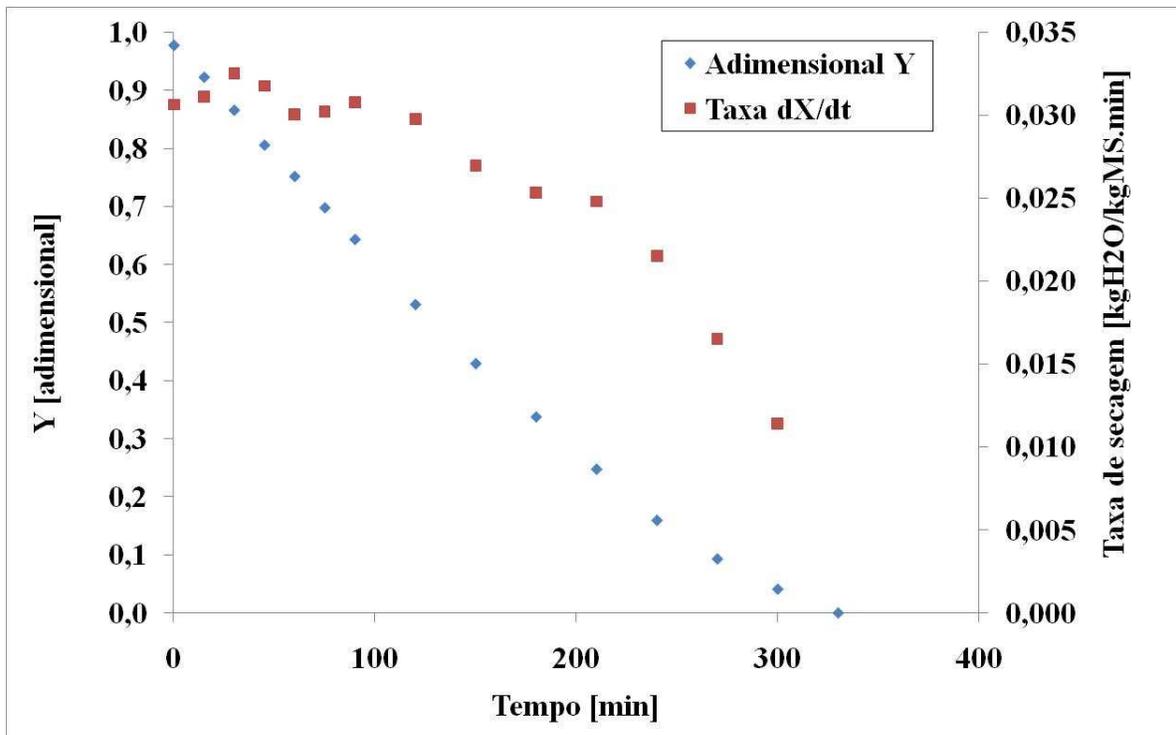


Figura E. 18 – Curvas de secagem de raiz de yacon - Ensaio 18.

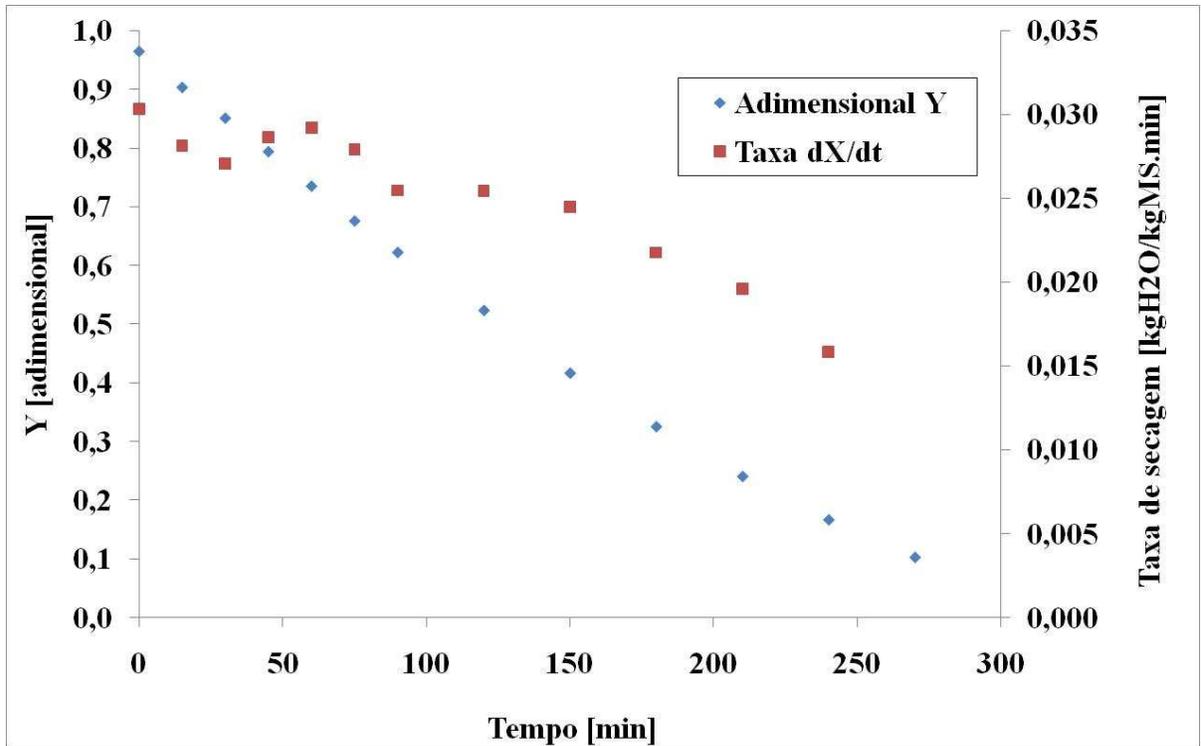


Figura E. 19 – Curvas de secagem de raiz de yacon - Ensaio 19.

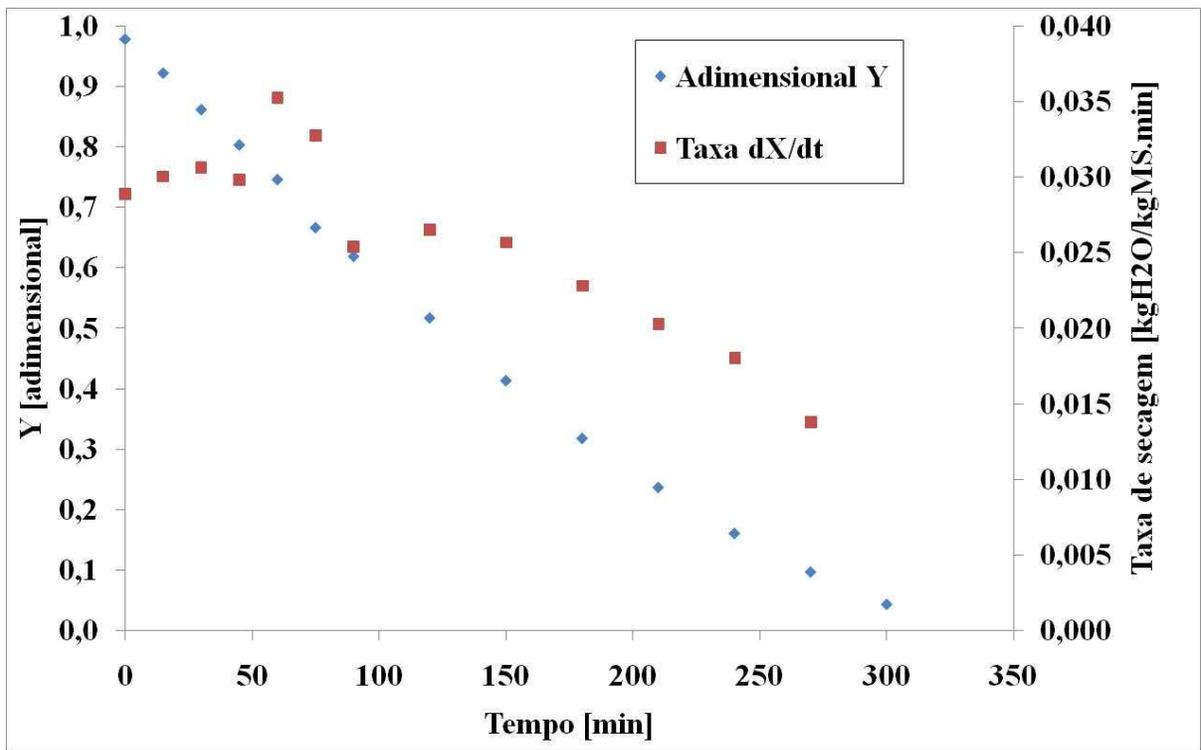


Figura E. 20 – Curvas de secagem de raiz de yacon - Ensaio 20.

APÊNDICE F: CURVAS DE SECAGEM DE BATATA CONGELADA BASEADAS NO PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL FATORIAL 2⁴.

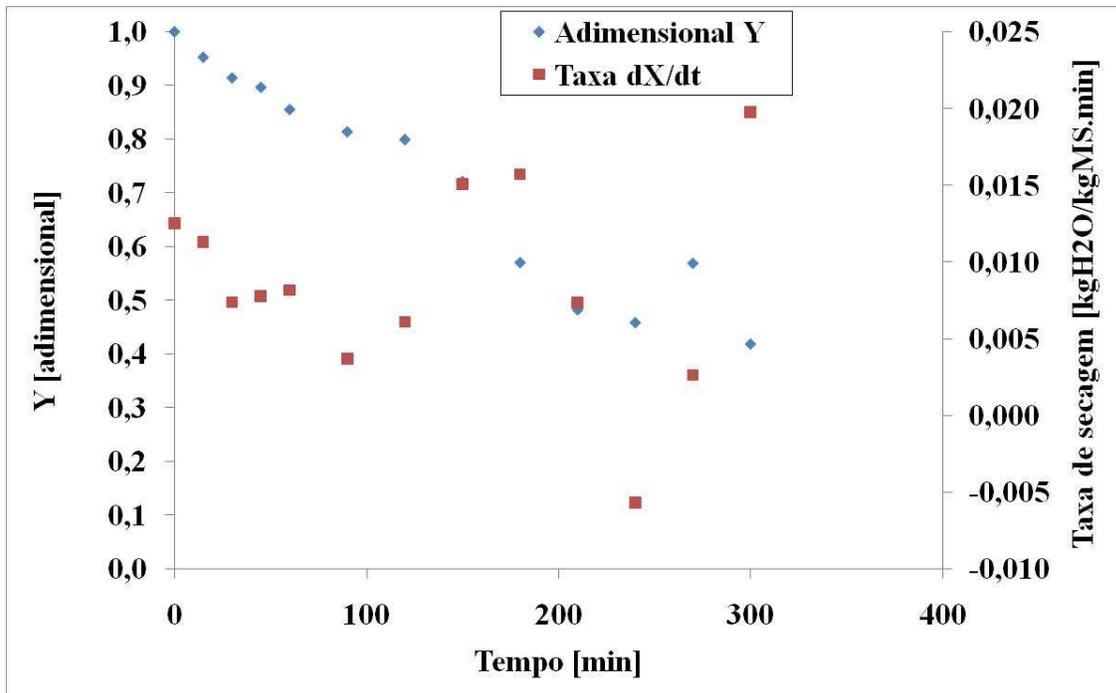


Figura F. 1 – Curvas de secagem de batata congelada - Ensaio 1.

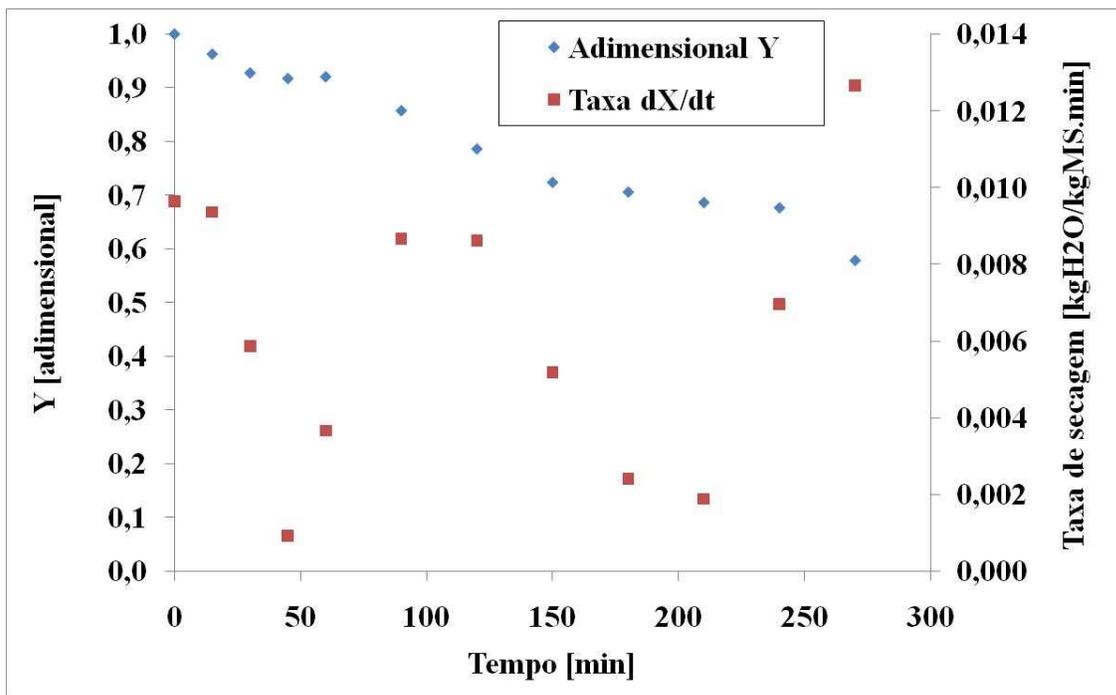


Figura F. 2 – Curvas de secagem de batata congelada - Ensaio 2.

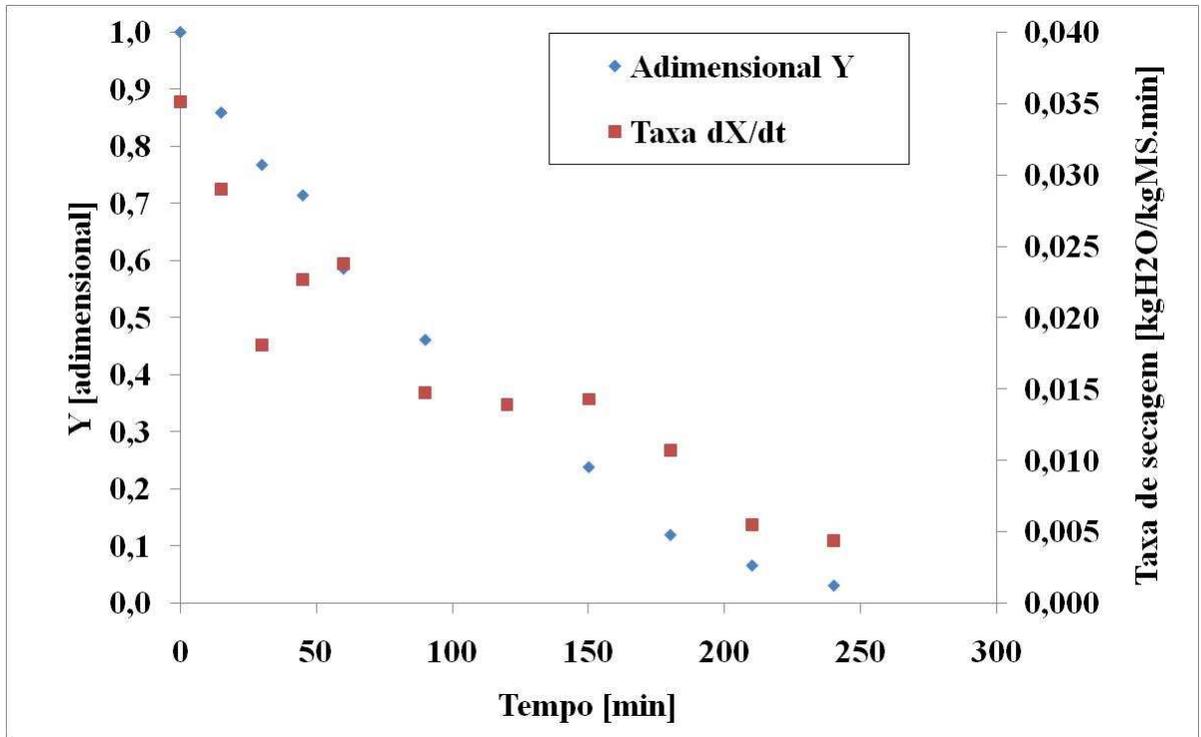


Figura F. 3 – Curvas de secagem de batata congelada - Ensaio 3.

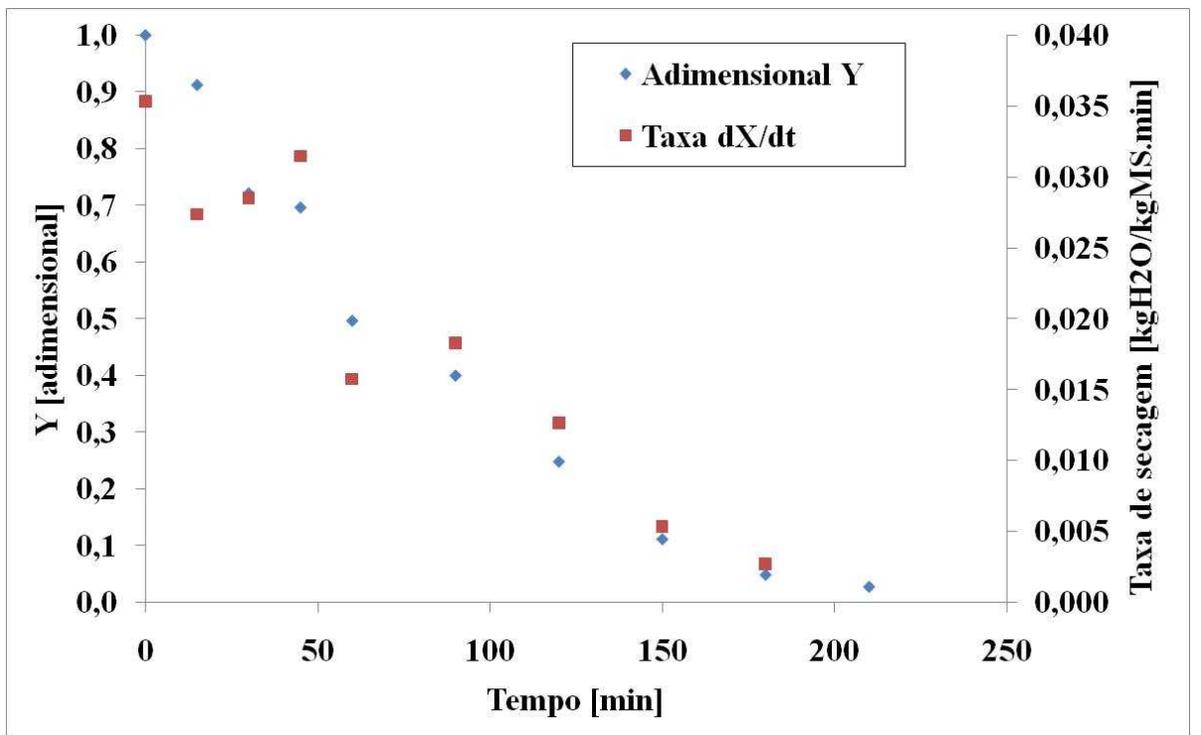


Figura F. 4 – Curvas de secagem de batata congelada - Ensaio 4.

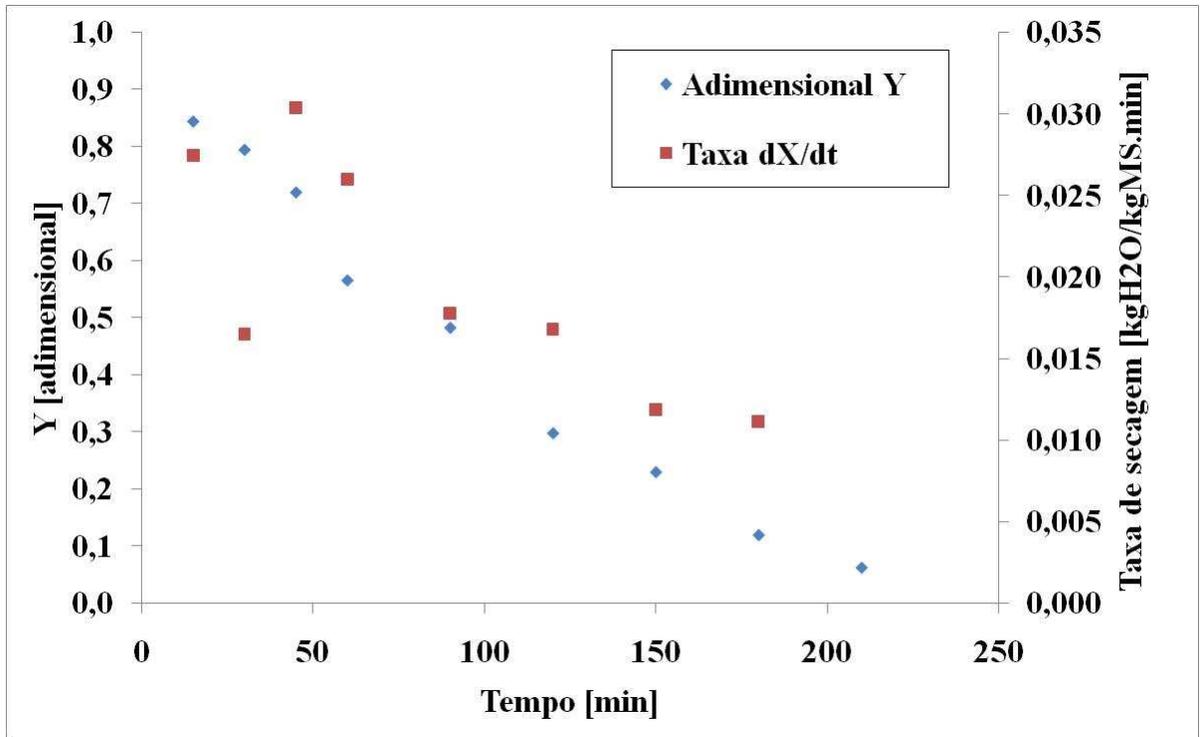


Figura F. 5 – Curvas de secagem de batata congelada - Ensaio 5.

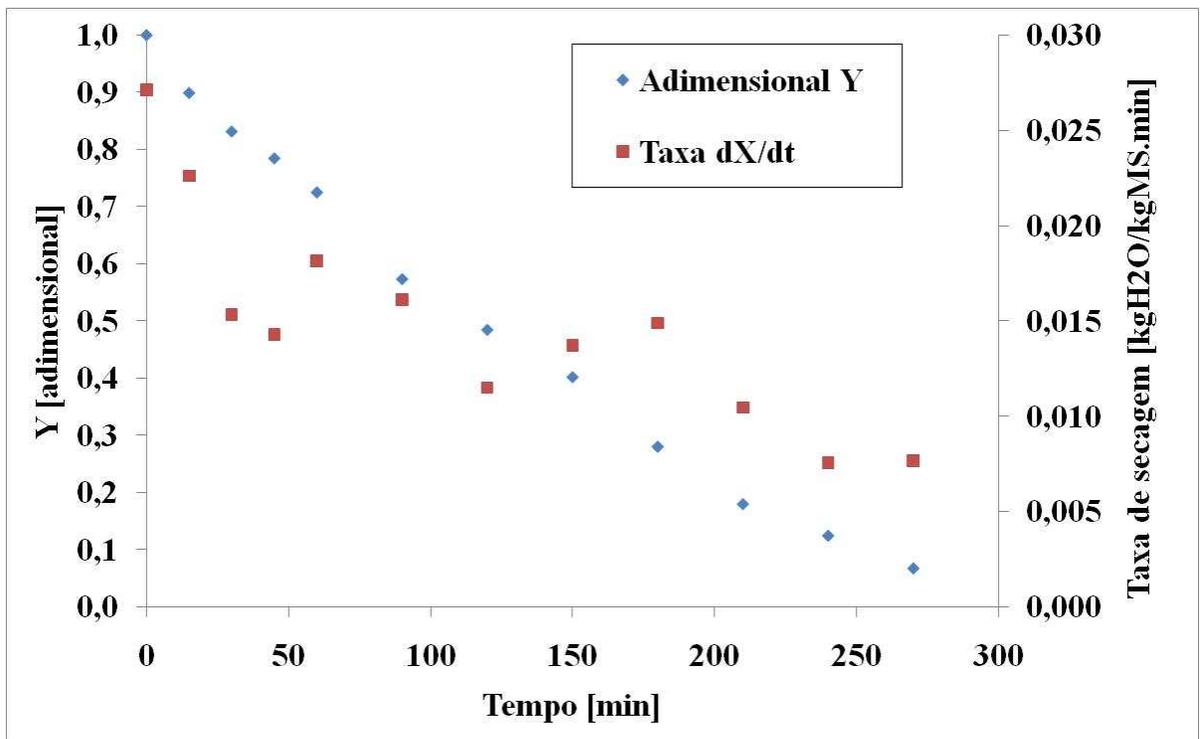


Figura F. 6 – Curvas de secagem de batata congelada - Ensaio 6.

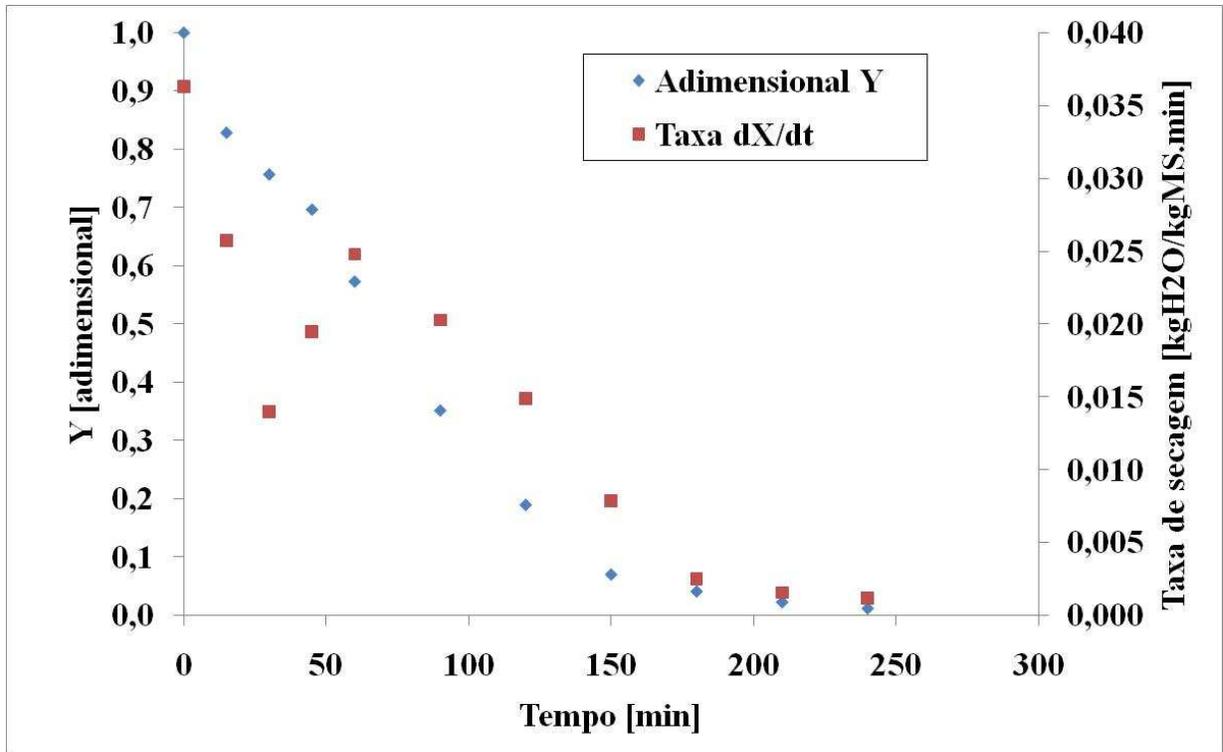


Figura F. 7 – Curvas de secagem de batata congelada - Ensaio 7.

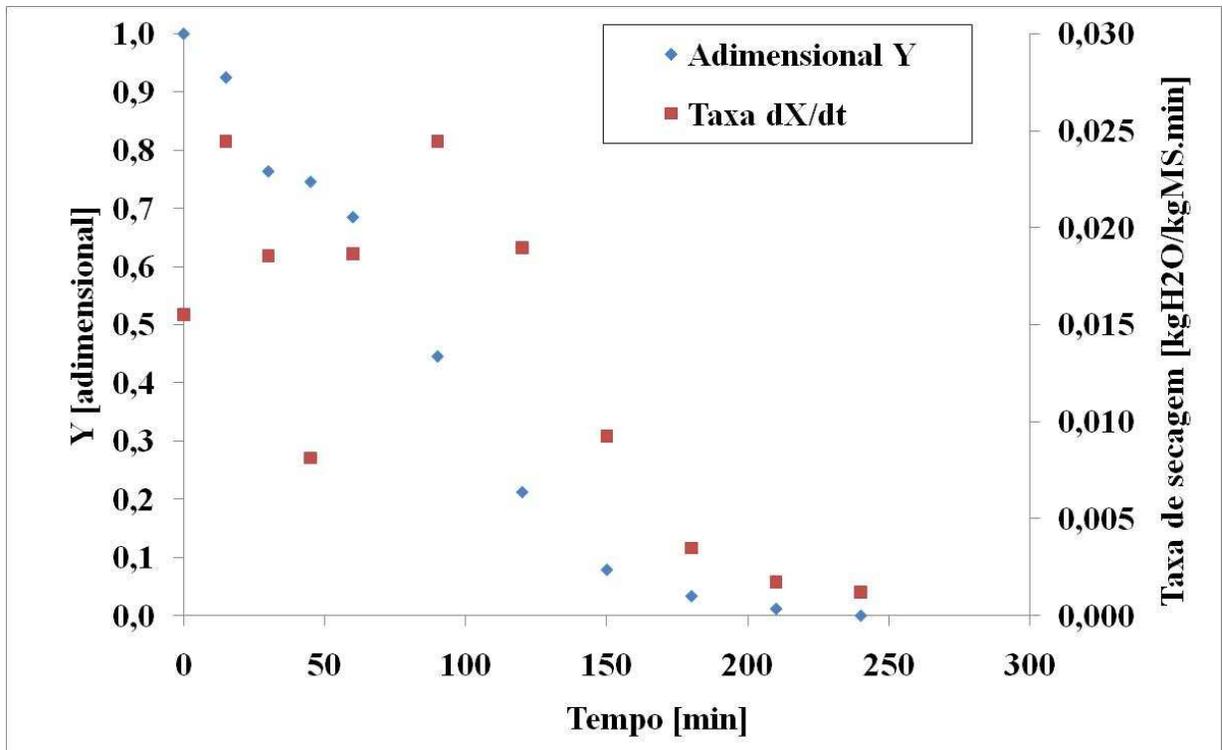


Figura F. 8 – Curvas de secagem de batata congelada - Ensaio 8.

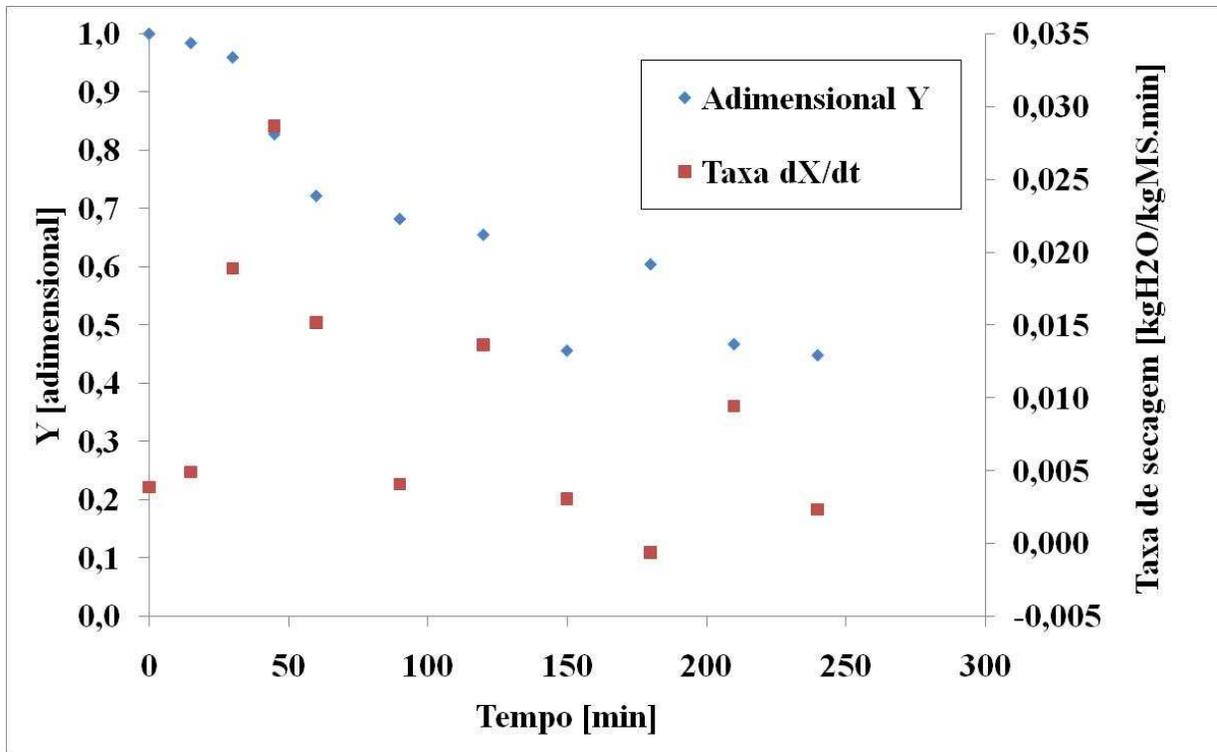


Figura F. 9 – Curvas de secagem de batata congelada - Ensaio 9.

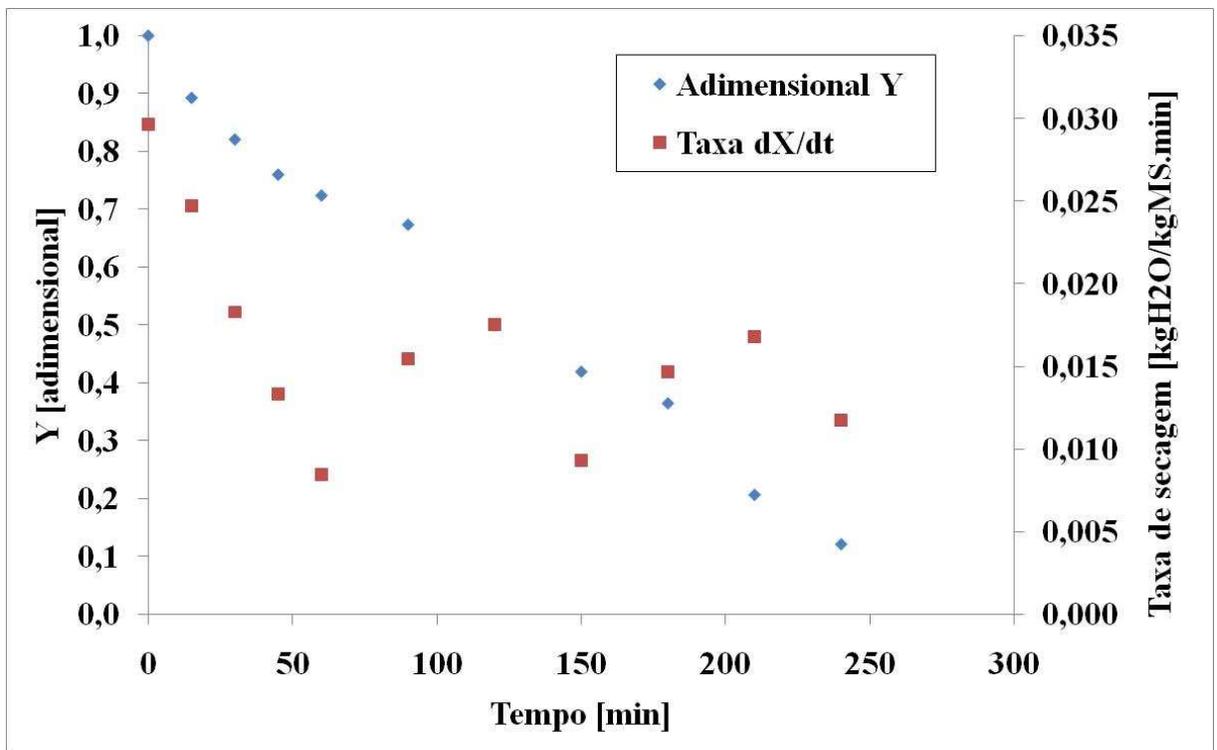


Figura F. 10 – Curvas de secagem de batata congelada - Ensaio 10.

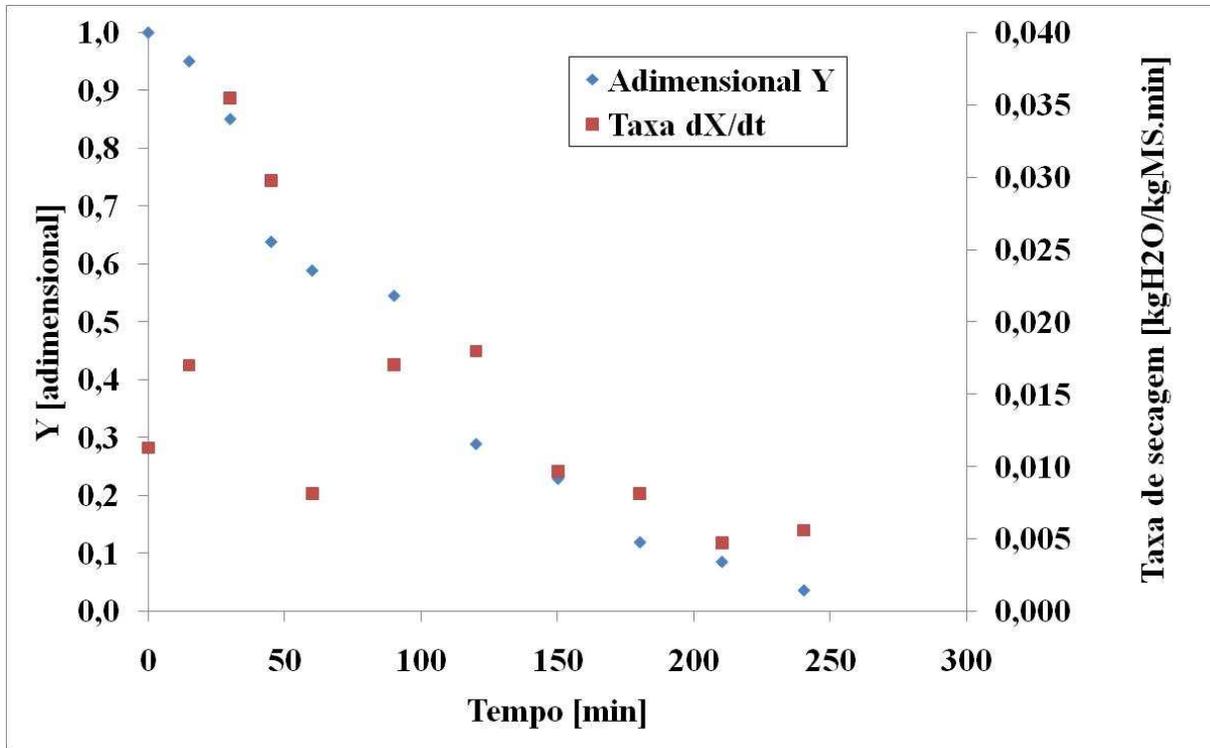


Figura F. 11 – Curvas de secagem de batata congelada - Ensaio 11.

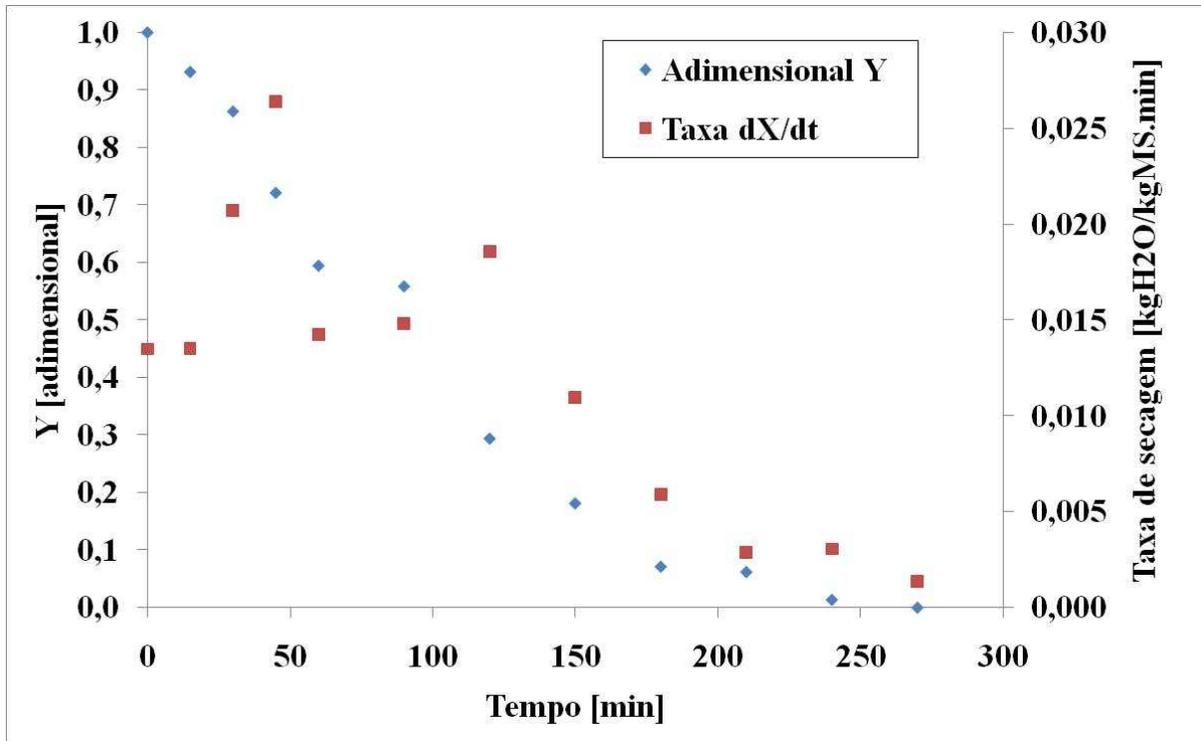


Figura F. 12 – Curvas de secagem de batata congelada - Ensaio 12.

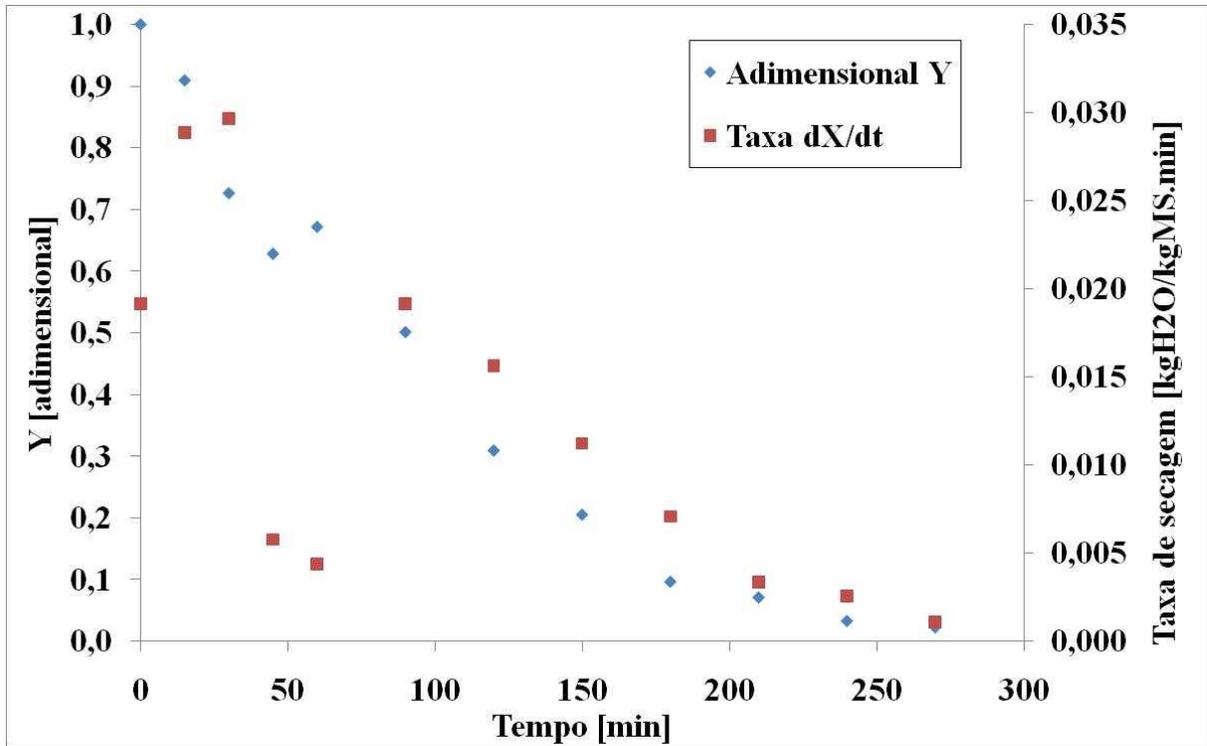


Figura F. 13 – Curvas de secagem de batata congelada - Ensaio 13.

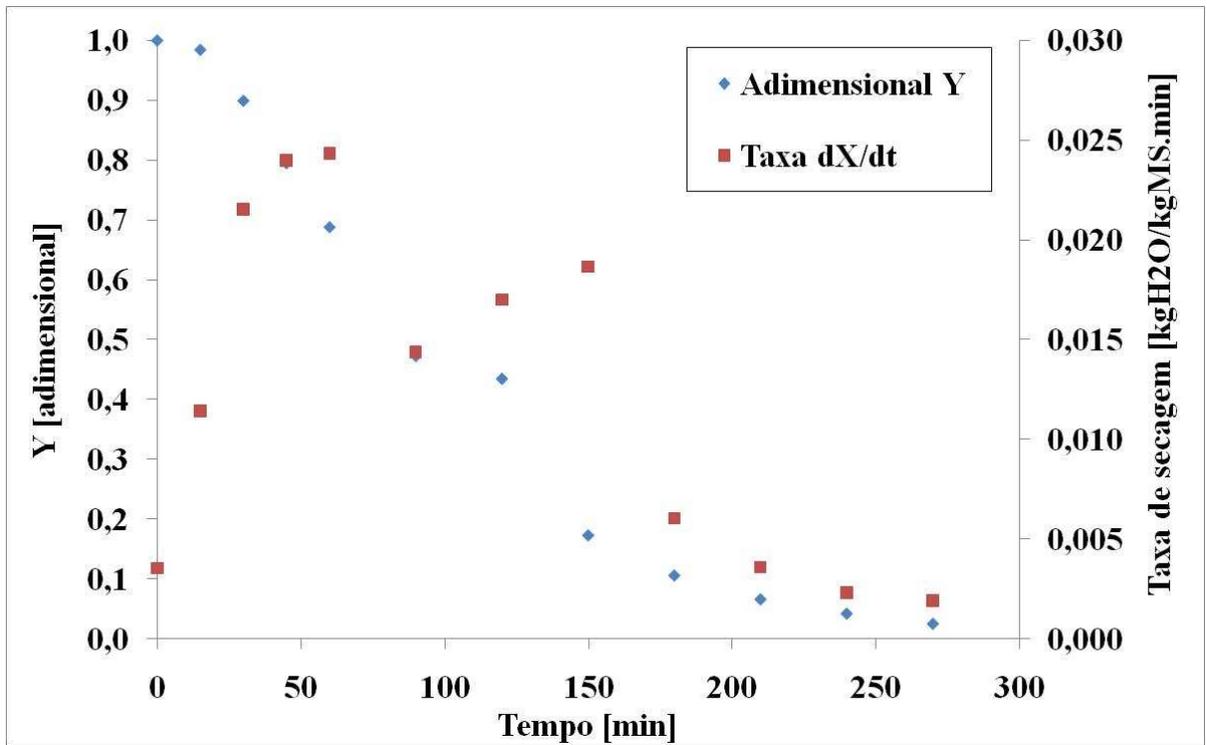


Figura F. 14 – Curvas de secagem de batata congelada - Ensaio 14.

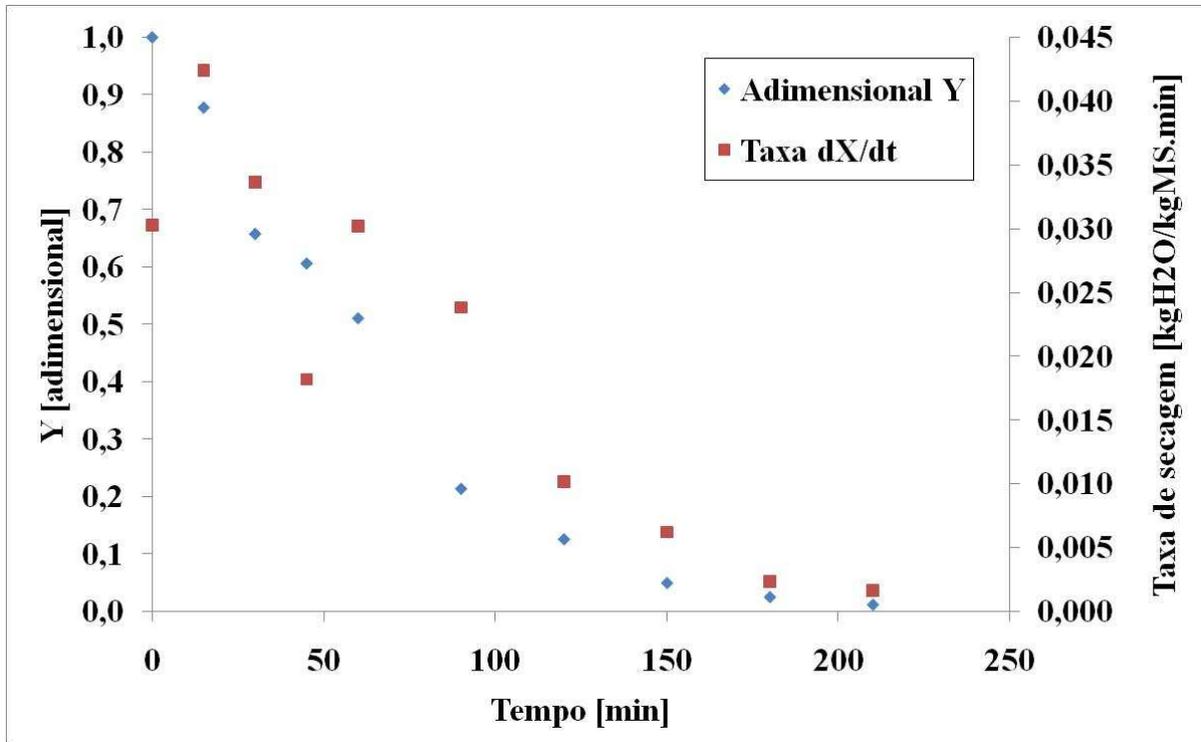


Figura F. 15 – Curvas de secagem de batata congelada - Ensaio 15.

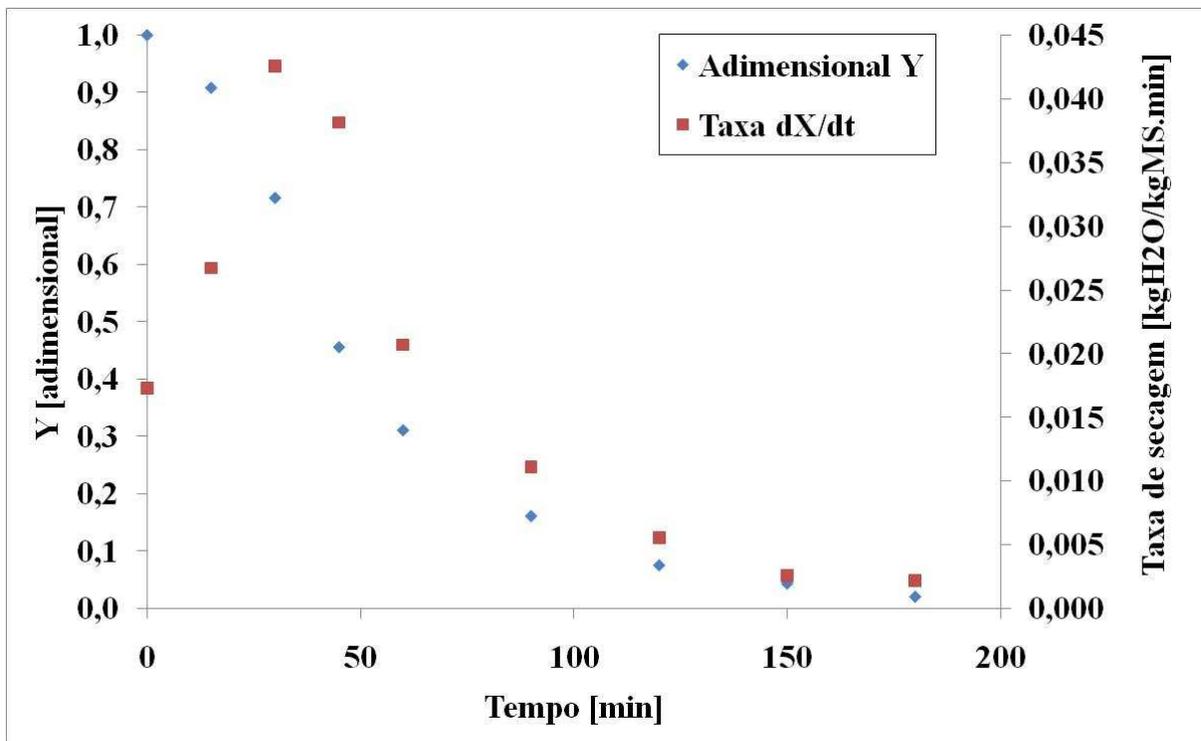


Figura F. 16 – Curvas de secagem de batata congelada - Ensaio 16.

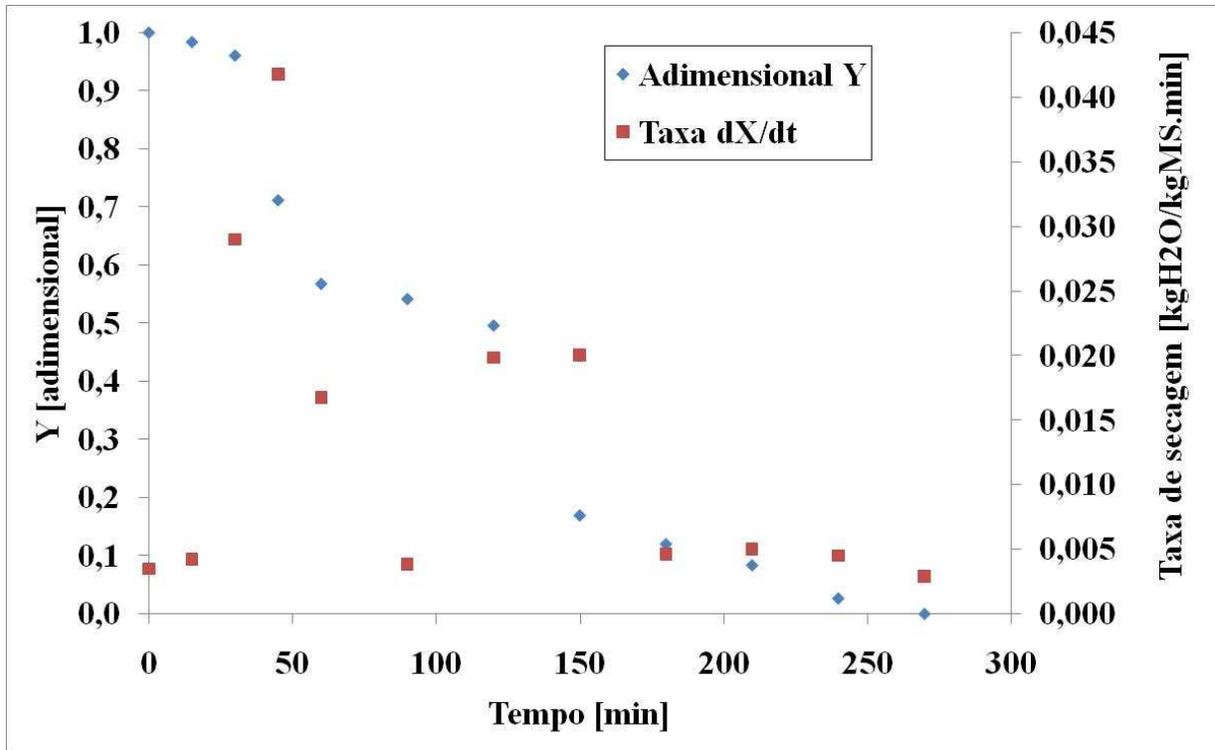


Figura F. 17 – Curvas de secagem de batata congelada - Ensaio 17.

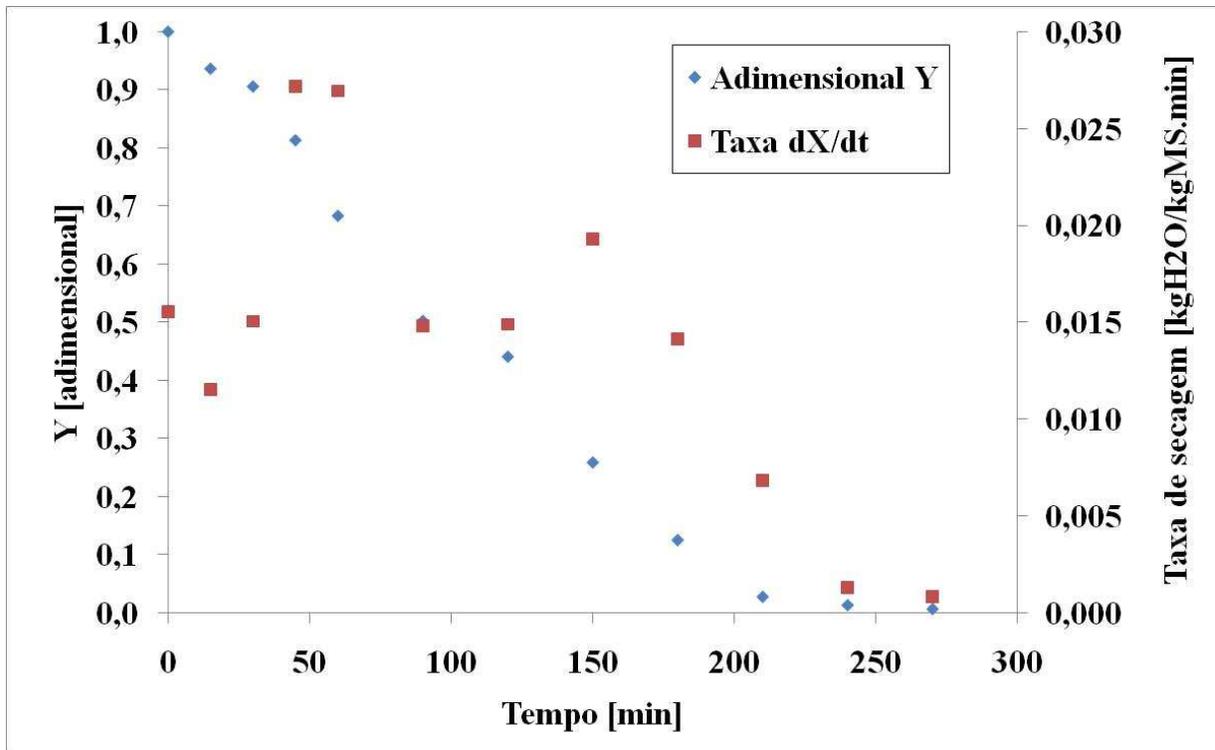


Figura F. 18 – Curvas de secagem de batata congelada - Ensaio 18.

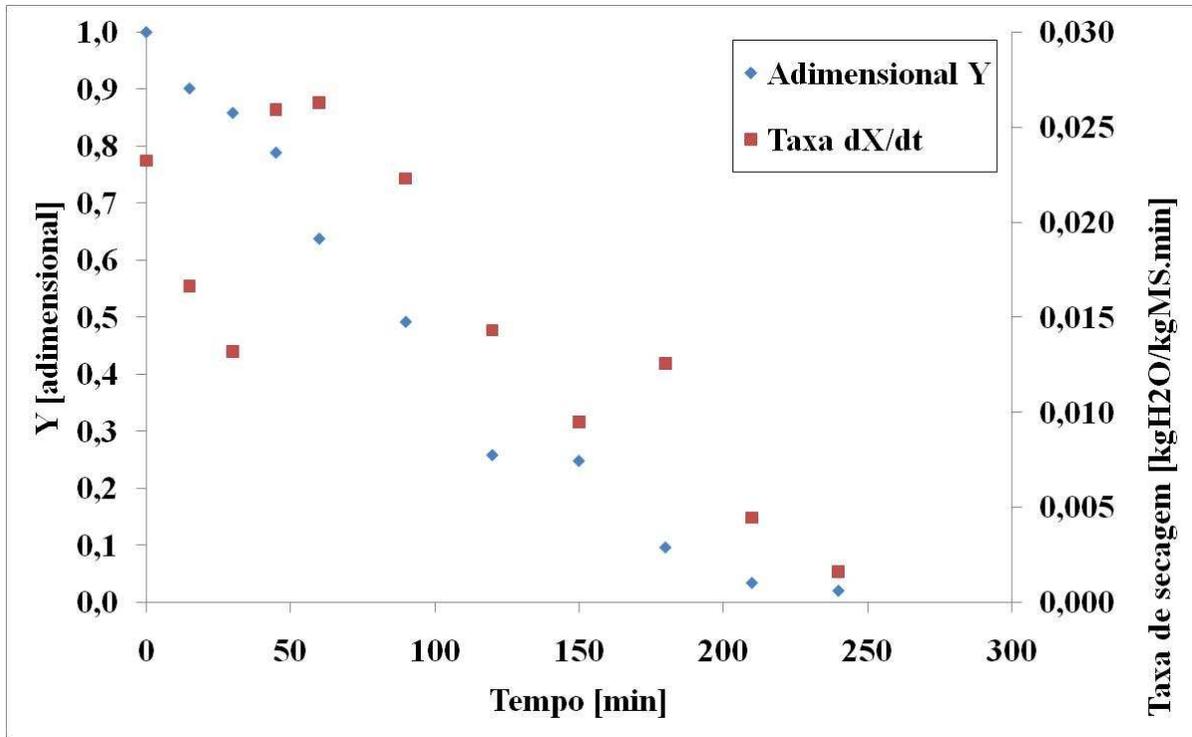


Figura F. 19 – Curvas de secagem de batata congelada - Ensaio 19.

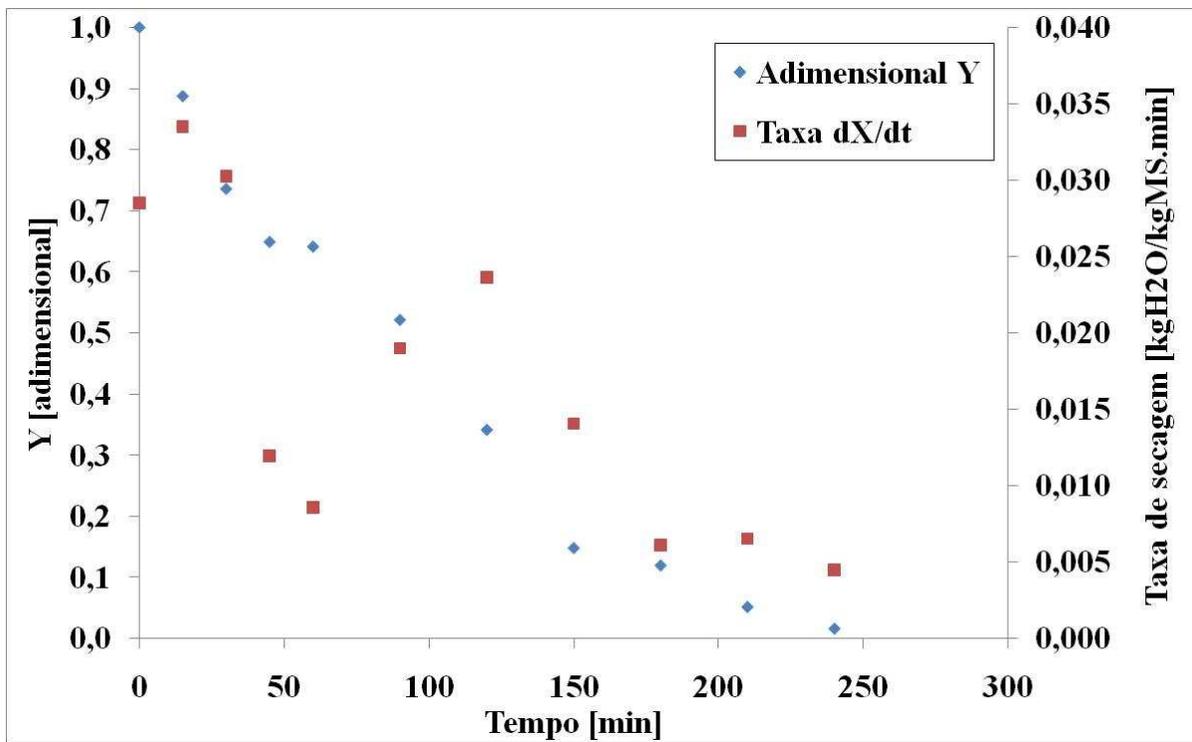


Figura F. 20 – Curvas de secagem de batata congelada - Ensaio 20.