



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA
ARMAZENAMENTO E PROCESSAMENTO DE PRODUTOS AGRÍCOLAS**

DISSERTAÇÃO
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO EM ARMAZENAMENTO E
PROCESSAMENTO DE PRODUTOS AGRÍCOLAS

DESENVOLVIMENTO DE UM PROGRAMA
COMPUTACIONAL DINÂMICO PARA SIMULAÇÃO DE
SECAGEM DE GRÃOS E SEMENTES

LUÍS ANTÔNIO DANTAS

Campina Grande – PB
Maior/2007

LUÍS ANTÔNIO DANTAS

**DESENVOLVIMENTO DE UM PROGRAMA
COMPUTACIONAL DINÂMICO PARA SIMULAÇÃO DE
SECAGEM DE GRÃOS E SEMENTES**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Campina Grande, em cumprimento às exigências para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Agrícola, na área de concentração Armazenamento e Processamento de Produtos Agrícolas.

Orientadores: Prof. Dr. Mario Eduardo R. M. Cavalcanti Mata e Prof.^a Dra. Maria Elita Martins Duarte.

Campina Grande – PB
Maio/2007

DIGITALIZAÇÃO:
SISTEMOTECA - UFCG

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

D192d

2007 Dantas, Luís Antônio.

Desenvolvimento de um programa computacional dinâmico para simulação de secagem de grãos e sementes / Luís Antônio Dantas.—
Campina Grande: 2007.

204f.: il. col.

”Anexos: código fonte e software para instalação em CD.”

Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais.

Referências.

Orientadores : Prof. Dr. Mario Eduardo R. M. Cavalcanti Mata, Prof.
Dr.^a. Maria Elita Martins Duarte.

1. Modelo de Thompson. 2. Simulação de Secagem. 3. Software Dinâmico. I. Título.

CDU – 631.563:004.383.4(043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
COORDENAÇÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA



PARECER FINAL DO JULGAMENTO DA DISSERTAÇÃO DO MESTRANDO

LUIS ANTÔNIO DANTAS

DESENVOLVIMENTO DE UM PROGRAMA COMPUTACIONAL DINÂMICO PARA
SIMULAÇÃO DE SECAGEM DE GRÃOS E SEMENTES

BANCA EXAMINADORA

PARECER

Mario Ely Mata
Dr. Mario Eduardo R. M. Cavalcanti Mata - Orientador

A PROVA DO

melton S
Dra. Maria Elita Martins Duarte - Orientadora

Aprovado

João Evangelista Franco do Carmo
Dr. João Evangelista Franco do Carmo - Examinador

Aprovado

Rossana Maria Feitosa de Figueirêdo
Dra. Rossana Maria Feitosa de Figueirêdo - Examinadora

Aprovado

MAIO - 2006

*“Quem sabe o segredo? Quem o revelou?
De onde, de onde veio a criação multiforme?
Os deuses só mais tarde à vida surgiram.
De onde esta criação imensa? Quem o sabe?
Por ação ou omissão de Sua Vontade?
O Sublime Vidente, no alto dos céus,
O segredo conhece... Talvez nem Ele...”*

*Profundando a eternidade... Inda mesmo antes
De lançados os alicerces do mundo,*

...”

RIG VEDA

Ao Criador;
aos meus pais,
Luiz Gonçalves Dantas (em memória) e Maria Noêmia de Araújo Dantas;
a meus avós paternos,
Francisco Dantas – Sr. Chico – e Adélia Gonçalves Maia – D. Iaiá –,
que em mim plantaram a semente da busca do conhecimento (em memória);
e a Yole Jerônimo Ramos da Costa,
esposa amada, que não me permite esmorecer.

AGRADECIMENTOS

Ao Criador, pela grandeza inalcançável da Luz, da Força da Sabedoria e do Amor, e que em tudo encerrou a qualidade mínima necessária à compreensão da diversidade da vida.

Aos Orixás, por me propiciarem viver, na totalidade, a diversidade Divina. Ê PÁ RÊ, OIÁ.

À minha Esposa, Yole Jerônimo Ramos da Costa, pelo incentivo incansável e, principalmente, pela crença no êxito de uma nova e árdua empreitada. (Eu já disse que te amo... hoje?).

Aos meus filhos Manuela Ramos Caldas Lins, Lonan Jerônimo Dantas e Mariana Jerônimo Dantas, pela paciência, pela colaboração e por fazerem com que eu sempre procure ser melhor.

Ao Prof. Dr. Mario Eduardo R. M. Cavalcanti Mata, pela orientação, pelo incentivo e por ser o Chefe de que o mundo precisa: sábio, profícuo, competente, proficiente, sério, exigente, detalhista, paciente; em suma, com todas as características e qualidades que um chefe de qualquer setor deveria ter.

À estimada Prof.^a Dra. Maria Elita Martins Duarte, pela orientação e pelo incentivo.

Aos queridos Professores Doutores do LAPPA Alexandre José de Melo Queiroz, Francisco de Assis Cardoso Almeida, Francisco de Assis Santos e Silva, Josivanda Palmeira Gomes de Gouveia, Juarez Paz Pedroza, Mozaniel Gomes da Silva e Rossana Maria Feitosa de Figueiredo, pela solidariedade e pelos incentivos.

Ao estimado Professor Doutor Wilson Fadlo Curi, pelo apoio e generosa colaboração.

Ao estimado Professor Doutor Wilson Guerreiro Pinheiro, pelo apoio e generosa colaboração.

A todos os colegas-funcionários do LAPPA, em especial aos Drs. Renato Fonseca Aragão e José Rildo Oliveira, a Jasiel Dantas Costa.

Aos colegas de mestrado, pela convivência, agora Saudade, pelo tempo compartilhado, pelas emoções, pelas aflições, pelas parcerias, pelo nosso Sucesso.

SUMÁRIO

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	iv
LISTA DE SÍMBOLOS	vi
LISTA DE FIGURAS	x
LISTA DE TABELAS	xii
RESUMO	xiii
ABSTRACT	xiv
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Objetivos	3
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1 Considerações Gerais	4
2.2 Histórico	5
2.3 Secadores	5
2.4 Modelos Matemáticos	6
2.4.1 Modelo de Hukill	7
2.4.2 Modelo de Thompson (1968) - Modelo Implementado	12
2.4.3 Modelo de Morey	18
2.4.4 Modelo de Michigan	20
3 MATERIAL E MÉTODOS	25
3.1 Implementação do Modelo Matemático	25
3.1.1 Razão de conversão	25
3.1.2 Calor específico	26
3.1.3 Calor latente de vaporização	26

3.1.4	Equações de teor de umidade	26
3.1.4.1	Cavalcanti Mata	26
3.1.4.2	Henderson	26
3.1.4.3	Oswin	26
3.1.4.4	Thompson	26
3.1.5	Equações de camada fina	27
3.1.5.1	Thompson	27
3.1.5.2	Page	28
3.2	Encadeamento do Modelo	28
3.3	Módulo Operacional: Aplicativo	28
3.4	Simulação e Banco de Dados	29
3.5	Integração: Aplicativo x GBD	29
3.6	Material e Equipamento: <i>Hardware</i>	30
3.7	Material e Equipamento: <i>Software</i> Básico	30
3.7.1	Linguagem de programação e descritor da base de dados	30
3.7.2	Base de dados	30
3.8	Estrutura e Modelagem de Dados	33
3.8.1	Análise e modelagem dos dados	33
3.8.1.1	A tabela USUARIO.DBF	34
3.8.1.2	A tabela PRODUTO.DBF	35
3.8.1.3	A tabela ENTRADA.DBF	35
3.8.1.4	A tabela SIMULACAO_AUXILIAR.DBF	36
3.8.1.5	A tabela OPERACIONAL_AUXILIAR.DBF	36
3.8.1.6	A tabela SIMULACAO.DBF	37
3.8.1.7	A tabela OPERACIONAL.DBF	37
3.9	Validação do <i>Software/Modelo</i>	38

3.9.1 Parametrização utilizada	39
3.10 Análise Estatística	40
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	41
4.1. O <i>Software</i>	41
4.1.1 A opção <u>A</u> rquivo	41
4.1.2 A opção <u>S</u> obre	49
4.2 Discussão dos Resultados	50
4.2.1 Dados psicrométricos	51
4.2.2 Dados das simulações de secagem	52
4.2.2.1 Simulações de secagem de milho comum	52
4.2.2.2 Simulações de secagem de feijão macaçar	60
5. CONCLUSÕES	69
6. REFERÊNCIAS	70
APÊNDICE A – Código Fonte do SASG _{Dinâmico}	74

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AMD	<i>Advanced Micro Devices</i>
Armaz.	Armazenamento
ASAE	<i>American Society of Agricultural Engineers</i> [= Sociedade Americana de Engenheiros Agrícolas.]
ASCII	<i>American Standard Code for Information Interchange</i> [= Código Padrão Americano para Intercâmbio de Informações.]
ASHRAE	<i>American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers</i> [= Sociedade Americana de Engenheiros de Calefação, Refrigeração e Ar-Condicionado.]
CD	<i>Compact Disc</i> [= disco compacto]
CDU	Classificação Decimal Universal
CENTREINAR	Centro Nacional de Treinamento em Armazenagem
CEP	Código de Endereçamento Postal
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
COPEAG	Coordenação de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola
CTRN	Centro de Tecnologia e Recursos Naturais
DBF	<i>Database File</i> [= arquivo de dados]
ed.	edição; editor
et al.	Abreviação da locução latina <i>et alii</i> [= e outros]
Exp.	Experimental
f.	folha(s)
GBD	Gerenciamento de Banco de Dados
GWBASIC	<i>Gee-Whiz Beginners' All-Purpose Symbolic Instruction Code; Graphics and Windows Beginner's All-purpose Symbolic Instruction Code</i>
IAPAR	Instituto Agrônômico do Paraná
IBM	<i>International Business Machines</i>
IBM-PC	<i>International Business Machines – Personal Computer</i>
il.	ilustração
Lab.	Laboratório
LAPPA	Laboratório de Armazenamento e Processamento de Produtos Agrícolas
MG	Estado de Minas Gerais
Minn.	Minnesota

MSU	<i>Michigan State University</i> [= Universidade do Estado de Michigan]
n.	número
p.	página(s)
PB	Estado da Paraíba
Proc.	Processamento
P.V.	Pressão Parcial do Vapor
P.V.S.	Pressão de Vapor de Saturação
RAM	<i>Random Access Memory</i> [= memória de acesso aleatório]
SASG_{Dinâmico}	Software Aplicado à Simulação de Secagem de Grãos – Dinâmico
SBEA	Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola
Simul.	Simulado
TM	<i>Trade Mark</i> [= marca comercial]
UAEAg	Unidade Acadêmica de Engenharia Agrícola
UF	Unidade da Federação
UFCG	Universidade Federal de Campina Grande
UFSM	Universidade Federal de Santa Maria
UNICAMP	Universidade Estadual de Campinas
v.	volume

LISTA DE SÍMBOLOS

a	Área específica, $m^2.m^{-3}$;
$a_0, a_1, a_2, a_3, a_4,$ a_5, a_6	Constantes que dependem do produto e da temperatura;
A	Constante que depende do produto e da temperatura;
$A_1, A_2, A_3, A_4,$ A_5, A_6, A_7, A_8	Constantes que dependem do produto, da temperatura e/ou do teor de água;
B	Constante que depende do produto e da temperatura;
b.s.	Base seca;
b.u.	Base úmida;
$B_1, B_2, B_3, B_4,$ B_5, B_6, B_7, B_8	Constantes que dependem do produto, da temperatura e/ou do teor de água
c	Calor específico, $J.kg^{-1}.K^{-1}$
c_a	Calor específico da água, $cal.g^{-1}.^{\circ}C^{-1}$
c_p	Calor específico do produto, $kJ.kg^{-1}.^{\circ}C^{-1}$
c_v	Calor específico do vapor de água, $kJ.kg^{-1}.^{\circ}C^{-1}$
c_w	Calor específico da água no estado líquido, $kJ.kg^{-1}.^{\circ}C^{-1}$
C	Constante que depende do produto e da temperatura;
c_m	Camada
C_p	Calor específico do produto, $(kJ.kg^{-1}.^{\circ}C^{-1})$ ou $(kcal.kg^{-1}.K^{-1})$.
C_{p1}, C_{p2}	Constantes que dependem da temperatura e do produto
$^{\circ}C$	Grau Celsius
dY	Diferencial de distância
D	Adimensional de profundidade
D_m	Massa específica das sementes, $(kg \text{ de matéria seca}).m^{-3}$
e_a	Densidade do ar, $kg.m^{-3}$
e_p	Entalpia específica do produto, $kJ.kg^{-1}.^{\circ}C^{-1}$
G_{ar}	Fluxo de ar de secagem, $m^3.min^{-1}.m^{-2}$ ou $(kg \text{ de ar seco}).m^{-2}.h^{-1}$
GB	Gibabyte
GHz	Gigahertz
G_m	Fluxo de massa, $(kg \text{ de ar seco}).h^{-1}$
H	Coefficiente de transferência de calor por convecção, $W.m^{-2}.K^{-1}$; hora

H_{tm}	Tempo de meia resposta; unidade absoluta
h_{fg}	Calor latente de vaporização da água do produto, kcal. kg ⁻¹ .°C ⁻¹ ou J.kg ⁻¹
$h_{fg1}, h_{fg2}, h_{fg3}, h_{fg4}$	Constantes que dependem da temperatura e do produto
J	Joule
k	Constante que depende do produto
K	Constante que depende do produto; kelvin
kcal	Quilocaloria
kg	Quilograma
kJ	Quilojoule
L	Espessura da camada de secagem;
Ln	Logaritmo neperiano
M	Metro
m ²	metro quadrado
m ³	metro cúbico
MB	Megabyte
min	Minuto
N	Constante que depende do produto
P	Constante que depende das condições de secagem;
P_{atm}	Pressão atmosférica;
P_v	Pressão de vapor à temperatura ambiente, N.m ⁻²
P_{vs}	Pressão de vapor à temperatura do bulbo úmido, N.m ⁻²
PMS	Perda de matéria seca, em percentagem, de milho com teor de água de 25% b.u., temperatura de 15,6°C e 30% de danos;
Q	Calor de vaporização, kcal;
Q'	Calor sensível, kcal;
Q_a	Fluxo de massa, kg.s ⁻¹ .m ⁻²
r_c	Razão de conversão;
R_l	Massa específica do produto;
R_c	Razão entre a quantidade de matéria seca do produto em uma camada e a quantidade de ar seco que a atravessa no intervalo de tempo Δt , (kg de matéria seca)/(kg de ar seco);
R_r	Coefficiente que depende do produto;
RX	Razão do teor de água, adimensional;
RX_f	Razão do teor de água final do produto;

RX_o	Razão do teor de água inicial do produto;
s	Segundo;
S	Área, m^2
Sdy	Volume diferencial;
T	Tempo, em hora, minuto ou segundo;
t_{f1}, t_{f2}, t_{f3}	Constantes que dependem do produto;
T	Temperatura do ar, °C ou K;
T_{aq}	Temperatura do ar aquecido, °C ou K;
T_{ar}	Temperatura do ar, °C ou K;
T_{bs}	Temperatura de bulbo seco, °C ou K;
T_{bu}	Temperatura de bulbo úmido do produto, °C ou K;
T_e	Temperatura de equilíbrio, °C ou K;
T_{e1}, T_{e2}	Constantes que dependem da temperatura e do produto, °C ou K;
T_{eq}	Tempo equivalente, min ou h;
T_f	Temperatura final do ar, °C ou K;
t_{f1}, t_{f2}, t_{f3}	Constantes que dependem do produto;
T_g	Temperatura do grão, °C ou K;
T_o	Temperatura inicial do produto, °C ou K;
T_p	Temperatura do produto, °C ou K;
T_q	Temperatura do ar aquecido, °C ou K;
UR	Umidade relativa do ar, decimal;
URE_u	Umidade relativa de equilíbrio para o produto no reumedecimento, em %
V	Velocidade, $m.s^{-1}$
V_a	Velocidade do ar, $m.s^{-1}$
V_{esp}	Volume específico, $m^3.kg^{-1}$;
W	Índice que se refere a água;
X	Teor de água, % base seca ou base úmida;
X_{bu}	Teor de água em base úmida;
X_e	Teor de água de equilíbrio, base seca, decimal;
X_{e1}, X_{e2}, X_{e3}	Constantes que dependem da temperatura e do produto;
X_f	Teor de água final, % ou decimal;
X_o	Teor de água inicial, base seca, % ou decimal;
y	Constante que depende da temperatura e do produto;

Y	Profundidade de camada de sementes, m;
W	Razão de umidade do ar, adimensional;
W	Watt;
Z	Distância do ponto de entrada do ar até o grão, m;
δl	Altura da camada fina, m;
δt	Intervalo de tempo de secagem, min ou h;
δX	Varição do teor de água;
Δh_{fg}	Varição do calor latente de vaporização da água do produto, $J.kg^{-1}$;
ΔR_X	Varição da razão do teor de água do ar de secagem, adimensional;
Δt	Incremento de tempo de secagem, min ou h;
ΔT	Intervalo de tempo de secagem, min ou h;
ΔT_p	Varição de temperatura do produto, °C ou K;
ΔX	Varição do teor de água, base seca, % ou decimal;
ϵ	Porosidade da massa de sementes, % ou decimal;
θ	Temperatura das sementes, K;
ρ	Massa específica, $kg.m^{-3}$;
ρ_a	Massa específica do ar, $kg.m^{-3}$;
ρ_p	Massa específica do produto, $kg.m^{-3}$;

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Diagrama ilustrativo da cadeia de produção de produtos agrícolas.	4
Figura 2	Ilustração de um secador de camada fixa.	6
Figura 3	Ilustração do processo de secagem do modelo de Thompson (1968): camada delgada.	13
Figura 4	Volume elementar de uma camada de sementes.	20
Figura 5	Diagrama de encadeamento operacional do SASG _{Dinâmico} .	31
Figura 6	Fluxograma ilustrativo da determinação da umidade final.	32
Figura 7	Figura ilustrativa do modelo de utilização de banco de dados. O aplicativo, programa de computador, acessa a base de dados através de um sistema de gerenciamento de dados.	33
Figura 8	Diagrama ilustrativo das entidades (tabelas) utilizadas pela aplicação e seus relacionamentos.	38
Figura 9	Tela inicial de abertura do aplicativo.	41
Figura 10	Tela operacional de cadastro de usuário.	42
Figura 11	Tela operacional de cadastro de produto, coeficientes e modelo de equações de umidade de equilíbrio e equação de camada fina (produto-parâmetro).	43
Figura 12	Tela operacional de cadastro das condições de secagem a serem utilizadas na simulação (condições de secagem).	43
Figura 13	Tela operacional de apresentação dos resultados da simulação: tempo de secagem, teor de água do produto, temperatura e média do teor de água (resultados da simulação).	45
Figura 14	Tela operacional de apresentação dos resultados da simulação na forma de gráficos, cinéticas de secagem: tempo de secagem, teor de água, temperatura e média do teor de água.	46
Figura 15	Tela operacional de apresentação dos resultados da simulação na forma de gráficos, cinéticas de secagem, a serem impressos e/ou exportáveis: tempo de secagem, teor de água, temperatura e média do teor de água.	46
Figura 16	Tela operacional de apresentação dos resultados da simulação na forma de relatório a ser impresso e/ou salvo, exportado. Dados numéricos: tempo de secagem, teor de água, temperatura e média de teor de água.	47
Figura 17	Tela operacional de apresentação dos resultados operacionais, variáveis intrínsecas ao processo físico da simulação na forma numérica: tempo de secagem, teor de água absoluto, pressão parcial de vapor, etc.	48

Figura 18	Tela operacional de apresentação dos resultados operacionais, variáveis intrínsecas ao processo físico da simulação na forma numérica, na forma de relatório a ser impresso e/ou salvo, exportado a outro meio ou aplicação: tempo de secagem, teor de água absoluto, pressão parcial de vapor, etc.	48
Figura 19	Tela operacional de apresentação dos créditos, autores e registro, do SASG _{Dinâmico} : Orientadores e Orientando.	49
Figura 20	Figura ilustrativa dos padrões de interface, ação e controle, utilizados pelo SASG _{Dinâmico} .	50
Figura 21	Curvas de secagem: dados experimentais e simulados de milho comum para o conjunto de PROVA 1.	57
Figura 22	Curvas de secagem: teor de água médio dos dados experimentais e simulados de milho comum para o conjunto de PROVA 1.	57
Figura 23	Curvas de secagem: dados experimentais e simulados de milho comum para o conjunto de PROVA 2.	59
Figura 24	Curvas de secagem: teor de água médio dos dados experimentais e simulados de milho comum para o conjunto de PROVA 2.	59
Figura 25	Curvas de secagem: dados experimentais e simulados de feijão macaçar para o conjunto de PROVA 3: ($X_o = 193$ b.s. (%), $T_q = 28^\circ\text{C}$, $G_{ar} = 30$ $\text{m}^3/\text{min}/\text{m}^2$, $L = 0,63$, $UR = 67\%$).	64
Figura 26	Curvas de secagem: teor de água médio dos dados experimentais e simulados de feijão macaçar para o conjunto de PROVA 3.	65
Figura 27	Curvas de secagem: dados experimentais e simulados de feijão macaçar para o conjunto de PROVA 4: ($X_o = 223$ b.s. (%), $T_q = 52^\circ\text{C}$, $G_{ar} = 30$ $\text{m}^3/\text{min}/\text{m}^2$, $L = 0,63$, $UR = 67\%$).	67
Figura 28	Curvas de secagem: teor de água médio dos dados experimentais e simulados de feijão macaçar para o conjunto de PROVA 4.	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Descrição das equações de parametrização aberta do SASG _{Dinâmico} .	25
Tabela 2	Parâmetros utilizados na simulação do produto milho comum.	39
Tabela 3	Parâmetros utilizados na simulação do produto feijão macaçar.	40
Tabela 4	Propriedades psicrométricas do ar – $P_{atm} = 760$ mmHg.	51
Tabela 5	Propriedades psicrométricas do ar – $P_{atm} = 695,10$ mmHg.	51
Tabela 6	Propriedades psicrométricas do ar aquecido – $P_{atm} = 695,10$ mmHg.	52
Tabela 7	Dados experimentais de milho comum, obtidos por Mantovani (1976): $X_o = 26$ % (b.s.) e $T_q = 35^\circ\text{C}$. (PROVA 1).	53
Tabela 8	Dados experimentais de milho comum, obtidos por Mantovani (1976): $X_o = 25$ % (b.s.) e $T_q = 30^\circ\text{C}$. (PROVA 2).	53
Tabela 9	Dados simulados de milho comum, para comparação ao conjunto de dados obtidos por Mantovani (1976) PROVA 1.	54
Tabela 10	Dados simulados de milho comum, para comparação ao conjunto de dados obtidos por Mantovani (1976) PROVA 2.	55
Tabela 11	Apresentação dos Desvios determinados entre os dados experimentais e simulados referentes ao conjunto de dados da PROVA 1.	56
Tabela 12	Apresentação dos Desvios determinados entre os dados experimentais e simulados referentes ao conjunto de dados da PROVA 2.	58
Tabela 13	Dados experimentais de feijão macaçar, obtidos por Souza (2004): $X_o = 193$ % (b.u.) e $T_q = 28^\circ\text{C}$. (PROVA 3).	61
Tabela 14	Dados experimentais de feijão macaçar, obtidos por Souza (2004): $X_o = 223$ % (b.u.) e $T_q = 52^\circ\text{C}$. (PROVA 4).	62
Tabela 15	Apresentação dos Desvios determinados entre os dados experimentais e simulados referentes ao conjunto de dados da PROVA 3.	63
Tabela 16	Apresentação dos Desvios determinados entre os dados experimentais e simulados referentes ao conjunto de dados da PROVA 4.	66



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA
ARMAZENAMENTO E PROCESSAMENTO DE PRODUTOS AGRÍCOLAS**

Dissertação de Mestrado: Desenvolvimento de um programa computacional dinâmico para simulação de secagem de grãos e sementes

Autor: Luís Antônio Dantas

Orientadores: Prof. Dr. Mario Eduardo Rangel Moreira Cavalcanti Mata

Prof.^a Dra. Maria Elita Martins Duarte

RESUMO

Este trabalho foi desenvolvido com o objetivo de se implementar um programa computacional dinâmico para a simulação de secagem de produtos agrícolas. Para tanto, utilizou-se o modelo de Thompson aplicado ao secador de camada fixa, acrescido das equações de Teor de Água Equilíbrio propostas por Henderson, Cavalcanti Mata, Oswin e Thompson e das equações de camada fina propostas por Page e Thompson. Tal propositura é possível a partir da possibilidade de se utilizarem quaisquer parâmetros predeterminados, a partir de dados experimentais coletados, observando-se a faixa de temperatura e o teor de água inicial do produto. Para que tal objetivo fosse alcançado, utilizou-se o conceito de Banco de Dados Relacional. Essa adoção permite abrir, literalmente, o escopo do aplicativo, visto que é possível criar uma base de dados de produtos, escopo paramétrico e condições de secagem particulares, uma vez que cada conjunto é armazenado e identificado individualmente, dando-lhe caráter único. Aplicativos com características similares estão baseados no mesmo conjunto de equações – Razão de Conversão, Calor Específico, Calor Latente de Vaporização, Equação de Teor de Água de Equilíbrio e Equação de Camada Fina –, porém com parametrização individualizada ao produto objeto. Como extensão funcional, implementou-se a possibilidade de identificação do usuário, do produto em análise, do conjunto simulado, com possibilidade de exportação dos dados a aplicativos exteriores a ele. Essa dinamicidade se mostrou eficiente principalmente no que tange ao reaproveitamento e análise dos dados, uma vez que toda a gama de informações ficará armazenada, dispensando a utilização de ações repetitivas maximizadoras de erros.

Palavras-chave: Modelo de Thompson; simulação de secagem; *software* dinâmico.



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA
ARMAZENAMENTO E PROCESSAMENTO DE PRODUTOS AGRÍCOLAS**

M. Sc. Thesis: Development of a dynamic computational program for simulation of drying of grains and seeds

Author: Luís Antônio Dantas

Supervisors: Mario Eduardo Rangel Moreira Cavalcanti Mata, Dr.

Maria Elita Martins Duarte, Dr.

ABSTRACT

The objective of the present work is to implement a dynamic computational program for the simulation of drying of agricultural products. To this effect, the Thompson's model as applied to a fixed-bed drier was used with the equations of Equilibrium Moisture Content, as proposed by Henderson, Cavalcanti Mata, Oswin and Thompson, and the equations of a fine layer, which were used and proposed by Page and Thompson. Moreover, the approach developed herein allows the use of any previously defined parameters, from collected experimental data, observing the temperature bandwidth and the initial moisture content of the product. To achieve such an objective, the concept of Relational Database was used. It allows to increase the number of practical applications due to its ability to create a product database, which stores individual parametric targets and particular conditions of drying, giving to each product a unique characteristic. Although similar softwares, which make use of some subset of equations used herein, such as Reason of Conversion, Specific Heat, Heat of Vaporization, Equilibrium Moisture Content Equation and Thin Layer Equation, have been developed, they do not couple with the set of parameter characterization for each product. As a functional extension to the application of the software, the user identification can also be stored along with the characteristics of the product in analysis and the simulated dataset. It is also possible to export the required data to perform a posteriori simulation experiments. This dynamic procedure is quite efficient when one desires to make reuse or to perform new analysis of stored dataset, since all the required information will be appropriately available, reducing error prone to repetitive actions.

Keywords: Model of Thompson; drying simulation; dynamic software.

1. INTRODUÇÃO

O Brasil, desde sua descoberta, vem mantendo a tradição de um país que se sustenta com base na agricultura, embora nas duas últimas décadas o percentual de produtos agrícolas primários venha perdendo espaço para produtos agrícolas processados e para a exportação de produtos industriais, como é o caso de eletrodomésticos, automóveis, aviões, etc.

Embora o seu perfil econômico esteja mudando, o Brasil ainda é uma Nação onde as atividades fundiárias, a agricultura e a pecuária ainda são a base do desenvolvimento econômico nacional. Atualmente, ano a ano, obtêm-se recordes na produção e comercialização de produtos agrícolas com forte influência na balança comercial.

Até o começo do século XIX, a população mundial era de um bilhão de pessoas; na metade do século XX, atingiu o número de três bilhões; no início do século XXI, já supera os seis bilhões de habitantes, verificando-se um forte aumento populacional em países do Terceiro Mundo (OLIVEIRA, 2005).

O aumento populacional sem planejamento familiar é um problema grave. A falta de políticas públicas, por parte dos Países do Terceiro Mundo, acaba por agravar as desigualdades sociais, propiciando maiores demandas por alimentos e exacerbando a fome no mundo.

Com vistas a suprir a exponencial demanda por alimentos, grãos em especial, é que se faz necessário que os países produtores busquem, cada vez mais, novas tecnologias que possibilitem a otimização de toda a cadeia produtiva de alimentos (insumos, plantio, tratamentos culturais, colheita, secagem, beneficiamento, armazenagem e comercialização).

A secagem de grãos e sementes, dentro da cadeia produtiva, é um processo de fundamental importância, pois, além de representar um custo equivalente a 12% da energia total gasta no sistema pós-colheita, prepara o produto para a armazenagem e exerce uma forte influência na manutenção da sua qualidade durante o período de estocagem, visto que a secagem, ao deixar o produto com baixo teor de água, diminui a sua atividade biológica e inibe as atividades microbianas associadas (CAVALCANTI MATA, 1993).

A exemplo dos demais processos da cadeia de produção, a secagem é uma atividade que precisa ser prevista, dimensionada e planejada. Nesse contexto, profissionais ligados à atividade, como engenheiros projetistas, pesquisadores, administradores ou produtores, carecem de uma ferramenta específica, como um programa computacional, que permitisse simular esse processo

de secagem e prever, sob as condições próprias de uma região, qual o melhor tipo de secador e quais as condições específicas de secagem, além do tempo necessário para realizá-la. Essa operação que permite prever e otimizar o processo deve também tornar possível sua utilização semi-imediata sem a necessidade de aporte de conhecimentos exteriores.

Os programas de simulação visam a economizar tempo e dinheiro de modo a prever a realidade (CAVALCANTI MATA, 1996), fazendo-se necessário para o seu desenvolvimento e sua implementação o conhecimento do processo físico e o modelo matemático que o representa. Nesse contexto, a simulação lógica, programa computacional, com base em modelos matemáticos deve ser consubstanciada com dados reais.

O primeiro trabalho de grande importância em simulação de secagem foi realizado por Hukill em 1947 (QUEIROZ, 1982). Esse trabalho foi o ponto de partida para o desenvolvimento de outros modelos e seus posteriores refinamentos.

Depois do modelo de Hukill, seguiu-se o trabalho de simulação de secagem feito por Thompson (1968) para leito fixo. O modelo de Thompson foi aperfeiçoado por Morey *et al.* (1978) para secagem a baixas temperaturas. Tal aperfeiçoamento se deu pela introdução de equações de perda de qualidade do produto, quando este fica submetido a um tempo excessivo sem que haja secagem na camada superior do secador.

Em 1974 diversos autores trabalharam no desenvolvimento de um modelo diferencial que, hoje, é denominado de modelo da *Michigan State University* (MSU). Com a evolução da Informática, esse modelo foi aperfeiçoado por diversos autores para diferentes produtos.

Ao se estudar cada um desses modelos dispostos na Literatura, pode-se observar, com clareza, que os programas foram feitos e utilizados para produtos específicos ou mesmo para um só produto. Esses programas, dado o seu escopo particular, não permitem a combinação de equações que melhor representem o processo de simulação.

1.1 Objetivos

Os objetivos específicos do presente trabalho, a partir do exposto no tópico anterior, são:

- Desenvolver um programa computacional com base no Modelo Analítico de Thompson (1968) para secagem em leito fixo, que permita incluir um número ilimitado de novos produtos, sem a necessidade de desenvolvimento de novos Softwares Exclusivos ou Particulares, associados a um único produto ou grão;
- disponibilizar em um único módulo computacional, de aferição analítica, a possibilidade de poder variar todos os coeficientes utilizados nas equações básicas de simulação, calor específico, calor latente de vaporização, teor de água de equilíbrio e equação de camada fina;
- desenvolver e associar ao programa computacional um Banco de Dados que permita a criação de uma base de informações com os resultados das simulações já efetuadas, associadas a um determinado produto, assim como a identificação do seu usuário.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Considerações Gerais

A cadeia metodológica da produção de alimentos, em sua estrutura natural, tem como base quatro componentes cíclicos, que são o Plantio, a Colheita, a Secagem e a Armazenagem, conforme ilustra a Figura 1. Hoje, dada a demanda mundial por alimentos, esses componentes devem ser aperfeiçoados na sua dinâmica, em busca da adoção de novos métodos, formas e técnicas que os tornem cada vez mais eficientes. A mecanização dos processos de semeadura e colheita, o melhoramento genético dos grãos e a simulação dos processos são exemplos do resultado dessa busca.

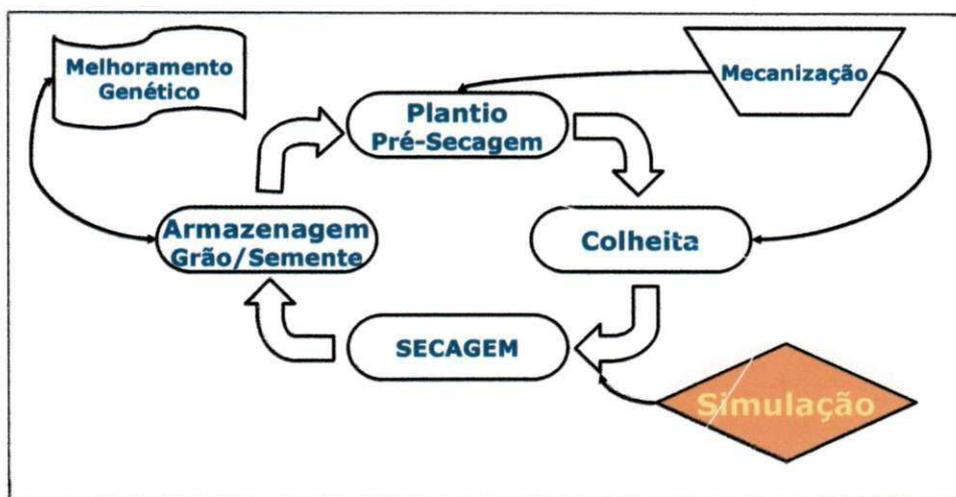


Figura 1 – Diagrama ilustrativo da cadeia de produção de produtos agrícolas.

A simulação tem sido, ao longo dos tempos, a maneira pela qual o homem experimenta e ratifica soluções. A simulação digital é, portanto, o ramo da ciência que alia formulação matemática ao processamento de informações por meio da implementação de algoritmos computacionais. Exemplos dessa técnica são a simulação do comportamento e do desempenho de máquinas e equipamentos, a simulação das variações climáticas e a simulação da otimização e utilização de recursos. Qualquer que seja o seu alvo, a simulação deve estar consubstanciada de todo o embasamento técnico-científico a ela associada.

2.2 Histórico

A simulação de secagem, a exemplo da cadeia de produção citada no tópico anterior, coincidentemente, apóia-se em quatro pilares: Hukill (1947), Thompson (1968), Morey (1976) e Michigan (1974). A partir da década de 1970, com o início da utilização de computadores, começa uma nova era, porém ainda restrita a instituições educacionais e empresas de grande porte. A facilidade e a rapidez no processamento de dados seriam, a partir de então, utilizadas massivamente.

Com o processamento centralizado basicamente nas Universidades Federais, tem início o trabalho de implementação dos modelos. No Brasil, o primeiro trabalho de simulação computacional foi feito por Mantovani (1976), que implementou o modelo de Hukill para simulação de secagem de milho em camada espessa, utilizando a linguagem de programação Fortran. Queiroz *et al.* (1982) implementaram os modelos de Thompson e Hukill para utilização em máquinas calculadoras do tipo TI-59. Martins (1982) implementou o modelo de Michigan para o milho. Tal aplicação foi desenvolvida em linguagem de programação Fortran IV e processada num computador IBM 360/370. Cavalcanti Mata *et al.* (1999) implementaram os modelos de Thompson e Hukill para milho, cacau, soja, trigo, arroz e café. Nessa implementação, utilizaram a Linguagem de Programação Clipper 87 baseado já na tecnologia IBM-PC. Caneppele (1993) desenvolveu um simulador baseado no modelo de Thompson (1968) para o arroz. Essa implementação utilizou a Linguagem de Programação Turbo Pascal versão 5.5. Fioreze (2004) implementou um simulador de secagem para raspa da mandioca a partir do modelo de Thompson modificado, utilizando a Linguagem de Programação GWBASIC.

2.3 Secadores

Os secadores variam em função de sua funcionalidade, do tipo de produto, da capacidade de secagem, do tipo de energia para aquecimento, etc. (FIOREZE, 2004). A Figura 2 ilustra um secador de camada fixa.

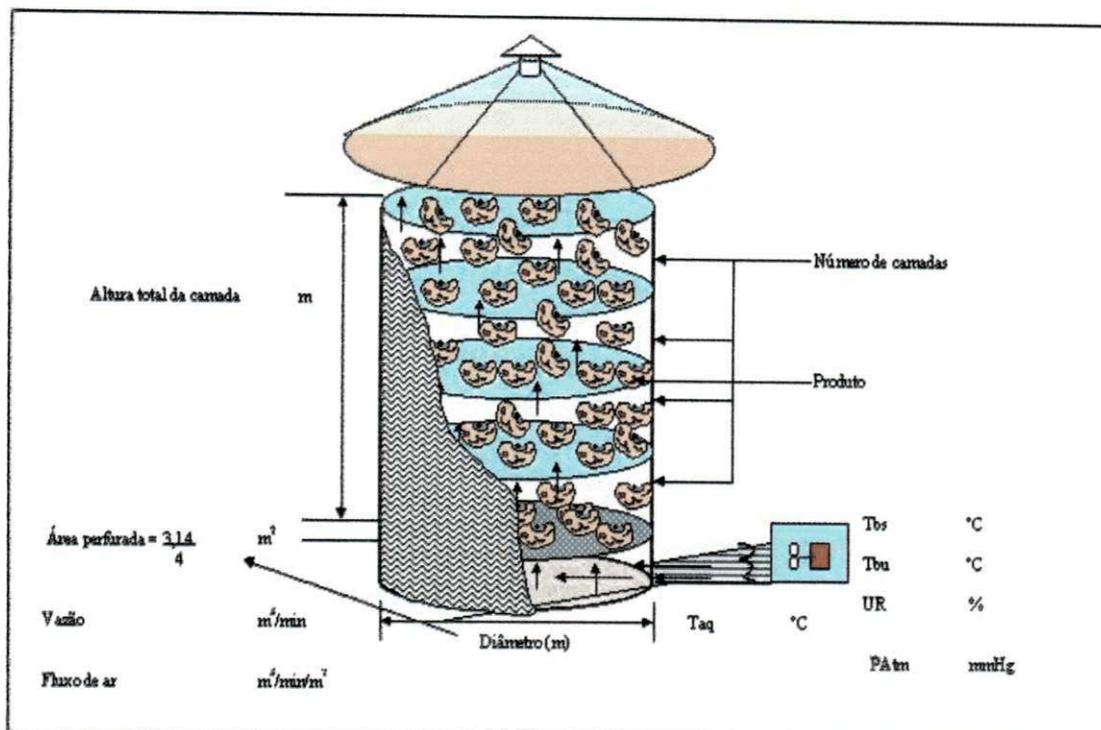


Figura 2 – Ilustração de um secador de camada fixa.

2.4 Modelos Matemáticos

Os modelos matemáticos podem ser classificados, quanto a sua formulação matemática, como *analíticos* e *numéricos*. Os modelos analíticos são expressos através de expressões polinomiais, logarítmicas e/ou literais (HUKILL, 1947), (THOMPSON, 1968), (MOREY, 1976), e os numéricos por equações diferenciais, modelo de Michigan. Cavalcanti Mata (1997) mostra que testes feitos entre os modelos de Thompson e Michigan não apresentam diferenças significativas. Ainda segundo Cavalcanti Mata (1999), os sistemas têm utilizado parâmetros genéricos. É possível concluir que a utilização de parâmetros genéricos é que deve definitivamente influenciar nas diferenças observadas. Logo, a partir da determinação de parâmetros, através de regressão linear, para cada produto sob condições específicas, é plausível supor em uma máxima minimização das diferenças e conseqüente convergência dos modelos.

Holanda (2007) descreve que as classificações das equações de camada fina são empíricas, semi-empíricas e teóricas. Essas equações não levam em consideração os efeitos da

variação da temperatura no processo de secagem, assumindo que o produto alcança a temperatura média do ar imediatamente no começo do processo de secagem. As equações empíricas e semi-empíricas admitem processo isotérmico e desprezam a resistência de transferência de massa interna, enquanto que as equações teóricas admitem equilíbrio de temperatura entre o produto e sua vizinhança, e também consideram desprezível a transferência de massa na superfície do produto.

Ainda segundo Holanda (2007), as equações empíricas possuem uma relação direta entre o teor de água no produto e o tempo de secagem, enquanto que as semi-empíricas são análogas à lei de Newton para o resfriamento, assumindo que a taxa de secagem é proporcional à diferença entre o teor de água do produto e seu respectivo teor de água de equilíbrio para as condições de secagem especificadas. As equações teóricas geralmente levam em consideração a difusão de líquido e/ou vapor dentro do produto. As taxas de transferência de calor e de massa no produto, como um todo, são descritas por modelos concentrados, ignorando as resistências internas dessas transferências.

2.4.1 Modelo de Hukill

Hukill (1947) desenvolveu uma expressão analítica para a água dos grãos, relacionada com a altura total da camada de grãos e com o tempo de secagem, desprezando o calor sensível dos grãos e admitindo que a temperatura do ar de secagem decresce exponencialmente, à medida que o ar vai passando pela massa de grãos.

O autor considerou, no balanço de energia, que o calor para vaporização da água do grão é igual ao calor sensível perdido na passagem do ar através dos grãos. Para tanto, considerou uma camada fina, δl , de grãos de uma altura L no silo. Durante um pequeno intervalo de tempo δt , o teor de água (X) decresce rapidamente (δX). A quantidade de calor necessária para diminuir o teor de água é dada pelo produto da quantidade de água evaporada pelo calor de vaporização. Isso pode ser expresso por:

$$Q = D_m S \delta z \left(\frac{\partial X}{100} h_{fg} \right) \quad (1)$$

onde

Q = calor de vaporização, kcal

D_m = massa específica das sementes, (kg de matéria seca).m⁻³

S = área, m²

z = distância do ponto de entrada do ar até o grão, m

X = Teor de água do produto, % base seca

h_{fg} = calor latente de vaporização da água do produto, kcal. kg⁻¹.°C⁻¹

Durante o mesmo intervalo de tempo, a movimentação do ar através da camada delgada provoca uma pequena diminuição da temperatura, δt . A perda de calor associada a essa diminuição de temperatura é dada como o produto da massa de ar passando através da camada delgada, durante o intervalo de tempo δt , pelo calor específico do ar e pela queda de temperatura, conforme a seguinte equação:

$$Q' = 60G_m t C_p \delta t \quad (2)$$

onde

Q' = calor sensível, kcal

G_m = fluxo de massa, (kg de ar seco). h⁻¹

t = tempo, h

T = Temperatura, K

C_p = calor específico do produto, kcal.kg⁻¹. K⁻¹

Considerando o calor de vaporização igual ao calor sensível do ar ($Q = Q'$), tem-se:

$$D_m S \delta z \left(\frac{X}{100} \right) h_{fg} = 60 G_m S \delta t C_p \delta T \quad (3)$$

Desprezando o calor sensível do grão, a condução e pequenas radiações de calor, resulta que:

$$X = \frac{6000G_m C_p}{D_m h_{fg}} \frac{\partial t \partial T}{\partial z} \quad (4)$$

Pode-se, então, escrever que:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = P \frac{\partial T}{\partial l} \quad (5)$$

onde L é a espessura da camada de secagem e P é uma constante, estabelecida para uma dada condição de secagem, definida por:

$$P = \frac{6000G_m C_p}{D_m h_{fg}} \quad (6)$$

Na equação 5, a taxa de secagem é proporcional à diferença entre as temperaturas do ar imediatamente acima e abaixo de uma camada fina, de espessura δL , considerando desprezíveis as trocas de calor nas paredes do silo e a variação do calor sensível dos grãos.

A relação entre o teor de água dos grãos e o tempo durante os processos de secagem em camada fina (ou seja, processos onde cada parte da massa das sementes está em contato com o ar nas condições iniciais), é a seguinte:

$$X - X_o = (X_o - X_e) \text{Exp}(-Kt) \quad (7)$$

em que

X_e = teor de água de equilíbrio, % base seca;

K = coeficiente que depende do produto.

A relação entre a temperatura do ar de secagem e a espessura da camada de grãos é a seguinte:

$$T - T_g = T \text{Exp}(-R_r z) \quad (8)$$

em que

T_g = temperatura do grão, °C;

R_r = coeficiente que depende do produto.

Assumindo as condições já citadas, pode-se derivar a expressão para o teor de água do grão com o tempo, em alguma parte do silo, na qual as condições iniciais do ar e também a velocidade através da massa de grãos são constantes. Hukill (1947) encontrou uma expressão para o teor de água (X) em função do tempo (t) e da espessura da camada (L), além de uma expressão em função dos mesmos parâmetros para a temperatura do ar. A seguir são descritas as condições de contorno e as expressões obtidas por ele.

$$\text{Condição 1: } T = 0, X = X_o \quad T = T \text{ Exp}(-R_r z) + T_g \quad (9)$$

$$\text{Condição 2: } T = \infty, X = X_o$$

$$\text{Condição 3: } z = 0, T = T_o \quad X = X \text{ Exp}(-Kt_1) + X_o \quad (10)$$

$$\text{Condição 4: } X = \infty, T = T_g$$

Para alguns valores de t e z, tem-se:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = P \frac{\partial T}{\partial z} \quad (11)$$

Para essa condição, as expressões são:

$$X = (X_o - X_g) \frac{e^{cz}}{e^{cz} + e^{kt} + 1} + X_g \quad (12)$$

$$T = (T_o - T) \frac{e^{kt}}{e^{cz} + e^{kt} + 1} + T_o \quad (13)$$

em que

$$c = \frac{K(X_o - X_e)}{P(T_o - T_e)} \quad (14)$$

Para simplificar a equação do teor de água, o referido autor definiu o teor de água, a temperatura, o tempo e a espessura da camada como parâmetros adimensionais. Tornando adimensional o teor de água dos grãos (razão de água), tem-se:

$$RX = \frac{X - X_e}{X_o - X_e} \quad (15)$$

onde $RX = 1$ no início da secagem ($t = 0$) e $RX = 0$ em $t = \infty$ (para o equilíbrio higroscópico).

O tempo pode ser expresso em termos de períodos de meia resposta, isto é, o período H , em horas, é o tempo necessário para que os grãos tenham uma razão de água de 0,5. Conseqüentemente, $e^{kt} = 0,5$ ou $e^{kt} = 2$, e tem-se o tempo, em período de meia resposta (adimensional de tempo):

$$Y = \frac{t}{H} \quad (16)$$

Segundo Queiroz *et al.* (1982), o tempo de meia resposta (H_{tm}) pode ser determinado por meio de regressão linear, mediante os dados de Brooker *et al.* (1974), utilizando-se a seguinte equação para milho:

$$H_{tm} = \text{Exp}(2,413 - 0,016 \%X_{bu} + 0,003 T - 0,001 \%X_{bu} T) \quad (17)$$

O teor de água equivalente a um fator profundidade (adimensional de profundidade) pode ser definido como a profundidade da camada de grãos na qual o calor necessário para evaporação da água inicial ($RX_o = 1$) e o teor de água final ($RX_f = 0$) é igual ao calor sensível fornecido pelo ar por unidade de tempo. Assim, o adimensional de profundidade é dado por:

$$D = \frac{z D_m h_{fg} (X_o - X_e)}{6000 G_{ar} C_p H(T_o - T_e)} \quad (18)$$

em que

G_{ar} = fluxo de ar, kg de ar seco. $m^{-2} \cdot h^{-1}$

A equação geral proposta por Hukill (1947) para descrever a secagem de uma massa de grãos é a seguinte:

$$RX = \frac{2^D}{2^D - 2^Y - 1} \quad (19)$$

2.4.2 Modelo de Thompson (1968) - Modelo Implementado

Thompson (1968) propôs um modelo analítico de simulação de secagem a partir das condições do ar de secagem, do fluxo de ar, do grão, da espessura da camada e do teor de água inicial do produto, considerando-o como vários pequenos processos, conforme mostrado na Figura 3. Queiroz *et al.* (1982) utilizaram o procedimento de dividir o processo contínuo de secagem em vários pequenos processos, simulando-os mediante cálculos consecutivos das trocas que ocorrem durante pequenos incrementos de tempo. Na Figura 3, é mostrado esquematicamente um desses processos. Durante um intervalo de tempo, Δt , uma quantidade de água, ΔX , é evaporada e transportada pelo ar, que aumenta sua razão de água, RX , para $RX + \Delta RX$. Durante a secagem, a temperatura do ar diminui de um valor ΔT proporcional ao aumento de temperatura do grão, ΔT_p , e ao resfriamento evaporativo, que acompanha a remoção de água.

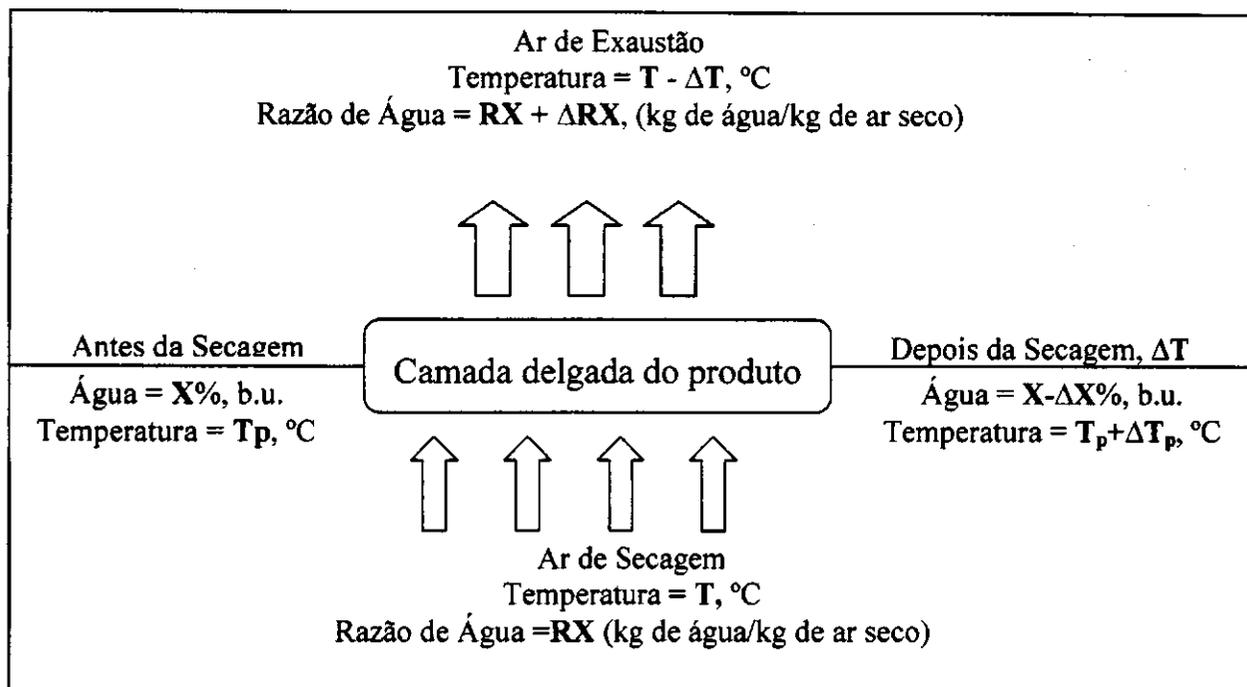


Figura 3 – Ilustração do processo de secagem do modelo de Thompson (1968): camada delgada.

O modelo de Thompson (1968) é construído a partir das seguintes suposições:

1.ª - Equação de camada fina:

$$t = A \ln(RX) + B [\ln(RX)]^2 \quad (20)$$

onde

t = tempo dado em hora;

A = constante que depende do produto e da temperatura;

B = constante que depende do produto e da temperatura;

RX = razão do teor de água, adimensional;

2.^a - A razão do teor de água é definida por:

$$RX = \frac{X - X_e}{X_o - X_e} \quad (21)$$

onde

X = teor de água, base seca, decimal;

X_e = teor de água de equilíbrio, base seca, decimal;

X_o = teor de água inicial, base seca, decimal.

3.^a - A temperatura do grão é igual à temperatura do ar que o envolve:

$$T_p = T_{ar} \quad (22)$$

onde

T_p = temperatura do grão, °C;

T_{ar} = temperatura do ar, °C.

4.^a - O teor de água de equilíbrio do produto, em uma determinada condição do ar de secagem, é dado por:

$$(1 - UR) = \text{Exp}[-K (T + C) X_e^N] \quad (23)$$

onde

UR = umidade relativa do ar, decimal;

K = constante que depende do produto;

C = constante que depende do produto;

N = constante que depende do produto;

T = temperatura do ar, °C.

5.ª - O calor latente de vaporização da água no milho é dado por:

$$h_{fg} = (h_{fg1} - h_{fg2} T) [h_{fg3} \text{Exp}(-h_{fg4} X)] \quad (24)$$

onde

h_{fg1} = constante que depende da temperatura e do produto;

h_{fg2} = constante que depende da temperatura e do produto;

h_{fg3} = constante que depende da temperatura e do produto;

h_{fg4} = constante que depende do produto;

h_{fg} = calor latente de vaporização, kJ.kg⁻¹;

X = teor de água, base seca decimal.

6.ª - O calor específico do produto é representado pela equação:

$$C_p = C_{p1} + C_{p2}X \quad (25)$$

onde

C_{p1} = constante que depende da temperatura e do produto;

C_{p2} = constante que depende da temperatura e do produto;

C_p = calor específico do produto, kJ.kg⁻¹ °C⁻¹;

7.ª - Temperatura do ar de secagem

A temperatura de equilíbrio entre o ar de secagem e o produto é determinada através da equação de balanço de energia. Como o calor sensível do ar é usado para a evaporação da água do grão, essa temperatura é menor do que a temperatura do ar aquecido que flui pela camada. Thompson (1968) determinou a seguinte expressão, utilizando o balanço de calor:

$$T_e = \frac{(T_{e1} + T_{e2} RX) T_{ar} + C_p T_p}{T_{e1} + T_{e2} RX + C_p} \quad (26)$$

onde

T_{e1} = constante que depende da temperatura e do produto;

T_{e2} = são constantes que dependem do produto;

RX = razão do teor de água do ar antes da secagem, kJ.kg^{-1} ;

T_{ar} = temperatura do ar antes da secagem, $^{\circ}\text{C}$;

C_p = calor específico do produto, $\text{kJ.kg}^{-1}.\text{^{\circ}C}^{-1}$;

T_p = temperatura do grão antes da secagem, $^{\circ}\text{C}$;

T_e = temperatura de equilíbrio, $^{\circ}\text{C}$.

8.ª - Água removida

Para a determinação da quantidade de água removida de cada camada, é necessário conhecer o teor de água inicial do grão e a temperatura do ar na saída. O teor de água de equilíbrio do produto (X_e) foi calculado usando a temperatura de equilíbrio da seguinte forma:

$$X = \left[\frac{-\ln(1 - UR)}{X_{e1} (T_e + X_{e2})} \right]^{\frac{1}{X_{e2}}} \quad (27)$$

Em um processo de secagem em camada espessa, a temperatura do ar de secagem (T_e), em uma dada localização da camada de grãos, muda com o processo de secagem. Thompson (1968) usou o tempo de secagem equivalente dado pela Equação (26), e determinou uma nova curva de

secagem, depois de cada incremento de tempo. A razão de água e o presente período de secagem foram calculados usando a Equação (26), adotando o tempo de secagem equivalente mais o intervalo de tempo de secagem, Δt . O teor de água final da camada foi, portanto, calculado pela razão de água.

9.ª - Temperatura final do ar e do grão

Depois que a água é removida, a temperatura final do ar e do grão pode ser determinada mais corretamente levando em consideração o calor de vaporização da água no grão:

$$T_f = \frac{(t_{f1} + t_{f2} X_o) T_e - \Delta X (t_{f3} + \Delta h_{fg} - T_p) + C_p T_p}{t_{f1} + t_{f2} X_f + C_p} \quad (28)$$

Nessa equação, assume-se que $T_p = T_e$.

O incremento da razão do teor de água do ar é dado por:

$$X = \frac{(X_o - X_f) R_c}{G_{ar} T} \quad (29)$$

onde

R_c = razão entre a quantidade de matéria seca do produto em uma camada e a quantidade de ar seco que a atravessa no intervalo de tempo Δt , (kg de matéria seca)/(kg de ar seco);

G_{ar} = fluxo de ar de secagem, $m^3 \cdot \text{min}^{-1} \cdot m^{-2}$.

2.4.3 Modelo de Morey

O modelo de Morey *et al.* (1976) consiste, na realidade, em um aprimoramento do modelo de Thompson (1968). Os autores trabalharam com secagem de milho a baixas temperaturas e verificaram que a equação proposta por Thompson (1968) para secagem em camada delgada não representava tão bem seus dados experimentais, pois a secagem nas camadas inferiores não acontecia tão rapidamente quanto o previsto no modelo de Thompson, uma vez que o produto não entrava em equilíbrio com o ar, como admite o modelo. Dessa forma, para corrigir os fatos evidenciados, Morey *et al.* (1976) acrescentaram ao modelo a equação de camada delgada proposta por Sabbah para temperaturas entre 0 e 21°C, que é:

$$RX = \text{Exp}(-K t^{0,664}) \quad (30)$$

em que

$$K = \text{Exp}(-P t^y) \quad (31)$$

$$P = [6,0142 + 1,453 \cdot 10^{-4}(\text{UR})^2]^{0,5} - (1,8 T_o + 32)[3,353 \cdot 10^{-4} + 3,0 \cdot 10^{-4} T_o] \quad (32)$$

$$P = 0,12264 - 1,461 \cdot 10^{-3} \text{UR} + 4,14 \cdot 10^{-5} \text{UR} T_o - 1,044 \cdot 10^{-4} T_o \quad (33)$$

em que

T_o = temperatura do milho, °C

UR = umidade relativa do ar, %;

t = tempo, h.

O modelo prevê também o reumedecimento do produto nas camadas superiores, que pode ocorrer em secagem a baixas temperaturas, uma vez que o ar de secagem pode chegar temporariamente saturado às camadas superiores nos secadores de leito fixo. Nesse modelo, Morey *et al.* (1976) mostraram que o fenômeno de histerese deveria ser considerado, pois os valores do teor de água no reumedecimento são sempre inferiores aos previstos pelo modelo de Thompson.

Dessa forma, incluiu-se a seguinte equação de adsorção de água para milho:

$$URE_u = 100 \left\{ 1 - \text{Exp} \left[-0,518 (\theta + 45,6) X^{1,72} \right] \right\} \quad (34)$$

em que

URE_u = umidade relativa de equilíbrio para o produto no reumedecimento, em %.

Embora o fenômeno de histerese seja difícil de quantificar, a equação anterior prevê, no reumedecimento, que o produto terá um teor de água de equilíbrio inferior ao atingido durante a secagem, para as mesmas condições de temperatura e umidade relativa.

No modelo proposto por Morey *et al.* (1978), quando as condições do ar, temperatura e umidade relativa indicam situação de secagem, usa-se a equação de dessorção para determinar o valor de umidade relativa de equilíbrio. Quando as condições indicam reumedecimento, determina-se o valor de URE_u . Existe, portanto, uma faixa do teor de água do produto entre as isotermas de adsorção e dessorção. Quando o ponto de estado do ar indicar um teor de água dentro dessa faixa, aceita-se que não haverá secagem nem reumedecimento. Apesar disso, o balanço de energia é realizado, para determinar a temperatura final do produto e do ar (QUEIROZ *et al.*, 1980).

Devido à lentidão com que se processa a secagem a baixas temperaturas, o modelo de Morey também prevê a deterioração do produto e a conseqüente perda de matéria seca do produto. Isso acontece porque nas camadas superiores do secador, o produto demora a iniciar a sua secagem, sendo que, nesse tempo, o produto sofre uma deterioração que pode ser expressa pela seguinte equação:

$$PMS = 0,00883 [\text{Exp}(0,006 t) - 1] + 0,00102 t \quad (35)$$

em que

PMS = perda de matéria seca, em percentagem, de milho com teor de água de 25% b.u., temperatura de 15,6 °C e 30 % de danos;

t = tempo de exposição do produto, nas condições supracitadas, em h.

O modelo de Morey *et al.* (1976) é considerado um dos melhores modelos para secagem a baixas temperaturas. Queiroz *et al.* (1980) mencionam que experiências realizadas para validação desse modelo mostram que os desvios entre os resultados experimentais e os simulados são de mesma ordem dos erros experimentais.

2.4.4 Modelo de Michigan

Segundo Queiroz *et al.* (1985), este modelo foi desenvolvido especificamente para simular a secagem de milho, podendo ser aplicado para outros tipos de grãos. Ele é composto por balanços de energia e de massa que são escritos para o volume diferencial (Sdy), para uma posição arbitrária da camada de grãos, conforme a Figura 4.

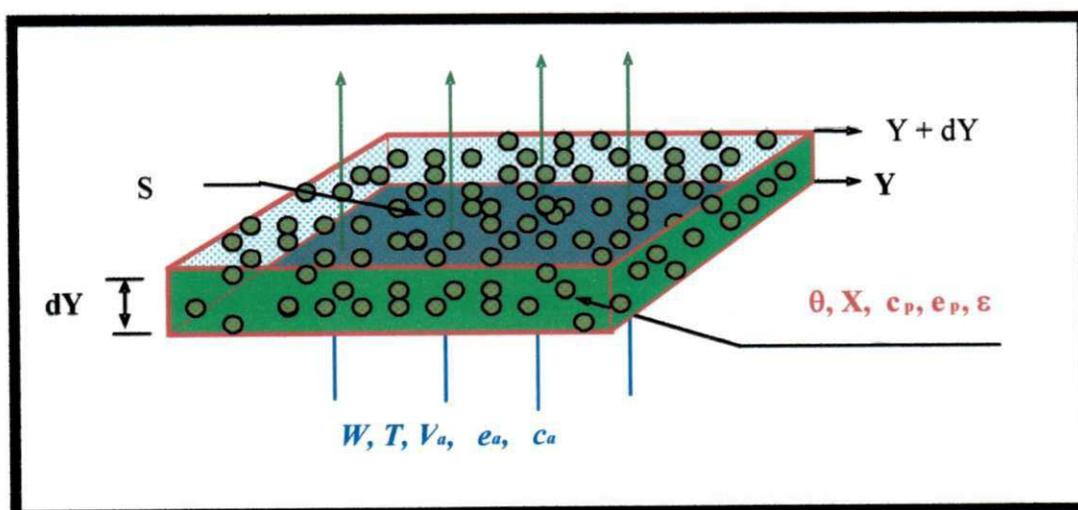
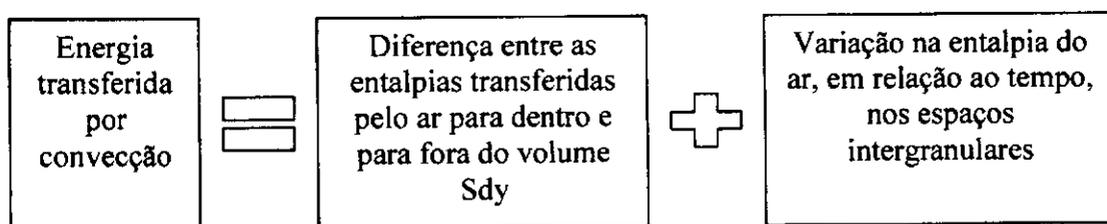


Figura 4 – Volume elementar de uma camada de sementes.

Neste modelo são assumidas as seguintes pressuposições:

- 1) o gradiente de temperatura dentro das sementes, individualmente, é desprezível;
- 2) a transferência de calor por condução entre sementes é desprezível;
- 3) o escoamento é em bloco (tipo “plug-flow”);
- 4) as paredes do silo são adiabáticas, com capacidades caloríficas desprezíveis;
- 5) as capacidades caloríficas do ar e da semente são constantes em um pequeno intervalo de tempo;
- 6) uma equação fidedigna de secagem em camada fina e de teor de umidade de equilíbrio é conhecida;
- 7) a contração volumétrica das sementes é desprezível;
- 8) as variações de temperatura do ar com o tempo e a razão de umidade do ar com o tempo são desprezíveis.

Balço de energia do ar



$$\frac{\partial T}{\partial t} = - \frac{h a (T - \theta)}{\epsilon \rho_a (C_a + C_v W)} - \frac{V_a}{\epsilon} \frac{\partial T}{\partial Y} \tag{36}$$

em que

h = coeficiente de transferência de calor por convecção, $W.m^{-2}.K^{-1}$;

a = área específica, $m^2.m^{-3}$;

T = temperatura do ar, K;

θ = temperatura das sementes, K;

ε = porosidade da massa de sementes, decimal;

ρ = massa específica, $kg.m^{-3}$;

C_p = calor específico, $J.kg^{-1}.k^{-1}$;

w = razão de água do ar, adimensional;

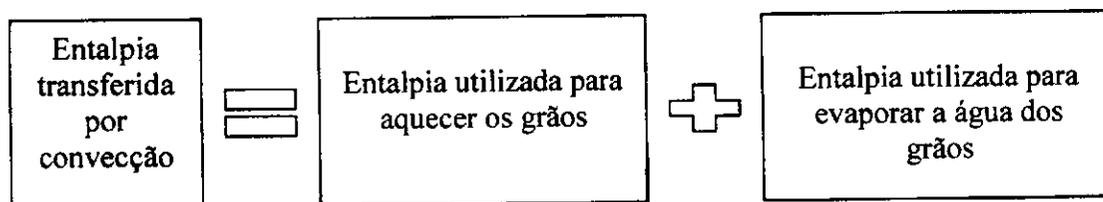
V = velocidade, $m.s^{-1}$;

Y = profundidade de camada de sementes, m;

t = tempo, s.

Os índices a, v, w e p indicam que as propriedades que contêm esses índices se referem a ar, vapor, água e produto, respectivamente.

Balanco de energia do produto



$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{h a (T - \theta)}{\rho_p (C_p + C_w X)} - \frac{h_{fg} [C_v (T - \theta)]}{\rho_p (C_p + C_w X)} Q_a \frac{\partial w}{\partial Y} \quad (37)$$

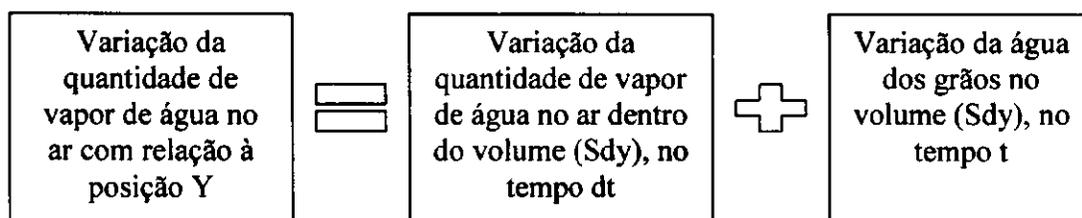
em que

X = teor de água do produto, decimal, b.s.;

Q_a = fluxo de massa, kg.s⁻¹.m⁻²;

h_{fg} = calor latente de vaporização da água do produto, J.kg⁻¹.

Balanco de massa do ar



$$\frac{\partial w}{\partial t} = - \frac{1}{\varepsilon \rho_a} \left(Q_a \frac{\partial w}{\partial Y} + \rho_p \frac{\partial X}{\partial t} \right) \tag{38}$$

Balanco de massa do produto

O balanço de massa do produto é dado pela equação de secagem em camada delgada apropriada. A equação abaixo foi sugerida por Thompson (1968):

$$\frac{\partial X}{\partial t} = - \frac{X - X_e}{3600 \sqrt{A + (1/900) B t}} \tag{39}$$

Sinício *et al.* (1983) sugeriram a seguinte equação para secagem a baixas temperaturas:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \frac{1}{3600} (a_0 + a_1 X_e) (a_2 + a_3 D + a_4 D^2) [a_5 (X - X_e) + a_6 (X - X_e)^2] \tag{40}$$

em que

$$D = [(P_{vs} - P_v) \cdot 10^{-4}] / 9,80665 \rho_a$$

$$a_0 = - 0,0652372$$

$$a_1 = 4,37761$$

$$a_2 = 0,0420049$$

$$a_3 = 8,86804$$

$$a_4 = - 168,160$$

$$a_5 = 0,148136$$

$$a_6 = - 34,9943$$

As 4 equações diferenciais acima formam o modelo de secagem em camada estacionária e constituem, portanto, o modelo de simulação para esse tipo de secador.

3. MATERIAL E MÉTODOS

O presente trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Informática da Área de Armazenamento e Processamento de Produtos Agrícolas da Universidade Federal de Campina Grande.

3.1 Implementação do Modelo Matemático

A implementação computacional do modelo de Thompson (1968), objetivo do presente trabalho, segue o algoritmo apresentado por Queiroz *et al.* (1986), acrescentando a parametrização em aberto das equações mostradas na Tabela 1, o que representa a inovação do presente trabalho. Até então, a implementação dos modelos de simulação de secagem era feita objetivando um produto específico.

Tabela 1- Descrição das equações de parametrização aberta do SASG_{Dinâmico}.

Equação	Característica de Utilização
Razão de Conversão	Equação Genérica
Calor Específico	Equação Genérica
Calor Latente de Vaporização	Equação Genérica
Umidade de Equilíbrio	Cavalcanti Mata , Henderson, Oswin, Thompson
Camada Fina	Thompson, Page

Para a implementação, utilizou-se a seguinte especificação:

3.1.1 Razão de conversão

$$r_c = \frac{R_1 L V_{esp}}{G_{ar} dt c_m 60} \quad (41)$$

onde

R_1 = massa específica do produto.

3.1.2 Calor específico

$$C_p = C_{p1} + C_{p2} X \quad (42)$$

3.1.3 Calor latente de vaporização

$$\Delta h_{fg} = (h_{fg1} - h_{fg2} T) h_{fg3} \text{Exp}(-h_{fg4} X) \quad (43)$$

3.1.4 Equações de teor de umidade

3.1.4.1 Cavalcanti Mata

$$X_e = \left[\frac{\ln(1 - UR)}{X_{e1} T^{X_{e2}}} \right]^{X_{e3}} \quad (44)$$

3.1.4.2 Henderson

$$X_e = \left[\frac{\ln(1 - UR)}{X_{e1} T} \right]^{X_{e2}} \quad (45)$$

3.1.4.3 Oswin

$$X_e = \left[\frac{X_{e1} + X_{e2} T}{(1 - UR)/UR} \right]^{X_{e3}} \quad (46)$$

3.1.4.4 Thompson

$$X_e = X_{e1} \sqrt{\frac{-\ln(1 + UR)}{T + X_{e2}}} \quad (47)$$

3.1.5 Equações de camada fina

3.1.5.1 Thompson

$$T_{eq} = A RX + B (RX)^2 \quad (48)$$

onde A e B são obtidos a partir das seguintes expressões:

Expressão polinomial dependente da temperatura:

$$A = A_1 + A_2 T + A_3 T^2 + A_4 T^3 + A_5 T^4 + A_6 T^5 + A_7 T^7 + A_8 T^7 \quad (49)$$

$$B = B_1 + B_2 T + B_3 T^2 + B_4 T^3 + B_5 T^4 + B_6 T^5 + B_7 T^7 + B_8 T^7 \quad (50)$$

- Expressão exponencial dependente da temperatura:

$$A = A_1 + \text{Exp}(-A_2 T) \quad (51)$$

$$B = B_1 + \text{Exp}(-B_2 T) \quad (52)$$

- Expressão polinomial dependente da temperatura da umidade inicial:

$$A = A_1 + A_2 T + A_3 X_o + A_4 T X_o + A_5 T^2 X_o + A_6 T X_o^2 + B_7 T^2 + A_8 X_o^2 \quad (53)$$

$$B = B_1 + B_2 T + B_3 X_o + B_4 T X_o + B_5 T^2 X_o + B_6 T X_o^2 + B_7 T^2 + B_8 X_o^2 \quad (54)$$

e T_{eq} com incremento de tempo é dado por:

$$T_{eq} = A RX + B (RX)^2 + \Delta t \quad (55)$$

3.1.5.2 Page

$$X_t = \text{Exp} (A T_{\text{eq}}^B) (X - X_e) + X_e \quad (56)$$

onde A e B seguem a estrutura mostrada no tópico anterior e T_{eq} é dado por:

$$T_{\text{eq}} = \left[\frac{\ln (RX)}{A} \right]^{\frac{1}{B}} \quad (57)$$

3.2 Encadeamento do Modelo

O sistema possibilitará, a partir da composição das equações elencadas, um conjunto de até 6 (seis) combinações. Com a possibilidade real de modificação ou ajustamento dos parâmetros, em tempo real, será oferecido um escopo de respostas ainda não disponível em aplicações similares. O encadeamento das equações, aliado à dinâmica paramétrica, fornecerá ao usuário a possibilidade de aferição e validação rápida e precisa da inferência localizada de cada um dos parâmetros específicos.

3.3 Módulo Operacional: Aplicativo

O aplicativo – inicialmente denominado de $\text{SASG}_{\text{Dinâmico}}$ – disponibilizará, a exemplo da interface adotada pelo padrão Windows, os módulos operacionais funcionais em barra de opções superior fixa: Arquivo e Sobre, onde: Arquivo é a opção destinada a toda a operação do *software*. A identificação do usuário, do produto, do modelo e das equações a serem utilizados, dos coeficientes e das condições de secagem; a simulação e a visualização dos dados obtidos, os gráficos, etc. Ou seja, foram colocadas em um único bloco, ou janela, todas as dinâmicas operacionais e funcionais do processo, objetivando uma interação homem-*software*-objetivo prática e simples. Essa única opção operacional do *software* permitirá toda a gama de atividades necessárias à sua execução, aí também incluídas as opções de visualização dos resultados que são apresentados quer na forma de gráficos, curvas de secagem (temperatura, teor de água, etc.), quer

na forma numérica através de relatórios a serem impressos ou exportáveis aos aplicativos de edição de uso corrente.

3.4 Simulação e Banco de Dados

A utilização do conceito de Banco de Dados Relacional é outro ponto que diferenciará o presente trabalho, posto que, até então, as aplicações voltadas a esse segmento da área científica baseiam tanto os dados de entrada – os dados a serem processados – quanto os dados de saída – os resultados obtidos – segundo o formato texto, ASCII. Essa prática, mesmo que largamente utilizada por aplicações técnico-científicas, é ineficiente, dadas as características desse tipo de arquivo, a partir do instante em que o gerenciamento do conjunto de informações equivale, em importância, ao(s) resultado(s) final (finais) obtido(s).

Com a utilização da técnica de Banco de Dados, podem-se associar, de maneira nominativa, usuário, produto e modelo; de maneira quantitativa e qualitativa, os resultados. Um outro ganho substancial é a acumulação de todos os experimentos realizados em um único banco de informações, minimizando, com essa técnica, a necessidade de que simulações sejam repetidas, informações e condições sejam esquecidas, etc. Para que tais recursos de gerenciamento de informações sejam disponibilizados, serão adotadas técnicas de modelagem de dados, estrutura e tipificação, com vistas à utilização de técnicas como Integridade Referencial, Ordenação Indexada de Dados, possibilidade de pesquisa textual, etc.

3.5 Integração: Aplicativo x GBD

Além da implementação matemática dos modelos de simulação de secagem, o presente trabalho terá em seu contexto operacional o acréscimo de módulos de gerenciamento e tratamento de banco de dados que possibilitarão as efetivas relações e transações entre as diversas tabelas a serem utilizados pelo sistema. Isso se dará tanto na programação, linhas de código, quanto na construção do Banco de Dados.

3.6 Material e Equipamento: *Hardware*

Foi utilizado um microcomputador com processador AMD, Athlon™ XP 1900+ de 1,6 GHz, com 512 MB de memória RAM, disco rígido com capacidade de 80 GB, unidade de leitura e gravação de CD e monitor de 17 polegadas.

3.7 Material e Equipamento: *Software Básico*

Utilizaram-se, no presente trabalho, como ferramentas para o seu desenvolvimento e implementação, os seguintes *softwares* básicos:

3.7.1 Linguagem de programação e descritor da base de dados

A linguagem de programação adotada para a implementação do presente trabalho é o Delphi 3.0, produto da Borland International Inc. Trata-se de uma linguagem de programação orientada a objeto, de interface gráfica padrão Windows, produto tecnológico evolutivo da linguagem Pascal. Esse *software* básico foi preferido por ser o que melhor se integra à base de dados escolhida, além de permitir uma completa integração gráfica com o padrão Windows.

Como ferramenta adjuvante ao processo, utilizou-se, como descritor-modelador e construtor da Base de Dados, o Database Desktop versão 7.0, módulo operacional nativo à Linguagem de Programação Delphi, direcionado ao dBase X.

3.7.2 Base de Dados

A base de dados utilizada neste projeto é o dBase III. Tal seleção se dá devido ao fato de ser uma base amplamente utilizada, cujas características principais são: leveza – baixa necessidade de memória auxiliar instalada; e portabilidade – sistema de fácil migração a outras plataformas operacionais ou de manipulação, de manutenção simples e principalmente rapidez de acesso às informações, aos dados armazenados. Incorpora todos os atributos característicos de Banco de Dados, como: Relacionamento entre as entidades, tabelas; Integridade Referencial – vinculação dos dados em estrutura de pertinência vinculada; Indexação das tabelas, permitindo

uma completa organização das informações armazenadas. É também parte nativa integrante do Database Desktop.

Na seqüência (Figura 5), é apresentado o diagrama de fluxo correspondente ao encadeamento operacional do SASG_{Dinâmico}.

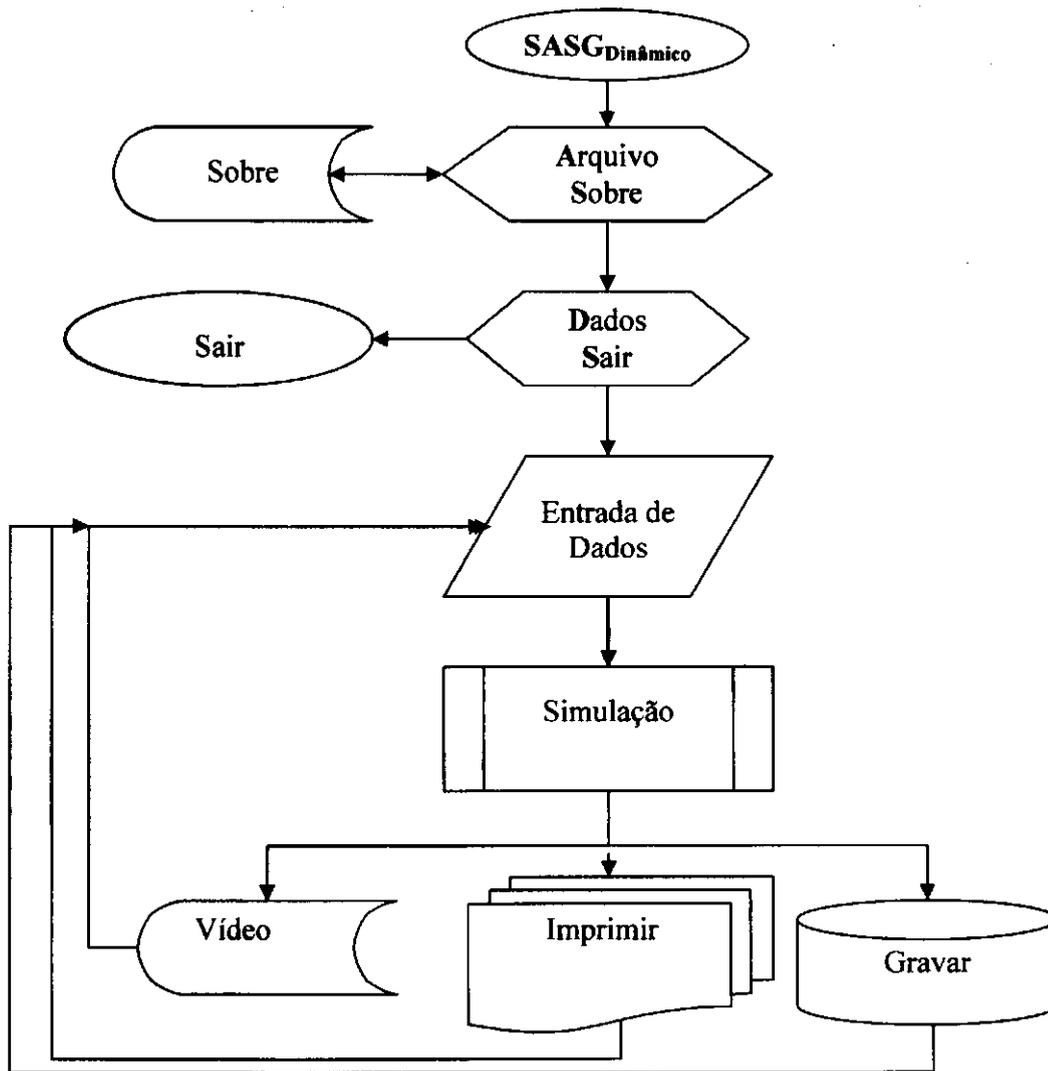


Figura 5 – Diagrama de encadeamento operacional do SASG_{Dinâmico}.

Vistos os encadeamentos operacionais, módulos de interface, tem-se a seguir (Figura 6) o fluxograma funcional do algoritmo de simulação.

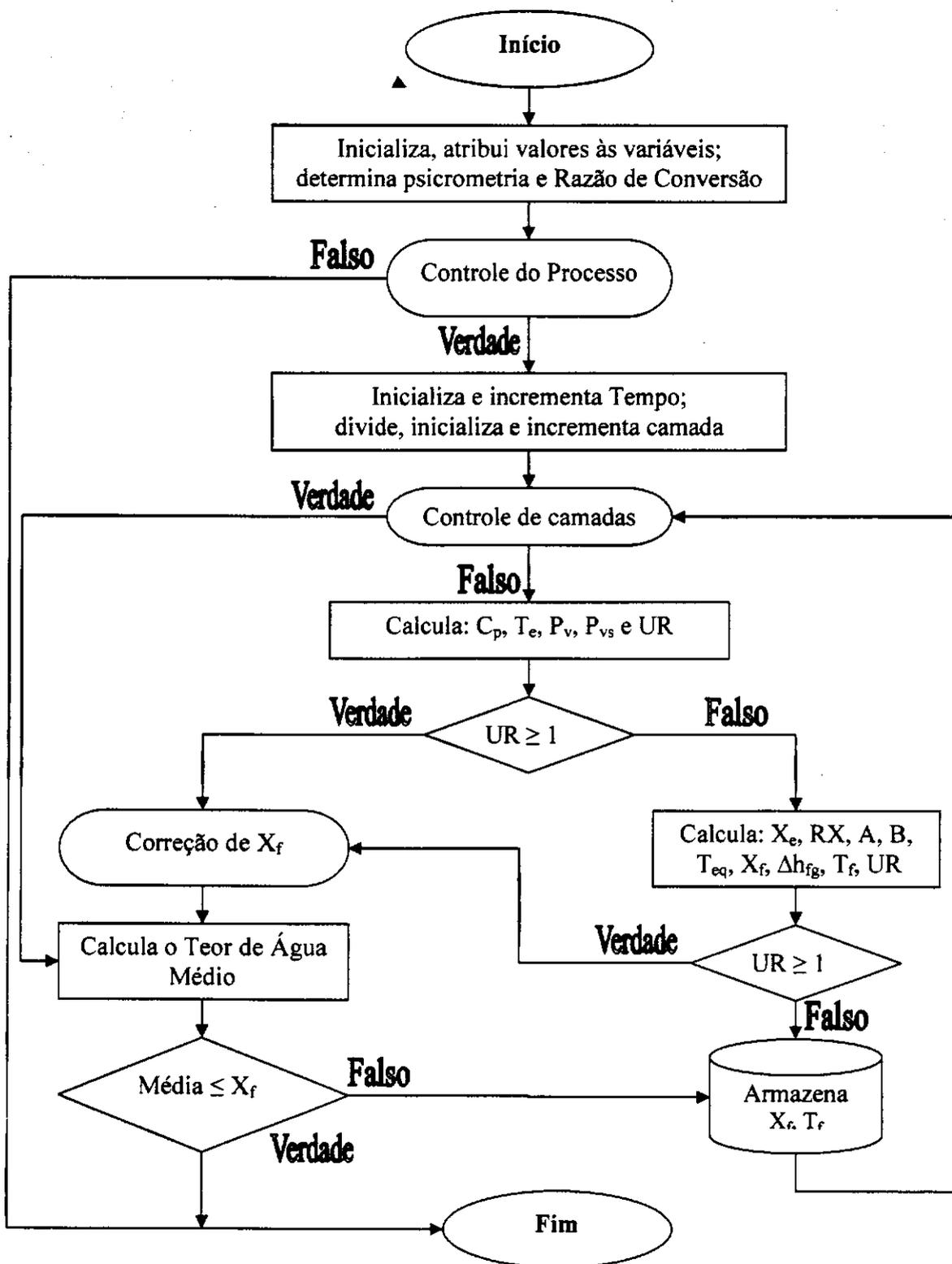


Figura 6 – Fluxograma ilustrativo da determinação da umidade final.

3.8 Estrutura e Modelagem de Dados

Para implementar uma das partes inovadoras deste trabalho – a utilização de elementos de Banco de Dados –, utilizou-se o descritor de dados do Delphi, Database Desktop, para criação das tabelas padrão dBase. Ao optar por esse padrão de dados, objetivou-se, primordialmente, a possibilidade de o usuário não necessitar de nenhuma ferramenta exterior – instalação de um módulo de Gerenciamento de Banco de Dados Cliente – quando da instalação e posterior utilização do SASG_{Dinâmico}. Em resumo, quando o aplicativo é instalado para utilização, a ele já estará incorporada a ferramenta de gerência de dados. A Figura 7 ilustra a ligação entre o aplicativo e a base de dados.

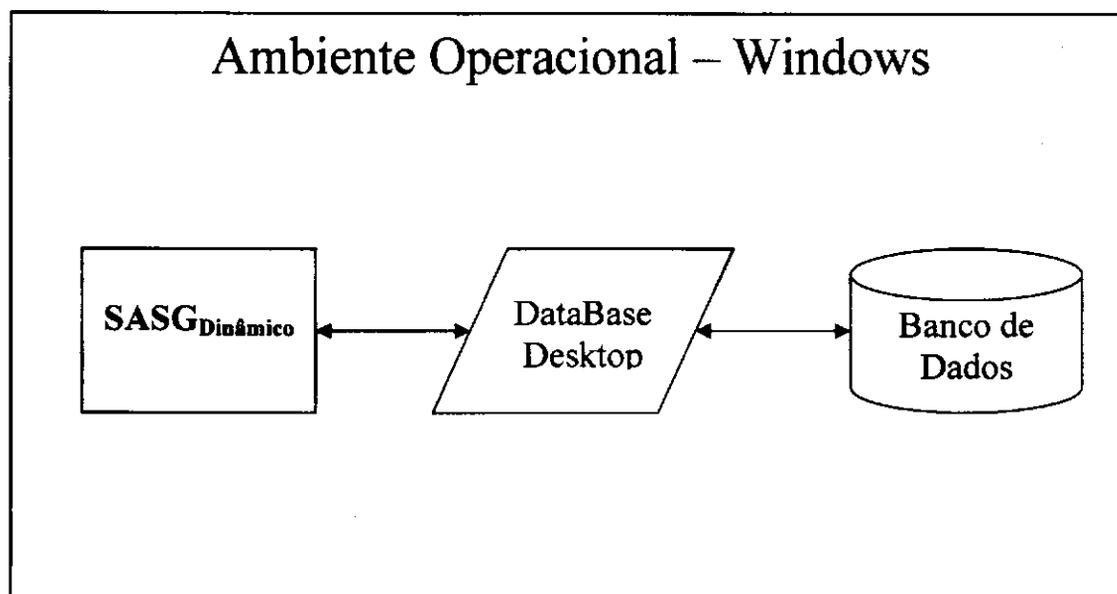


Figura 7 – Figura ilustrativa do modelo de utilização de banco de dados. O aplicativo, programa de computador, acessa a base de dados através de um sistema de gerenciamento de dados.

3.8.1 Análise e modelagem dos dados

A implementação algorítmica de um modelo matemático não encerra, por si só, o problema. Mesmo que a captação, o processamento e a apresentação de dados se configurem de maneira intuitiva e prática ao usuário, fica esta questão: como relacionar, agrupar, selecionar, guardar, reaproveitar e reprocessar esses dados?

As soluções matemáticas (programas computacionais) correntes apresentam-na na forma de criação de arquivos a serem nomeados e salvos em pastas, diretórios, determinados pelo usuário. Esse procedimento tem como base o pressuposto da capacitação técnica do público-alvo. A nossa experiência mostra que isso não é cotidiano, visto que profissionais de áreas distintas têm capacitação e habilidades distintas. Compete, pois, ao profissional de tecnologia de informação prover a ferramenta em desenvolvimento de mecanismos que possibilitem ao usuário o maior rendimento no menor tempo possível. Faz-se necessária, então, a adoção de ferramentas adjuvantes, que possibilitem a efetiva posse e racional utilização dos dados obtidos.

O desenvolvimento e a implementação de um programa computacional são a resposta, solução, de um problema. Tal resposta é o resultado do estudo, da análise e da interpretação acurada dele. Esse estudo (análise) tem como objetivo o delineamento de todo o processo funcional a partir dos elementos construtivos da informação.

Neste trabalho, identificou-se a necessidade da organização dos dados em sete tabelas, padrão DBF (Data Base File): **Usuário, Produto, Entrada, Simulação Temporário, Operacional Temporário, Simulação Definitiva e Operacional Definitiva**. Essas, por sua vez, têm a elas associados arquivos de índices (*Multiple Index Files*), extensão MDX, de mesmo número, assim distribuídos: Usuário e Produto – um único arquivo de indexação; as demais tabelas têm a elas associados 3 (três) arquivos de índices, perfazendo um total de 15 (quinze). Assim, o nosso escopo de dados é composto por 7 (sete) tabelas de dados base e 17 (dezesete) arquivos auxiliares de ordenação e ligação. A seguir, detalha-se o objetivo de cada uma delas. A definição estrutural delas (*Script*) está no Apêndice A.

3.8.1.1 A Tabela USUARIO.DBF

Usuário - Tabela de identificação (cadastro) de usuários, cuja modelagem é baseada no conjunto de dados de identificação (CODIGO, NOME, ENDERECO, COMPLEMENT, BAIRRO, CIDADE, UF, CEP, PAÍS, TELEFONE, TELEFAX, CELULAR, NASCIMENTO, SEXO, EMAIL, TIPO (tipifica o usuário: aluno de graduação, mestrado, doutorado, pesquisador, extensionista, etc.), SENHA (do usuário), ENTIDADE (Instituição à qual está vinculado o usuário), SIGLA (da Instituição), FONE_ENTI (fone da Instituição), DEPTO (da instituição), SIGLADEPTO (da Instituição), FONE_DEPTO, ORIENTADOR, FONE_ORIEN,

EMAIL_ORIE). Esta tabela tem como chave primária o NOME do usuário e está organizada em ordem alfabética crescente.

3.8.1.2 A tabela PRODUTO.DBF

Produto - Tabela de identificação de produto, coeficientes e modelos a serem utilizados pelo SASG^{Dinâmico}, cuja modelagem é baseada nos campos: USUARIO (vinculado ao campo NOME da tabela usuario.dbf), PRODUTO (nome do produto que será simulado), CHAVE (gerada automaticamente pelo sistema), XE (autor da equação de umidade de equilíbrio), MODELO (autor da equação de camada fina), RAZAO (parâmetro a ser utilizado na equação de razão de conversão), CP1 e CP2 (parâmetros a serem utilizados na equação de calor específico), XE1, XE2, XE3, XE4 e XE5 (coeficientes a serem utilizados pela equação de teor de água de equilíbrio), DHFG1, DHFG2, DHFG3 e DHFG4 (coeficientes a serem utilizados pela equação de calor latente de vaporização da água do produto), A1, A2, A3, A4, A5, A6, A7, A8, B1, B2, B3, B4, B5, B6, B7 e B8 (coeficientes a serem utilizados nas equações encadeadas utilizadas na equação de tempo equivalente e, em seqüência, na equação de camada fina). Esta tabela está relacionada à tabela Usuário pelo campo USUARIO e tem como chave secundária de encadeamento o conjunto paramétrico gerado automaticamente pelo sistema.

3.8.1.3 A tabela ENTRADA.DBF

Entrada - Tabela de identificação das condições de secagem. Relaciona-se às tabelas usuario.dbf e produto.dbf pelos campos USUARIO, PRODUTO e CHAVE. Está baseada segundo a modelagem: DATA (data da simulação), HORA (hora da simulação), USUARIO (vínculo com a tabela usuario.dbf), PRODUTO (vínculo com a tabela produto.dbf), CHAVE (vínculo com a tabela produto.dbf – elemento de composição da integridade referencial e de individualização paramétrica), XE (identificação da equação de determinação de umidade de equilíbrio a ser utilizada), MODELO (identifica a equação de camada fina a ser utilizada), identificação da simulação (Nome e/ou Número), TBS (temperatura inicial do produto), UR (umidade relativa), PATM (pressão atmosférica), TQ (temperatura de secagem – ar aquecido), XO (teor de água inicial do produto), GAR (fluxo do ar de secagem), XFINAL (teor de água final

do produto), L (altura total da camada de grãos), DT (intervalo de tempo de medição), TIPO_TEMPO (identifica a unidade do tempo que será utilizado na simulação: hora ou minuto), CAMADA (número de camadas em que será dividido o processo de secagem).

3.8.1.4 A tabela SIMULACAO_AUXILIAR.DBF

Simulação Auxiliar - Tabela de identificação dos Dados Simulados ainda não incorporados à base. Esta tabela contém as informações descritivas da simulação executada, e é estruturada segundo a modelagem: DATA (data da simulação), HORA_DATA (hora da simulação), USUARIO (identificação do usuário – vínculo com as outras tabelas), PRODUTO (identificação do produto – vínculo com as outras tabelas), HORA (intervalo de tempo de medição da simulação), BS1, BS2, BS3, BS4, BS5, BS6, BS7, BS8, BS9 e BS10 (campos destinados à acumulação do teor de umidade do grão em uma determinada camada no intervalo de tempo em HORA), TEMP1, TEMP2, TEMP3, TEMP4, TEMP5, TEMP6, TEMP7, TEMP8, TEMP9 e TEMP10 (campos que acumularão a temperatura do grão em uma determinada camada no intervalo de tempo HORA), MEDIA (campo destinado ao teor de água médio do produto em um determinado intervalo de tempo HORA). Esta tabela está relacionada às anteriores pelos campos USUARIO, PRODUTO e CHAVE.

3.8.1.5 A tabela OPERACIONAL_AUXILIAR.DBF

Operacional Auxiliar - Tabela de identificação dos Dados Operacionais utilizados na simulação ainda não incorporados à base. Esta tabela tem como finalidade armazenar os dados inerentes ao processo da secagem. Toda a variação numérica das variáveis Razão de Umidade, Pressão de Vapor Saturado, etc. estará disponível para análise e posterior incorporação à Base de Dados. Esses dados serão, por opção do usuário, salvos ou transferidos à tabela operacional.dbf. Essa tabela tem a seguinte estrutura: DATA (data da simulação), HORA (hora da simulação), USUARIO (vínculo com a tabela usuario.dbf), PRODUTO (vínculo com a tabela produto.dbf), CHAVE (vínculo com a tabela produto.dbf – elemento de composição da integridade referencial e de individualização paramétrica), XE (identificação da equação de determinação de umidade de equilíbrio a ser utilizada), MODELO (identifica a equação de camada fina a ser utilizada), TBS

(temperatura inicial do produto), UR (umidade relativa), PATM (pressão atmosférica), TQ (temperatura de secagem – ar aquecido), XO (teor de água inicial do produto), GAR (fluxo do ar de secagem), MFINAL (teor de água final do produto), L (altura total da camada de grãos), DT (intervalo de tempo de medição), TIPO_TEMPO (identifica o tipo do tempo que será utilizado na simulação: hora ou minuto), CAMADA (número de camadas em que será dividido o processo de secagem), H_RAZ_MIST (valor da umidade absoluta), VESP (volume específico), R_RAZ_CONV (razão de conversão), CP (calor específico), T (temperatura do ar de secagem), TABS (temperatura do produto), PV (pressão parcial de vapor), PVS (pressão de vapor de saturação), UR_INTERNO (umidade relativa interna do secador), XE_INTERNO (teor de água de equilíbrio do produto), RX (razão do teor de água), A (coeficiente determinado durante a simulação), B (coeficiente determinado durante a simulação), TEQ (tempo equivalente), XF (teor de água final do produto), DHFG (calor latente de vaporização). Esta tabela está relacionada às anteriores pelos campos USUARIO, PRODUTO e CHAVE.

3.8.1.6 A tabela SIMULACAO.DBF

Simulação - Tabela de identificação dos Dados Simulados incorporados à base. Esta tabela está relacionada às anteriores pelos campos USUARIO, PRODUTO e CHAVE, e segue modelagem idêntica à SIMULACAO_AUXILIAR.DBF.

3.8.1.7 A tabela OPERACIONAL.DBF

Operacional - Tabela de identificação dos Dados Operacionais utilizados na simulação e incorporados à base. Esta tabela está relacionada às anteriores pelos campos USUARIO, PRODUTO e CHAVE, e segue a mesma modelagem de OPERACIONAL_AUXILIAR.DBF.

Concluídas a identificação e a definição estrutural das entidades necessárias à implementação da base de dados, é apresentado na Figura 8 o diagrama ilustrativo das entidades (tabelas) utilizadas pela aplicação e seus relacionamentos.

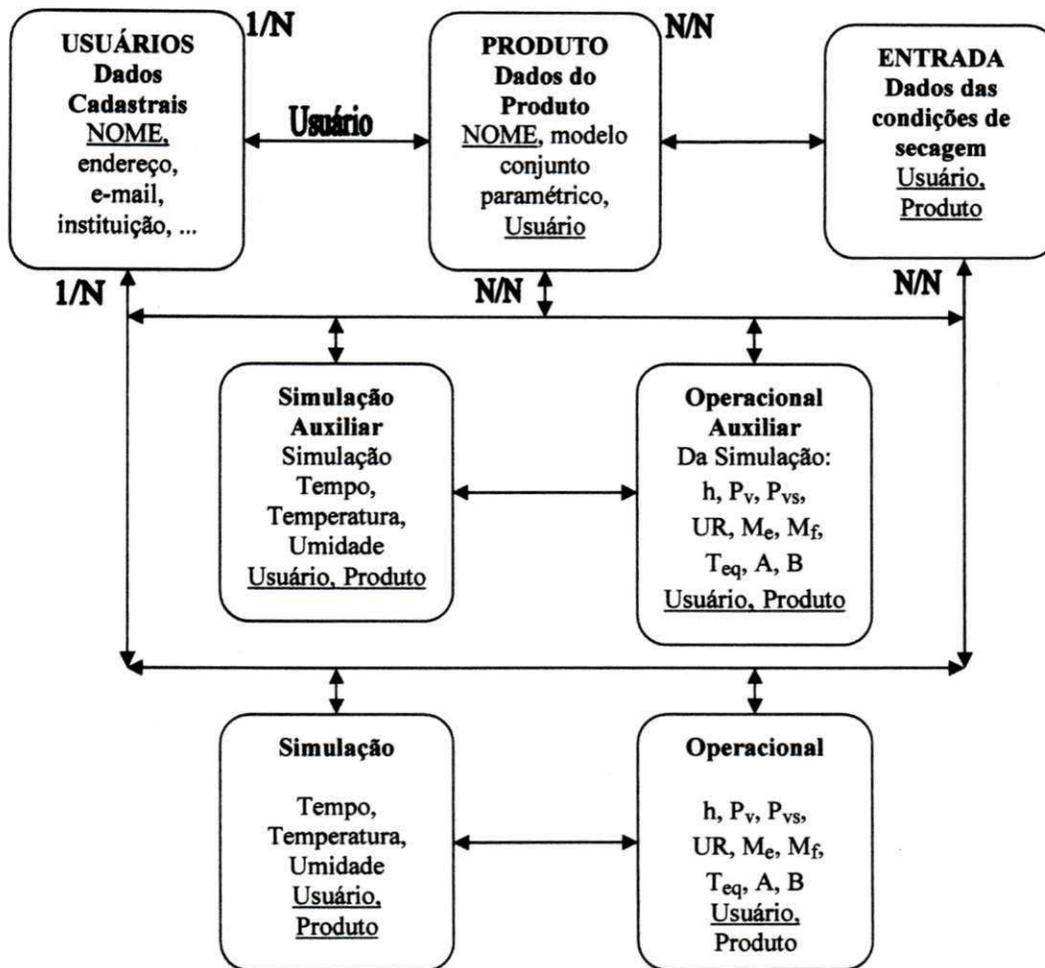


Figura 8 – Diagrama ilustrativo das entidades (tabelas) utilizadas pela aplicação e seus relacionamentos.

3.9 Validação do Software/Modelo

Para a validação do SASG_{Dinâmico}, utilizaram-se dados experimentais disponibilizados na literatura para os produtos milho comum e feijão macaçar, obtidos por Mantovani (1976) e Sousa (2004), respectivamente.

3.9.1 Parametrização utilizada

A parametrização utilizada para obtenção dos dados simulados para o produto milho comum, assim como para o produto feijão macaçar, estão dispostos nas Tabelas 2 e 3, respectivamente. Os parâmetros necessários à equação de camada fina para o produto milho comum foram determinados, durante o desenvolvimento do presente trabalho, por Cavalcanti Mata (2007)¹, na faixa de temperatura de 35°C a 150°C. Os demais parâmetros utilizados são os disponibilizados na literatura. O conjunto paramétrico utilizado para comparação do produto feijão macaçar é o mesmo utilizado por Sousa (2004).

Tabela 2 – Conjunto paramétrico utilizado na simulação do produto milho comum.

Razão de conversão	Equação (41)	$R_1 = 550$
Calor específico	Equação (42)	$C_{p1} = 0,35; C_{p2} = 0,851$
Calor latente de vaporização da água do produto	Equação (43)	$h_{fg1} = 606; h_{fg2} = 0,57;$ $h_{fg3} = 4,35; h_{fg4} = 0,2835$
Teor de água de equilíbrio	Equação (47)	$X_{e1} = 120,6; X_{e2} = 45,6; X_{e3} = 0,5$
Parâmetro A	Equação (49)	$A_1 = 3,33726; A_2 = -0,13288;$ $A_3 = 0,001277; A_4 = -3,7E-5;$
Parâmetro B	Equação (52)	$B_1 = 30,529; B_2 = -0,03563;$
Equação de camada fina	Equação (48)	$T_{eq} = A RX + B (RX)^2$

¹ CAVALCANTI MATA, M. E. R. M. Título do trabalho. Local, 2007, p. 8. Publicação interna

Tabela 3 – Conjunto paramétrico utilizado na simulação do produto feijão macacar.

Razão de conversão	Equação (41)	$R_1 = 520$
Calor específico	Equação (42)	$C_{p1} = 0,357; C_{p2} = 0,00178$
Calor latente de vaporização da água do produto	Equação (43)	$h_{fg1} = 606; h_{fg2} = 0,57;$ $h_{fg3} = 0,3822; h_{fg4} = 0,469$
Teor de água de equilíbrio	Equação (44)	$X_{e1} = -0,009688; X_{e2} = 0,276015;$ $X_{e3} = 0,755301$
Parâmetro A	Equação (53)	$A_1 = -891,151; A_2 = 24,721;$ $A_3 = -0,886; A_4 = 0,019;$ $A_5 = 0; A_6 = 0;$ $A_7 = 0,00071; A_8 = -0,198;$
Parâmetro B	Equação (54)	$B_1 = 79,959; B_2 = 2,15;$ $B_3 = 0,078; B_4 = -0,003;$ $B_5 = 0; B_6 = 0;$ $B_7 = 0,00089; B_8 = -0,015;$
Equação de camada fina	Equação (48)	$T_{eq} = A \text{ RX} + B (\text{RX})^2$

3.10 Análise Estatística

Os dados experimentais utilizados para a comparação com os dados simulados, são os obtidos por MANTOVANI (1976), na secagem de milho comum e o conjunto de dados determinados por SOUZA (2004) na secagem de feijão macacar.

A análise estatística utilizada para a comparação entre os dados experimentais e os dados simulados é feita através da medição do erro percentual absoluto, conforme equação (58):

$$D_{esv} \% = \left| \frac{X_{exp} - X_{sim}}{X_{exp}} \right| 100 \quad (58)$$

onde:

$D_{esv} \% =$ desvio, erro, percentual;

$X_{exp} =$ valor do dado experimental

$X_{sim} =$ valor do dado simulado

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 O Software

O SASG_{Dinâmico}, Software Aplicado à Simulação de Secagem de Grãos – Dinâmico, é um programa computacional cuja definição e objetivo encerram-se em sua nomenclatura. É apresentado a partir de uma janela inicial ou de apresentação, conforme a Figura 9.



Figura 9 – Tela inicial de abertura do aplicativo.

Seguindo o padrão Windows, interface gráfica, interação intuitiva, logo abaixo da linha de identificação do aplicativo, Linha de Título, está a barra de opções. Neste caso, têm-se apenas duas opções: Arquivo e Sobre. A primeira encerra toda a funcionalidade do aplicativo; a segunda apresenta os créditos. A seguir, serão apresentadas as opções e funcionalidades disponíveis no Software.

4.1.1 A opção Arquivo

A opção Arquivo abre, em cascata, para duas outras, Dados e Sair. Sair é o meio de encerramento do aplicativo, *software*. Dados é a opção que agrega toda a funcionalidade do SASG_{Dinâmico}. É interessante salientar, neste ponto, que a letra sublinhada indica que podem ser usadas as teclas [ALT + CTRL + letra sublinhada]. Optando-se por Dados, [ALT+CTRL+D] ou

utilizando-se o mouse, será apresentada uma nova janela composta por quatro abas de controle, cujos rótulos identificam a função a ela restrita, conforme mostrado na Figura 10.

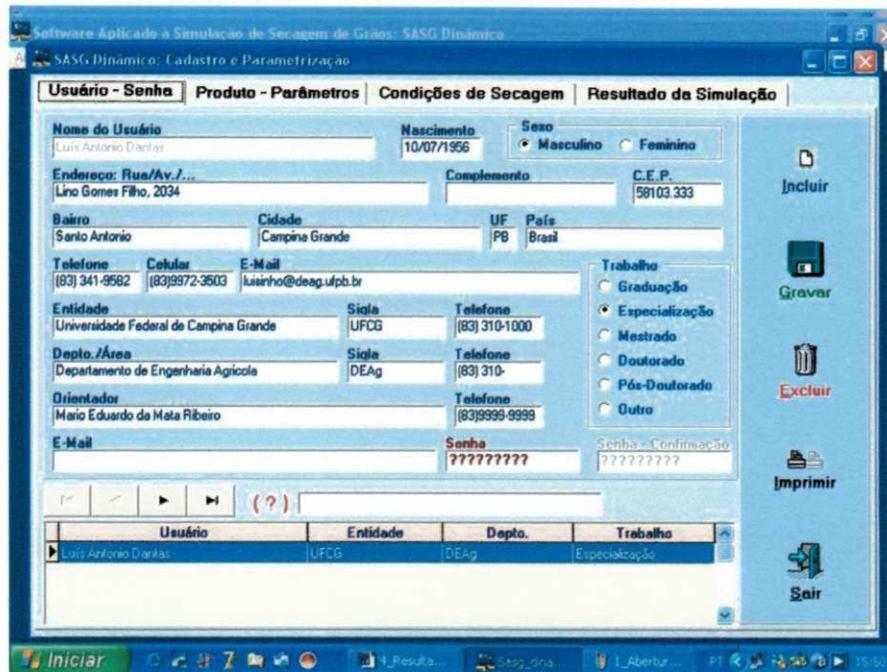


Figura 10 – Tela operacional de cadastro de usuário.

Ao acessar a opção Dados, é apresentada em primeiro plano a aba (**Usuário-Senha**) destinada ao cadastro do usuário, sendo o bastante cadastrar-se uma única vez. Tal exigência visa, conseqüentemente, criar o vínculo entre o usuário e o(s) produto(s), modelo(s), coeficientes, dados de secagem e simulações. Cumprida essa etapa, é chegada a hora de se selecionarem os parâmetros, coeficientes, e as equações que serão utilizados na simulação.

A aba (**Produto-Parâmetros**) permite a inclusão de Novo(s) Produto(s), assim como a inserção dos coeficientes que serão utilizados nas equações de Razão de Conversão, Calor Específico, Calor Latente de Vaporização da água do produto, Equação do Teor de Água de Equilíbrio e a Equação de Camada Fina e seus coeficientes, a exemplo do que ilustra a Figura 11. Após todos os dados serem preenchidos, passa-se à aba seguinte, (**Condições de Secagem**). Nesta opção, é que serão informadas as condições de secagem a serem simuladas, a exemplo do que mostra a Figura 12.

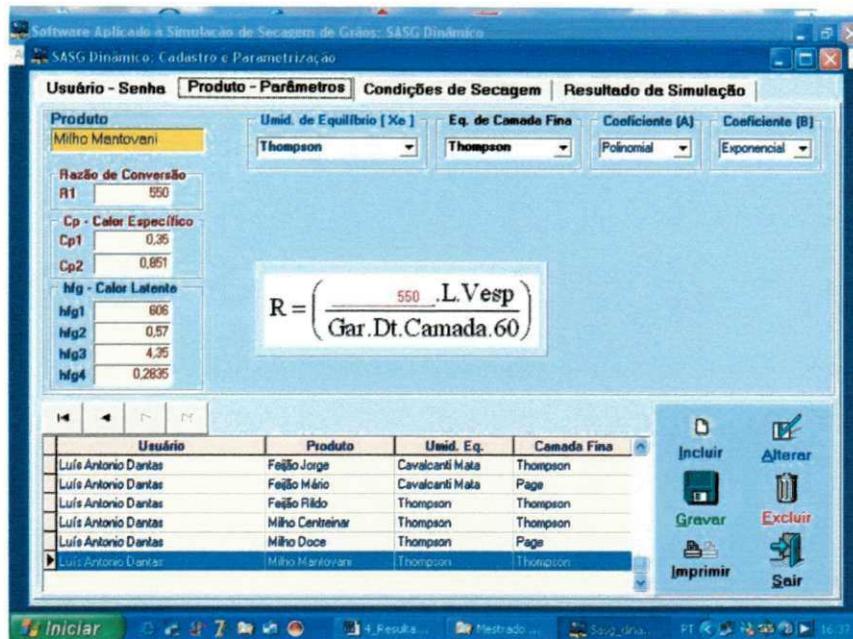


Figura 11 – Tela operacional de cadastro de produto, coeficientes e modelo de equações de umidade de equilíbrio e equação de camada fina (produto-parâmetro).

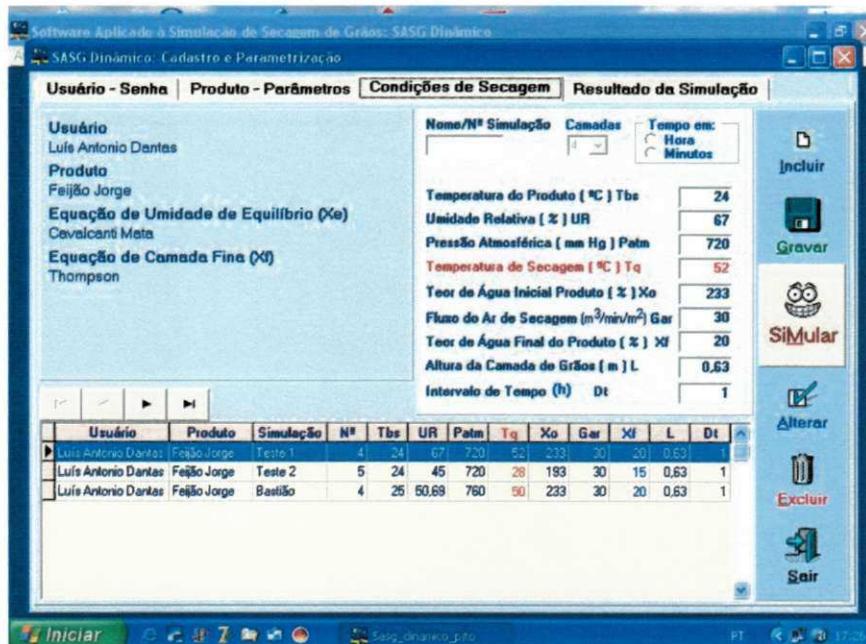


Figura 12 – Tela operacional de cadastro das condições de secagem a serem utilizadas na simulação (condições de secagem).

Podem-se associar, incluir, diversas condições a um mesmo produto. Para melhor contextualização da utilização desta opção, dados como nome do Usuário, produto que se está utilizando, equação de Teor de Água de Equilíbrio (autor) e equação de Camada Fina (autor) são apresentados ao lado da caixa de dados de secagem. Depois que as informações das condições de secagem forem inseridas, digitadas, pode-se então efetivar a simulação.

Neste ponto, pode-se identificar o ganho operacional no controle e gestão dos dados com a utilização de Banco de Dados. Um usuário pode trabalhar com um ou mais produtos, que poderá(ão) estar associado(s) a um ou mais conjuntos de coeficientes e modelos que, por sua vez, poderão estar associados a um ou mais conjuntos de informações de secagem. Observa-se, portanto, a utilização de relacionamento de entidades, tabelas (Usuário → Produtos → Parâmetros/Modelos → Condições de Secagem → Resultados), assim como a integridade referencial entre elas. Em resumo, pode-se afirmar que, excluindo-se um usuário, todas as informações a ele associadas serão excluídas. Excluindo-se um produto, as informações a ele – produto – associadas serão também excluídas, resguardando-se o usuário. E, por fim, podem-se excluir apenas as condições de secagem, sem prejuízo das informações associadas ao produto e ao usuário. Isso é integridade referencial. Um outro fator importante na utilização desta técnica, Banco de Dados, é isentar do usuário do SASG_{Dinâmico} a necessidade da criação de pastas, uma vez que todas as informações estarão contidas em um banco de dados, e poderão ser exportadas a outros aplicativos, como Editores de Texto, Planilhas de Cálculo, etc.

Voltando à aplicação, após a inclusão das condições de secagem, passa-se então à simulação, bastando, para tanto, usar o botão pertinente, SiMular. Uma vez executada, serão mostrados os resultados. Os dados são apresentados seguindo a notação (**Resultados da Simulação**) e (**Dados Operacionais**), conforme ilustra a Figura 13.

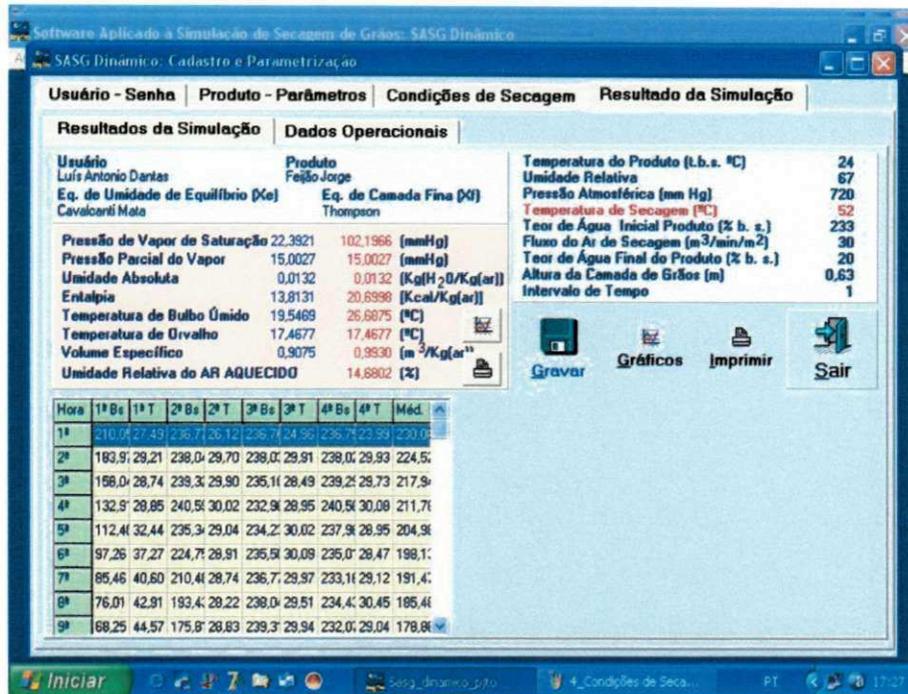


Figura 13 – Tela operacional de apresentação dos resultados da simulação: tempo de secagem, teor de água do produto, temperatura e média do teor de água (resultados da simulação).

(Resultados da Simulação) encerra as informações referentes à secagem: Tempo de Secagem, Teor de Água, Temperatura por Camada e Teor de Água Médio em cada intervalo de tempo de medição. Esses resultados podem ser visualizados de três formas diferentes: uma para consulta imediata, como mostrado no quadro (*grid*, em inglês) acima; na forma de gráfico, como mostrado na Figura 14, apresentando individualmente a curva de Teor de Água Médio, as curvas de Temperatura, as curvas do Teor de Água, disponibilizando ainda a visualização individualizada da variação da Temperatura, camada a camada, o mesmo se aplicando à variação do Teor de Água, camada a camada. A terceira opção de visualização dos dados possibilita a impressão e/ou exportação para outro meio ou dispositivo de armazenamento. Essas opções de visualização e acesso dos dados processados se dão através de botões de ação disponíveis na tela correspondente, identificada na Figura 13. A Figura 14 mostra uma tela de exposição de dados na forma gráfica.

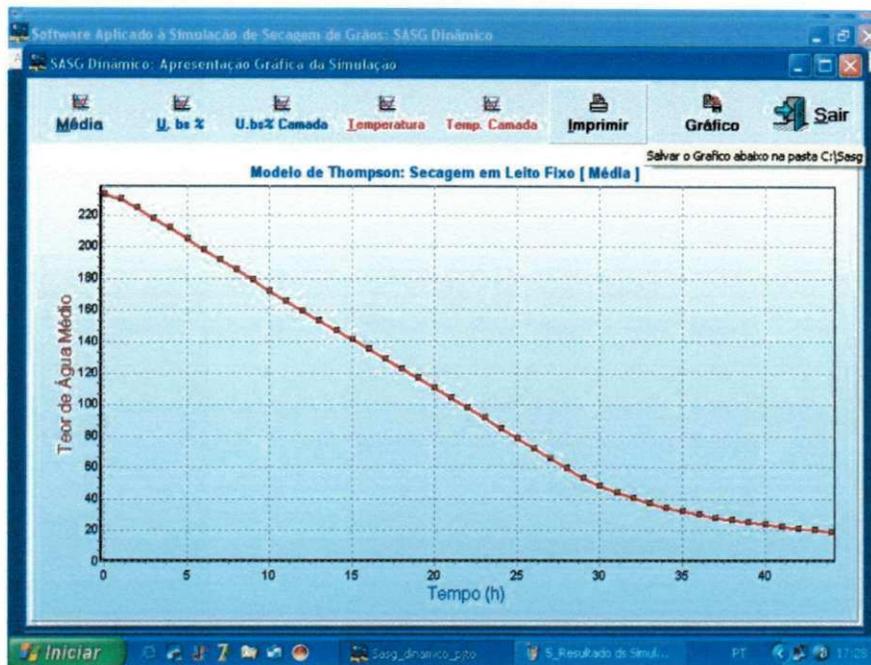


Figura 14 – Tela operacional de apresentação dos resultados da simulação na forma de gráficos, cinéticas de secagem: tempo de secagem, teor de água, temperatura e média do teor de água.

Na seqüência (Figura 15), é apresentada a formatação utilizada na impressão dos gráficos.

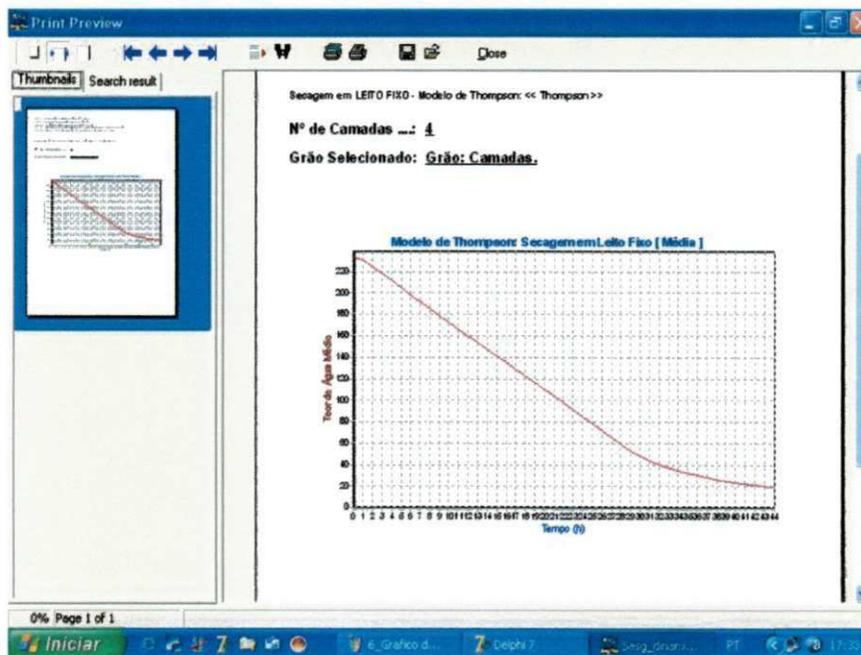


Figura 15 – Tela operacional de apresentação dos resultados da simulação na forma de gráficos, cinéticas de secagem, a serem impressos e/ou exportáveis: tempo de secagem, teor de água, temperatura e média do teor de água.

A Figura 16 ilustra a maneira como os dados obtidos na Simulação são apresentados na forma de relatório impresso.

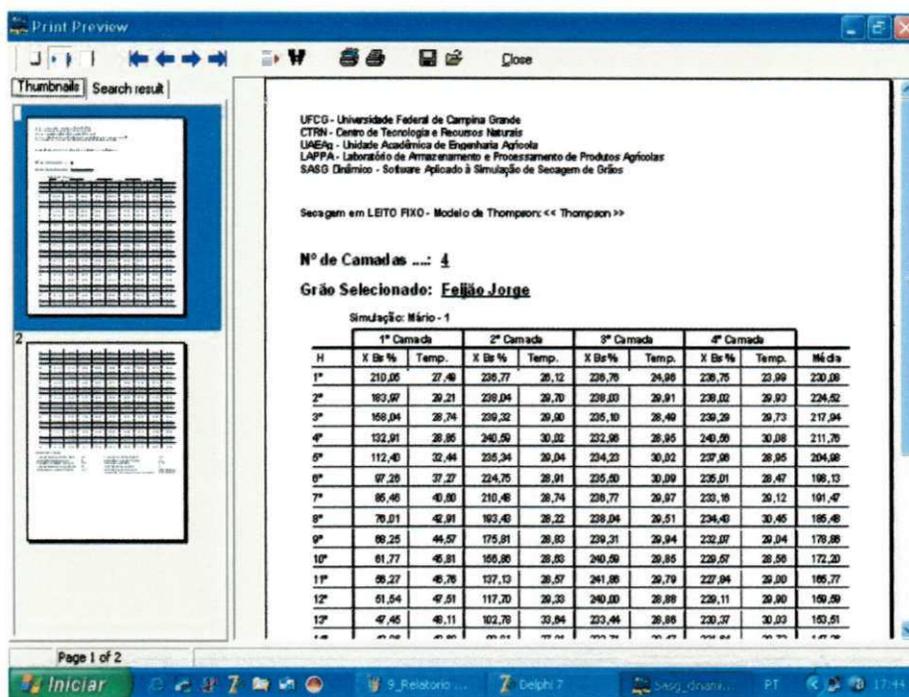


Figura 16 – Tela operacional de apresentação dos resultados da simulação na forma de relatório a ser impresso e/ou salvo, exportado. Dados numéricos: tempo de secagem, teor de água, temperatura e média do teor de água.

A opção aba (**Dados Operacionais**) disponibiliza os parâmetros (variáveis) internos à simulação, que são: Teor de Água Absoluto, Pressão Parcial de Vapor, Pressão de Vapor de Saturação, etc., como mostrados na Figura 17, identificando a variação deles em cada instante e em cada fatia (camada) em que ocorre. A exemplo de (**Resultados da Simulação**), pode-se ter uma visão imediata, a sua representação gráfica e/ou a sua impressão exportação.

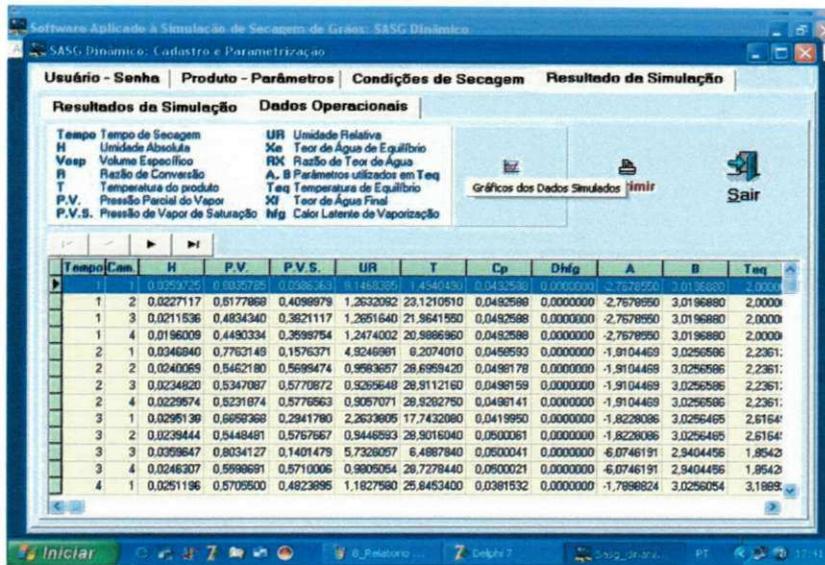


Figura 17 - Tela operacional de apresentação dos resultados operacionais, variáveis intrínsecas ao processo físico da simulação na forma numérica: tempo de secagem, teor de água absoluto, pressão parcial de vapor, etc.

A geração de um relatório impresso dos Dados Operacionais é obtida através do botão **Imprimir**. Essa ação irá transferir os dados para a impressora, seguindo o formato apresentado na Figura 18.

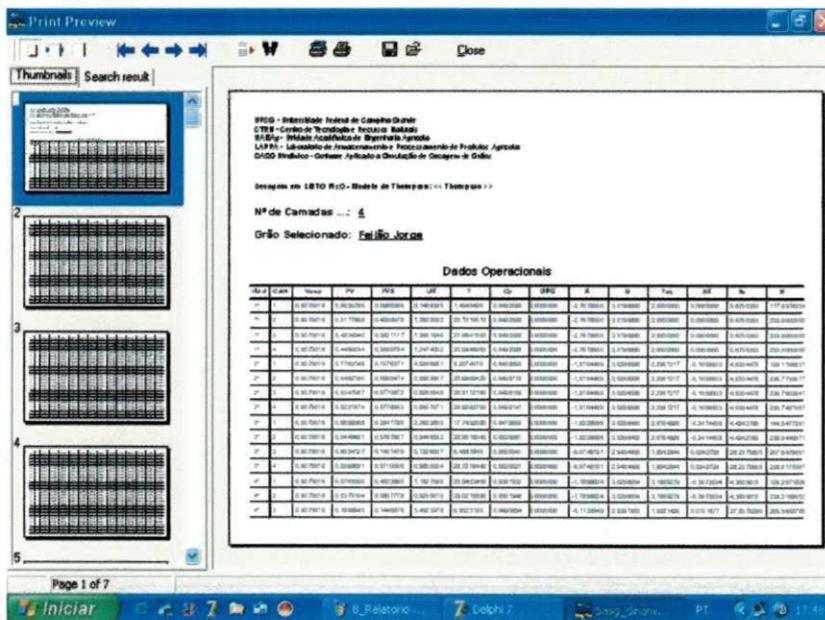


Figura 18 – Tela operacional de apresentação dos resultados operacionais, variáveis intrínsecas ao processo físico da simulação na forma numérica, na forma de relatório a ser impresso e/ou salvo, exportado a outro meio ou aplicação: tempo de secagem, teor de água absoluto, pressão parcial de vapor, etc.

As figuras anteriores encerram a apresentação operacional do SASG_{Dinâmico}. Como mencionado em tópico anterior, procurou-se disponibilizar toda a funcionalidade do aplicativo em uma única tela (janela) multifuncional, com o objetivo de proporcionar ao usuário um ambiente uniforme e prático, que o conduza o mais natural e intuitivamente possível ao seu pleno domínio e à sua perfeita utilização.

4.1.2 A opção Sobre

Segunda opção da barra de função, presta-se à identificação da sua autoria, conforme a Figura 19.



Figura 19 – Tela operacional de apresentação dos créditos do SASG_{Dinâmico}.

Por adotar o padrão Windows, a operacionalização do SASG_{Dinâmico} segue a metodologia: caixas de texto para entrada de dados, botões associados à execução de atividades, barra de navegação para visualização individualizada de dados, quadros (*grids*) de disponibilização de dados. O conjunto da interface é mostrado na Figura 20.

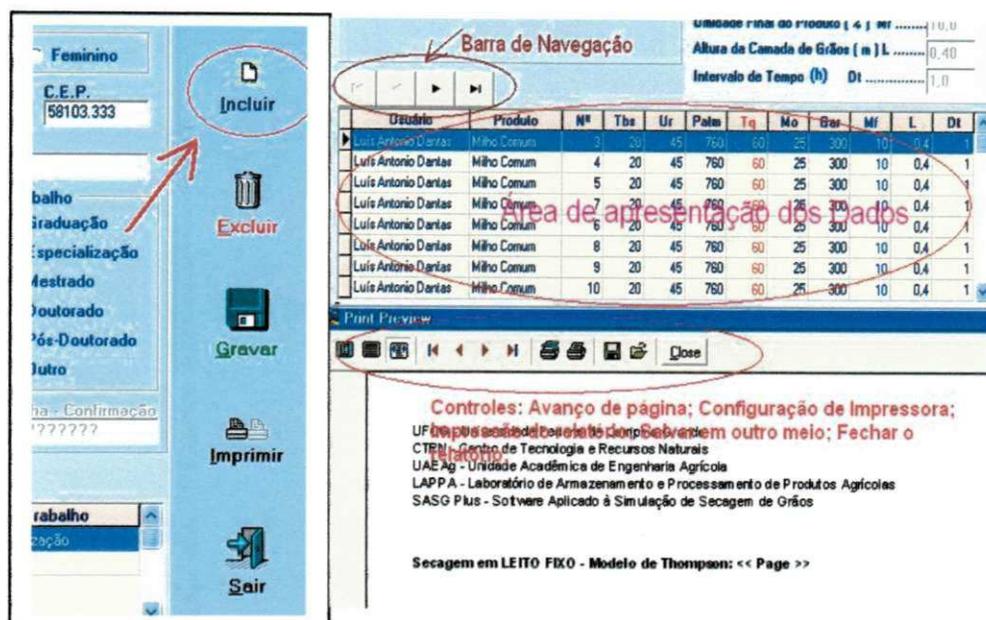


Figura 20 – Figura ilustrativa dos padrões de interface, ação e controle, utilizados pelo SASG Dinâmico.

A Figura 20, por apresentar o padrão de controle utilizado pelo SASG Dinâmico, exige um detalhamento mais afinado do que está sendo exposto. No primeiro plano vertical, à esquerda, tem-se uma mostra dos botões de ação: Incluir, Excluir, Gravar, Imprimir, Sair. Tal padronização está presente em todas as telas. À direita, na parte superior, tem-se uma mostra de como os dados são disponibilizados através de uma tabela ou grid, precedido de uma barra de navegação, cujo objetivo é permitir a mostra dos dados. E no plano inferior, abaixo do grid de dados, tem-se uma mostra de como a opção Imprimir disponibiliza os controles de relatório, através de botões de avanço de página, configuração de Impressora, impressão do relatório e opção de exportação.

4.2 Discussão dos Resultados

A partir das características do SASG Dinâmico, aplicação voltada à simulação de secagem de grãos, testaram-se os resultados fornecidos pelo aplicativo com dados disponibilizados pela literatura. Para tanto, selecionaram-se na literatura dados experimentais apresentados por Mantovani (1976) para o produto milho comum e por Sousa (2004) para o feijão macaçar.

4.2.1 Dados psicrométricos

Alguns dados psicrométricos fornecidos pelo Programa foram comparados com os dados apresentados por Cavalcanti Mata *et al.* (1999). Nas Tabelas 4, 5 e 6 são feitas as comparações para condições de propriedades psicrométricas do ar e para o processo de aquecimento do ar de secagem, respectivamente.

Tabela 4 – Propriedades psicrométricas do ar – $P_{atm} = 760$ mmHg.

Variáveis Observadas	Pressão - 760 mmHg					
	SASG Biaggi e Dalbello			SASG		
	Dinâmico		%	Dinâmico	ASHRAE	%
Temperatura em b.s. (°C)	25,00	25,00		25,00	25,00	
Umidade Relativa (%)	70,00	70,00		70,00	70,00	
Temperatura em b.u. (°C)	20,93	20,97	0,19	20,93	21,00	0,33
Temperatura de Orvalho	19,12	19,14	0,10	19,12	19,00	0,63
Entalpia (kJ/kg de ar seco)	60,57	60,58	0,01	60,57	61,00	0,70
Volume Específico (m ³ /kg de ar seco)	0,86	0,86		0,86	0,86	

Tabela 5 – Propriedades psicrométricas do ar – $P_{atm} = 695,10$ mmHg.

Variáveis Observadas	Pressão - 695,10 mmHg					
	SASG Biaggi e Dalbello			SASG		
	Dinâmico		%	Dinâmico	ASHRAE	%
Temperatura em b.s. (°C)	25,00	25,00		25,00	25,00	
Umidade Relativa (%)	70,00	70,00		70,00	70,00	
Temperatura em b.u. (°C)	20,85	20,97	0,57	20,85	20,97	0,57
Temperatura de Orvalho	19,12	19,14	0,10	19,12	19,14	0,10
Entalpia (kJ/kg de ar seco)	63,96	63,97	0,02	63,96	62,39	2,52
Volume Específico (m ³ /kg de ar seco)	0,95	0,95		0,95	0,95	

Nas Tabelas 4 e 5, observa-se que, para a pressão atmosférica de 760 mmHg, o maior percentual de diferença entre o SASG_{Dinâmico}, e a Carta Psicrométrica da ASHRAE é de 0,70% para a Entalpia, e de 2,52% para a pressão atmosférica de 695,10 mmHg. Como essas diferenças são pequenas pode-se considerar que as equações que foram utilizadas para expressar as propriedades termodinâmicas do ar são válidas, podendo ser utilizadas para representar as condições psicrométricas do ar.

Tabela 6 – Propriedades psicrométricas para o ar aquecido – $P_{atm} = 695,10$ mmHg.

Variáveis Observadas	Pressão - 695,10 mmHg					
	SASG	Biaggi e	%	SASG	ASHRAE	%
	Dinâmico	Dalbello		Dinâmico		
Temperatura em b.s. (°C)	45,00	45,00		45,00	45,00	
Umidade Relativa (%)	70,00	70,00		70,00	70,00	
Temperatura em b.u. (°C)	26,25	26,44	0,72	26,25	26,40	0,57
Temperatura de Orvalho	19,12	19,14	0,10	19,12	19,14	0,10
Entalpia (kJ/kg de ar seco)	84,62	81,24	4,16	84,62	82,00	3,20
Volume Específico (m ³ /kg de ar seco)	0,94	0,92	2,17	0,94	0,95	0,63

Na Tabela 6, encontra-se um exemplo de aquecimento do ar para 45°C. Observa-se que a maior diferença encontrada é ainda para a entalpia 4,16% e 3,20% em comparação aos dados observados por Biaggi e Dalbello (1994) e a carta psicrométrica da ASHRAE, respectivamente, podendo ainda ser considerado como uma diferença aceitável.

4.2.2 Dados das simulações de secagem

4.2.2.1 Simulações de secagem de milho comum

Nas Tabelas 7 e 8 encontram-se os dados experimentais obtidos por Mantovani (1976), na secagem de milho comum. Identifica-se como PROVA 1 o conjunto de dados: temperatura de secagem = 35°C; teor de água = 26% (b.s.); altura da camada = 1,1m de espessura; fluxo de ar de secagem = 12,2 m³/min/m²; umidade relativa = 67%; e como PROVA 2 o conjunto de dados: temperatura de secagem = 30°C; teor de água = 25% (b.s.); altura da camada = 1,1m; fluxo do ar de secagem = 12,2 m³/min/m²; e a umidade relativa é de 67%.

Tabela 7 – Dados experimentais de milho comum, obtidos por Mantovani (1976): $X_0 = 26\%$ (b.s.) e $T_q = 35^\circ\text{C}$. (PROVA 1).

Dados Experimentais - Teor de Água					
Número de Camadas					
T (h)	1.ª	2.ª	3.ª	4.ª	5.ª
1	21,72	27,00	25,99	25,77	25,96
2	19,47	24,62	26,01	25,68	25,83
3	17,99	22,90	26,19	25,80	26,20
4	16,71	20,70	25,57	25,49	25,87
6	15,21	17,96	22,14	25,35	25,58
8	14,07	16,25	19,53	23,91	25,42
10	13,64	15,18	17,78	22,02	25,42
12	13,55	14,68	16,62	20,07	24,73
14	13,07	13,93	15,61	18,18	22,65
16	12,57	13,49	14,54	16,72	20,36
18	12,28	13,04	13,96	15,59	18,55
20	12,18	12,80	13,52	14,91	17,26
22	11,93	12,46	13,17	14,25	16,11
24	11,59	12,10	12,71	13,57	15,15
26	11,30	11,81	12,25	13,07	14,38

Tabela 8 – Dados experimentais de milho comum, obtidos por Mantovani (1976): $X_0 = 25\%$ (b.s.) e $T_q = 30^\circ\text{C}$ (PROVA 2).

Dados Experimentais - Teor de Água					
Número de Camadas					
T (h)	1.ª	2.ª	3.ª	4.ª	5.ª
1	23,06	25,05	25,02	25,11	25,13
2	21,20	24,75	24,84	25,13	25,16
3	19,90	23,77	25,03	24,99	25,00
4	18,76	22,63	25,05	24,92	25,07
6	17,15	20,50	24,17	25,05	25,10
8	16,16	18,90	23,00	25,05	25,08
10	15,37	17,29	21,11	24,53	24,89
12	14,87	16,49	19,81	23,81	24,64
14	13,89	15,20	17,90	21,87	23,95
16	13,84	14,88	16,89	20,66	23,54
18	13,67	14,57	16,15	19,33	22,70
20	13,49	14,10	15,66	17,99	21,31
22	13,22	14,10	14,88	17,11	20,46
24	13,00	13,52	14,73	16,40	19,15
26	13,07	13,55	14,48	16,27	18,24
28	12,89	13,26	14,10	15,42	17,71
30	12,83	13,12	13,92	14,82	16,52

A partir dos dados experimentais da PROVA 1 e PROVA 2 simulou-se a secagem para essas duas condições pelo SASG_{Dinâmico}. Como resultado, obteve-se o conjunto de dados apresentados nas Tabelas 9 e 10 e que foram utilizados para comparação com os dados experimentais das Tabelas 7 e 8, respectivamente.

Tabela 9 – Dados simulados de milho comum, para comparação ao conjunto de dados obtidos por Mantovani (1976) PROVA 1.

Dados Simulados - Teor de Água						
T(h)	Número de Camadas					Média
	1ª	2ª	3ª	4ª	5ª	
1	22,30	23,64	27,10	28,19	27,09	25,66
2	20,60	21,65	22,75	27,13	28,20	24,07
3	19,43	20,31	21,25	22,73	25,87	21,92
4	18,53	19,30	20,12	21,31	22,84	20,42
6	17,80	18,50	19,22	20,23	21,44	19,44
8	17,19	17,83	18,49	19,36	20,38	18,65
10	16,67	17,25	17,86	18,64	19,53	17,99
12	16,22	16,76	17,32	18,03	18,82	17,43
14	15,82	16,32	16,84	17,49	18,21	16,94
16	15,46	15,93	16,42	17,02	17,67	16,50
18	15,14	15,58	16,04	16,59	17,20	16,11
20	14,85	15,26	15,69	16,21	16,77	15,76
22	14,58	14,97	15,38	15,86	16,39	15,44
24	14,33	14,71	15,09	15,55	16,04	15,14
26	14,11	14,46	14,83	15,26	15,72	14,88

Tabela 10 – Dados simulados de milho comum, para comparação ao conjunto de dados obtidos por Mantovani (1976) PROVA 2.

Dados Simulados - Teor de Água						
T(h)	Número de Camadas					Média
	1ª	2ª	3ª	4ª	5ª	
1	21,99	26,20	26,80	26,20	26,19	25,48
2	20,41	23,34	27,41	26,81	26,80	24,95
3	19,29	21,45	25,99	27,42	26,30	24,09
4	18,43	20,25	23,39	28,03	25,17	23,05
6	17,16	18,58	20,50	24,07	26,39	21,34
8	16,67	17,95	19,62	22,02	25,66	20,38
10	16,24	17,42	18,90	20,90	23,81	19,45
12	15,86	16,95	18,29	20,02	22,11	18,65
14	15,52	16,53	17,76	19,30	21,07	18,04
16	15,22	16,16	17,30	18,68	20,24	17,52
18	14,94	15,83	16,88	18,14	19,54	17,07
20	14,69	15,53	16,51	17,67	18,94	16,67
22	14,25	14,99	15,86	16,86	17,94	15,98
24	14,05	14,76	15,57	16,51	17,52	15,68
26	13,87	14,54	15,31	16,19	17,14	15,41
28	13,70	14,34	15,07	15,90	16,79	15,16
30	13,54	14,15	14,85	15,63	16,47	14,93

Em seqüência foi construída a Tabela 11, cujo conteúdo é formado pelos dados experimentais da PROVA 1, os dados simulados pelo SASG_{dinâmico} e os respectivos desvios entre os dados experimentais e simulados, por camada e teor de água médio a cada hora de operação.

Tabela 11 – Apresentação dos Desvios determinados entre os dados experimentais e simulados referentes ao conjunto de dados da PROVA 1.

Prova 1																		
Dados Experimentais - Teor de Água							Dados Simulados - Teor de Água						Desvio [%]					
Número de Camadas							Número de Camadas						Número de Camadas					
T (h)	1.ª	2.ª	3.ª	4.ª	5.ª	Méd.	1.ª	2.ª	3.ª	4.ª	5.ª	Méd.	1º%	2º%	3º%	4º%	5º%	Méd.
1	21,72	27,00	25,99	25,77	25,96	25,29	22,30	23,64	27,10	28,19	27,09	25,66	2,67	12,44	4,27	9,39	4,35	1,47
2	19,47	24,62	26,01	25,68	25,83	24,32	20,60	21,65	22,75	27,13	28,20	24,07	5,80	12,06	12,53	5,65	9,18	1,04
3	17,99	22,90	26,19	25,80	26,20	23,82	19,43	20,31	21,25	22,73	25,87	21,92	8,00	11,31	18,86	11,90	1,26	7,96
4	16,71	20,70	25,57	25,49	25,87	22,87	18,53	19,30	20,12	21,31	22,84	20,42	10,89	6,76	21,31	16,40	11,71	10,70
6	15,21	17,96	22,14	25,35	25,58	21,25	17,80	18,50	19,22	20,23	21,44	19,44	17,03	3,01	13,19	20,20	16,18	8,51
8	14,07	16,25	19,53	23,91	25,42	19,84	17,19	17,83	18,49	19,36	20,38	18,65	22,17	9,72	5,33	19,03	19,83	5,98
10	13,64	15,18	17,78	22,02	25,42	18,81	16,67	17,25	17,86	18,64	19,53	17,99	22,21	13,64	0,45	15,35	23,17	4,35
12	13,55	14,68	16,62	20,07	24,73	17,93	16,22	16,76	17,32	18,03	18,82	17,43	19,70	14,17	4,21	10,16	23,90	2,79
14	13,07	13,93	15,61	18,18	22,65	16,69	15,82	16,32	16,84	17,49	18,21	16,94	21,04	17,16	7,88	3,80	19,60	1,51
16	12,57	13,49	14,54	16,72	20,36	15,54	15,46	15,93	16,42	17,02	17,67	16,50	22,99	18,09	12,93	1,79	13,21	6,20
18	12,28	13,04	13,96	15,59	18,55	14,68	15,14	15,58	16,04	16,59	17,20	16,11	23,29	19,48	14,90	6,41	7,28	9,71
20	12,18	12,80	13,52	14,91	17,26	14,13	14,85	15,26	15,69	16,21	16,77	15,76	21,92	19,22	16,05	8,72	2,84	11,50
22	11,93	12,46	13,17	14,25	16,11	13,58	14,58	14,97	15,38	15,86	16,39	15,44	22,21	20,14	16,78	11,30	1,74	13,66
24	11,59	12,10	12,71	13,57	15,15	13,02	14,33	14,71	15,09	15,55	16,04	15,14	23,64	21,57	18,73	14,59	5,87	16,25
26	11,30	11,81	12,25	13,07	14,38	12,56	14,11	14,46	14,83	15,26	15,72	14,88	24,87	22,44	21,06	16,76	9,32	18,45

Pode-se observar na Tabela 11, que os desvios ao final dos processo de secagem entre os dados experimentais e simulados são da ordem de 24,87% na 1ª camada, 22,44% na 2ª camada, 21,06% na 3ª camada, 16,76% na 4ª camada e 9,32% na 5ª camada, que corresponde a uma diferença do teor de água final experimental e simulado em pontos percentuais de: |2,81|%, |2,65|%, |2,58|%, |2,19|% e |1,34|% respectivamente. O desvio médio final é de 18,45% o que representa um teor de água de |2,32|%.

Nas Figuras 21 e 22 encontram-se as curvas de secagem dos dados experimentais e simulados do conjunto de dados da PROVA 1 contidos na Tabela 11.

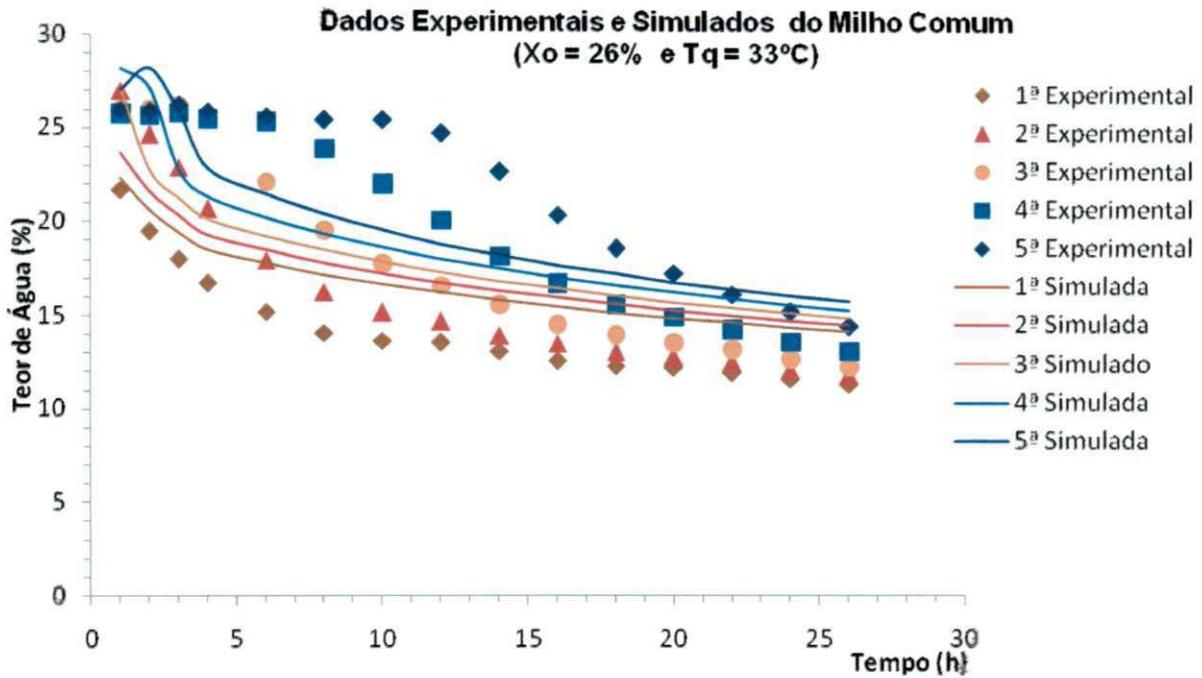


Figura 21 – Curvas de secagem: dados experimentais e simulados de milho comum para o conjunto de PROVA 1.

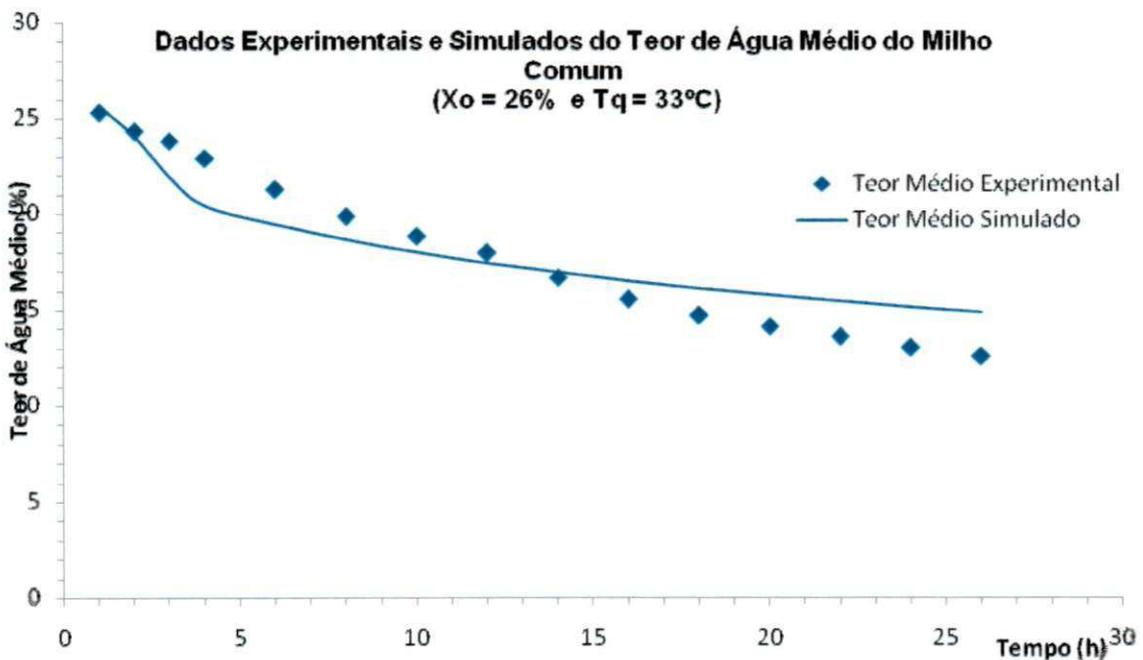


Figura 22 – Curvas de secagem: teor de água médio dos dados experimentais e simulados de milho comum para o conjunto de PROVA 1.

Na Tabela 12 são apresentados os desvios entre os dados experimentais e simulados para o conjunto de dados da PROVA 2. Encontram-se nesta tabela os dados experimentais e simulados, assim como os respectivos desvios, semelhante ao exposto na Tabela 11.

Tabela 12 – Apresentação dos Desvios determinados entre os dados experimentais e simulados referentes ao conjunto de dados da PROVA 2.

Prova 2																		
Dados Experimentais - Teor de Água							Dados Simulados - Teor de Água						Desvio [%]					
Número de Camadas							Número de Camadas						Número de Camadas					
T(h)	1. ^a	2. ^a	3. ^a	4. ^a	5. ^a	Méd.	1. ^a	2. ^a	3. ^a	4. ^a	5. ^a	Méd.	1 ^o %	2 ^o %	3 ^o %	4 ^o %	5 ^o %	Méd.
1	23,06	25,05	25,02	25,11	25,13	24,67	21,99	26,20	26,80	26,20	26,19	25,48	4,64	4,59	7,11	4,34	4,22	3,27
2	21,20	24,75	24,84	25,13	25,16	24,22	20,41	23,34	27,41	26,81	26,80	24,95	3,73	5,70	10,35	6,69	6,52	3,03
3	19,90	23,77	25,03	24,99	25,00	23,74	19,29	21,45	25,99	27,42	26,30	24,09	3,07	9,76	3,84	9,72	5,20	1,48
4	18,76	22,63	25,05	24,92	25,07	23,29	18,43	20,25	23,39	28,03	25,17	23,05	1,76	10,52	6,63	12,48	0,40	1,01
6	17,15	20,50	24,17	25,05	25,10	22,39	17,16	18,58	20,50	24,07	26,39	21,34	0,06	9,37	15,18	3,91	5,14	4,71
8	16,16	18,90	23,00	25,05	25,08	21,64	16,67	17,95	19,62	22,02	25,66	20,38	3,16	5,03	14,70	12,10	2,31	5,81
10	15,37	17,29	21,11	24,53	24,89	20,64	16,24	17,42	18,90	20,90	23,81	19,45	5,66	0,75	10,47	14,80	4,34	5,76
12	14,87	16,49	19,81	23,81	24,64	19,92	15,86	16,95	18,29	20,02	22,11	18,65	6,66	2,79	7,67	15,92	10,27	6,39
14	13,89	15,20	17,90	21,87	23,95	18,56	15,52	16,53	17,76	19,30	21,07	18,04	11,74	8,75	0,78	11,75	12,03	2,81
16	13,84	14,88	16,89	20,66	23,54	17,96	15,22	16,16	17,30	18,68	20,24	17,52	9,97	8,60	2,43	9,58	14,02	2,46
18	13,67	14,57	16,15	19,33	22,70	17,28	14,94	15,83	16,88	18,14	19,54	17,07	9,29	8,65	4,52	6,16	13,92	1,24
20	13,49	14,10	15,66	17,99	21,31	16,51	14,69	15,53	16,51	17,67	18,94	16,67	8,90	10,14	5,43	1,78	11,12	0,97
22	13,22	14,10	14,88	17,11	20,46	15,95	14,25	14,99	15,86	16,86	17,94	15,98	7,79	6,31	6,59	1,46	12,32	0,16
24	13,00	13,52	14,73	16,40	19,15	15,36	14,05	14,76	15,57	16,51	17,52	15,68	8,08	9,17	5,70	0,67	8,51	2,08
26	13,07	13,55	14,48	16,27	18,24	15,12	13,87	14,54	15,31	16,19	17,14	15,41	6,12	7,31	5,73	0,49	6,03	1,90
28	12,89	13,26	14,10	15,42	17,71	14,68	13,70	14,34	15,07	15,90	16,79	15,16	6,28	8,14	6,88	3,11	5,19	3,30
30	12,83	13,12	13,92	14,82	16,52	14,24	13,54	14,15	14,85	15,63	16,47	14,93	5,53	7,85	6,68	5,47	0,30	4,83

A Tabela 12 contém os resultados experimentais e os obtidos por simulação no SASG_{Dinâmico}, com desvios da ordem de 5,537% na 1^a camada, 7,85% na 2^a camada, 6,68% na 3^a camada, 5,47% na 4^a camada e 0,30% na 5^a camada, que correspondem a uma diferença em pontos percentuais do teor de água final por camada de |0,71|%, |1,03|%, |0,93|%, |0,81|% e |0,05|%, respectivamente. O desvio médio final é de 4,83% o que representa um teor de água de |0,69|%, portanto podendo ser considerado como um bom resultado de simulação.

Nas Figuras 23 e 24 estão as curvas de secagem dos dados experimentais e simulados do conjunto de dados da PROVA 2 contidos na Tabela 12, onde se pode observar que para estas condições de secagem o SASG_{dinâmico} simula o processo de secagem satisfatoriamente.

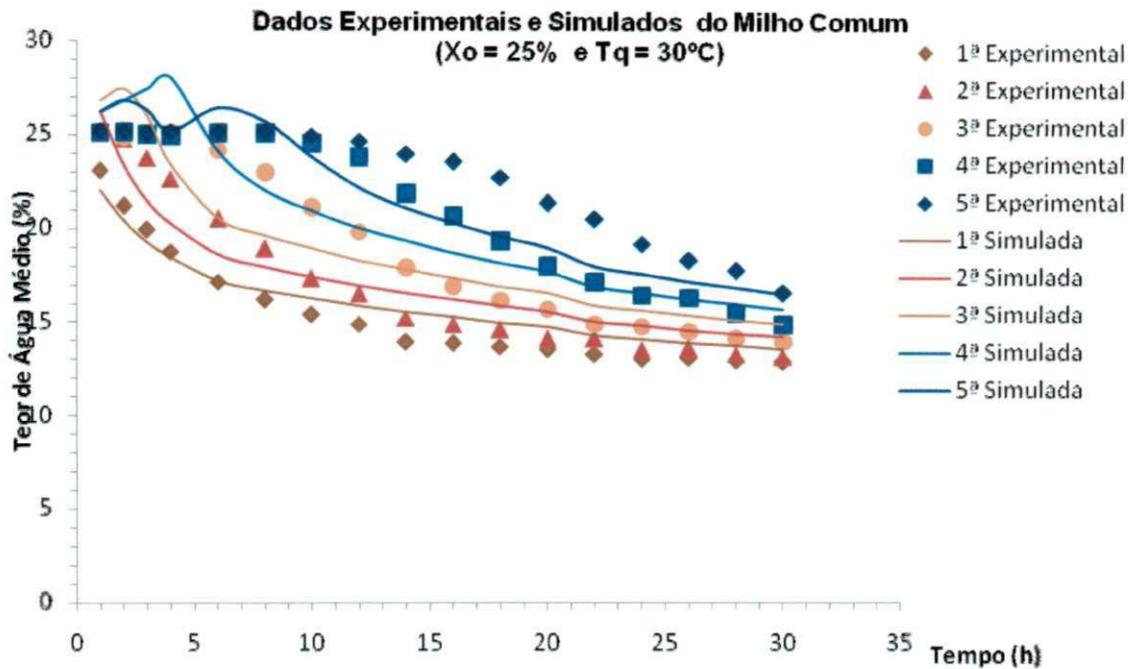


Figura 23 – Curvas de secagem: dados experimentais e simulados de milho comum para o conjunto de PROVA 2.

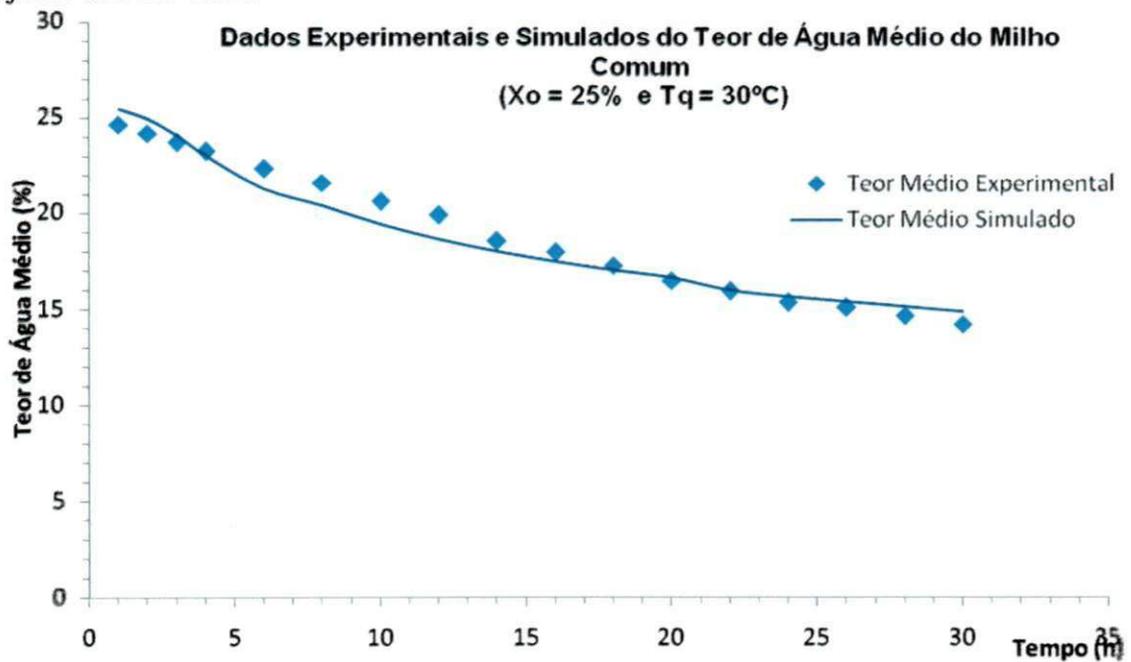


Figura 24 – Curvas de secagem: teor de água médio dos dados experimentais e simulados de milho comum para o conjunto de PROVA 2.

4.2.2.2 Simulações de secagem de feijão macaçar

O conjunto de dados experimentais utilizados para comparar com o processo de simulação de secagem de feijão feito do SASG_{Dinâmico}, são os determinados por Sousa (2004), apresentados na Tabela 13, sendo as condições de secagem identificadas como PROVA 3. O conjunto de dados da PROVA 3 é: temperatura de secagem = 28 °C; teor de água = 193% (b.s.); altura da camada = 0,63m de espessura; fluxo de ar de secagem = 30 m³/min/m²; umidade relativa = 67%. A PROVA 4 identifica o seguinte conjunto de dados: temperatura de secagem = 52 °C; teor de água = 223% (b.s.); altura da camada = 0,63m; fluxo do ar de secagem = 30 m³/min/m²; e a umidade relativa é de 67%, apresentados na Tabela 14.

Tabela 13 – Dados experimentais de feijão macaçar, obtidos por Souza (2004): $X_o = 193\%$ (b.u.) e $T_q = 28\text{ °C}$. (PROVA 3).

Dados Experimentais - Teor de Água					
Número de Camadas					
T (h)	1ª	2ª	3ª	4ª	Média
0	193,00	193,00	193,00	193,00	193,00
2	171,86	194,85	197,30	194,39	189,60
4	160,94	194,22	198,53	196,40	187,52
6	144,97	192,88	203,41	197,69	184,74
8	127,14	189,64	206,33	196,67	179,95
11	102,45	190,34	205,11	178,93	169,21
14	76,45	181,26	197,38	184,89	160,00
17	63,54	167,32	193,79	195,61	155,07
20	50,42	146,68	192,20	189,06	144,59
23	43,32	115,28	190,94	191,09	135,16
26	38,14	93,78	185,23	194,99	128,04
30	33,36	74,33	164,89	196,18	117,19
34	29,02	57,64	133,38	188,32	102,09
38	23,10	46,06	77,83	183,85	82,71
45	20,36	35,84	53,76	168,54	69,63
51	18,44	29,04	40,03	120,32	51,96
57	16,92	22,59	32,09	67,36	34,74
63	16,08	22,47	26,86	44,37	27,45
69	15,41	19,78	23,27	36,29	23,69
75	14,46	17,74	20,74	30,97	20,98
81	13,56	18,32	20,11	30,62	20,65
87	13,10	17,35	18,66	26,36	18,87
93	13,07	16,60	17,56	23,37	17,65
99	13,52	16,01	16,72	21,20	16,86
105	13,54	15,56	16,07	19,60	16,19
111	14,05	15,19	15,55	18,39	15,80
117	14,57	14,90		17,47	11,74

Tabela 14 – Dados experimentais de feijão macaçar, obtidos por Souza (2004): $X_0 = 223$ % (b.u.) e $T_q = 52$ °C. (PROVA 4).

Dados Experimentais - Teor de Água					
Número de Camadas					
T (h)	1ª	2ª	3ª	4ª	Média
0	223,00	223,00	223,00	223,00	223,00
1	189,02	223,95	226,01	227,37	216,59
2	167,79	223,27	223,95	229,43	211,11
3	141,76	222,58	223,27	234,91	205,63
4	114,37	220,53	223,27	238,33	199,13
5	99,99	209,57	221,90	234,91	191,59
6	81,49	192,45	221,21	228,74	180,97
7	72,59	174,64	216,42	217,10	170,19
8	60,95	154,09	215,73	221,90	163,17
9	54,78	123,96	214,36	217,10	152,55
10	49,99	106,84	213,68	215,05	146,39
11	46,57	97,93	205,46	214,36	141,08
12	42,46	84,92	184,23	211,62	130,81
13	34,92	73,96	165,05	206,83	120,19
14	33,55	69,17	138,34	204,09	111,29
15	31,50	61,63	126,70	199,98	104,95
16	29,44	56,15	106,15	195,19	96,73
17	28,07	52,73	92,45	180,80	88,51
18	26,70	47,25	80,81	140,53	73,82
19	24,65	42,46	77,39	114,37	64,72
20	22,59	39,03	63,00	106,15	57,69
21	21,22	35,61	54,10	91,77	50,68
22	20,54	30,81	61,36	84,92	49,41
23	20,54	28,76	48,62	81,49	44,85
24	19,85	26,70	45,88	77,39	42,46
25	19,85	25,33	41,77	70,54	39,37
26	19,85	23,96	37,66	45,20	31,67
27	19,17	22,59	34,24	41,77	29,44
28	18,49	21,22	31,50	39,03	27,56
29	16,43	19,85	30,13	35,61	25,51
30	15,75	18,49	28,76	31,50	23,63
31	15,06	17,12	26,70	29,44	22,08
32	15,06	17,12	23,96	27,39	20,88
33	13,69	16,43	21,22	26,02	19,34
34	12,32	15,75	20,54	24,65	18,32
35	11,64	15,75	19,85	23,96	17,80
36	11,16	15,06	19,85	22,59	17,17
37	10,95	15,06	19,17	22,59	16,94
38	10,94	14,38	19,17	21,91	16,60
39	10,85	14,31	18,80	21,91	16,47

A Tabela 15 contém os dados experimentais e simulados da secagem de feijão macaçar para as condições expressas na PROVA 3, bem como os respectivos desvios entre esses dados experimentais e simulados. Nessa tabela os dados experimentais e simulados de secagem são dispostos de acordo com a variação do teor de água do feijão a cada hora de secagem, subdividido em quatro camadas. Foi confeccionada ainda nessa tabela uma coluna para expressar o teor de água médio experimental ao longo do processo de secagem e outra coluna para expressar o teor de água médio simulado.

Tabela 15 – Apresentação dos Desvios determinados entre os dados experimentais e simulados referentes ao conjunto de dados da PROVA 3.

Prova 3															
Dados Experimentais - Teor de Água						Dados Simulados - Teor de Água					Desvio [%]				
T(h)	Número de Camadas					Número de Camadas					Número de Camadas				
	1ª	2ª	3ª	4ª	Méd.	1ª	2ª	3ª	4ª	Méd.	1ª %	2ª %	3ª %	4ª %	Méd.
0	193,00	193,00	193,00	193,00	193,00	193,00	193,00	193,00	193,00	193,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	171,86	194,85	197,30	194,39	189,60	158,90	196,80	196,80	196,80	187,33	7,54	1,00	0,25	1,24	1,20
4	160,94	194,22	198,53	196,40	187,52	125,08	200,62	192,48	200,61	179,70	22,28	3,30	3,05	2,14	4,17
6	144,97	192,88	203,41	197,69	184,74	91,06	204,43	186,22	204,43	171,53	37,19	5,99	8,45	3,41	7,15
8	127,14	189,64	206,33	196,67	179,95	70,06	190,48	190,02	201,16	162,93	44,90	0,44	7,90	2,28	9,46
11	102,45	190,34	205,11	178,93	169,21	55,96	171,30	193,83	194,19	153,82	45,38	10,00	5,50	8,53	9,09
14	76,45	181,26	197,38	184,89	160,00	46,01	147,41	197,64	190,69	145,44	39,82	18,67	0,13	3,14	9,10
17	63,54	167,32	193,79	195,61	155,07	38,72	121,57	201,46	184,44	136,55	39,06	27,34	3,96	5,71	11,94
20	50,42	146,68	192,20	189,06	144,59	33,24	94,35	205,27	180,54	128,35	34,07	35,68	6,80	4,51	11,23
23	43,32	115,28	190,94	191,09	135,16	29,02	73,07	197,76	184,35	121,05	33,01	36,62	3,57	3,53	10,44
26	38,14	93,78	185,23	194,99	128,04	25,72	58,57	181,21	188,15	113,41	32,56	37,55	2,17	3,51	11,42
30	33,36	74,33	164,89	196,18	117,19	23,09	48,22	158,21	191,96	105,37	30,79	35,13	4,05	2,15	10,09
34	29,02	57,64	133,38	188,32	102,09	20,98	40,60	132,58	195,77	97,48	27,71	29,56	0,60	3,96	4,52
38	23,10	46,06	77,83	183,85	82,71	19,26	34,83	105,46	199,58	89,78	16,62	24,38	35,50	8,56	8,55
45	20,36	35,84	53,76	168,54	69,63	17,84	30,37	80,67	195,03	80,98	12,38	15,26	50,06	15,72	16,31
51	18,44	29,04	40,03	120,32	51,96	16,67	26,87	64,04	181,95	72,38	9,60	7,47	59,98	51,22	39,31
57	16,92	22,59	32,09	67,36	34,74	15,68	24,08	52,31	163,75	63,96	7,33	6,60	63,01	143,10	84,11
63	16,08	22,47	26,86	44,37	27,45	14,86	21,83	43,73	140,32	55,19	7,59	2,85	62,81	216,25	101,09
69	15,41	19,78	23,27	36,29	23,69	14,16	20,00	37,28	114,37	46,45	8,11	1,11	60,21	215,16	96,09
75	14,46	17,74	20,74	30,97	20,98	13,57	18,48	32,33	86,64	37,76	6,15	4,17	55,88	179,75	80,00
81	13,56	18,32	20,11	30,62	20,65	13,06	17,23	28,46	68,29	31,76	3,69	5,95	41,52	123,02	53,78
87	13,10	17,35	18,66	26,36	18,87	12,63	16,18	25,38	55,44	27,41	3,59	6,74	36,01	110,32	45,28
93	13,07	16,60	17,56	23,37	17,65	12,25	15,30	22,91	46,11	24,14	6,27	7,83	30,47	97,30	36,77
99	13,52	16,01	16,72	21,20	16,86	11,93	14,55	20,90	39,13	21,63	11,76	9,12	25,00	84,58	28,27
105	13,54	15,56	16,07	19,60	16,19	11,65	13,91	19,24	33,79	19,65	13,96	10,60	19,73	72,40	21,35
111	14,05	15,19	15,55	18,39	15,80	11,40	13,37	17,88	29,63	18,07	18,86	11,98	14,98	61,12	14,40
117	14,57	14,90	15,55	17,47	15,62	11,19	12,90	16,73	26,34	16,79	23,20	13,42	7,59	50,77	7,47

Observa-se na Tabela 15, desvios da ordem de 23,20% para a 1ª camada; de 13,42% na 2ª camada; de 7,59% na 3ª camada e de 50,77% na 4ª camada. Estes desvios importam nas seguintes variações em pontos percentuais de teor de água: |3,38|% para a 1ª camada, |2,00|% para a 2ª, |1,18|% para a 3ª e |8,87|% na 4ª camada. O desvio médio final foi da ordem de 7,47%, o que implica em um déficit percentual do teor de água final da ordem de |1,17|%, podendo ser considerado o SASG_{Dinâmico}, como um bom programa para expressar este processo de simulação de secagem do feijão macaçar.

As Figuras 25 e 26 apresentam as curvas de secagem dos dados experimentais e simulados do conjunto de dados da PROVA 3 contidos na Tabela 15.

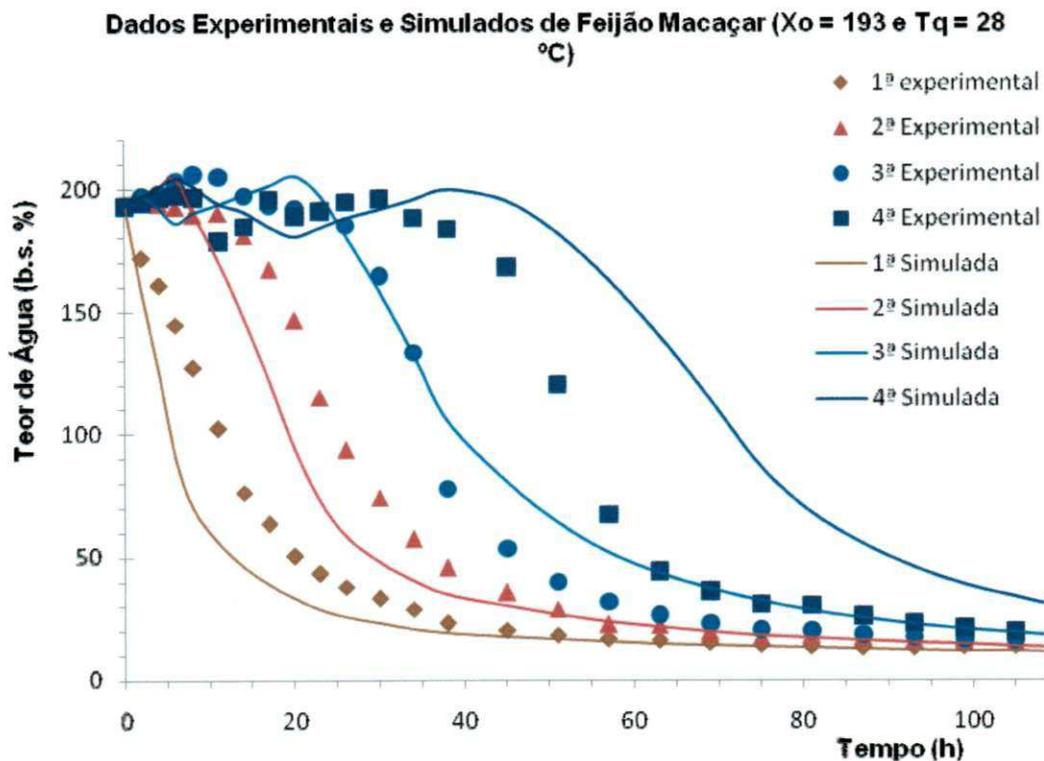


Figura 25 – Curvas de secagem: dados experimentais e simulados de feijão macaçar para o conjunto de PROVA 3: ($X_o = 193$ b.s. (%), $T_q = 28^\circ\text{C}$, $G_{ar} = 30 \text{ m}^3/\text{min}/\text{m}^2$, $L = 0,63$, $UR = 67\%$).

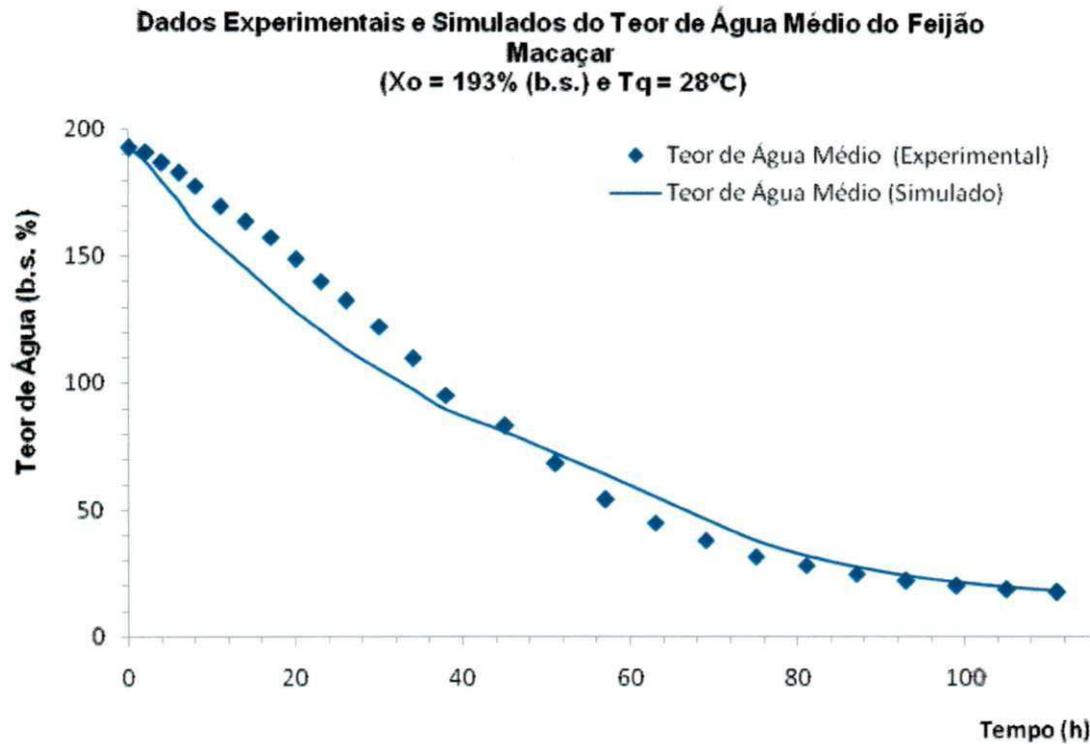


Figura 26 – Curvas de secagem: teor de água médio dos dados experimentais e simulados de feijão macaçar para o conjunto de PROVA 3.

Na Tabela 16 encontram-se os dados experimentais e simulados, assim como os respectivos desvios entre os mesmos, para as condições de secagem da PROVA 4, a exemplo do exposto na Tabela 15.

Tabela 16 – Apresentação dos Desvios determinados entre os dados experimentais e simulados referentes ao conjunto de dados da PROVA 4.

Dados Experimentais - Teor de Água						Dados Simulados - Teor de Água					Desvio [%]				
Número de Camadas						Número de Camadas					Número de Camadas				
T(h)	1ª	2ª	3ª	4ª	Méd.	1ª	2ª	3ª	4ª	Méd.	1ª %	2ª %	3ª %	4ª %	Méd.
0	223,00	223,00	223,00	223,00	223,00	223,00	223,00	223,00	223,00	223,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	167,79	223,27	223,95	229,43	211,11	173,21	238,78	237,33	236,04	221,34	3,23	6,95	5,97	2,88	4,85
4	114,37	220,53	223,27	238,33	199,13	118,34	233,50	236,07	235,19	205,77	3,47	5,88	5,73	1,32	3,33
5	99,99	209,57	221,90	234,91	191,59	101,13	219,21	237,52	232,73	197,65	1,14	4,60	7,04	0,93	3,16
6	81,49	192,45	221,21	228,74	180,97	88,08	200,54	238,98	234,18	190,45	8,09	4,20	8,03	2,38	5,24
7	72,59	174,64	216,42	217,10	170,19	77,82	180,08	240,43	231,08	182,36	7,20	3,11	11,09	6,44	7,15
8	60,95	154,09	215,73	221,90	163,17	69,52	158,11	241,89	228,76	174,57	14,06	2,61	12,13	3,09	6,99
9	54,78	123,96	214,36	217,10	152,55	62,65	133,98	243,35	226,33	166,58	14,37	8,08	13,52	4,25	9,20
10	49,99	106,84	213,68	215,05	146,39	56,87	114,94	236,67	227,78	159,07	13,76	7,58	10,76	5,92	8,66
11	46,57	97,93	205,46	214,36	141,08	51,94	100,17	225,98	229,23	151,83	11,53	2,29	9,99	6,94	7,62
12	42,46	84,92	184,23	211,62	130,81	47,69	88,37	211,24	230,68	144,49	12,32	4,06	14,66	9,01	10,46
14	33,55	69,17	138,34	204,09	111,29	40,72	70,78	173,42	233,58	129,62	21,37	2,33	25,36	14,45	16,47
15	31,50	61,63	126,70	199,98	104,95	37,84	64,06	151,98	235,03	122,23	20,13	3,94	19,95	17,53	16,46
16	29,44	56,15	106,15	195,19	96,73	35,27	58,34	129,23	236,49	114,83	19,80	3,90	21,74	21,16	18,71
17	28,07	52,73	92,45	180,80	88,51	32,98	53,40	112,04	230,12	107,13	17,49	1,27	21,19	27,28	21,04
18	26,70	47,25	80,81	140,53	73,82	30,91	49,11	98,37	219,11	99,37	15,77	3,94	21,73	55,92	34,61
19	24,65	42,46	77,39	114,37	64,72	29,05	45,35	87,27	204,94	91,65	17,85	6,81	12,77	79,19	41,61
20	22,59	39,03	63,00	106,15	57,69	27,36	42,03	78,11	188,47	83,99	21,12	7,69	23,98	77,55	45,59
21	21,22	35,61	54,10	91,77	50,68	25,82	39,09	70,44	169,89	76,31	21,68	9,77	30,20	85,13	50,57
22	20,54	30,81	61,36	84,92	49,41	24,42	36,45	63,93	150,30	68,78	18,89	18,31	4,19	76,99	39,20
23	20,54	28,76	48,62	81,49	44,85	23,13	34,09	58,34	128,53	61,03	12,61	18,53	19,99	57,72	36,08
24	19,85	26,70	45,88	77,39	42,46	21,96	31,97	53,50	111,89	54,83	10,63	19,74	16,61	44,58	29,13
25	19,85	25,33	41,77	70,54	39,37	20,87	30,04	49,28	98,53	49,68	5,14	18,59	17,98	39,68	26,19
26	19,85	23,96	37,66	45,20	31,67	19,87	28,30	45,56	87,62	45,34	0,10	18,11	20,98	93,85	43,16
27	19,17	22,59	34,24	41,77	29,44	18,95	26,71	42,27	78,56	41,62	1,15	18,24	23,45	88,08	41,37
28	18,49	21,22	31,50	39,03	27,56	18,10	25,26	39,34	70,93	38,41	2,11	19,04	24,89	81,73	39,37
29	16,43	19,85	30,13	35,61	25,51	17,30	23,92	36,72	64,44	35,60	5,30	20,50	21,87	80,96	39,55
30	15,75	18,49	28,76	31,50	23,63	16,57	22,70	34,37	58,86	33,12	5,21	22,77	19,51	86,86	40,16
31	15,06	17,12	26,70	29,44	22,08	15,88	21,58	32,24	54,01	30,93	5,44	26,05	20,75	83,46	40,08
32	15,06	17,12	23,96	27,39	20,88	15,24	20,54	30,32	49,77	28,97	1,20	19,98	26,54	81,71	38,75
33	13,69	16,43	21,22	26,02	19,34	14,65	19,58	28,57	46,04	27,21	7,01	19,17	34,64	76,94	40,69
34	12,32	15,75	20,54	24,65	18,32	14,09	18,69	26,97	42,73	25,62	14,37	18,67	31,30	73,35	39,85
35	11,64	15,75	19,85	23,96	17,80	13,57	17,87	25,51	39,78	24,18	16,58	13,46	28,51	66,03	35,84
36	11,16	15,06	19,85	22,59	17,17	13,08	17,10	24,17	37,14	22,87	17,20	13,55	21,76	64,41	33,20
37	10,95	15,06	19,17	22,59	16,94	12,62	16,39	22,94	34,76	21,68	15,25	8,83	19,67	53,87	27,98
38	10,94	14,38	19,17	21,91	16,60	12,19	15,72	21,81	32,62	20,59	11,43	9,32	13,77	48,88	24,04
39	10,85	14,31	18,80	21,91	16,47	11,78	15,10	20,77	30,67	19,58	8,57	5,52	10,48	39,98	18,88

Observa-se na Tabela 16, desvios da ordem de 8,57% para a 1ª camada, de 5,52% na 2ª camada, enquanto que para a 3ª camada o desvio foi de 10,4837% e a 4ª camada apresenta um desvio de 39,98%. Os desvios obtidos ao final dos processos experimental e simulado, indicam diferenças no teor de água final, em pontos percentuais, da ordem de: |0,93|% na 1ª camada, |0,79|% 2ª camada, |1,97|% na 3ª camada e de |8,76|% na 4ª camada. O desvio médio final foi da ordem de 18,88%, o que implica em um desvio em pontos percentuais de |3,11|%.

As Figuras 27 e 28 apresentam as curvas de secagem dos dados experimentais e simulados do conjunto de dados da PROVA 4 contidos na Tabela 16.

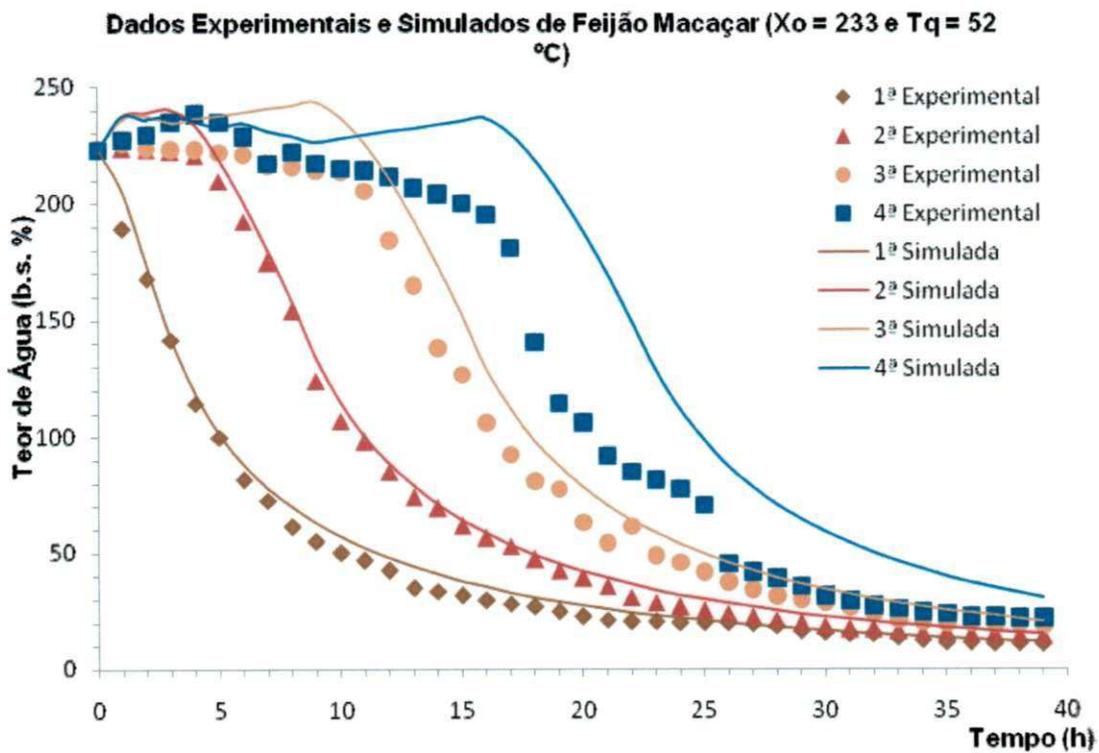


Figura 27 – Curvas de secagem: dados experimentais e simulados de feijão macaçar para o conjunto de PROVA 4: ($X_0 = 223$ b.s. (%), $T_q = 52^\circ\text{C}$, $G_{ar} = 30 \text{ m}^3/\text{min}/\text{m}^2$, $L = 0,63$, $UR = 67\%$).

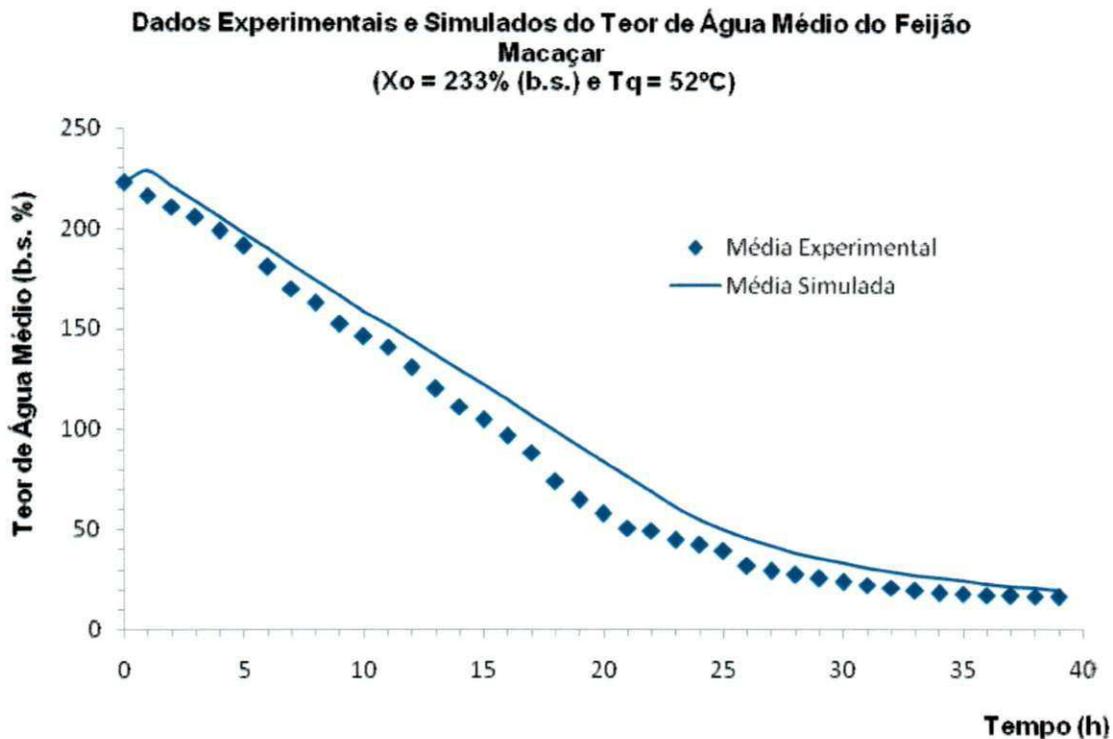


Figura 28 – Curvas de secagem: teor de água médio dos dados experimentais e simulados de feijão macaçar para o conjunto de PROVA 4.

A partir do exposto nas Tabelas (11, 12, 15 e 16) e Figuras 23 - 27, pode-se observar que os dados simulados acompanham os dados experimentais, embora apresentem alguns desvios.

Estes desvios podem ser perfeitamente justificados dentro da variabilidade biológica particular do produto utilizado nas experimentações, ou ainda da inadequação do escopo paramétrico, ou seja, coeficientes não representativos do processo, utilizados nas equações de camada fina e de umidade de equilíbrio higroscópico dos produtos em teste.

A grande vantagem deste programa, **SASG_{Dinâmico}**, é a possibilidade de se incluir e/ou alterar o conjunto paramétrico necessário à simulação, substituindo seus coeficientes, ou mesmo associando ao processo de simulação novas equações de camada fina e de umidade de equilíbrio de diferentes autores, objetivando um maior ajuste dos dados obtidos.

Outra vantagem do **SASG_{Dinâmico}** é a possibilidade de inclusão de novos produtos, permitindo a criação de um banco de dados real envolvendo: Produtos, Equações, Parâmetros, Condições de simulação de secagem e Resultados obtidos.

5. CONCLUSÕES

Diante dos resultados obtidos, pode-se concluir que:

- O programa desenvolvido simula satisfatoriamente os processos psicrométricos para secagem de produtos agrícolas na faixa de temperatura de 1 a 150°C, utilizando como alternativa a pressão barométrica local;
- Os parâmetros utilizados por Mantovani, para simulação de milho, e por Sousa, para simulação de feijão macaçar, inseridos no programa, permitem concluir que, embora o fenômeno de secagem não esteja tão bem representado, ao final do processo os resultados se encontram muito próximos dos experimentais, resultando em desvios na ordem de 0,69 e 3,11 pontos percentuais de teor de água final. O programa simula satisfatoriamente o processo de secagem na faixa de temperatura em que os parâmetros forem determinados;
- O programa disponibiliza 3 tipos de expressões para a determinação dos parâmetros A e B, a serem utilizados na equação de camada fina permitindo a observação da inferência de cada um dos parâmetros, objetivando o melhor ajuste aos dados, assim como um melhor entendimento de sua atuação na modelagem;
- O programa possibilita que se utilize no modelo de Thompson *et al.* (1968) equações de teor de água de equilíbrio de outros autores, assim como a equação de camada fina. O programa ao permitir a inserção e/ou modificação de diferentes parâmetros das equações, possibilita que o processo de simulação de secagem possa ser mais bem representado diferenciando-se dos demais programas computacionais de simulação de secagem até então concebidos.

6. REFERÊNCIAS

ASAE STANDARDS : **Standards, Engineering practices and data adopted by the American Society of Agricultural Engineers**. Published by the American Society of Agricultural Engineers. 1984, 534p.

BIAGI, J.D.; DALBELLO, O. **Modelo psicrométrico para representar os processos de aquecimento, resfriamento, umidificação e mistura de dois ares** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, XXIII, 1994, Campinas. 10p.

BRAGA, M. E. D. **Estudo da histerese entre as isotermas de sorção e dessorção do milho BR-451**. 1991. 78 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande-PB.

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

CANEPELLE, C. **Simulação de secagem de arroz (*Oriza sativa* L.) em secadores por convecção natural**. 1993. 58 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG.

CAVALCANTI MATA, M. E. R. M. **Estudo experimental de seca-aeração de amêndoas de cacau em camadas finas**. 1979. 63 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG.

CAVALCANTI MATA, M. E. R. M.; DANTAS, L. A. **Modelo de simulação de secagem de cacau (*Theobroma cacao* L.) em camada fixa**. *Revista Brasileira de Armazenamento*, v. 23, n. 2, p. 52-60, 1998.

CAVALCANTI MATA, M. E. R. M. **Efeitos da secagem em altas temperaturas por curtos períodos de tempo, em camada estacionária, sobre a armazenabilidade de sementes de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.), variedade “carioca”: Avaliação experimental, modelagem e simulação**. 1996. 229 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Alimentos) – UNICAMP – São Paulo.

CAVALCANTI MATA, M. E. R. M.; DANTAS, L. A.; BRAGA, M. E. D. **Software aplicado a secagem de grãos**. 1997. 1 CD (Programa computacional).

- CAVALCANTI MATA, M. E. R. M.; DANTAS, L. A.; BRAGA, M. E. D. **Programa computacional para simulação de secagem de grãos**. *Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais*, v. 1, n. 1, p. 33-55, 1999.
- CORRÊA, P. C. **Simulação de Café em Camada Espessa**. 1982. 47 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG.
- FIOREZE, R. **Princípios de Secagem de Produtos Biológicos**. João Pessoa: Editora Universitária/UFPB, 2004, 229 p.
- HOLANDA, Pedro Ronaldo Herculano de, **Secador para Casulos do Bicho-da-Seda: Desenvolvimento, Simulação e Experimentação**. Campina Grande: Doutorado em Engenharia de Processos, Universidade Federal de Campina Grande, 2007. 162 p. Tese (Doutorado).
- HUKILL, W. V. **Drying of grain**. In: CRISTENSEN, C. M. (ed.). **Storage of cereal grains and their products**. 2. ed. Saint Paul, Minn.: American Association of Cereal Chemists, 1974, p. 481-508.
- MANTOVANI, B. H. M. **Análise e Simulação de Secagem de Grãos de Milho em Camadas Espessas**. 1976. 90 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG.
- MARTINS, J. H. **Simulação de Secagem de Milho em Camada Estacionária**. 1982. 97 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG.
- MORAES NETO, J. M.; MARTINS, J. H.; CAVALCANTI MATA, M. E. R. M. **Secagem de feijão carioquinha em camada fina utilizando os modelos de Thompson e Page**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 21, 1992, Santa Maria-RS. *Anais...* Santa Maria: UFSM/SBEA, 1992, v. 4, p. 1958-1971.
- MOREY, R. V.; KEENER, H. M.; THOMPSON, T. L., WHITE, G. M. 7 ARKEMA, F. W. B. **The present status of grain drying simulation**. St. Joseph, Michigan, A.S.A.E., 1978. 25p. (Paper nº 78-3009).
- NASCIMENTO, J. W. B.; CAVALCANTI MATA, M. E. R. M.; MARTINS, J. H. **Simulação de secagem de milho utilizando a energia térmica de um gasogênio de fluxo transversal descendente**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA

AGRÍCOLA, 20, 1991, Londrina-PR. **Anais...** Londrina: IAPAR/SBEA, 1992. v. 1, p. 207-227, 1991.

OLIVEIRA, J. R. de. **Estudo experimental e simulado da contração volumétrica dos grãos de feijão macassar (*Vigna unguiculata* (L.) Walpers) durante o processo de secagem.** 2005. 81 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Campina Grande – Campina Grande.

QUEIROZ, D. M.; SILVA, J. S.; MELO, E. C. **Prática de simulação de secagem em calculadoras programáveis.** Viçosa: Centro Nacional de Treinamento em Armazenagem, 1982, 84 p. (CENTREINAR, n. 3).

QUEIROZ, D.M.; PEREIRA, J.A.M.; MELO, E.C. **Modelos Matemáticos de Simulação de Secagem de Grãos.** Viçosa: Centro Nacional de Treinamento em Armazenagem, 1985. 59p.

SILVA, L. C. da. **Desenvolvimento e Avaliação de um Secador de Café (*Coffea arabica* L.) Intermitente de Fluxos Contracorrentes.** 1991. 74 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG.

SINÍCIO, R. **Simulação de secagem de milho em camadas espessas a baixas temperaturas.** Viçosa-MG. Universidade Federal de Viçosa, 1983. 64 p. (Dissertação de Mestrado).

SOUSA, J. A. **Modelagem e simulação de secagem de Feijão Macassar (*Vigna unguiculata* (L.) Walpers): Contração Volumétrica da Camada Espessa.** 2004. 110 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Centro de Ciências e Tecnologia – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande.

TASCON, C. E. O. **Simulação de secagem de café, em camada fixa, com inversão de sentido de fluxo de ar.** 1984. 64 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG.

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