



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE**

**PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA**

**CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PROCESSOS**

**SOLUÇÕES COMPUTACIONAIS ANALÍTICO-NUMÉRICAS APLICADAS À  
SIMULAÇÃO DE SECAGEM DE PRODUTOS BIOLÓGICOS**

**AUTOR: Luís Antônio Dantas**

**ORIENTADORES: Prof. Dr. Mário Eduardo R. M. Cavalcanti Mata**

**Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Maria Elita Martins Duarte**

**Campina Grande, PB, junho de 2012**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE**

**CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PROCESSOS**

**SOLUÇÕES COMPUTACIONAIS ANALÍTICO-NUMÉRICAS APLICADAS À  
SIMULAÇÃO DE SECAGEM DE PRODUTOS BIOLÓGICOS**

**Tese de Doutorado submetida à Coordenação do Curso de Doutorado em Engenharia de Processos da Universidade Federal de Campina Grande como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Doutor em Engenharia de Processos.**

**AUTOR: Luís Antônio Dantas**

**ORIENTADORES: Prof. Dr. Mário Eduardo R. M. Cavalcanti Mata**

**Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Maria Elita Martins Duarte**

**CAMPINA GRANDE - PARAÍBA**

**Junho - 2012**

**DIGITALIZAÇÃO:  
SISTEMOTECA - UFCG**

**FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG**

**D129s**

**Dantas, Luís Antônio.**

**Soluções computacionais analítico-numéricas aplicadas à simulação de secagem de produtos biológicos / Luís Antônio Dantas. – Campina Grande, 2012.**

**1076 f. : il. color.**

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

**Orientadores: Prof. Dr. Mário Eduardo R. M. Cavalcanti Mata, Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Maria Elita Martins Duarte.**

**Referências.**

**1. Programa Computacional. 2. Simulação de Secagem. 3. Produtos Biológicos. 4. Modelo de Thompson. 5. Modelo de Hukill. 6. Modelo de Michigan. I. Título.**

**004.4:631.563.2(043)**

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA TESE DE DOUTORADO DE **LUÍS ANTÔNIO DANTAS** APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PROCESSOS DO CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE.

Tese de Doutorado Campina Grande em 20 de Junho de 2012.

  
Prof. Dr. Mário Eduardo R. M. Cavalcanti Mata  
UFCG/CTRN/UAEA - ORIENTADOR

  
Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Maria Elita Martins Duarte  
UFCG/CTRN/UAEA - ORIENTADORA

  
Prof. Dr. Francisco de Assis Santos e Silva  
UFCG/CTRN/UAEA - EXAMINADOR EXTERNO

  
Prof. Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima  
UFCG/CCT/UAEM - EXAMINADOR INTERNO

  
Prof. Dr. Wilton Pereira da Silva  
UFCG/CCT/UAF - EXAMINADOR INTERNO

  
Prof. Dr. Severino Rodrigues de Farias Neto  
UFCG/CCT/UAEQ - EXAMINADOR INTERNO

  
Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Severina de Sousa  
UFCG/CCT/UAEA - EXAMINADORA EXTERNA

Campina Grande, Junho de 2012.  
PB, Brasil

Este exemplar corresponde à versão final da Tese de Doutorado em Engenharia de Processos, defendida por Luís Antônio Dantas e aprovada pela banca em 20 de junho de 2012.

## DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho:

Ao Criador, pela grandeza da Luz, da Força, da Sabedoria e do Amor. 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 amada e querida Esposa, Yole Jerônimo Ramos da Costa, pelo incentivo constante, pelos conselhos, pela paciência, compreensão e principalmente, pela crença no êxito de uma nova e árdua empreitada. Minha Loteria. (Eu já disse que te amo... hoje?).

Aos meus filhos Manuela Ramos Caldas Lins, Lonan Jerônimo Dantas e Mariana Jerônimo Dantas, pela paciência, apoio, colaboração, e compreensão.

Aos meus filhos, Bergson Cavalcanti Dantas, Tácio Cavalcanti Dantas e Hilber José Cavalcanti Dantas.

Aos meus pais, Luiz Gonçalves Dantas (*in memoriam*) e Maria Noêmia de Araújo Dantas, pela educação, pelos princípios, pelo incentivo à busca do conhecimento.

Aos meus avós paternos, Francisco Dantas, S. Chico (*in memoriam*) e Adélia Gonçalves Maia, D. Iaiá (*in memoriam*), semeadores.

Aos meus irmãos, Neomísia Dantas, Agliberto Dantas, Enildo de Araújo Dantas, Antúlio de Araújo Dantas, Erickson de Araújo Dantas e Lívia de Araújo Dantas (*in memoriam*).

## AGRADECIMENTOS

À minha esposa Yole Jerônimo Ramos da Costa, sem a qual este não teria nem começado.

Aos meus filhos Manuela Ramos Caldas Lins (e aí Pai?), Lonan Jerônimo Dantas (pelo auxílio derivativo luxuoso) e Mariana Jerônimo Dantas (Luisinho, psit!), pela paciência, colaboração, copenção, ... O véi normal é difíci, imagine estressado, heim? Obrigado meus filhos.

Ao Prof. Dr. Mário Eduardo R. M. Cavalcanti Mata, por me aceitar como orientando, pelo incentivo, apoio, paciência, tempo, disposição, correções de rumo, de texto, de tudo.

À Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Maria Elita Martins Duarte, sábia, calma, competente, centrada, acessível, profícua, ....

Aos membros da banca examinadora, os professores doutores Antonio Gilson Barbosa de Lima, Wilton Pereira da Silva, Severino Rodrigues de Fatias Neto, Francisco de Assis Sousa e Silva, que em detrimento de suas muitas e profícuas atividades, disponibilizam-se à avaliação e contribuição significativas deste.

À coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos, na pessoa do Prof. Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima.

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

Aos Professores Doutores do LAPP/UAEA/CTRN/UFCG 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.

Aos colegas funcionários Flávio Teixeira Cavalcanti, Gustavo Villarim de Farias Leite, Jasiel Dantas Costa, Dr. José Rildo de Oliveira, Paulo de Almeida Farias, Rebeca de Lima Dantas, Dr. Renato Fonseca Aragão, e ao prestador de serviços Silas Sandro Luiz da Silva pela cooperação, incentivo e compreensão.

Aos colegas de doutorado, pela convivência, agora Saudade, pelo tempo compartilhado, emoções, aflições, parcerias.

*“A formulação de um problema é frequentemente mais essencial do que sua solução, a qual pode ser meramente uma questão de habilidade matemática ou experimental.”*

Einstein e Infeld – 1938 – “A evolução da física”



## SUMÁRIO

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	xiv
LISTA DE FIGURAS	xvi
LISTA DE TABELAS	xviii
NOMENCLATURA	xx
RESUMO	xxiv
ABSTRACT	xxv
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Objetivo Geral	2
1.2. Objetivos Específicos	3
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1. Sistemas e modelos de simulação	5
2.1.1. Classificação dos sistemas para modelagem e simulação	6
2.1.2. Equações matemáticas representantes do modelo	6
2.2. Modelos de simulação de secagem	7
2.2.1. Histórico	7
2.2.2. Simulação digital e banco de dados	9
2.2.3. Modelo de Hukill	10
2.2.4. Modelo de Thompson	13
2.2.5. Modelo de Morey	19
2.2.6. Modelo de Michigan	21
2.3. Cálculo das propriedades psicrométricas do ar	28
2.3.1. Pressão parcial de vapor	28
2.3.2. Razão de mistura do ar, para temperatura de bulbo úmido	28

2.3.3. Razão de mistura do ar	29
2.3.4. Umidade relativa do ar	29
2.3.5. Temperatura do ponto de orvalho	29
2.3.6. Entalpia do ar	29
2.3.7. Volume específico do ar	29
3. MATERIAL E MÉTODOS	31
3.1. Implementação dos modelos de simulação de secagem	31
3.1.1. Razão de conversão	31
3.1.2. Calor específico	31
3.1.3. Calor latente de vaporização da água do produto	32
3.1.4. Equações de determinação de equilíbrio higroscópico	32
3.1.4.1. ASAE – Standard (1984)	32
3.1.4.2. BET (Brunauer, Emmett e Teller)	32
3.1.4.3. Cavalcanti Mata	33
3.1.4.4. Chung-Pfost	33
3.1.4.5. GAB (Guggenheim, Anderson e de Boer)	33
3.1.4.6. Halsey, modificado	33
3.1.4.7. Henderson	33
3.1.4.8. Henderson, modificado por Cavalcanti Mata	33
3.1.4.9. Henderson, modificado por Thompson	33
3.1.4.10. Oswin	33
3.1.4.11. Sigma-Copace	34
3.1.4.12. Thompson	34
3.1.4.13. Zuritz e Sing	34
3.1.5. Equações de camada fina	34
3.1.5.1. Byler e Brook	35
3.1.5.2. Cavalcanti Mata	35

3.1.5.3. Henderson e Pabis	35
3.1.5.4. Noomhorm e Verma	35
3.1.5.5. Page	36
3.1.5.6. Roa e Macedo	36
3.1.5.7. Sharaf-Eldeen	36
3.1.5.8 Thompson	36
3.1.6. Coeficientes das equações de camada fina	37
3.1.6.1. Exponencial dependente da temperatura	37
3.1.6.2. Polinomial dependente da temperatura, de grau 7	37
3.1.6.3. Polinomial dependente da temperatura e do teor de água inicial	37
3.1.7. Solução numérica para o modelo de Michigan – fluxo cruzado	38
3.1.8. Propriedades termofísicas e características físicas dos produtos, do ar e da água	40
3.2. Encadeamento do modelo	40
3.3. Módulo operacional: Aplicativo	41
3.4. Simulação e Banco de Dados	42
3.5. Integração: Aplicativo x GBD	42
3.6. Hardware	42
3.7. Software básico	42
3.7.1. Linguagem de programação e descritor da base de dados	43
3.7.2. Base de dados	43
3.8. Estrutura e modelagem de dados	43
3.8.1. Análise e modelagem dos dados	44
3.8.2. Tabelas, entidades, utilizadas	45
3.8.2.1. Usuários	45
3.8.2.2. Produtos	46
3.8.2.3. Coeficientes	46

3.8.2.4. Experimental	46
3.8.2.5. Experimentos	46
3.8.2.6. Entrada	47
3.8.2.7. Auxiliar operacional	47
3.8.2.8. Auxiliar simulação	47
3.8.2.9. Operacional	47
3.8.2.10. Simulação	47
3.8.2.11. Desvios	48
3.9. Validação do software	48
3.10. Análise do erro relativo	48
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	49
4.1. O Software	49
4.1.1. A opção Arquivo	50
4.1.1.1. Cadastro	50
4.1.1.1.1. Usuários e produtos	50
4.1.1.1.2. Coeficientes	52
4.1.1.1.3. Dados experimentais	54
4.1.2. A opção Modelos	55
4.1.2.1. Interface de operação e controle	55
4.1.3. Análises	61
4.1.4. Psicrometria	63
4.1.5. A opção Sobre	65
4.2. Discussão dos resultados	65
4.2.1. Dados simulados versus SASS-PB <sub>ANUM</sub>	66
4.2.1.1. Modelo de Hukill – leito fixo	66
4.2.1.2. Modelo de Thompson – leito fixo	69
4.2.1.3. Modelo de Thompson – fluxo cruzado	71

4.2.1.4. Modelo de Thompson – fluxo concorrente	73
4.2.2. Dados experimentais versus SASS-PB <sub>ANUM</sub>	75
4.2.2.1. Dados experimentais: milho – Yellow-Dent (Becks 65)	75
4.2.2.2. Dados experimentais: Arroz longo	80
4.2.2.3. Dados experimentais: Feijão macassar	87
4.2.3. Análise comparativa entre os modelos	93
4.2.3.1. Análise dos resultados	93
4.2.3.2. Análise de desempenho	93
4.2.4. Dados psicrométricos	94
5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES	96
6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	97
7. REFERÊNCIAS	98
APÊNDICE – A	103
APÊNDICE – B	117

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

AMD	Advanced Micro Devices
Armaz.	Armazenamento
ASAE	American Society of Agricultural Engineers [= Sociedade Americana de Engenheiros Agrícolas.]
ASCII	American Standard Code for Information Interchange [= Código Padrão Americano para Intercâmbio de Informações.]
ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers [= Sociedade Americana de Engenheiros de Calefação,
b.s.	Base seca
b.u.	Base úmida
°C	Grau Censius
CD	Compact Disc [= 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	Database File [= arquivo de dados]
ed.	edição; editor
<i>et al.</i>	Abreviação da locução latina et alii [= e outros]
Exp.	Experimental
f.	folha(s)
GBD	Gerenciamento de Banco de Dados
GPSS	General Purpose Simulation System
GWBASIC	Gee-Whiz Beginners' All-Purpose Symbolic Instruction Code; Graphics and Windows Beginner's All-purpose Symbolic Instruction Code

IAPAR	Instituto Agronômico do Paraná
IBM	International Business Machines
IBM-PC	International Business Machines – Personal Computer
il.	ilustração
Lab.	Laboratório
LAPPA	Laboratório de Armazenamento e Processamento de Produtos Agrícolas
MDX	Multiple Index Files
MG	Estado de Minas Gerais
Minn.	Minnesota
MSU	Michigan State University [= Universidade do Estado de Michigan]
n.	número
MS Visual Basic	Microsoft Visual Basic
p.	página(s)
PB	Estado da Paraíba
Proc.	Processamento
PV	Pressão Parcial do Vapor
PVS	Pressão de Vapor de Saturação
RAM	Random Access Memory [= memória de acesso aleatório]
SASS-PB <sub>ANUM</sub>	Software Aplicado à Simulação de Secagem de Produtos Biológicos – Analítico-Numérico
SBEA	Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola
Simul.	Simulado
TM	Trade Mark [= marca comercial]
UAEA	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

## LISTA DE FIGURAS

<b>FIGURA 2.1</b>	Ilustração da cadeia de produção agrícola	4
<b>FIGURA 2.2</b>	Classificação dos sistemas para fins de modelagem	6
<b>FIGURA 2.3</b>	Fluxograma do modelo de Hukill, leito fixo	13
<b>FIGURA 2.4</b>	Ilustração da camada delgada no modelo de Thompson	14
<b>FIGURA 2.5</b>	Fluxograma do modelo de Thompson, leito fixo	18
<b>FIGURA 2.6</b>	Volume elementar da camada de grãos	21
<b>FIGURA 2.7</b>	Fluxograma do modelo de Michigan, leito fixo	27
<b>FIGURA 2.8</b>	Fluxograma do cálculo psicrométrico: $[T_{bs}, T_{bu}] - [T_{bs}, UR]$	30
<b>FIGURA 3.1</b>	Esquema numérico e volume de controle	38
<b>FIGURA 3.2</b>	Diagrama de encadeamento operacional do SASS-PB <sub>ANUM</sub>	41
<b>FIGURA 3.3</b>	Ligação entre o SASS-PB <sub>ANUM</sub> e o banco de dados.	44
<b>FIGURA 3.4</b>	Diagrama ilustrativo das entidades relacionais, tabelas, utilizadas	44
<b>FIGURA 4.1</b>	Tela inicial de abertura do aplicativo	49
<b>FIGURA 4.2</b>	Tela operacional de opções funcionais	50
<b>FIGURA 4.3</b>	Tela operacional de cadastro de usuário e produto	51
<b>FIGURA 4.4</b>	Tela operacional de inclusão de coeficientes para o modelo de Hukill	52
<b>FIGURA 4.5</b>	Tela de inclusão de coeficientes para o modelo de Michigan	53
<b>FIGURA 4.6</b>	Tela de inclusão de coeficientes para o modelo de Thompson	54
<b>FIGURA 4.7</b>	Tela de inclusão de dados experimentais	54
<b>FIGURA 4.8</b>	Tela funcional para a simulação utilizando o modelo de Hukill	56
<b>FIGURA 4.9</b>	Tela operacional de apresentação dos resultados da simulação	58
<b>FIGURA 4.10</b>	Exemplo de relatório impresso dos dados simulados	59
<b>FIGURA 4.11</b>	Tela operacional de apresentação dos dados operacionais	60
<b>FIGURA 4.12</b>	Tela de apresentação dos resultados obtidos: Cinéticas de secagem	61
<b>FIGURA 4.13</b>	Tela operacional de análise entre os dados experimentais e simulados	61
<b>FIGURA 4.14</b>	Tela de apresentação das cinéticas dos dados experimentais e simulados	62
<b>FIGURA 4.15</b>	Relatório de análise dos dados experimentais e simulados.	63
<b>FIGURA 4.16</b>	Tela operacional para o cálculo das propriedades psicrométricas do ar	64
<b>FIGURA 4.17</b>	Relatório dos dados psicrométricos calculados	64



<b>FIGURA 4.18</b>	Teor de água médio: Modelo de Hukill - leite fixo	68
<b>FIGURA 4.19</b>	Teor de água médio: Modelo de Thompson - leite fixo.	70
<b>FIGURA 4.20</b>	Teor de água médio: Modelo de Thompson - fluxo cruzado.	72
<b>FIGURA 4.21</b>	Teor de água: Modelo de Thompson – fluxo concorrente	74
<b>FIGURA 4.22</b>	Modelo de Thompson: Yellow-Dent: 30% (b.s.) – 47,2°C.	77
<b>FIGURA 4.23</b>	Modelo de Michigan: Yellow-Dent: 30% (b.s.) – 47,2°C.	77
<b>FIGURA 4.24</b>	Modelo de Thompson: Yellow-Dent – 30,1% (b.s.) – 75 °C.	79
<b>FIGURA 4.25</b>	Modelo de Michigan: Yellow-Dent – 30,1% (b.s.) – 75 °C.	80
<b>FIGURA 4.26</b>	Modelo de Thompson: Arroz longo – 22,5 % (b.s.) – 59,1 °C.	82
<b>FIGURA 4.27</b>	Modelo de Michigan: Arroz longo – 22,5 % (b.s.) – 59,1 °C.	83
<b>FIGURA 4.28</b>	Modelo de Thompson: Arroz longo – 24,5 % (b.s.) – 59,2 °C.	84
<b>FIGURA 4.29</b>	Modelo de Michigan: Arroz longo – 24,5 % (b.s.) – 59,2 °C.	85
<b>FIGURA 4.30</b>	Modelo de Thompson: Arroz longo – 20,2 % (b.s.) – 59,4 °C.	86
<b>FIGURA 4.31</b>	Modelo de Michigan: Arroz longo – 20,2 % (b.s.) – 59,4 °C.	86
<b>FIGURA 4.32</b>	Modelo de Thompson: Feijão macassar - 21,5% (b.s.) – 50°C.	89
<b>FIGURA 4.33</b>	Modelo de Michigan: Feijão macassar - 21,5% (b.s.) – 50°C.	89
<b>FIGURA 4.34</b>	Modelo de Thompson: Feijão macassar - 21,5% (b.s.) – 60 °C.	90
<b>FIGURA 4.35</b>	Modelo de Michigan: Feijão macassar - 21,5% (b.s.) – 60 °C.	91
<b>FIGURA 4.36</b>	Modelo de Thompson: Feijão macassar – 21,5 % (b.s.) – 70 °C.	92
<b>FIGURA 4.37</b>	Modelo de Michigan: Feijão macassar – 21,5 % (b.s.) – 70 °C.	92

**LISTA DE TABELAS**

<b>TABELA 4.1</b>	Coeficientes utilizados no modelo de Hukill pelo SASG <sub>W</sub>	66
<b>TABELA 4.2</b>	Coeficientes utilizados no modelo de Hukill pelo SASS-PB <sub>ANUM</sub>	66
<b>TABELA 4.3</b>	Modelo de Hukill: SASG <sub>W</sub> x SASS-PB <sub>ANUM</sub>	67
<b>TABELA 4.4</b>	Modelo de Hukill - Diferenças observadas: SASG <sub>W</sub> x SASS-PB <sub>ANUM</sub>	67
<b>TABELA 4.5</b>	Coeficientes utilizados no modelo de Thompson – leito fixo - SASG <sub>W</sub>	69
<b>TABELA 4.6</b>	Modelo de Thompson – leito fixo: SASG <sub>W</sub> x SASS-PB <sub>ANUM</sub>	70
<b>TABELA 4.7</b>	Coeficientes utilizados no modelo de Thompson – fluxo cruzado – SASS-PB <sub>ANUM</sub>	71
<b>TABELA 4.8</b>	Modelo de Thompson – fluxo cruzado: SASG <sub>W</sub> x SASS-PB <sub>ANUM</sub>	72
<b>TABELA 4.9</b>	Coeficientes usados no modelo de Thompson – fluxo concorrente - SASG <sub>W</sub>	73
<b>TABELA 4.10</b>	Modelo de Thompson – fluxo concorrente: SASG <sub>W</sub> x SASS-PB <sub>ANUM</sub>	74
<b>TABELA 4.11</b>	Coeficientes usados em Michigan – Yellow-Dent	75
<b>TABELA 4.12</b>	Dados experimentais e simulados – Yellow-Dent: 29,8% (b.s.) – 47,2°C.	76
<b>TABELA 4.13</b>	Dados experimentais e simulados: Yellow-Dent – 30,10 % (b.s.) – 75°C.	78
<b>TABELA 4.14</b>	Coeficientes usados em Thompson: Arroz longo – 22,5% (b.s.) – 59,1°C.	81
<b>TABELA 4.15</b>	Coeficientes usados em Michigan: Arroz longo – 22,5% (b.s.) – 59,1°C.	81
<b>TABELA 4.16</b>	Dados experimentais e simulados: Arroz longo – 22,5% (b.s.) – 59,1°C	82
<b>TABELA 4.17</b>	Dados experimentais e simulados: Arroz longo – 24,5% (b.s.) – 59,2°C.	83
<b>TABELA 4.18</b>	Dados experimentais e simulados: Arroz longo – 20,2% (b.s.) – 59,4°C.	85
<b>TABELA 4.19</b>	Coeficientes usados em Thompson: Feijão macassar	87
<b>TABELA 4.20</b>	Coeficientes usados em Michigan: Feijão macassar	87
<b>TABELA 4.21</b>	Dados experimentais e simulados: Feijão macassar – 21,5% (b.s.) – 50 °C.	88

<b>TABELA 4.22</b>	Dados experimentais e simulados: Feijão macassar– 21,5% (b.s.) – 60°C.	90
<b>TABELA 4.23</b>	Dados experimentais e simulados: Feijão macassar –21,5% (b.s.) – 70°C.	91
<b>TABELA 4.24</b>	Propriedades psicrométricas do ar – $P_{\text{atm}} = 760$ mmHg.	94
<b>TABELA 4.25</b>	Propriedades psicrométricas do ar – $P_{\text{atm}} = 695,10$ mmHg.	95
<b>TABELA 4.26</b>	Propriedades psicrométricas para o ar aquecido – $P_{\text{atm}} = 695,10$ mmHg.	96

## NOMENCLATURA

$a$	Área específica, $m^2 m^{-3}$ ;
$a_w$	Atividade de água, adimensional;
$A$	Constante que depende do produto;
$A_1, A_2, \dots, A_8$	Constantes que dependem do produto, da temperatura e/ou do teor de água;
$A_{psi}$	Constante que depende da temperatura;
$B$	Constante que depende do produto;
$B_1, B_2, \dots, B_8$	Constantes que dependem do produto, da temperatura e/ou do teor de água;
$C$	Constante que depende do produto;
$c$	Taxa de resfriamento do ar, W;
$c_a$	Calor específico da água, $kJ kg^{-1} K^{-1}$ ;
$c_v$	Calor específico do vapor de água, $kJ kg^{-1} K^{-1}$ ;
$c_w$	Calor específico da água no estado líquido, $kJ kg^{-1} K^{-1}$ ;
$C_m$	Camada;
$c_p$	Calor específico do produto, $kJ kg^{-1} K^{-1}$ ;
$D$	Constante que depende do produto;
$dy$	Diferencial de distância, m;
$D_{ap}$	Adimensional de profundidade;
$D_m$	Massa específica das sementes, (kg de matéria seca) $m^{-3}$ ;
$E$	Constante que depende do produto;
$E_{nt}$	Entalpia do ar, $kJ kg^{-1}$ ;
$e_a$	Densidade do ar, $kg m^{-3}$ ;
$e_p$	Entalpia específica do produto, $kJ kg^{-1} K^{-1}$ ;
$E_{rel}$	Erro relativo, %;
$F$	Constante que depende do produto;
$G_{ar}$	Fluxo do ar de secagem, $m^3 min^{-1} m^{-2}$ ;

$G_m$	Fluxo de massa, (kg de ar seco) $h^{-1}$ ;
$H$	Espessura da camada de grãos, m;
$H_x$	Distância da entrada do ar até a base da camada de grãos, m;
$h$	Coefficiente de transferência de calor por convecção, $W m^{-2} K^{-1}$ ;
$h_{ar}$	Razão de mistura do ar, [kg de água (kg de ar seco) $^{-1}$ ];
$h_{bu}$	Razão de mistura do ar, bulbo úmido, [kg de água (kg de ar seco) $^{-1}$ ];
$h_{fg}$	Calor latente de vaporização da água do produto, $kJ kg^{-1}$ ;
$h_{fg1}, h_{fg2}$	Constantes que dependem da unidade, $kJ kg^{-1}$ ;
$i_{ter}$	Número máximo de iterações, decimal;
$k_a$	Condutividade térmica do ar, $W m^{-1} K^{-1}$ ;
$K_p$	Constante que depende do produto;
$L$	Espessura da camada de secagem, m;
$ln$	Logaritmo neperiano;
$np_y$	Número de pontos nodais, decimal;
$P$	Constante que depende das condições de secagem;
$P_{atm}$	Pressão atmosférica, $N m^{-2}$ ;
$P_v$	Pressão de vapor à temperatura ambiente, $N m^{-2}$ ;
$P_{vs}$	Pressão de vapor à temperatura ambiente, $N m^{-2}$ ;
$P_{MS}$	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, $kJ$ ;
$Q'$	Calor sensível, $kJ$ ;
$Q_a$	Fluxo de massa, $kg s^{-1} m^{-2}$ ;
$R_c$	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 $\Delta t$ , (kg de matéria seca) (kg de ar seco) $^{-1}$ ;
$R_{op}$	Densidade aparente;

$R_p$	Constante que depende do produto;
$R_r$	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;
$Sdy$	Volume diferencial;
$t$	Tempo, em hora, minuto ou segundo;
$T$	Temperatura do ar, K;
$T_{aq}$	Temperatura do ar aquecido, K;
$T_{ar}$	Temperatura do ar, K;
$T_{bs}$	Temperatura de bulbo seco, K;
$T_{bu}$	Temperatura de bulbo úmido do produto, K;
$T_e$	Temperatura de equilíbrio, K;
$t_{eq}$	Tempo equivalente, hora ou minuto;
$T_f$	Temperatura final do ar, K;
$T_g$	Temperatura do grão, K;
$t_{max}$	Tempo máximo, hora, minuto ou segundo;
$t_{mr}$	Tempo de meia resposta, hora ou minuto;
$T_o$	Temperatura inicial do produto, K;
$T_p$	Temperatura do produto, K;
$T_q$	Temperatura do ar aquecido, K;
$UR$	Umidade relativa do ar, decimal;
$UR_e$	Umidade relativa de equilíbrio para o produto no reumedecimento, em %;
$v$	Volume, m <sup>3</sup> ;
$V$	Velocidade, m s <sup>-1</sup> ;
$V_a$	Velocidade do ar, m s <sup>-1</sup> ;
$V_{esp}$	Volume específico, m <sup>3</sup> kg <sup>-1</sup> ;

$W_a$	Razão de água do ar, adimensional;
$X$	Teor de água, % base seca ou base úmida;
$X_a$	Umidade absoluta do ar, decimal;
$X_{bu}$	Teor de água em base úmida, decimal;
$X_e$	Teor de água de equilíbrio, base seca, decimal;
$X_{exp}$	Teor de água experimental, b.s., b.u., % ou decimal;
$X_f$	Teor de água final, % ou decimal;
$X_o$	Teor de água inicial, base seca, % ou decimal;
$X_{sim}$	Teor de água simulado, b.s., b.u., % ou decimal;
$Y_p$	Profundidade da camada de sementes, m;
$Z$	Distância do ponto de entrada do ar até o grão, m;
$\delta l$	Altura da camada fina, m;
$\delta t$	Intervalo de tempo de secagem, hora, minuto ou segundo;
$\delta X$	Variação do teor de água;
$\Delta h_{fg}$	Variação do calor latente de vaporização da água do produto, $\text{kJ kg}^{-1}$ ;
$\Delta RX$	Variação da razão do teor de água do ar de secagem, adimensional;
$\Delta t$	Incremento de tempo de secagem, hora ou minuto;
$\Delta T_p$	Variação de temperatura do produto, K;
$\Delta X$	Variação do teor de água, base seca, % ou decimal;

#### **Letras Gregas**

$\varepsilon$	Porosidade do produto, % ou decimal;
$\theta$	Temperatura do produto, K;
$\rho$	Massa específica, $\text{kg m}^{-3}$ ;
$\rho_a$	Massa específica do ar, $\text{kg m}^{-3}$ ;
$\rho_p$	Massa específica do produto, $\text{kg m}^{-3}$ .

## RESUMO

Este trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de um programa computacional para a simulação do processo de secagem de produtos biológicos; disponibiliza, num único módulo operacional, os modelos de simulação já consolidados, associados a um banco de dados especificamente modelado, que se prestará tanto à simulação quanto ao gerenciamento de informações oriundas de experimentações. Com base nas equações para determinação de equilíbrio higroscópico, camada fina, razão de conversão, calor específico do produto e calor latente de vaporização da água do produto, foi modelado um banco de dados que permite aos usuários (técnicos, pesquisadores, estudantes, professores) o estudo, a análise ou a experimentação de qualquer produto biológico. Estão disponíveis os seguintes modelos: de Hukill, aplicado ao secador de leito fixo; de Thompson, aplicado aos secadores de leito fixo, fluxo cruzado e fluxo concorrente; e de Michigan, aplicado aos secadores de leito fixo e de fluxo cruzado, com solução numérica por volumes finitos. No aplicativo, toda a formulação matemática e os coeficientes estão dispostos em meio externo, não sendo necessárias modificações, edições ou recompilações. No modelo de Michigan, podem-se variar o número de pontos nodais, o número máximo de iterações e/ou o tempo máximo. A metodologia utilizada possibilita que se associem usuário(s), produto(s), modelo utilizado, as equações e seus coeficientes, as condições de secagem, os resultados experimentais obtidos e a análise dos resultados de secagem. Essa dinâmica operacional mostrou-se eficiente e prática, tanto na repetição de experimentos, quanto nos tempos de apresentação dos resultados. A reutilização de dados é um fator importante, uma vez que toda a gama de informações é armazenada, dispensando a utilização de ações repetitivas que maximizam erros.

**Palavras-Chaves:** Modelo de Thompson. Modelo de Hukill. Modelo de Michigan. Simulação. Secagem. Produtos Biológicos.



## ABSTRACT

The objective of this work is the development of a computational program for the simulation of the drying process of biological products. It offers, in a single operating module, the simulation models already consolidated, associated with a database specifically modeled, which provide both simulation and managing information from drying tests. Based on the equations to determine hygroscopic equilibrium, thin layer, conversion ratio, specific heat and latent heat of vaporization of water of the product, a database was modeled that allows users (technical staff, researchers, students, teachers) to study, analyze or test any biological product. The following models are available: Hukill applied to fixed-bed dryers; Thompson applied to fixed-bed, crossflow and concurrent-flow dryers; Michigan, applied to fixed-bed and crossflow dryers with numerical solution by finite volume methods. In the application, all mathematical formulation and coefficients are externally arranged, in such a way that modifications, edits or recompilations are not necessary. In the Michigan drying simulation model, the number of nodal points, the maximum number of iterations and/or the maximum time can be varied. The methodology used allows joining user(s), product(s), model used, the equations and their coefficients, the drying conditions, the experimental results obtained and the analysis of the drying results. Reusing data is an important factor, since the full range of information is stored, eliminating the use of repetitive actions that maximize errors.

**Keywords:** Thompson Model. Hukill Model. Michigan Model. Drying. Simulation. Biological products.

## 1. INTRODUÇÃO

A população mundial atingiu o expressivo número de sete bilhões de pessoas. Com vistas a suprir a exponencial demanda por alimentos, especificamente grãos, é que se faz necessária a busca por novas tecnologias que possibilitem a otimização de toda a cadeia metodológica da produção de alimentos: Plantio, Colheita, Secagem, Armazenamento e Distribuição.

A secagem de grãos e sementes, além de representar um custo equivalente a 12% da energia total gasta nos sistemas de pós-colheita, é um processo de fundamental importância, pois prepara o produto para a armazenagem e exerce uma forte influência na manutenção da sua qualidade durante o período de conservação, porque o baixo teor de água diminui a atividade biológica do produto e inibe as atividades microbianas associadas (CAVALCANTI MATA, 2006).

A exemplo dos demais processos da cadeia de produção, a secagem é uma atividade que precisa ser prevista, dimensionada e planejada. Neste contexto, faz-se necessário para qualquer engenheiro projetista, pesquisador, administrador ou produtor, a utilização de uma ferramenta específica, programa computacional, voltado à atividade que, objetivando otimizar, possibilite utilização semi-imediata sem a necessidade de aporte de conhecimentos exteriores, e que permita simular este processo de secagem de modo a prever, sob as condições próprias de uma região, o melhor tipo de secador e as condições específicas de secagem, além do tempo necessário para realizá-la.

Os programas de simulação têm como objetivo prever a realidade, fazendo-se necessário, para tanto, o conhecimento do processo físico e o modelo matemático que o representa. Neste contexto a simulação lógica, programa computacional, baseada em modelos matemáticos deve ser consubstanciada com dados reais.

Para a simulação de secagem de grãos e sementes, os modelos até então desenvolvidos são os de HUKILL (1947), de THOMPSON (1967) e o modelo desenvolvido pela Universidade de MICHIGAN (1974), descritos por BROOKER *et al.* (1992). Os dois primeiros modelos são baseados em equações algébricas de balanço de calor e massa com soluções analíticas; para o modelo de Michigan as determinações de

transferência de calor e massa estão dispostas em equações diferenciais, com solução numérica.

Os programas computacionais, até o momento, foram desenvolvidos para atender produtos (grãos) e secadores específicos. As equações que regem a simulação têm valores específicos referentes aos produtos a serem simulados e para cada nova variedade e ou novo produto, torna-se necessário reconfigurar o programa e realizar nova compilação. Esta realidade exige que o programador conheça o algoritmo nos seus mínimos detalhes e possa redesenhá-lo para atender as especificações de uma nova variedade e ou produto (DANTAS *et al.*, 2011).

Para solucionar este problema a finalidade desta pesquisa concentra-se na efetiva possibilidade de se poder trabalhar com quaisquer produtos biológicos, ao mesmo tempo em que disponibiliza ao usuário, a opção entre modelos com solução analítica e/ou solução numérica, sem a necessidade de se modificar ou desenvolver novos softwares cativos ou particulares, associados a um único produto, grão ou modelo de secagem. Para tanto, está sendo introduzido o conceito de Banco de Dados Relacional, que possibilitará ao(s) usuário(s) a criação de uma base de informações com o resultado das simulações já efetuadas, associadas a um determinado produto e modelo utilizado.

Com a adoção da metodologia supracitada colocar-se-á à disposição dos técnicos, engenheiros, projetistas, produtores, e estudantes, uma ferramenta de gerenciamento de informações só disponível em aplicações de porte administrativo. Outra inovação proposta, é a disponibilização nesse módulo computacional a possibilidade de incluir/alterar/excluir os coeficientes necessários às determinações do calor específico, calor latente de vaporização, equações do teor de água de equilíbrio e a equação de camada fina, sem a necessidade da utilização de softwares exteriores ou complementares aos processos de simulação, possibilitando a escolha do método que melhor represente a secagem do produto em análise.

### **1.1. Objetivo geral**

O objetivo é o desenvolvimento de um Programa computacional, SASS-PB<sub>ANUM</sub> (Software Aplicado à Simulação de Secagem de Produtos Biológicos - Analítico-Numérico), para a simulação de secagem de produtos biológicos, disponibilizando em

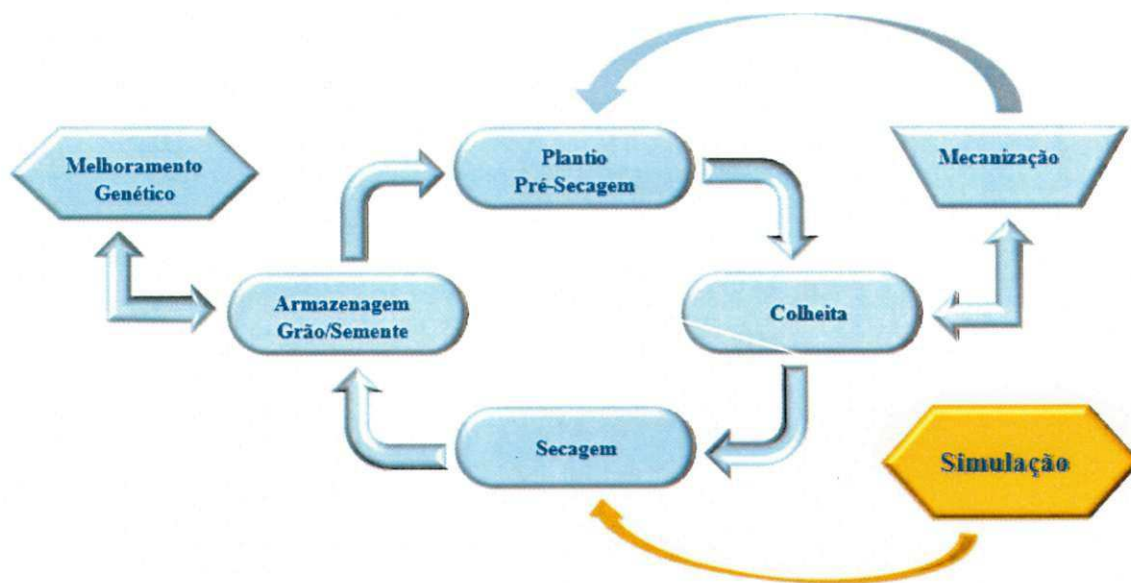
um único módulo operacional, os modelos de simulação já consolidados, associados a um banco de dados especificamente modelado, que se prestará tanto à simulação quanto ao gerenciamento de informações oriundas de experimentações.

## **1.2. Objetivos específicos**

- Modelagem de um banco de dados destinado à guarda e gerenciamento das informações necessárias à simulação de secagem de produtos biológicos, que possibilite desde a identificação do usuário, até as diferenças e desvios observados entre os dados experimentais e os obtidos com as simulações, associando-os: ao produto(s), modelo(s), equações e coeficientes utilizados; e condições de secagem.
- Implementar os modelos de simulação de: Hukill para leito fixo; Thompson para leito fixo, fluxo cruzado e fluxo concorrente; Michigan para o secador de leito fixo e fluxo cruzado (solução numérica por volumes finitos), possibilitando a simulação de secagem de produtos biológicos;
- Desenvolver um módulo para determinação das propriedades psicrométricas e termofísicas do ar, com opções de saída-visualização para relatório;
- Validar o SASS-PB<sub>ANUM</sub> com dados experimentais de milho, arroz e feijão macassar.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

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 2.1. 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 (DANTAS, 2007).-



**Figura 2.1** – Ilustração da cadeia de produção agrícola

A simulação tem sido, ao longo do tempo, 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, otimização e utilização de recursos, etc... Qualquer que seja o seu alvo, a simulação deve estar consubstanciada de todo o embasamento técnico-científico a ela associada (DANTAS, 2007).

## **2.1. Sistemas e modelos de simulação**

GAVIRA (2003) afirma que a simulação é uma das técnicas da Pesquisa Operacional, cujo objetivo principal é a criação de modelos adequados à tomada racional de decisões. Com o avanço dos métodos computacionais, esta é a que mais se desenvolveu. Segundo o mesmo autor, Pesquisa Operacional é a aplicação do método científico, por equipes multidisciplinares, a problemas que dizem respeito ao controle de sistemas organizados (homem-máquina), com a finalidade de obter as soluções que melhor satisfaçam aos objetivos da organização como um todo.

FREITAS FILHO (2008) afirma que são muitas as definições de simulação. De acordo com Schriber citado pelo mesmo autor, que foi um dos desenvolvedores do GPSS, primeira linguagem comercial voltada à simulação de sistemas, no clássico *Simulation Using GPSS*, “simulação implica na modelagem de um processo ou sistema, de tal forma que o modelo imite as respostas do sistema real, numa sucessão de eventos que ocorrem ao longo do tempo”. FREITAS FILHO (2008) afirma que esta definição não especifica que o modelo deva ser computacional, uma vez que à época era comum a utilização de modelos analógicos e físicos para se estudar e analisar o comportamento de sistemas. De acordo com o mesmo autor, hoje, simulação é quase sinônimo de simulação computacional. Contudo, Shannon em 1975, citado pelo mesmo autor, definiu, já naquela época, que “modelo computacional é um programa de computador cujas variáveis apresentam o mesmo comportamento dinâmico e estocástico do sistema real que representa”. A partir desta definição, PEGDEN *et al.* (1990) apresentam uma definição mais completa, abrangendo todo o processo de simulação onde ele cita que: “simulação é o processo de projetar um modelo computacional a partir de um sistema real e conduzir experimentos com este modelo com o propósito de entender seu comportamento e/ou avaliar estratégias para sua operação”. Ainda segundo FREITAS FILHO (2008), a simulação tem sido cada vez mais aceita e empregada como uma técnica que permite aos analistas dos mais diversos segmentos verificarem ou encaminharem soluções, com a profundidade desejada, aos problemas com os quais lidam diariamente.

### 2.1.1. Classificação dos sistemas para modelagem e simulação

De maneira geral, com o propósito de modelar e simular, os sistemas podem ser classificados como: estáticos ou dinâmicos, contínuos ou discretos, determinísticos ou aleatórios, conforme ilustrado na Figura 2.2. Os modelos de simulação de secagem se enquadram na classificação de sistema dinâmico-determinístico-contínuo, uma vez que as variáveis de estado que os representam se modificam no decorrer do tempo; determinístico, posto que as variáveis de entrada são conhecidas e predeterminadas, gerando um único conjunto de dados de saída esperado; contínuo, pois as mudanças de estado podem variar continuamente ao longo do tempo.



**Figura 2.2** – Classificação dos sistemas para fins de modelagem.

### 2.1.2. Equações matemáticas representantes dos modelos

TRIVELATO (2003) afirma que as equações que representam os modelos podem ser classificadas como: Algébricas, quando as relações são representadas só por operações algébricas; Diferenciais, quando as relações são representadas por operações algébricas e diferenciais; Integrais, quando as relações são representadas por operações algébricas e integrais. Essas equações ainda podem ser classificadas segundo os mesmos princípios utilizados para classificar os sistemas: lineares ou não lineares; equações ordinárias ou parciais; de parâmetros variantes ou invariantes no tempo;

determinísticas ou estocásticas; e contínuas ou discretas no tempo (a diferenças finitas). Como exemplo desta classificação, tem-se os modelos de Hukill e Thompson, com formulação algébrica e solução analítica e o modelo de Michigan, à equações diferenciais como descrito por BROOKER *et al.* (1992), com solução numérica, por volumes finitos.

## **2.2. Modelos de simulação de secagem**

O primeiro modelo de simulação de secagem de grãos foi proposto por Hukill em 1947, aplicado ao secador de leito fixo. A este trabalho seguiu-se o modelo desenvolvido por Thompson em 1967. Este modelo é aplicado aos secadores de leito fixo, secador de fluxo cruzado e secador de fluxo concorrente. MOREY *et al.* em 1978, aperfeiçoaram o modelo de Thompson, adaptando-o à secagem a baixas temperaturas, a partir da 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 (CAVALCANTI MATA *et al.*, 2006).

Em 1974 diversos autores trabalharam no desenvolvimento de um modelo diferencial denominado de modelo da *Michigan State University* (MSU).

### **2.2.1. Histórico**

Com o processamento centralizado basicamente nas Universidades Públicas, tem início o trabalho de implementação computacional destes modelos. No Brasil, o primeiro trabalho de simulação computacional, aplicada à simulação de secagem de grãos, 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 programáveis. 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. CANAPPELE (1993) desenvolveu um simulador baseado no modelo de Thompson para o arroz longo. Essa implementação utilizou a Linguagem de Programação Turbo Pascal versão 5.5. CAVALCANTI MATA *et al.* (1999) implementaram, em um único módulo computacional, os modelos de Thompson e



Hukill para os produtos: milho, cacau, soja, trigo, arroz e café. Foi utilizada a Linguagem de Programação Clipper 87, baseado na tecnologia IBM-PC. FIOREZE (2004) implementou um simulador de secagem para raspa da mandioca a partir do modelo de Thompson modificado, utilizando a Linguagem de Programação GwBasic. FARIAS *et al.* (2004) desenvolveram uma solução numérica para a simulação de secagem para milho, a partir do modelo de Michigan, que permite a determinação da condensação da água durante o processo de secagem, utilizando a ferramenta computacional Mathematica®. SOUSA (2004) desenvolveu um aplicativo voltado à simulação de secagem de feijão macassar com análise da contração volumétrica – SOFEIMA – utilizando a linguagem Delphi 3.0. VITORINO (2009) implementou o VertiSec no MS Visual Basic.

Observa-se, no transcurso da construção deste conhecimento, que a implementação, codificação em linguagem de programação, dos modelos de simulação de secagem, segue a evolução da tecnologia e a consequente capacitação pessoal do(s) desenvolvedor(es). RODRIGUES *et al.* (2008) e MARTINAZZI *et al.* (2007) desenvolveram trabalhos de simulação aplicados a frutas e folhas. GOYALDE *et al.* (2009), aplicam a modelagem matemática a secagem de cana de açúcar. Como suplemento a simulação de secagem, introduz-se a análise de encolhimento do grão estudado, a exemplo de CORREA *et al.* (2011).

A pesquisa e a consequente otimização no âmbito dos métodos numéricos, tem sido utilizados à solução das equações do modelo de Michigan: MARTINS (1982) utilizou o método de linhas; OLIVEIRA (2006), HOLANDA (2007) e NOVAES (2010) utilizaram o método de volumes finitos. PETRY (2007) utilizou como solução o método de diferenças finitas; AMARAL *et al.* (2010) utilizaram elementos finitos.

Concomitantemente, foram formuladas novas equações de determinação do teor de água de equilíbrio, como as citadas por PICELLI *et al.* (2009), que objetivam um melhor ajuste a determinado produto. HENAO *et al.* (2009), elencam equações que melhor representam a secagem de café cereja. Este mesmo aprimoramento é estendido às equações de camada fina, como apresentado por CORRÊA *et al.* (2007) na análise de secagem de feijão, assim como RESENDE *et al.* (2008). PONTES *et al.* (2009) elencam equações de camada fina utilizadas na secagem de pimenta de cheiro. RODRIGUES *et al.* (2008) utilizam o modelo de Thompson à simulação de secagem de abacaxi.

### **2.2.2. Simulação digital e banco de dados**

DANTAS (2007) afirma que a implementação algorítmica de um modelo matemático não encerra, por si só, o problema. Mesmo que a captação, o processamento e a apresentação dos 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 arquivos particulares ou nativos; tipo texto, 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 prática diária, no entanto, 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 o aplicativo de mecanismos que possibilitem ao usuário o maior rendimento no menor tempo possível. Faz-se necessária, a adoção de ferramentas adjuvantes, que possibilitem a efetiva posse e racional utilização dos dados obtidos (DANTAS, 2007).

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.

A utilização do conceito de Banco de Dados Relacional, é outro ponto de importante inovação. Até então, as aplicações voltadas a este segmento da área científica baseiam os dados 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) (DANTAS, 2007).

DANTAS (2007) apresentou o modelo de Thompson – camada fixa, onde as equações regentes do processo têm os seus coeficientes não particularizados. Essa extensão será ampliada à secagem em fluxo cruzado e fluxo concorrente para os modelos objeto do presente trabalho. A mesma metodologia é estendida ao modelo de Hukill, secagem em camada fixa apresentado por CAVALCANTI MATA *et al.* (1999), e ao modelo de Michigan para secagem em fluxo cruzado e camada fixa, como apresentados por HOLANDA (2007) e NOVAES (2010).

### 2.2.3. Modelo de Hukill

CAVALCANTI MATA *et al.* (2006), descrevem que o modelo de Hukill parte da predição de que a taxa de secagem é proporcional à diferença entre as temperaturas do ar, imediatamente acima e abaixo de uma camada fina, considerando como desprezíveis as trocas de calor nas paredes do secador e a mudança do calor sensível das sementes.

$$\frac{\partial X}{\partial t} = P \frac{\partial T}{\partial H} \quad (1)$$

onde:

$\partial X$  – variação do teor de água, % base seca;

$\partial t$  – intervalo de tempo, h;

$\partial T$  – variação da temperatura do ar, K;

$\partial H$  – variação da espessura da camada de grãos, m;

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

$$P = \frac{G_m c_p}{D_m h_{fg}} \quad (2)$$

em que:

$G_m$  – fluxo de massa do ar, (kg. de ar seco) h<sup>-1</sup>;

$c_p$  – calor específico do produto, J K<sup>-1</sup>;

$D_m$  – massa específica da semente, (kg de matéria seca) m<sup>-3</sup>;

$h_{fg}$  – calor latente de vaporização da água do produto, J kg<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>;

A relação entre o teor de água dos grãos e o tempo durante os processos de secagem em camada fina é expressa por:

$$(X - X_e) = (X_o - X_e) \exp(-K_p t) \quad (3)$$

em que

X – teor de água do produto, no tempo (t) e altura (H), % base seca;

X<sub>o</sub> – teor de água inicial, % base seca;

X<sub>e</sub> – teor de água de equilíbrio, % base seca;

K<sub>p</sub> – coeficiente que depende do produto;

t – tempo de secagem, h

A variação que ocorre na temperatura do ar de secagem sobre a camada fina, é descrita por:

$$(T_H - T_p) = (T_o - T_p) \exp(-R_p H_x) \quad (4)$$

em que

$T_H$  – temperatura do ar a uma distância (H) da entrada do ar, K;

$T_p$  – temperatura do grão, K;

$T_o$  – temperatura do ar de secagem na entrada do secador, K;

$H_x$  – distância da entrada do ar até a base da camada grãos, m;

$R_p$  – constante que depende do produto.

Hukill encontrou duas expressões: uma para calcular o teor de água (X); outra para calcular a temperatura do ar. Ambas as equações, em função do tempo (t) e da espessura da camada (H), obedecendo as condições iniciais e de contorno descritas à sequência.

1<sup>a</sup>: ( $t = 0, X = X_o$ ); 2<sup>a</sup>: ( $t \rightarrow \infty, X = X_e$ ); 3<sup>a</sup>: ( $H = 0, T = T_o$ ); 4<sup>a</sup>: ( $X \rightarrow X_e, T_p = T$ )

Para essas condições, as expressões são:

$$X = (X_o - X_e) \frac{e^{C_x H_x}}{e^{C_x H_x} + e^{K_p t} - 1} + X_e \quad (5)$$

$$T = (T_o - T_p) \frac{e^{K_p t}}{e^{C_x H_x} + e^{K_p t} - 1} + T_p \quad (6)$$

onde

$$C_x = \frac{K_p (X_o - X_e)}{P (T_o - T_p)} \quad (7)$$

A razão de teor de água (RX), é definida como sendo:

$$RX = \frac{X - X_e}{X_o - X_e} \quad (8)$$

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

$$Y_p = \frac{t}{t_{mr}} \quad (9)$$

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

$$t_{mr} = \exp\{[0,003325 - (0,00073412 \cdot X_o)T] + 2,412584 - (0,0156482 X_o)\} \quad (10)$$

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:

$$D_{ap} = \frac{H D_m h_{fg} (X_o - X_e)}{6000 G_{ar} c_p t_{mr} (T_o - T_e)} \quad (11)$$

em que

$G_{ar}$  – fluxo do ar de secagem,  $m^3 \text{ min}^{-1} m^{-2}$ ;

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

$$RX = \frac{2^{D_{ap}}}{2^{D_{ap}} - 2^{Y_p} - 1} \quad (12)$$

A Figura 2.3 contém o fluxograma ilustrativo do modelo de Hukill. Utiliza-se nesta ilustração, uma representação das macro operações envolvidas.

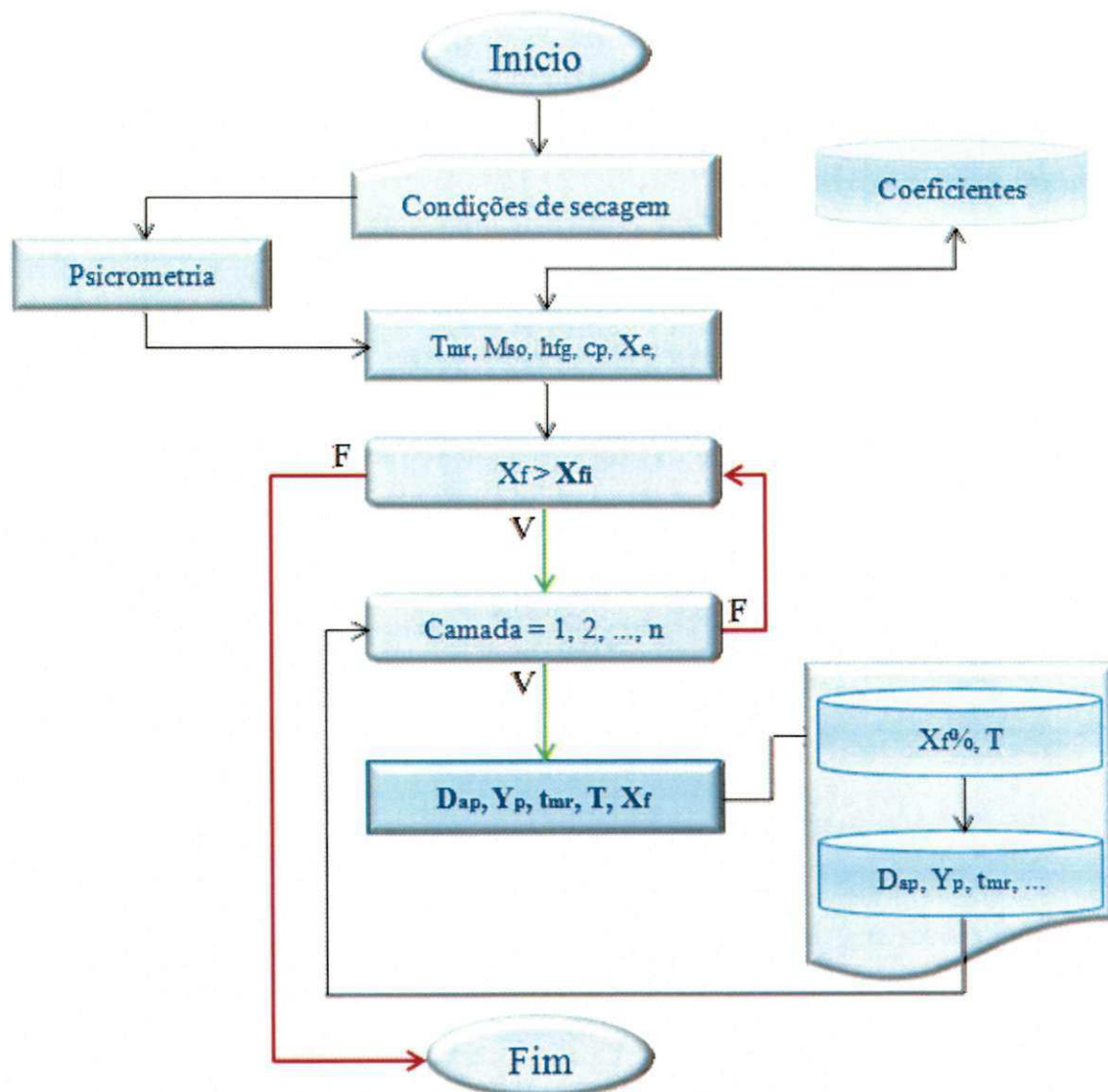
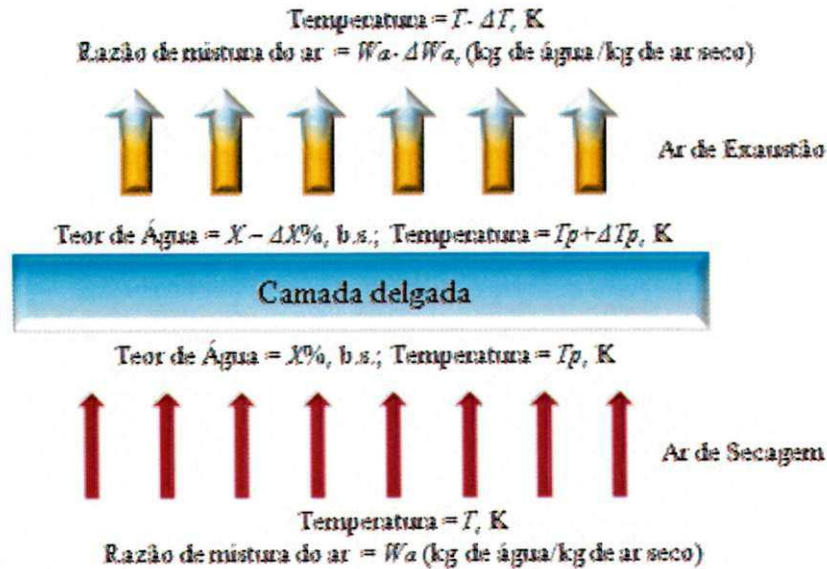


Figura 2.3 – Fluxograma do modelo de Hukill, leito fixo.

#### 2.2.4. Modelo de Thompson

Thompson propôs um modelo de simulação de secagem a partir das condições do ar de secagem, do grão, da espessura da camada e do teor de água inicial do produto. 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. A Figura 2.4 contém uma ilustração desses processos.

Durante um intervalo de tempo,  $\Delta t$ , uma quantidade de água,  $\Delta X$ , é evaporada e transportada pelo ar, que aumenta sua razão de mistura ou umidade absoluta,  $W_a$ , para  $W_a + \Delta W_a$ . Durante a secagem, a temperatura do ar diminui de um valor  $\Delta T$  proporcional ao aumento de temperatura do grão,  $\Delta T_p$ , e ao resfriamento evaporativo, que acompanha a remoção de água.



**Figura 2.4** – Ilustração da camada delgada no modelo de Thompson.

Segundo CAVALCANTI MATA (2012), considera-se como camada fina, a quantidade de grãos suficientes para cobrir a superfície da área de secagem em uma superposição de até 3 grãos. Este entendimento ajusta-se à natureza e comportamento termofísico dos componentes envolvidos.

O modelo de Thompson é construído a partir da seguinte formulação:

a) Equação de camada fina:

$$t_{eq} = A \ln(RX) + B[\ln(RX)]^2 \quad (20)$$

onde

$t_{eq}$  – tempo equivalente, h;

$A, B$  – constantes que dependem do produto e da temperatura;

$RX$  – razão do teor de água, adimensional

b) 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.

c) 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, K;

$T_{ar}$  – temperatura do ar, K.

d) O teor de água de equilíbrio do produto, em uma determinada condição do ar de secagem, é dado por:

$$(1 - UR) = \exp[-A_1(T + A_2)X_e^{A_3}] \quad (23)$$

onde

$UR$  – umidade relativa do ar, decimal;

$A_1, A_2, A_3$  – constantes que dependem do produto;

$T$  – temperatura do ar, K.

e) O calor latente de vaporização da água do produto é dado por:

$$h_{fg} = (h_{fg1} - h_{fg2}T)[1 + A_1 \exp(-A_2 X_e)] \quad (24)$$

onde

$h_{fg}$  – calor latente de vaporização,  $\text{kJ kg}^{-1}$ ;

$A_1, A_2$  – constantes que dependem da temperatura e do produto;

$h_{fg1}, h_{fg2}$  – constantes que dependem da unidade,  $\text{kJ kg}^{-1}$ ;

$X_e$  – teor de água de equilíbrio, base seca ou base úmida, decimal.



f) O calor específico do produto é representado pela equação:

$$c_p = A_1 + A_2 X \quad (25)$$

onde

$c_p$  – calor específico do produto,  $\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ ;

$A_1, A_2$  – constantes que dependem da temperatura e do produto;

g) Temperatura do ar de secagem

A temperatura de equilíbrio entre o ar de secagem e o produto é determinada pela 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 determinou a seguinte expressão, utilizando o balanço de calor:

$$T_e = \frac{(A_1 + A_2 RX)T_{ar} + c_p T_p}{A_1 + A_2 RX + c_p} \quad (26)$$

onde

$A_1, A_2$  – constantes que dependem da temperatura e do produto;

$RX$  – razão do teor de água, adimensional;

$T_{ar}$  – temperatura do ar antes da secagem, K;

$c_p$  – calor específico do produto,  $\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ ;

$T_p$  – temperatura do grão antes da secagem, K;

$T_e$  – temperatura de equilíbrio, K

h) 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  $X_e$  é calculado usando a temperatura de equilíbrio da seguinte forma:

$$X_e = \left[ \frac{-\ln(1 - UR)}{A_1(T_e + A_2)} \right]^{1/A_3} \quad (27)$$

Em um processo de secagem em camada espessa, a temperatura do ar de secagem  $T_{ar}$ , em uma dada localização da camada de grãos, muda com o processo de secagem. Thompson usou o tempo de secagem equivalente dado pela Equação (20), 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,  $\Delta t$ . O teor de água final da camada foi, portanto, calculado pela razão de água.

i) Temperatura final do ar e do grão

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

$$T_f = \frac{(A_1 + A_2 X_o) T_e - [\Delta X (A_3 + \Delta h_{fg} - c_w T_p) + c_p T_p]}{A_1 + (A_2 X_f) + c_p} \quad (28)$$

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

$X_f$  – teor de água final, base seca, decimal;

$R_c$  – 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  $\Delta t$ , (kg de matéria seca) (kg de ar seco)<sup>-1</sup>;

$G_{ar}$  – fluxo do ar de secagem, m<sup>3</sup> min<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>

j) Tratamento da condensação

O modelo de Thompson, no algoritmo apresentado por QUEIROZ *et al.* (1982), trata a condensação a partir de balanços que envolvem: temperatura de secagem, o volume específico - determinado, pressão de vapor, a pressão de vapor de saturação e a

umidade relativa. Esta sequência operacional condicionada é parte integrante do algoritmo implementado.

A Figura 2.5 contém o fluxograma ilustrativo do modelo de Thompson, para secador em leito fixo. O bloco que representa o tratamento da condensação, está no destaque em azul.

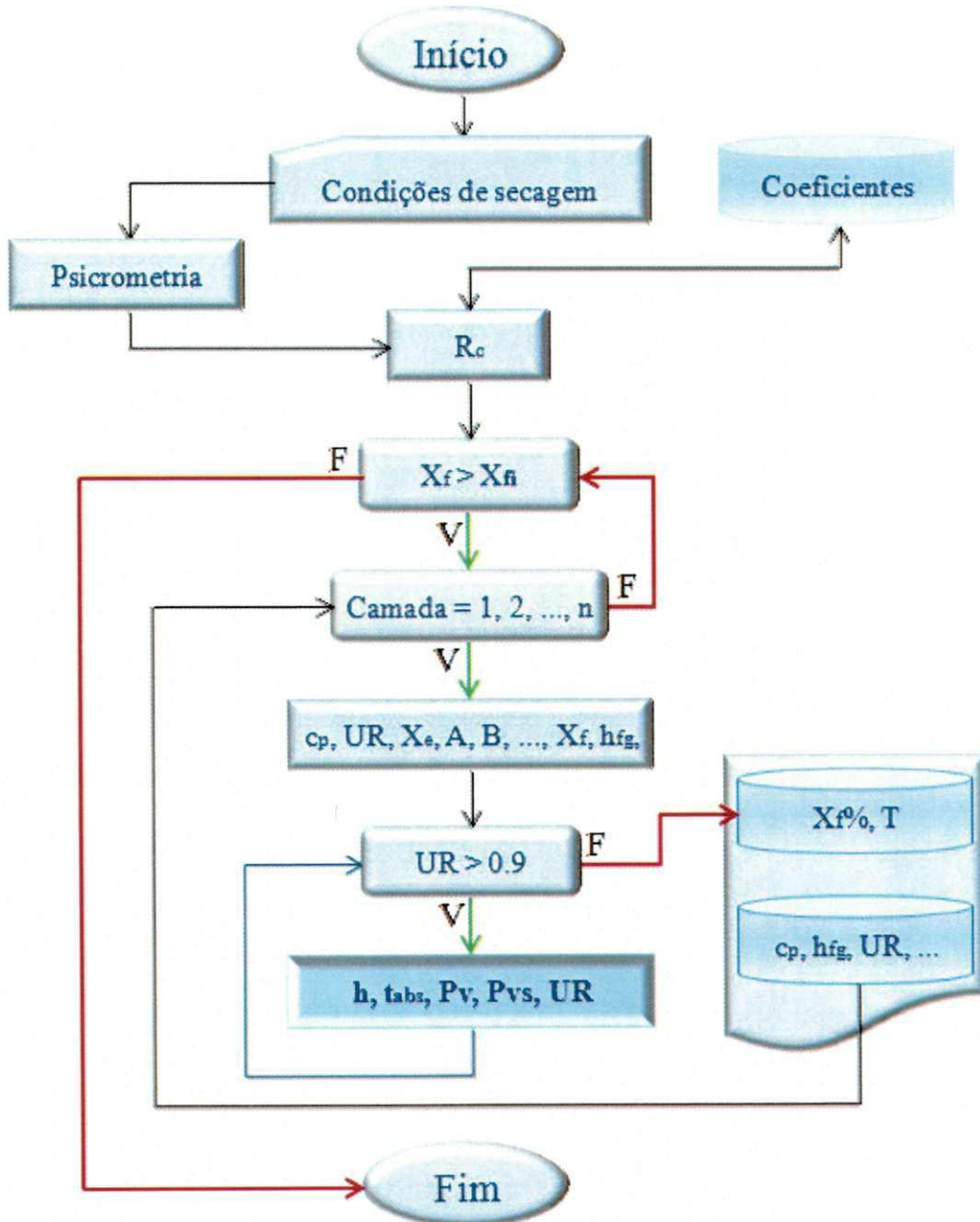


Figura 2.5 - Fluxograma do modelo de Thompson, leito fixo.

### 2.2.5. Modelo de Morey

O modelo de MOREY *et al.* (1976) é um aprimoramento do modelo de Thompson. Os autores trabalharam com a secagem de milho à baixas temperaturas e verificaram que a equação proposta por Thompson para secagem em camada delgada não representava tão bem seus dados experimentais, pois a secagem nas camadas superiores não acontecia tão rapidamente quanto o previsto no modelo 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:

$$RX = \exp(A t^{0,664}) \quad (30)$$

em que

$$A = \exp(B t^C) \quad (31)$$

$$B = [6,0142 + 1,453 \times 10^{-4} UR^2]^{0,5} - 1,8 T_o + 32[3,353^{-4} + 3,01^{-8} UR^2]^{0,5} \quad (32.a)$$

$$C = 0,12264 - 1,461 \times 10^{-3} UR + 4,14 \times 10^{-5} UR T_o - 1,044 \times 10^{-4} T_o \quad (32.b)$$

onde

$T_o$  – Temperatura do milho, K;

$A, B, C$  – Constantes que dependem do produto;

$UR$  – 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 isotermas de equilíbrio higroscópico para o produto:

$$UR_e = 100\{1 - \exp[0,518(T + 45,6)]X^{1,72}\} \quad (33)$$

onde

$UR_e$  – umidade relativa de equilíbrio para o produto no reumedecimento, em %;

$T$  - Temperatura, K;

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.* (1976), 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  $UR_e$ . 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 em baixas temperaturas, o modelo de MOREY *et al.* (1976) também prevê a deterioração do produto e a consequente 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:

$$P_{MS} = 0,00883[\exp(0,006 T) - 1] + 0,00102 t \quad (34)$$

em que

$P_{MS}$  – perda de matéria seca, em percentagem, do produto 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 simulação de secagem em baixas temperaturas. QUEIROZ *et al.* (1982) 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.

### 2.2.6. 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 2.6.

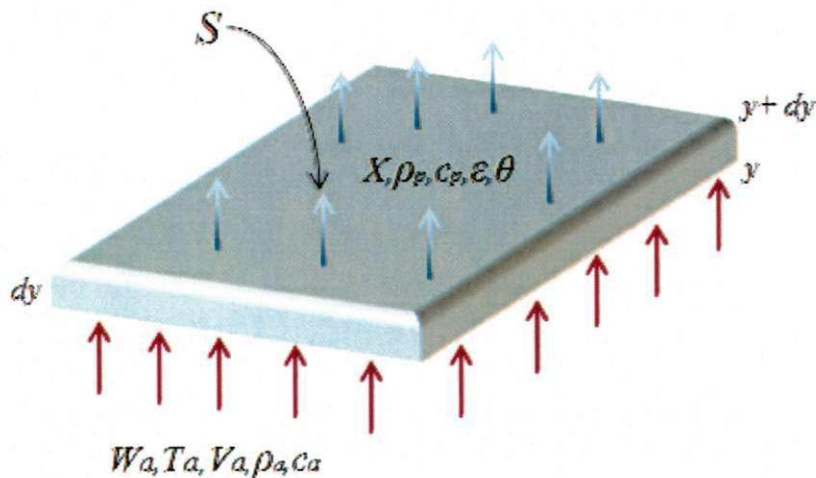


Figura 2.6 – Volume elementar da camada de grãos.

onde:

- $X$  - Teor de água do produto, decimal base seca;
- $\rho_p$  - Massa específica do produto,  $\text{kg m}^{-3}$ ;
- $c_p$  - Calor Específico do produto,  $\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ ;
- $\epsilon$  - Porosidade do produto, decimal, adimensional;
- $\theta$  - Temperatura do produto, K;
- $S$  - Área,  $\text{m}^2$
- $W_a$  - Razão de mistura do ar, adimensional;
- $T_a$  - Temperatura do ar seco, K;
- $V_a$  - Velocidade do ar,  $\text{m s}^{-1}$ ;
- $\rho_a$  - Massa específica do ar,  $\text{kg m}^{-3}$ ;
- $c_a$  - Calor específico do ar,  $\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ ;
- $dy$  - Diferencial de distância, m

Nesse modelo são assumidas as seguintes pressuposições:

- a) O encolhimento dos grãos durante a secagem não é considerado;
- b) O ar é distribuído uniformemente através da camada de grãos;
- c) A transferência de calor, por condução, entre os grãos é desprezível;
- d) As paredes do secador são adiabáticas, com capacidades caloríficas desprezíveis;
- e) As capacidades caloríficas do ar e do produto são constantes durante pequenos intervalos de tempo;
- f) O gradiente de temperatura no interior dos grãos, individualmente, é desprezível;
- g) A variação de temperatura e da razão de mistura do ar com relação ao tempo é desprezível ( $\partial T/\partial t$  e  $\partial W_a/\partial t$ ), quando comparada à variação da temperatura e da razão de mistura com relação a posição ( $\partial T/\partial y$  e  $\partial W_a/\partial y$ );
- h) Há uma equação específica para a determinação da perda de água, em camada fina;
- i) Há uma equação específica para a determinação do teor de água de equilíbrio.

O modelo de Michigan, descrito por BARKER-ARKEMA (1974), é construído a partir de balanços de energia e massa, tanto para o ar de secagem quanto para o produto, adequando-se à secagem em camada fixa, fluxo cruzado, fluxo concorrente e fluxo contracorrente.

### **Balanço de energia para o ar**

A energia transferida, por convecção, na área  $S$  e posição  $y$ , menos a energia que sai de  $S$  na posição  $y + dy$ , é igual a energia transferida ao produto, por convecção, mais a variação, com relação ao tempo, da entalpia do ar nos espaços vazios.

O balanço completo da energia do ar, após as devidas simplificações, é definido como:

$$V_a \frac{\partial T}{\partial y} + \frac{\varepsilon \partial T}{\partial t} = - \frac{h a (T - \bar{\theta})}{\rho_a (c_a + c_v W_a)} \quad (35)$$

Na suposição (g),  $\varepsilon(\partial T/\partial t)$ , pode ser desprezado quando comparado a  $V_a(\partial T/\partial y)$ . Como  $V_a \rho_a = Q_a$ , a equação da energia do ar é:

$$\frac{\partial T}{\partial y} = - \frac{h a (T - \bar{\theta})}{Q_a (c_a + c_v W_a)} \quad (36)$$

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;

$\bar{\theta}$  – temperatura do produto, K;

$\varepsilon$  – porosidade da massa do produto, adimensional

$Q_a$  – massa específica do produto,  $kg m^{-3}$ ;

$c_v$  – calor específico do vapor de água,  $kJ kg^{-1} K^{-1}$ ;

$W_a$  – razão de mistura do ar, adimensional;

$y$  – profundidade da camada do produto, m;

Neste modelo, os índices  $a$ ,  $v$ ,  $w$  e  $p$  que aparecem nas equações, indicam que as propriedades que contêm esses índices se referem ao ar, vapor d'água, água líquida e ao produto, respectivamente.

### **Balanco de energia para o produto**

A energia transferida do ar para o produto, por convecção, é igual a energia requerida para aquecer o produto, mais a energia requerida para evaporar a água do produto, mais a energia requerida para aquecer o vapor da água evaporada.

O balanço da energia para o produto, reagrupando-se os termos, é definido como:

$$h a S dy (T - \theta) dt = (\rho_p c_p + \rho_p c_w \bar{X}) S dy \frac{\partial \theta}{\partial t} dt - [h_{fg} + c_v (T - \theta)] Q_a \frac{\partial W_a}{\partial y} dy S dt \quad (37)$$

Assim a variação da temperatura do produto num determinado tempo é dada por:

$$\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial t} = \frac{h a (T - \bar{\theta})}{\rho_p (c_p + c_w \bar{X})} + \frac{h_{fg} + c_v (T - \bar{\theta})}{\rho_p (c_p + c_w \bar{X})} Q_a \frac{\partial W_a}{\partial y} \quad (38)$$



em que

$c_p$  – calor específico do produto,  $\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ ;

$Q_a$  – fluxo de massa,  $\text{kg s}^{-1} \text{m}^{-2}$ ;

$h_{fg}$  – calor latente de vaporização da água do produto,  $\text{kJ kg}^{-1}$ ;

### **Balanco de massa para o ar**

A quantidade de vapor de água que entra em  $S$  na posição  $y$ , menos a quantidade de vapor de água que sai de  $S$  na posição  $y + dy$ , mais a variação da umidade do ar nos espaços vazios, é igual a umidade cedida pelo produto.

O balanço de massa para o ar, reagrupando-se os termos, é definido como:

$$\rho_a W_a S dy \frac{\partial \bar{X}}{\partial t} dt = Q_a S dt - Q_a S \left( W_a + \frac{\partial W_a}{\partial y} dy \right) dt + \varepsilon S dy \rho_a \frac{\partial W_a}{\partial t} dt \quad (39)$$

Desprezando-se o termo  $\partial W_a / \partial t$ , tem-se:

$$\frac{\partial W_a}{\partial y} = - \frac{\rho_p}{Q_a} \frac{\partial \bar{X}}{\partial t} \quad (40)$$

### **Balanco de massa para o produto**

O balanço de massa do produto é obtido a partir de uma equação de secagem em camada delgada apropriada,  $f_1$ , descritas no tópico 3.1.5.

$$\frac{\partial \bar{X}}{\partial t} = f_1 \quad (41)$$

As Equações diferenciais (36), (38), (40) mais a Equação (41), equação de camada fina específica ao produto, formam o modelo de simulação de secagem aplicado à camada espessa. A solução depende das seguintes condições iniciais:

- Temperatura do Produto;
- Teor de Água inicial do Produto;
- Temperatura do Ar de Secagem;
- Razão de mistura inicial do Ar de Secagem.

As condições de iniciais e de contorno utilizadas na simulação de secagem em camada espessa são:

$$\begin{cases} T(y = 0, t) = T_o \\ \bar{\theta}(y, t = 0) = \bar{\theta}_o \\ \bar{X}(y, t = 0) = \bar{X}_o \\ W_a(0, t) = W_a \end{cases}$$

### **Secagem em Fluxo Concorrente**

Nesses secadores, o ar e o produto escoam na direção  $y$ , perpendicular a  $z$ , no mesmo sentido. Os balanços de energia e de massa são obtidos de forma semelhante à camada espessa, descrito anteriormente. Logo, fazendo-se os balanços de energia e de massa para o ar de Secagem e para o produto, obtêm-se o seguinte sistema de Equações:

$$\frac{dT}{dy} = - \frac{h a (T - \bar{\theta})}{Q_a c_a + Q_a c_v \bar{X}} \quad (42)$$

$$\frac{d\bar{\theta}}{dy} = \frac{h a (T - \bar{\theta})}{Q_p c_p + Q_p c_w \bar{X}} - \frac{h_{fg} + c_v(T - \bar{\theta})}{Q_p c_p + Q_p c_w \bar{X}} Q_a \frac{d\bar{X}}{dy} \quad (43)$$

$$\frac{d\bar{X}}{dy} = - \frac{Q_p}{Q_a} \frac{d\bar{X}}{dy} \quad (44)$$

$$\frac{d\bar{X}}{dt} = f_1 \quad (41)$$

As condições de iniciais e de contorno utilizadas na simulação de secagem em fluxo concorrente são:

$$\begin{cases} T(y = 0, t) = T_o \\ \theta(y, t = 0) = \theta \\ \bar{X}(y = 0, t) = \bar{X}_o \\ W_a(y = 0, t) = W_a \end{cases}$$

### **Secagem em Fluxo Contracorrente**

Nesses secadores, o ar e o produto escoam na direção  $y$ , perpendicular a  $z$ , porém em sentido contrário. Os balanços de Energia e de Massa são obtidos de forma semelhante à Camada Espessa. Logo, fazendo-se os balanços de Energia e de Massa para o Ar de Secagem e para o Produto, obtêm-se o seguinte sistema de Equações:

$$\frac{dT}{dy} = - \frac{h a (T - \bar{\theta})}{Q_a c_a + Q_a c_v \bar{X}} \quad (45)$$

$$\frac{d\bar{\theta}}{dy} = \frac{h a (T - \bar{\theta})}{Q_p c_p + Q_p c_w \bar{X}} - \frac{h_{fg} + c_v(T - \bar{\theta})}{Q_p c_p + Q_p c_w \bar{X}} Q_a \frac{d\bar{X}}{dy} \quad (46)$$

$$\frac{d\bar{X}}{dy} = \frac{Q_p}{Q_a} \frac{d\bar{X}}{dy} \quad (47)$$

$$\frac{\partial \bar{X}}{\partial t} = f_1 \quad (41)$$

As condições de iniciais e de contorno utilizadas na simulação de Secagem em fluxo concorrente são:

$$\begin{cases} T(y = H, t) = T_o \\ \bar{\theta}(y = 0, t) = \bar{\theta}_o \\ \bar{X}(y = 0, t) = \bar{X}_o \\ W_a(y = H, t) = W_a \end{cases}$$

### **Secagem em Fluxo Cruzado**

Nestes secadores, o ar e o produto fluem cruzando-se. Enquanto o ar flui na direção  $y$ , o produto flui na direção  $z$ . Os balanços de Energia e de Massa são obtidos de forma semelhante à Camada Espessa. Logo, o sistema de Equações a ser resolvido é:

$$\frac{dT}{dy} = - \frac{h a (T - \bar{\theta})}{Q_a c_a + Q_a c_v \bar{X}} \quad (48)$$

$$\frac{d\bar{\theta}}{dz} = \frac{h a (T - \bar{\theta})}{Q_p c_p + Q_p c_w \bar{X}} + \frac{h_{fg} + c_v(T - \bar{\theta})}{Q_p c_p + Q_p c_w \bar{X}} Q_a \frac{d\bar{X}}{dy} \quad (49)$$

$$\frac{d\bar{X}}{dy} = - \frac{Q_p}{Q_a} \frac{d\bar{X}}{dz} \quad (50)$$

$$\frac{\partial \bar{X}}{\partial t} = f_1 \quad (41)$$

As condições de contorno utilizadas na simulação de secagem em fluxo cruzado são:

$$\begin{cases} T(y = 0, t) = T_o \\ \bar{\theta}(y, t = 0) = \bar{\theta}_o \\ \bar{X}(y, 0) = \bar{X}_o \\ W_a(y = 0, t) = W_a \end{cases}$$

A Figura 2.7 contém o fluxograma ilustrativo do modelo de Michigan. O teor de água final como parâmetro condicional ao encerramento da simulação está destacado no componente, em cor laranja.

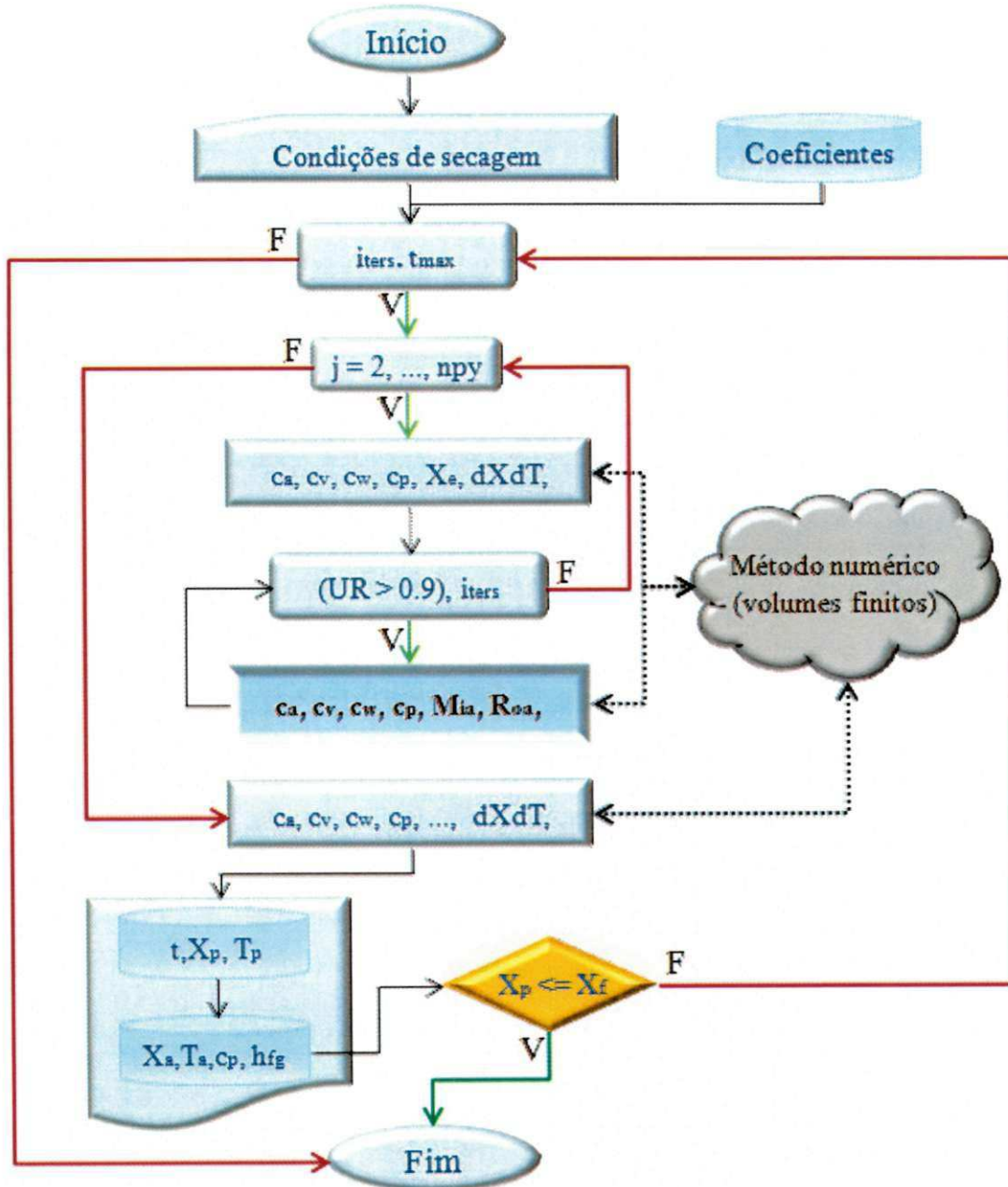


Figura 2.7 – Fluxograma do modelo de Michigan, leito fixo;

### 2.3. Cálculo das propriedades psicrométricas do ar

Segundo QUEIROZ *et al.* (1982), a secagem e o armazenamento de cereais são operações que, também, estão diretamente correlacionadas e limitadas pelas condições psicrométricas do ar. Desta maneira, preliminarmente, faz-se necessária a quantificação das condições psicrométricas do ar, uma vez que os processos de secagem envolvem as variáveis: temperatura de bulbo seco e bulbo úmido, umidade relativa, umidade absoluta, pressão de vapor, entalpia, calor sensível e temperatura do ponto de orvalho.

Foram utilizados os modelos apresentados por QUEIROZ *et al.* (1982), onde o cálculo das condições psicrométricas são efetuados a partir dos valores da temperatura de bulbo seco e bulbo úmido ou a partir da temperatura de bulbo seco e da umidade relativa, fornecendo como saída, os valores para a razão de mistura do ar de secagem, entalpia, temperatura de ponto de orvalho, volume específico e temperatura de bulbo úmido do ar aquecido, que são utilizados à determinação do teor de umidade de equilíbrio.

Para o cálculo das propriedades psicrométricas utilizadas nos modelos de Hukill e Thompson, fez-se uso da formulação utilizada por CAVALCANTI MATA *et al.* (1999).

#### 2.3.1. Pressão parcial de vapor

$$P_{vs} = \frac{\exp(A_{psi})}{0,1333} \quad (51)$$

onde,

$$A_{psi} = \frac{-7511,52}{T} + 89,63121 + (02399897 T) - [12,150799 \ln(T)] \\ + (2,0998405 \cdot 10^{-11} \cdot T^4) - (1,1654551 \cdot 10^{-5} T^2) - (1,2810336 \cdot 10^{-8} \cdot T^3) \quad (52)$$

em que:

$P_{vs}$  – Pressão de vapor à temperatura ambiente, N m<sup>-2</sup>

$A_{psi}$  – Constante que depende da temperatura;

$T$  – Temperatura de bulbo úmido, bulbo seco, °C

#### 2.3.2. Razão de mistura do ar, para temperatura de bulbo úmido

$$h_{bu} = \frac{P_{vs}}{P_{atm} - P_{vs}} \quad (53)$$

onde,

$h_{bu}$  – Razão de mistura do ar, [kg de água (kg de ar seco)<sup>-1</sup>];

### 2.3.3. Razão de mistura do ar

$$h_{ar} = \frac{2501 - [(2,411 T_{bu})h_{bu}] - [1,006(T_{bs} - T_{bu})]}{2501 + (1,775 T_{bs}) - (4,186 T_{bu})} \quad (54)$$

onde,

$h_{ar}$  – Razão de mistura do ar, [kg de água (kg de ar seco)<sup>-1</sup>];

$T_{bs}$  – Temperatura de bulbo seco, °C;

$T_{bu}$  – Temperatura de bulbo úmido, °C

### 2.3.4. Umidade relativa do ar

$$UR = \frac{(h_{ar} P_{atm} 100)}{[P_{vs}(h_{ar} + 0,622)]} \quad (55)$$

onde,

$UR$  – Umidade relativa do ar, decimal

### 2.3.5. Temperatura do ponto de orvalho

$$\left\{ \begin{array}{l} T_{bs} > 50^{\circ}C, \\ T_{po} = (13,8 + (9,478 A_{psi}) + (1,991 A_{psi}^2)) \end{array} \right. \quad (56.a)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} T_{bs} \leq 50^{\circ}C, \\ T_{po} = (6,983 + (14,38 A_{psi}) + (1,079 A_{psi}^2)) \end{array} \right. \quad (56.b)$$

onde,

$T_{po}$  – Temperatura do ponto de orvalho, °C

### 2.3.6. Entalpia do ar

$$E_{nt} = (0,24 T_{bs}) + (597,6 + (0,45 T_{bs}) h_{ar}) \quad (57)$$

onde,

$E_{nt}$  – Entalpia do ar, kcal kg<sup>-1</sup>

### 2.3.7. Volume específico do ar

$$V_{esp} = \frac{2,153(T_{bs} + 273,16) (1 + (1,6078 h_{ar}))}{P_{atm}} \quad (58)$$

onde,

$V_{esp}$  – Volume específico do ar,  $m^3 kg^{-1}$

A Figura 2.8 contém o fluxograma ilustrativo do algoritmo utilizado para o cálculo das propriedades psicrométricas a partir das temperaturas de (bulbo seco e bulbo úmido) ou da (temperatura de bulbo seco e umidade relativa).

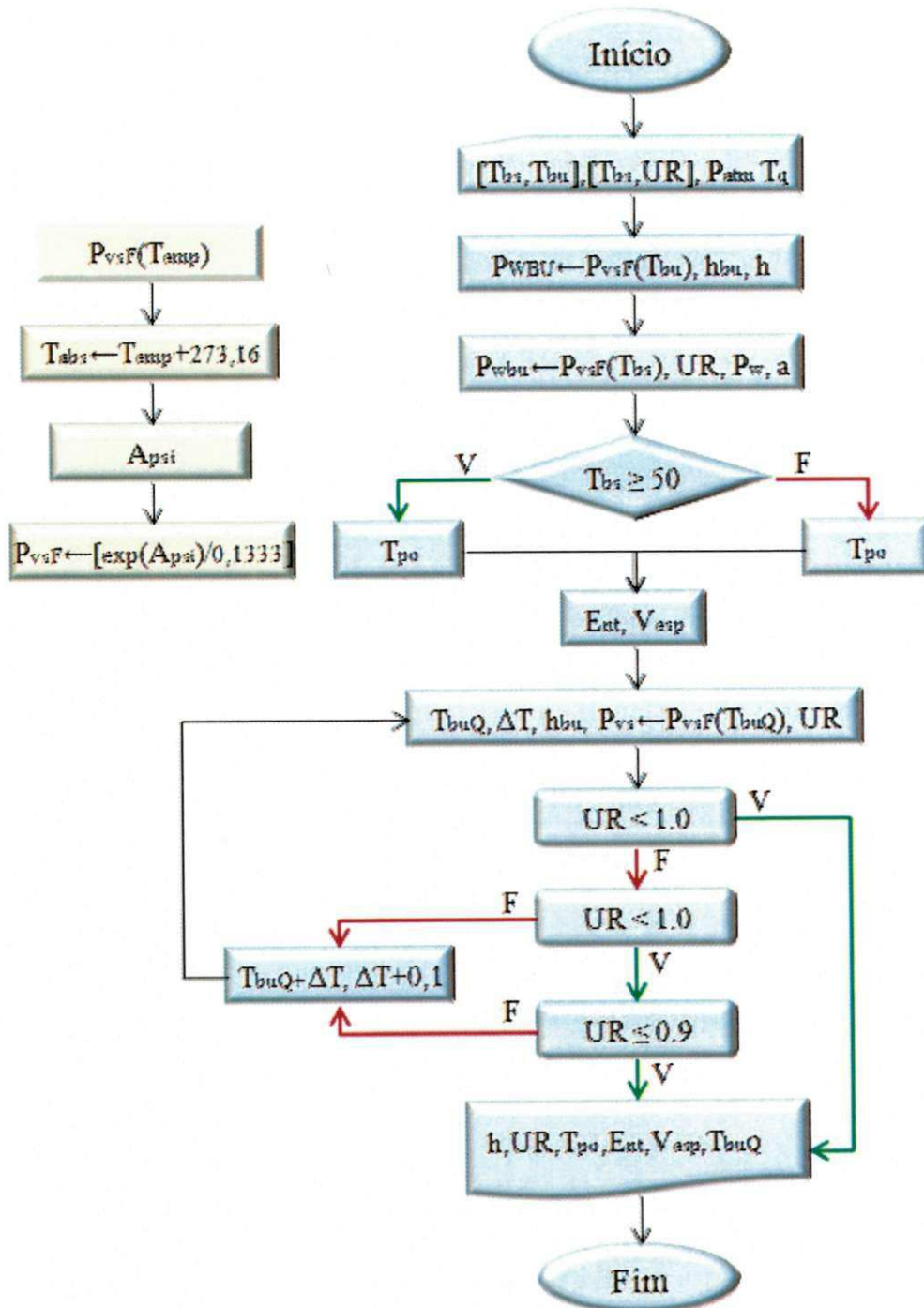


Figura 2.8 – Fluxograma do cálculo psicrométrico:  $[T_{bs}, T_{bu}] - [T_{bs}, UR]$

### 3. MATERIAL E MÉTODOS

O aplicativo computacional, construído a partir da formulação matemática descrita nessa seção, foi concebido e desenvolvido no Laboratório de Informática da Área de Armazenamento e Processamento de Produtos Agrícolas da Unidade Acadêmica de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Campina Grande.

#### 3.1. Implementação dos modelos de simulação de secagem

A implementação computacional dos modelos segue os algoritmos originalmente propostos: modelo de Hukill (camada fixa); modelo de Thompson (camada fixa, fluxo cruzado e fluxo concorrente); modelo de Michigan (camada fixa e fluxo cruzado), utilizando-se as equações com a seguinte formatação:

##### 3.1.1. Razão de conversão

É a 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  $\Delta t$ , (kg de matéria seca).(kg de ar seco)<sup>-1</sup>.

$$R_c = \frac{A_1 H V_{esp}}{G_{ar} \Delta t C_m 60} \quad (59)$$

em que,

$R_c$  – razão de conversão, decimal;

$A_1$  – constante dependente do produto (massa específica do produto seco), kg m<sup>-3</sup>;

$H$  – altura da camada, m;

$V_{esp}$  – volume específico do ar, m<sup>3</sup> kg<sup>-1</sup>(ar);

$G_{ar}$  – fluxo do ar de secagem, m<sup>3</sup> min<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>;

$\Delta t$  – incremento de tempo, h;

$C_m$  – número de camadas, decimal

##### 3.1.2. Calor específico

$$c_p = A_1 + A_2 X \quad (25)$$



em que,

$c_p$  – calor específico do produto,  $\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ ;

$A_1, A_2$  – constantes dependentes do produto;

$X$  – teor de água, % base seca ou base úmida

### 3.1.3. Calor latente de vaporização da água do produto

$$h_{fg} = (h_{fg1} - h_{fg2}T)[1 + A_1 \exp(-A_2 X_e)] \quad (24)$$

em que,

$h_{fg}$  – calor latente de vaporização da água do produto,  $\text{kJ kg}^{-1}$ ;

$h_{fg1}, h_{fg2}$  - constantes dependentes da unidade,  $\text{kJ}$ ;

$A_1, A_2$  – constantes dependentes do produto;

$T$  – temperatura do ar,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$X_e$  – teor de água de equilíbrio, base seca ou base úmida, decimal

### 3.1.4. Equações de determinação de equilíbrio higroscópico

As equações elencadas a seguir fazem parte do escopo de soluções disponíveis, podendo ser utilizadas em quaisquer dos modelos selecionados.

#### 3.1.4.1. ASAE – Standard (1984)

$$X_e = \left[ \frac{\ln(1 - a_w)}{A_1 (T + A_2)} \right]^{A_3} \quad (60)$$

#### 3.1.4.2. BET (Brunauer, Emmett e Teller)

$$X_e = \frac{(X_m A_1 a_w)[1 - (B_1 + 1)a_w^{B_1} + B_1 a_w^{B_1+1}]}{(1 - a_w)[1 + (A_1 - 1)a_w - C_1 a_w^{B_1+1}]} \quad (61)$$

**3.1.4.3. Cavalcanti Mata**

$$X_e = \frac{\ln(1 - a_w) - A_1}{A_2 T^{A_3}} \quad (62)$$

**3.1.4.4. Chung-Pfost**

$$X_e = A_1 - A_2 \ln[-(T + A_3)\ln(a_w)] \quad (63)$$

**3.1.4.5. GAB (Guggenheim, Anderson e de Boer)**

$$X_e = \frac{X_m A_1 B_1 a_w}{(1 - B_1 a_w)(1 - B_1 a_w + A_1 B_1 a_w)} \quad (64)$$

**3.1.4.6. Halsey, modificado**

$$X_e = \left[ \frac{\exp(A_1 - A_2 T)}{-\ln A_w} \right]^{1/A_3} \quad (65)$$

**3.1.4.7. Henderson**

$$X_e = \left[ \frac{\ln(1 - a_w)}{-A_1 T} \right]^{1/A_2} \quad (66)$$

**3.1.4.8. Henderson, modificado por Cavalcanti Mata**

$$X_e = \left[ -\frac{\ln(1 - a_w)}{A_1 T^{A_2}} \right]^{A_3} \quad (67)$$

**3.1.4.9. Henderson, modificado por Thompson**

$$X_e = \left[ \frac{\ln(1 - a_w)}{-A_1 (T + A_2)} \right]^{1/A_3} \quad (68)$$

**3.1.4.10. Oswin**

$$X_e = \frac{(A_1 + A_2 T)}{\left[ \frac{1 - a_w}{a_w} \right]^{1/A_3}} \quad (69)$$

### 3.1.4.11. Sigma-Copace

$$X_e = \exp[A_1 - (A_2 T) + (A_3 a_w)] \quad (70)$$

### 3.1.4.12. Thompson

$$X_e = A_1 \left[ \frac{\ln(1 - a_w)}{A_2 + T} \right]^{A_3} \quad (71)$$

### 3.1.4.13. Zuritz e Sing

$$X_e = \frac{1}{100} \left[ \frac{A}{B} \right]^C \quad (72)$$

onde,

$$A = -\ln(1 - a_w)T \quad (72.a)$$

$$B = B_1 \left[ 1 - \frac{T}{B_2} \right]^{B_3} \quad (72.b)$$

$$C = \frac{1}{C_1 T^{C_2}} \quad (72.c)$$

em que,

$X_e$  – Teor de água de equilíbrio;

$A, A_1, \dots, B, B_1, \dots, C, C_1, \dots$  – constantes das equações, dependentes do produto;

$a_w$  – atividade de água, adimensional;

$T$  – temperatura, K

### 3.1.5. Equações de camada fina

As equações constantes neste tópico fazem parte do escopo de soluções disponíveis no sistema, podendo ser utilizadas em quaisquer dos modelos que as comportem.

No modelo de Michigan a equação de camada fina é derivada em relação ao  $t$  (tempo), com notação  $dx/dt$  a ser utilizada na codificação do programa como parte da

solução numérica adotada, volumes finitos, apresentada por HOLANDA (2007) e NOVAES (2010).

No modelo de Thompson, é utilizado o conceito do tempo equivalente, onde a equação de camada fina é colocada em função de  $t$  (tempo), com notação interna à codificação,  $t_{eq}$ .

Para uma melhor explicitação, a equação de camada fina é mostrada na forma original, como proposta pelo(s) autor(es). Em seguida, a mesma é apresentada na sua forma derivada a ser utilizada na solução numérica adotada, e por último a variação matemática a ser utilizada no modelo de Thompson, quando possível.

### 3.1.5.1. Byler e Brook

$$RX = (1 - A - B) \exp(C D t) + A \exp(E D t) + B \exp(F D t) \quad (73)$$

$$\frac{dX}{dt} = (C D)(1 - A - D) \exp(C D t) + (A E D) \exp(E D t) + (B F D) \exp(F D t) \quad (73.a)$$

### 3.1.5.2. Cavalcanti Mata

$$RX = A \exp[(B t)^C] + D \exp[(B t)^E] + F \quad (74)$$

$$\frac{dX}{dt} = \{A B^C C t^{C-1} \exp[(B t)^C] + D B^E E t^{E-1} \exp[(B t)^E]\} \quad (74.a)$$

### 3.1.5.3. Henderson e Pabis

$$RX = A \exp(B t) \quad (75)$$

$$\frac{dX}{dt} = AB \exp(B t) \quad (75.a)$$

$$t_{eq} = \frac{\ln\left(\frac{RX}{A}\right)}{B} \quad (75.b)$$

### 3.1.5.4. Noomhorm e Verma

$$RX = A \exp(B t) + [C \exp(D t)] + E \quad (76)$$

$$\frac{dX}{dt} = (A B) \exp(B t) + [(C D) \exp(D t)] \quad (76.a)$$

**3.1.5.5. Page**

$$RX = \exp(A t^B) \quad (77)$$

$$\frac{dX}{dt} = (A B t^{B-1}) \exp(A t^B) \quad (77.a)$$

$$t_{eq} = \left[ \frac{\ln(RX)}{A} \right]^{\frac{1}{B}} \quad (77.b)$$

**3.1.5.6. Roa e Macedo**

$$RX = \exp[A(P_{vs} - P_v)^B t^C] \quad (78)$$

$$\frac{dX}{dt} = [A C t^{C-1} (P_{vs} - P_v)^B] \exp[A(P_{vs} - P_v)^B t^C] \quad (78.a)$$

$$t_{eq} = \left[ \frac{\ln(RX)}{A(P_{vs} - P_v)^B} \right]^{\frac{1}{C}} \quad (78.b)$$

**3.1.5.7. Sharaf-Eldeen**

$$RX = A \exp(B t) + [(1 - C) \exp(D B t)] \quad (79)$$

$$\frac{dX}{dt} = A B \exp(B t) + [(D B - C D B) \exp(D B t)] \quad (79.a)$$

**3.1.5.8. Thompson**

$$RX = \exp\left(\frac{-A - \sqrt{A^2 + 4 t B}}{2 B}\right) \quad (80)$$

$$\frac{dX}{dt} = \frac{-B}{A \sqrt{A^2 + 4 t B}} \exp\left(\frac{-A - \sqrt{A^2 + 4 t B}}{2 B}\right) \quad (80.a)$$

$$t_{eq} = A \ln(RX) + B [\ln(RX)^2] \quad (80.b)$$

em que,

$RX$  – razão do teor de água, adimensional;

$A, B, C, D, E, F$  – constantes das equações dependentes do produto;

$P_v$  – pressão de vapor à determinada temperatura,  $N\ m^{-2}$ ;

$P_{vs}$  – pressão de vapor de saturação,  $N\ m^{-2}$ ;

$t$  – tempo, hora, minuto ou segundo;

$t_{eq}$  – tempo equivalente, hora

### **3.1.6. Coeficientes das equações de camada fina**

Os coeficientes,  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$ ,  $E$  e  $F$  são dependentes do produto e têm relação direta com a temperatura, unicamente, ou com a temperatura e o teor de água inicial do mesmo. A solução computacional objeto, adotou 03 (Três) representações literais, que são as mais comumente utilizadas.

As formulações, particularizadas à literal **A**, são extensíveis às demais.

#### **3.1.6.1. Exponencial, dependente da temperatura**

$$A = A_1 \exp(A_2 T) \quad (81)$$

#### **3.1.6.2. Polinomial, dependente da temperatura, de grau 7**

$$A = A_1 + A_2 T + A_3 T^2 + A_4 T^3 + A_5 T^4 + A_6 T^5 + A_7 T^6 + A_8 T^7 \quad (82)$$

#### **3.1.6.3. Polinomial dependente da temperatura e do teor de água inicial**

$$A = A_1 + A_2 T + A_3 X_o + A_4 T X_o + A_5 T^2 X_o + A_6 T X_o^2 + A_7 T^2 + A_8 X_o^2 \quad (83)$$

onde

$T$  – temperatura do ar, °C;

$X_o$  – teor de água inicial do produto, base seca ou base úmida, decimal;

### 3.1.7. Solução numérica para o modelo de Michigan – fluxo cruzado

A solução numérica utilizada método de volumes finitos para a solução do problema em regime transiente para secadores de fluxo cruzado e leito fixo, como ilustrado na Figura 3.1.

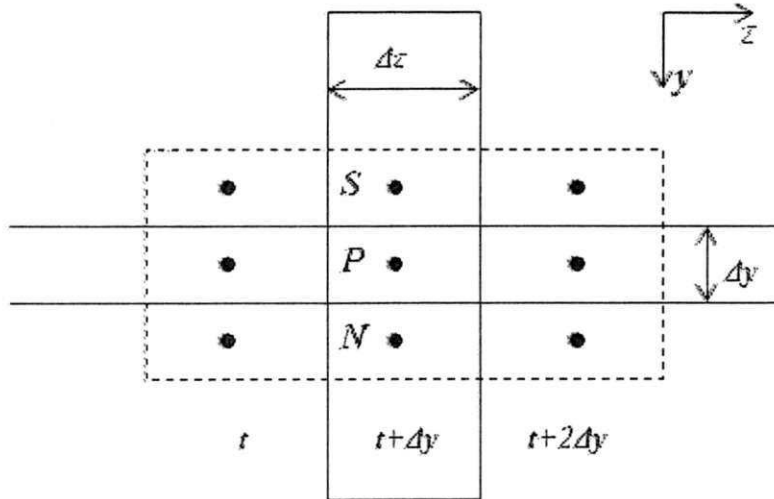


Figura 3.1 – Esquema numérico e volume de controle.

Integrando-se as equações diferenciais parciais (36), (38) e (40), obtêm-se o sistema de equações lineares na sua forma discretizada, HOLANDA (2007), como descritas em sequência.

#### Balço de energia para o ar

$$A_P T_P = A_S T_S + A_P^o T_P^o + S_C^T \quad (84)$$

onde:

$$A_P = \frac{\Delta y}{\Delta t} + \frac{W_a}{\varepsilon} + \frac{h A^* \Delta y}{\varepsilon (\rho_a c_p + \rho_a W_a c_v)} \quad (84.a)$$

$$A_S = \frac{W_a}{\varepsilon} \quad (84.b)$$

$$A_P^o = \frac{h A^* \Delta y}{\varepsilon (\rho_a c_p + \rho_a W_a c_v)} \quad (84.c)$$

$$S_C^T = \frac{\Delta y}{\Delta t} \quad (84.d)$$

**Balço de energia para o produto**

$$A_p \theta_p = A_p^o \theta_p^o + S_C^o \quad (85)$$

onde:

$$A_p = \frac{\Delta z}{\Delta t_m} + \frac{h A^* \Delta z}{\rho_p c_p + \rho_p c_w X_p} + \frac{\rho_p c_v \frac{\partial \bar{X}}{\partial t} \Delta z}{\rho_p c_p + \rho_p c_w X_p} \quad (85.a)$$

$$A_p^o = \frac{\Delta z}{\Delta t_m} \quad (85.b)$$

$$S_C^o = \frac{\rho_p (h_{fg} + c_v T_p) \frac{\partial \bar{X}}{\partial t} \Delta z}{\rho_p c_p + \rho_p c_w X} + \frac{h A^* \Delta z}{\rho_p c_p + \rho_p c_w X} \quad (85.b)$$

em que  $\Delta t_m = (npy-1) \cdot \Delta t$ , e  $npy$  é o número de pontos nodais na direção  $y$ .

**Balço de massa para o ar**

$$A_p X_p = A_S X_S + A_p^o X_p^o + S_C^X \quad (86)$$

onde:

$$A_p = \rho_a \frac{\Delta y}{\Delta t} + \rho_a \frac{W_a}{\varepsilon} \quad (86.a)$$

$$A_S = \rho_a \frac{W_a}{\varepsilon} \quad (86.b)$$

$$A_p^o = \rho_a \frac{\Delta y}{\Delta t} \quad (86.c)$$

$$S_C^o = -\frac{\rho_p}{\varepsilon} \frac{\partial \bar{X}}{\partial t} dy \quad (86.c)$$

**Balço de massa para o produto**

$$A_p \bar{X} = A_p^o \bar{X}_p^o + S_C^X \quad (87)$$

onde:



$$A_p = \frac{\Delta z}{\Delta t_m} + \frac{\Delta z}{3600 \sqrt{A^2 + \frac{B t}{900}}} \quad (87.a)$$

$$A_p^0 = \frac{\Delta z}{\Delta t_m} \quad (87.b)$$

$$S_C^X = \frac{X_e}{3600 \sqrt{A^2 + \frac{B t}{900}}} \Delta z \quad (87.c)$$

Nas Equações (36, 38, 40) utilizou-se o esquema upwind como função de interpolação para os termos convectivos, HURTADO (2005).

Fez-se necessária uma modificação no sistema de controle lógico, uma vez que na literatura citada, (MARTINS, 1982; HOLANDA, 2007; NOVAES, 2010), utilizou-se como condição de parada, o número de iterações e o tempo. A secagem de produtos biológicos está condicionada, essencialmente, ao teor de água final, que permite a utilização do mesmo para os mais variados fins.

O número de iterações é fundamental ao método numérico, não à secagem.

O tempo e o número de iterações não são parâmetros adequados à limitação ou finalização do processo de simulação de secagem. Assim sendo, incluiu-se o teor de água final desejado como condição para finalização, a exemplo do modelo de Thompson.

### **3.1.8. Propriedades termofísicas e características físicas dos produtos, do ar e da água**

Dada a aplicabilidade genérica do software, o: calor específico do produto; calor latente de vaporização da água do produto; o teor de água de equilíbrio; a porosidade e área específica do produto, dependem do produto com o qual se estará trabalhando.

## **3.2. Encadeamento dos modelos**

O software, a partir da composição de equações e coeficientes, oferece um escopo razoável às simulações, aliado à versatilidade de se poder modificar ou ajustar os coeficientes, em tempo real. Essa dinâmica operacional permite uma rápida e precisa aferição da inferência localizada de cada uma das equações e coeficientes utilizados.

### 3.3. Módulo Operacional: Aplicativo

No aplicativo SASS-PB<sub>ANUM</sub>, a exemplo da interface adotada pelo padrão Windows, os módulos operacionais funcionais em barra de opções superior fixa: Arquivo, Modelos, Psicrometria e Sobre: Arquivo é a opção destinada ao cadastro de: usuários, produtos; modelo que será utilizado; seleção das equações que serão utilizadas e seus respectivos coeficientes; entrada dos dados experimentais que servirão à comparação dos dados obtidos com a simulação. Modelos é a opção que disponibiliza os modelos implementados disponíveis: Camada Fixa – (Hukill, Thompson e Michigan); Fluxo Cruzado – (Michigan e Thompson); Fluxo Concorrente (Thompson); Experimentais x Simulados, é o módulo a partir do qual verifica-se as diferenças e desvios entre os dados experimentais e os dados simulados, apresentando-os na forma de gráfico, cinéticas, e/ou relatórios com as respectivas diferenças. A Figura 3.2 ilustra a distribuição operacional do software.

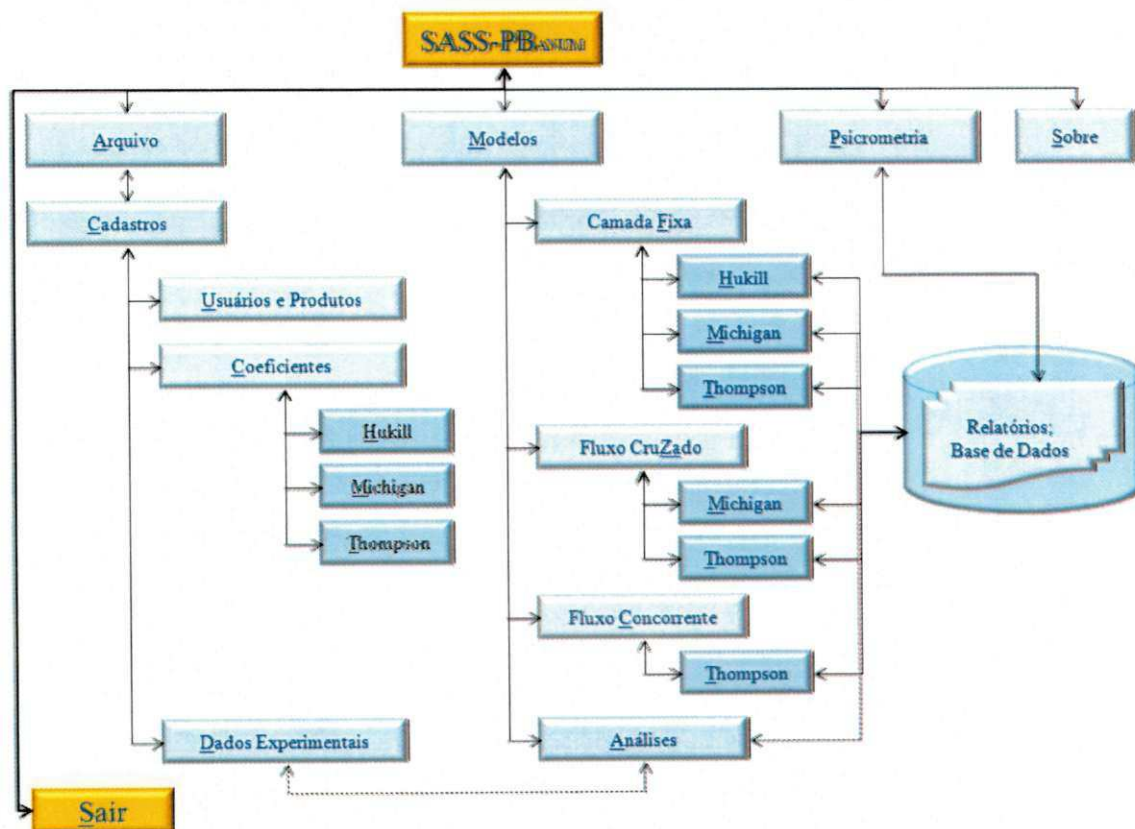


Figura 3.2 – Diagrama de encadeamento operacional do SASS-PB<sub>ANUM</sub>.

### **3.4. Simulação e banco de dados**

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. 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 informação fossem disponibilizados, adotou-se o modelo de banco de dados relacional. Neste modelo os dados são apresentados na forma de tabelas, em que as linhas – REGISTROS - são distintas e o nome das colunas – ATRIBUTOS - é único, o que possibilita a utilização de técnicas como Integridade Referencial, Ordenação e Indexada de Dados, Acesso direto, dentre outras.

### **3.5. Integração: Aplicativo x GBD**

Além da implementação matemática dos modelos de simulação de secagem, SASS-PB<sub>ANUM</sub> tem em seu contexto operacional o acréscimo de módulos de gerenciamento e tratamento de banco de dados que possibilita as efetivas relações e transações entre as diversas entidades, tabelas, do sistema. Isso se dá tanto no nível de programação, linhas de código, quanto na construção do Banco de Dados.

### **3.6. Hardware**

Utilizou-se um microcomputador com processador AMD, Athlon™ XP 1900+ de 1,6 GHz, com 2 GB de memória RAM, disco rígido com capacidade de 80 GB.

### **3.7. Software básico**

Utilizou-se, no desenvolvimento do aplicativo SASS-PB<sub>ANUM</sub> e na criação do banco de dados os seguintes *softwares* básicos:

### **3.7.1. Linguagem de programação e descritor da base de dados**

A linguagem de programação adotada no presente trabalho foi o Delphi 5.0, produto da Borland International Inc. Linguagem de programação orientada a objeto, compilada, de interface gráfica padrão Windows, produto tecnológico evolutivo da linguagem Pascal. A preferência por essa ferramenta deve-se a facilidade de construção de módulos executáveis, não interpretados, que se integram eficientemente à base de dados escolhida, além de permitir uma completa integração gráfica com o padrão Windows.

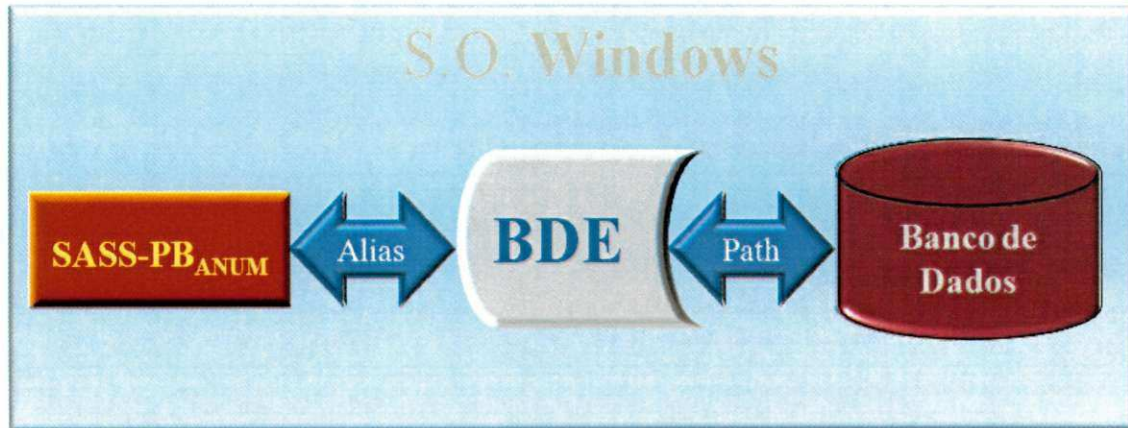
Como ferramenta adjuvante ao processo, utilizou-se, como descritor-modelador e construtor da base de dados, o Database Desktop versão 7.0, módulo operacional nativo à linguagem de programação Delphi, direcionado ao dBase.

### **3.7.2. Base de dados**

A base de dados utilizada tem o padrão dBase IV. Tal seleção se dá devido ao fato de ser amplamente utilizada e nativa do Delphi, dispensando a necessidade de aquisição ou utilização de outros softwares. As principais características deste padrão são: leveza – baixa necessidade de memória auxiliar instalada; sistema de fácil migração à outras bases, plataformas operacionais ou de manipulação, de manutenção simples e principalmente rapidez de acesso 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.

### **3.8. Estrutura e modelagem de dados**

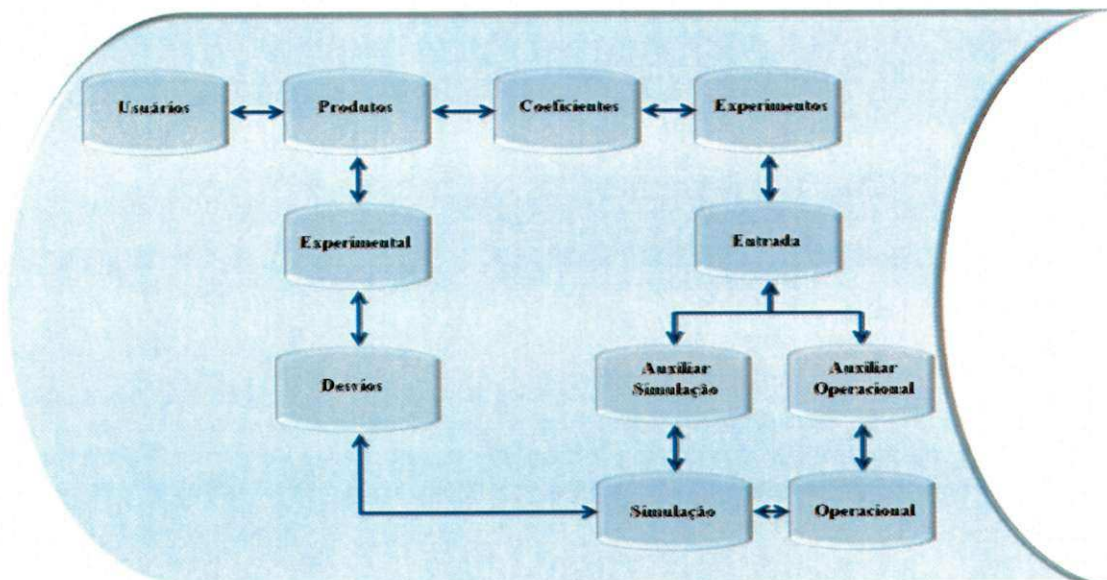
O ato de criar um banco de dados a ser utilizado no Delphi, com o padrão adotado - dBase, é feito através do Borland Database Engine – BDE, ferramenta integrada ao mesmo. Com ela, cria-se uma macro, Alias (apelido), cujo conteúdo é o Path - caminho que servirá de repositório às tabelas. O Alias, é o meio lógico através do qual o aplicativo acessa o banco de dados. Essa ligação é transparente para o usuário. A Figura 3.3 ilustra esse encadeamento operacional.



**Figura 3.3** – Ligação entre o SASS-PB<sub>ANUM</sub> e o banco de dados.

### 3.8.1. Análise e modelagem dos dados

A análise e modelagem dos dados que consiste na: identificação, classificação, caracterização, e normalização, resultou na identificação de 11 (onze) entidades ou tabelas: Usuários; Produtos; Coeficientes; Experimentos; Experimental; Entrada; Operacional Temporário; Simulação Temporário; Operacional Definitiva; Simulação Definitiva e Desvios. Essas tabelas, por sua vez, têm a elas associados arquivos de índices (*Multiple Index Files*), extensão MDX, em mesmo número e nomenclatura. Esses arquivos têm como objetivo a ordenação dos dados conforme as definições necessárias à aplicação. A descrição funcional será apresentada no tópico seguinte. Na Figura 3.4 têm-se um diagrama ilustrativo das entidades, tabelas, e seus relacionamentos.



**Figura 3.4** – Diagrama ilustrativo das entidades relacionais, tabelas, utilizadas.

Concluída a análise e modelagem, utilizou-se o descritor de dados Database Desktop, ferramenta integrada ao Delphi, para a criação das tabelas, padrão dBase conforme descrição no Apêndice A, contido em CD anexo.

### **3.8.2. Tabelas, entidades, utilizadas**

Um banco de dados pode ser composto por uma ou mais tabelas. O número ou quantidade de tabelas é determinado pelo grau de complexidade do problema. A população, ato de se incluir dados, de uma tabela é determinada pelas necessidades da aplicação. O mais comum é o ato direto, com ação do usuário, via teclado, por meio dos comandos disponíveis, preenchimento/digitação de campos de dados – literal, numérico, alfanumérico, data, fotos, imagens, etc. – que serão gravados, armazenados na(s) tabela(s) a eles vinculados. Este processo se dá na maioria dos aplicativos, notadamente os comerciais. Outra maneira de se popular diretamente uma tabela de dados, é através da importação de arquivos texto, com tabulação específica e estruturada segundo a base de dados local. Como exemplo, tem-se os sistemas de transferência de informações às Instituições Públicas nas esferas Federal, Estadual, Municipal e Empresas Privadas.

Sendo o SASS-PB<sub>ANUM</sub> uma aplicação essencialmente numérica, a população de algumas tabelas se dará de maneira indireta sem a ação do usuário, posto que salvo as informações de identificação e condições físicas iniciais, todas as demais são geradas e gravadas pelo aplicativo.

A seguir é feita a descrição funcional das entidades relacionais, tabelas, utilizadas. A descrição estrutural (descritor SQL) assim como o código fonte do aplicativo estão dispostos nos apêndices A e B respectivamente, contidos em CD anexo.

#### **3.8.2.1. Usuários**

Usuários é o arquivo, tabela, que conterà os dados de identificação dos Usuários, associando-os a instituições, orientador e tipificando-o quanto a natureza técnica. Está sob ordenação alfabética e identificação única, chave primária, através do campo específico.

### **3.8.2.2. Produtos**

Produtos é o arquivo, tabela, que conterà os dados de identificação dos Produtos, com ordenação alfabética e identificação do cultivar, associado ao usuário que adicionou à base.

### **3.8.2.3. Coeficientes**

Coeficientes é o arquivo, tabela, que conterà todo o conjunto de informações necessárias à formulação matemática utilizada na simulação, associando-as a um Usuário, Produto, Tipo do Secador e Modelo que será utilizado à simulação. Essa mesma tabela conterà: a faixa de temperatura para a qual os coeficientes são válidos; os coeficientes das equações de determinação do calor específico ( $c_p$ ), do calor latente de vaporização da água do produto ( $h_{fg}$ ), Equação de determinação do teor de água de equilíbrio ( $X_e$ ), Equação de camada fina ( $X_f$ ) e seus coeficientes  $A, B, \dots, F$ , com formulação exponencial, polinomial dependente da temperatura de grau 7 ( $A_1, A_2, A_3, A_4, A_5, A_6, A_7, B_1, B_2, B_3, B_4, B_5, B_6, B_7, \dots, F_1, F_2, F_3, F_4, F_5, F_6, F_7$ ), ou polinomial dependente da temperatura e do teor de água inicial ( $X_o, T$ ).

### **3.8.2.4. Experimental**

Experimental é o arquivo, tabela, que conterà os dados Experimentais obtidos, dados de secagens – tempos, teores de água e temperaturas, referentes a Produto(s) cadastrados por Usuário(s). Essa tabela conterà as condições de secagem: Temperatura do produto, umidade relativa, pressão atmosférica, teor de água inicial, fluxo do ar de secagem, teor de água de equilíbrio (final), altura da camada de grãos, unidade de tempo utilizado na medição, número de camadas, etc.

### **3.8.2.5. Experimentos**

Experimentos é o arquivo, tabela, que conterà as simulações já realizadas, identificando: o Usuário, o Produto, o Modelo utilizado, o Nome da Simulação, os dados calculados: tempo, teor de água por camada, temperatura em cada camada, teor de água médio no tempo e temperatura média no tempo.

### **3.8.2.6. Entrada**

Entrada é o arquivo, tabela, que conterà os dados referentes às condições de secagem a ser(em) simulado(s), com identificação e ligação a Usuário, Produto, Tipo do Secador e nome da Simulação e ordenação pelo Nome da Simulação.

### **3.8.2.7. Auxiliar operacional**

Auxiliar operacional é o arquivo, tabela, que conterà os valores internos das variáveis utilizadas no processo da simulação: calor específico, calor latente de vaporização da água do produto, pressão parcial de vapor, pressão de vapor de saturação, umidade relativa, teor de água de equilíbrio, tempo equivalente, temperatura do produto, temperatura do ar, ... . Estes valores serão automaticamente descartados se não utilizados.

### **3.8.2.8. Auxiliar simulação**

Auxiliar simulação é o arquivo, tabela, que conterà os valores obtidos na simulação: tempo, teor de água e temperatura (T). Tem como ordenador o tempo. Estes valores serão automaticamente descartados se não utilizados.

### **3.8.2.9. Operacional**

Operacional é o arquivo, tabela, que conterà os valores internos do processo da simulação válida, com descrição estrutural semelhante ao tópico 3.8.2.7. Essa tabela tem como objetivo a guarda permanente dos dados, objetivando a criação de séries históricas.

### **3.8.2.10. Simulação**

Simulação é arquivo, tabela, que conterà os valores de uma simulação válida, à semelhança do tópico 3.8.2.8. A exemplo do tópico anterior, essa tabela tem como objetivo a guarda permanente dos dados, objetivando a criação de séries históricas.



### **3.8.2.11. Desvios**

Desvios é o arquivo, tabela, que conterà as diferenças percentuais calculadas, entre os dados experimentais e simulados, a partir dos dados contidos nos arquivos: Experimental e Simulação.

### **3.9. Validação do software/modelos**

Para a validação do SASS-PB<sub>ANUM</sub>, foram utilizados dados experimentais obtidos por FORTES (1973), milho yellow-dent (Becks 65), CANEPPELE (1993), arroz longo, e OLIVEIRA (2006), feijão macassar, e que são apresentados no capítulo de Resultados e Discussão. Os dados experimentais dos referidos autores estão dispostos nos Anexos dos respectivos trabalhos.

### **3.10. Análise do erro relativo**

A análise utilizada para a comparação entre os dados experimentais e os dados simulados é feita a partir da medição do erro percentual relativo, conforme equação abaixo.

$$E_{rel}\% = \left| \frac{X_{exp} - X_{sim}}{X_{exp}} \right| 100 \quad (88)$$

onde:

$E_{rel}\%$  – erro relativo, %;

$X_{exp}$  – Teor de água experimental, b.s., b.u., % ou decimal;

$X_{sim}$  – Teor de água simulado, b.s., b.u., % ou decimal

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1. O Software

Na Figura 4.1 encontra-se a tela de abertura do SASS-PB<sub>ANUM</sub>, Software Aplicado à Simulação de Secagem de Produtos Biológicos, que é o programa computacional cujo objetivo é explicitado em sua nomenclatura. ANUM deve-se à utilização dos modelos analíticos de Hukill e Thompson e a solução numérica exigida pelo modelo de Michigan. .



**Figura 4.1** – Tela inicial de abertura do aplicativo.

Seguindo o padrão Windows, interface gráfica e interação intuitiva, logo abaixo da linha de identificação do aplicativo, Linha de Título, está a barra de opções. Neste caso, têm-se apenas as opções: Arquivo, Modelos, Psicrometria e Sobre. A primeira encerra as opções de cadastro, inserção, de informações que serão utilizadas nas simulações, como ilustrado na Figura 4.2; a segunda apresenta as opções de simulação disponíveis no Software; a terceira opção, Psicrometria, possibilita a determinação das propriedades psicrométricas do ar; a quarta opção apresenta os créditos, autoria, do SASS-PB<sub>ANUM</sub>. A seguir estão apresentadas as opções e funcionalidades disponíveis no Software.

#### 4.1.1. A opção Arquivo

A opção Arquivo abre, em cascata, para duas outras opções: Cadastro e Sair, conforme Figura 4.2. Sair é o meio correto de encerramento do aplicativo, *software*. Não se deve encerrar o aplicativo SASS-PB<sub>ANUM</sub> utilizando o ícone de borda de sistema, [x], visível no canto superior direito do aplicativo.



**Figura 4.2** – Tela operacional de opções funcionais.

##### 4.1.1.1. Cadastro

Cadastro é a opção que possibilita a inclusão das informações cruciais ao funcionamento e operacionalização do sistema, seguindo uma rígida e vertical pertinência. Usuário → Produto → Modelo → Secador → Coeficientes → Equações → Condições de secagem.

##### 4.1.1.1.1. Usuários e Produtos

Esta opção se presta à inserção de novo(s) Usuário(s) e Produto(s). Optando-se por Usuários e Produtos, [ALT+U] ou utilizando-se o mouse, será apresentada a janela de cadastro conforme ilustra a Figura 4.3, onde as informações pertinentes a um e outro

elemento estão devidamente identificadas e agrupadas em painéis de contexto. Estas informações poderão ser: Inseridas, Editadas/Modificadas e/ou Excluídas. Recomenda-se atenção no trato, manejo, de opções que encerrem estas dinâmicas.

Produto	Variedade
Arroz	Arroz
Arroz - Caneppele	Arroz
Arroz-Michigan	??????????
Cacau	Cacau
Calé	??????????
Feijão - Sasg	Sasg
Feijão Carioca	Mário Eduardo
Feijão Jorge	Mecassar

Código	Usuário	Telefone	Entidade	Telefone	Depto.	Usuário
141 101 724-20	Luís Antônio Dantas	9971-3503	UFPG	2101-1000	DEAG	Estudante

Figura 4.3 – Tela operacional de cadastro de usuário e produto.

Vê-se na Figura 4.3, o padrão a ser utilizado em todo o aplicativo. Painéis que agregam um conjunto específico de informações, sequenciado por grids de apresentação linear dos dados incluídos.

As ações referentes a inclusão, alteração, gravação, exclusão e saída da tela em foco, são acionados por botões, devidamente caracterizados. Assim, para que a inclusão/exclusão/alteração de um usuário ou produto possa ser efetuado, deve-se acionar previamente o botão de comando correspondente. A gravação dos dados é feita de maneira implícita, não necessitando do acionamento do botão correspondente.

Dada as características do aplicativo e a natureza progressiva do preenchimento dos dados, sugere-se a utilização da tecla [ENTER] após a digitação do conteúdo de cada campo. Essa ação desencadeia o método de gravação implícito, uma vez que o campo de dado correspondente está diretamente ligado à base de dados, além de ser mais produtivo.

A utilização do mouse, na área de dados, deve se restringir aos botões de ação e as caixas de marcação e seleção dados. No contexto geral, prevalece o padrão Windows.

#### 4.1.1.1.2. Coeficientes

Coeficientes é a opção que permite a inclusão dos coeficientes que serão utilizados nas equações cujos coeficientes são dependentes do produto biológico. Para tanto são disponibilizadas 3 (três) outras opções identificadas diretamente aos modelos de simulação implementados: Hukill (camada fixa), Michigan (camada fixa, fluxo cruzado) e Thompson (camada fixa, fluxo cruzado e fluxo concorrente). Assim, dependendo do modelo a ser utilizado pode-se entrar, com os coeficientes utilizados nas equações: razão de conversão; calor específico; calor latente de vaporização da água do produto; equação do tempo de meia-resposta; equação do teor de água de equilíbrio e a equação de camada fina, ao mesmo tempo em que os associam, inicialmente, a um usuário, um produto e um secador específicos.

A Figura 4.4 contém uma ilustração da tela utilizada na captação dos dados que serão utilizados no modelo de Hukill – camada fixa: coeficientes; equação de determinação do teor de água de equilíbrio; faixa de temperatura para a qual esses coeficientes foram, a partir de dados experimentais, matematicamente calculados. Essas informações estarão particularmente vinculadas ao produto biológico selecionado.

1ª - Usuário: Luís Antônio Dantas

2ª - Produto: Milho Amarelo

Coeficientes Válidos para Temperaturas entre: 40 e 80 °C.

**Calor Específico**

A1: 0.02725  
A2: 0.00851  
 $C_p = A_1 + A_2 X$

**Calor Latente de Vaporização**

A1: 600  
A2: 0.57  
A3: 4.35  
A4: 28.25  
 $h_{fg} = (A_1 - A_2 T) [(A_3 \exp(-A_4 X))]$

**Equação de Umidade de Equilíbrio**

Thompson

$X_e = -A_1 \left[ \frac{-\ln(1-UR)}{T + A_2} \right]^{A_3}$

**Coeficientes**

A1: 120.6  
A2: 45.6  
A3: 0.5  
A4:

**Eq. de Tempo de Meia-Resposta [Tmr]**

A1: 0.003325  
A2: 0.00673412  
A3: 2.412584  
A4: 0.0156482  
 $T_{mr} = \exp\{[A_1 - (A_2 \cdot X_0) \cdot T] + A_3 - (A_4 \cdot X_0)\}$

Usuário	Produto	Modelo	Secador	Eq. de Umid. de Equilíbrio
Luís Antônio Dantas	Milho Amarelo	Hukill	Leito Fixo	Thompson

Sair

Figura 4.4 – Tela operacional de inclusão de coeficientes para o modelo de Hukill.

A Figura 4.5 contém uma ilustração da tela utilizada na captação dos dados que serão utilizados no modelo de Michigan (camada fixa e fluxo cruzado). Observe-se a inclusão da equação de camada fina e a formulação dos coeficientes a serem utilizados.

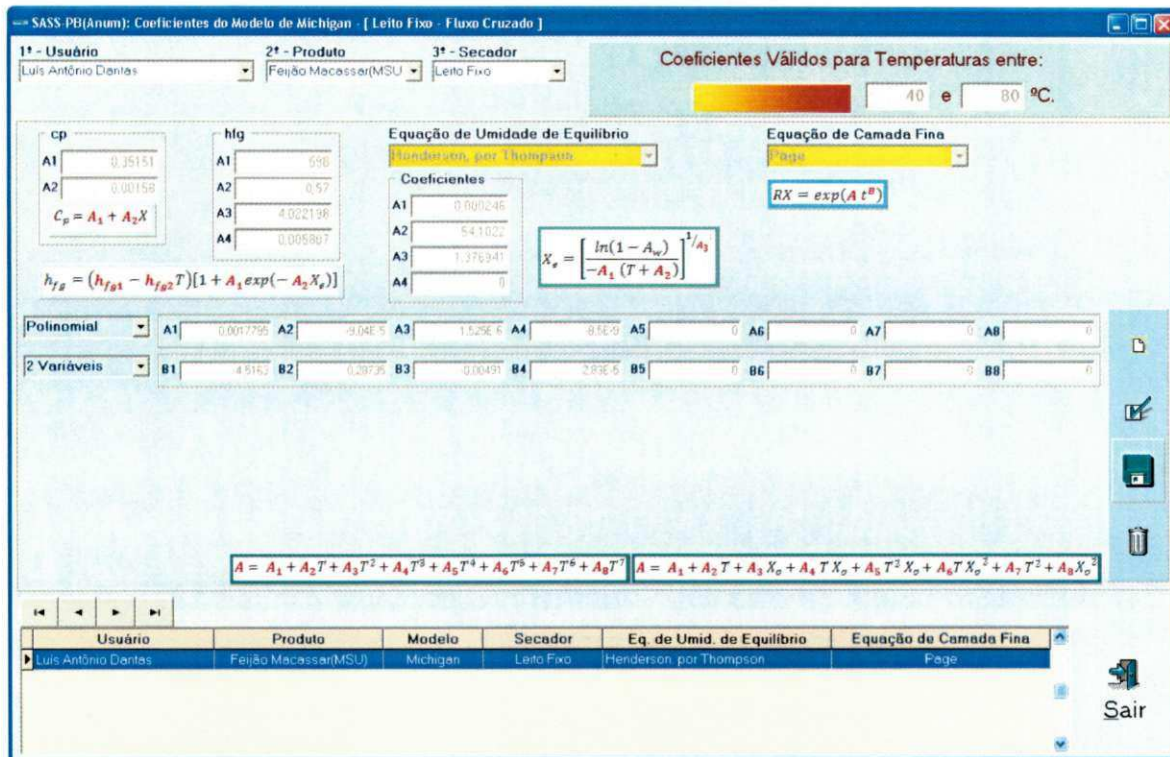


Figura 4.5 – Tela de inclusão de coeficientes para o modelo de Michigan.

A Figura 4.6 contém uma ilustração da tela utilizada na captação dos dados que serão utilizados no modelo de Thompson (camada fixa, fluxo cruzado e fluxo concorrente). Seguindo o padrão utilizado em Hukill e Michigan, nela observa-se a inclusão de 2 novos termos numéricos, decimais, que têm como objetivo expandir ainda mais o escopo matemático, uma vez que algumas formulações apresentam a equação de equilíbrio higroscópico multiplicado por um coeficiente,  $10^{-x}$ . O mesmo procedimento é utilizado em algumas formulações no tempo equivalente utilizado na equação de camada fina. Nesses casos, o  $t_{eq}$ , é dividido por um valor de adequação. Essas informações estarão particularmente vinculadas ao produto biológico selecionado.

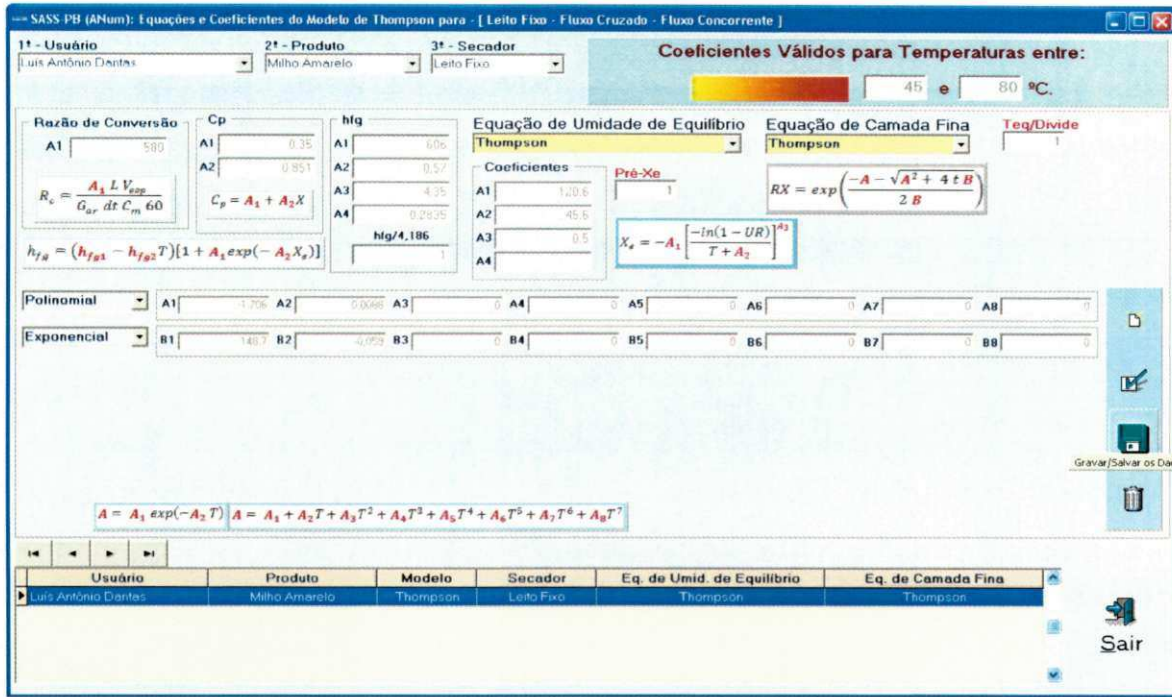


Figura 4.6 – Tela de inclusão de coeficientes para o modelo de Thompson.

#### 4.1.1.1.3. Dados Experimentais

Esta opção possibilita a inclusão de dados experimentais, cuja operacionalização está dividida em três fases distintas, como ilustrado na Figura 4.7. O objetivo deste módulo é possibilitar a comparação entre os dados experimentais e os obtidos em simulações, identificando-se assim, aquela que melhor se ajusta ao experimento.



Figura 4.7 – Tela de inclusão de dados experimentais.

Nesta janela, identificam-se três áreas de inclusão de dados. Inicialmente é feita a identificação do Usuário, Produto, Nome do Experimento, o número de camadas utilizadas, o tipo do Tempo contado e a quantidade de pontos coletados. Em seguida dá-se entrada nas condições de secagem: temperatura do produto, umidade relativa, fluxo do ar de secagem, etc.. E, finalmente, faz-se a inclusão dos dados experimentais coletados, tempo e teor de água, ponto a ponto. Ao termino, o sistema disponibiliza a opção do cálculo do teor de água médio, pontual.

#### **4.1.2. A opção Modelos**

Modelo é a opção que possibilita a efetiva simulação. Faz-se necessário ressaltar que, para tanto, as informações básicas necessárias tenham sido incluídas na opção Cadastro – Usuários e Produtos – Coeficientes: Hukill, Michigan e/ou Thompson. A partir da integralidade destas informações, e só assim, é que se torna possível a simulação.

Nesta opção está a efetiva funcionalidade do aplicativo. Pode-se utilizar qualquer um dos modelos associado ao secador específico. A disposição dos modelos, no menu de opções, segue a ordenação nominal alfabética.

A seguir são apresentadas suas características funcionais, tomando-se como base o modelo de Hukill, uma vez que os demais seguem a mesma formatação e metodologia.

##### **4.1.2.1. Interface de operação e controle**

A operacionalização da simulação se dá a partir de módulos, cuja formatação genérica está ilustrada na Figura 4.8. Procurou-se disponibilizar, em uma única tela, toda a funcionalidade de cada um dos modelos. Para tanto, é introduzido um novo componente à interface: Aba/Orelha. Quaisquer das opções selecionadas o desenho funcional será sempre o mesmo, constituído de 4 abas/orelhas, assim distribuídas: Condições de Secagem – Resultados da Simulação – Dados Operacionais – Cinéticas de Secagem [ Gráficos ]. Cada uma dessas subopções, aba/orelha, encerra em si, seu objetivo e funcionalidade.



SASS-PB (ANum): Modelo de Hukill - [ Leito Fixo ]

Condições de Secagem | Resultado da Simulação | Dados Operacionais | Cinéticas de Secagem | Gráficos |

1ª -> Usuário: Luis Antônio Dantas      2ª -> Produto: Milho Amarelo

Usuário: Luis Antônio Dantas      Produto: Milho Amarelo

Eq. de Umid. de Eq. (Xe)      Eq. de Camada Fina (Xi)

Thompson

Cp	hg	Xe	Imr
0.02725	606	120.6	0.003325
0.00851	0.57	45.6	0.00073412
	4.35	0.5	2.412584
	28.25		0.0156482

Modelo      Secador      Xe

Hukill	Leito Fixo	Thompson
--------	------------	----------

Simulação: Nome/Nº: Hukill - Fixa [Tbs/Tbu]

Número de Camadas: 4

Tempo medido em: Hora

Simulação a partir de: Bulbo Seco/Bulbo Úmido

Temperatura do Produto: Tbs 20 [°C]

Temperatura de Bulbo Úmido: Tbu 18 [°C]

Umidade Relativa: UR 0 [%]

Pressão Atmosférica: Patm 760 [mmHg]

Temperatura do ar de Secagem: Tq 60 [°C]

Teor de Água Inicial Produto: Xo 25 [%]

Fluxo do Ar de Secagem: Gar 300 [m³ min⁻¹.m²]

Teor de Água Final do Produto: Xi 13 [%]

Altura da Camada de Grãos: H 0.5 [m]

Intervalo de Tempo: Dt 1 [h]

Massa Específica: Dm 550 [kg.m³]

Área do Secador: Área 20 [m²]

Produto	Secador	Simulação	Simulação a partir de
Milho Amarelo	Leito Fixo	Hukill - Fixa [Tbs/Tbu]	Bulbo Seco/Bulbo Úmido
Milho Amarelo	Leito Fixo	Hukill - Fixa [Tbs-UR]	Bulbo Seco/Umidade Relativa
Milho Amarelo	Leito Fixo	Yellow-dent - 47.2 - 30	Bulbo Seco/Umidade Relativa

T	1ª	2ª	3ª	4ª	5ª	6ª	Média
1.00	21.88	22.55	23.09	23.52	0.00	0.00	22.76
2.00	19.06	20.17	21.13	21.94	0.00	0.00	20.58
3.00	16.56	17.93	19.17	20.27	0.00	0.00	18.48
4.00	14.39	15.85	17.27	18.58	0.00	0.00	16.52
5.00	12.52	13.98	15.45	16.88	0.00	0.00	14.71
6.00	10.94	12.31	13.76	15.24	0.00	0.00	13.06
7.00	9.61	10.86	12.23	13.68	0.00	0.00	11.59

Figura 4.8 – Tela funcional para a simulação utilizando o modelo de Hukill.

Condições de Secagem é a porta de entrada à simulação. Inicialmente, seleciona-se o Usuário e o Produto com o qual se quer trabalhar. Uma vez identificados, aparecerão em painel associativo as informações básicas e imprescindíveis à simulação, previamente cadastradas: Coeficientes e Equações utilizadas pelo modelo. Com a devida base de sustentação à matemática, em mãos, passa-se a inclusão das condições de secagem que serão utilizadas. Para se incluir, alterar, excluir, simular ou sair do módulo, utiliza-se botão de ação correspondente, disposto no painel de operações situado à direita da tela.

Observa-se, neste ponto, o conjunto de informações necessárias à simulação, dividida em duas partes distintas. Primeira, a identificação: nome do experimento; número de camadas; tipo do tempo medido; base de cálculo na determinação das propriedades psicrométricas – temperatura de bulbo seco e bulbo úmido ou temperatura de bulbo seco e umidade relativa. Segunda, condições de secagem propriamente ditas: temperatura do produto ( $T_{bs}$ ); temperatura de bulbo úmido ( $T_{bu}$ ); umidade relativa ( $UR$ ); pressão atmosférica ( $P_{atm}$ ); temperatura do ar de secagem ( $T_q$ ); teor de água inicial do produto ( $X_o$ ); fluxo do ar de secagem ( $G_{ar}$ ); teor de água final do produto ( $X_f$ ); altura da camada ( $H$ ); incremento de tempo utilizado ( $D_t$ ); peso específico ( $\rho_p$ ) e área do secador.

Para o modelo de Michigan são acrescentados: número de pontos nodais ( $n_{py}$ ); número máximo de iterações ( $i_{ter}$ ); tempo máximo da simulação ( $t_{max}$ ); largura da camada

( $L$ ); porosidade ( $\varepsilon$ ); área específica da partícula/produto ( $a$ ); massa específica ( $\rho_p$ ) e a condutividade térmica do ar ( $k_a$ )

Vencidas estas etapas, executa-se a simulação, clicando-se no botão de ação correspondente.

Observa-se, neste ponto, a abrangência deste aplicativo. Diversas condições e simulações podem ser associadas a um mesmo produto. Pode-se modificar quaisquer dos valores iniciais e observar aquele conjunto que melhor se adéqua à experimentação. É possível salvar todos os conjuntos utilizados e os resultados obtidos, particularmente, desde que univocamente identificado.

Ressalta-se o ganho operacional no controle e gestão das informações com a utilização da tecnologia do 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 que, por sua vez, poderão estar associados a um ou mais conjuntos de informações de secagem. Percebe-se, portanto, a utilização de relacionamento de entidades, tabelas (Usuário → Produtos → Parâmetros/Modelos → Condições de Secagem → Resultados), assim como a integridade referencial entre elas.

Dada a natureza e tecnologia utilizada, faz-se necessária uma observação importante, no que concerne a operação do Software. Excluindo-se um usuário, todas as informações a ele associadas serão excluídas. Excluindo-se um produto, grão/semente, as informações a ele associadas serão também excluídas, resguardando-se o usuário. Ao se excluir um conjunto de dados iniciais, os resultados da simulação a ele associado também serão apagados, sem prejuízo das informações precedentes: Usuário, Produto e Coeficientes. Este encadeamento hierárquico é o que caracteriza a integridade referencial. Há uma relação de precedência hierárquica, vertical, da informação de mais alto nível, básica, até a informação de menor nível, pontual. Mesmo que o Software interfira, alerte, quando da necessidade de se apagar/excluir um dado, atenção!

Um fator importante na utilização do banco de dados é isentar o usuário do SASS-PB<sub>ANUM</sub> da necessidade de criação de pastas, uma vez que todas as informações estarão contidas em uma base de dados, e poderão ser exportadas a outros aplicativos, como editores de texto, planilhas de cálculo, etc.

Incluídas as condições de secagem, passa-se então à simulação, utilizando-se do botão de ação correspondente. Uma vez executada, os resultados obtidos serão automaticamente mostrados na 2ª aba/orelha (Resultado da Simulação), conforme a Figura 4.9. Esta tela, para maior conforto funcional, apresenta o escopo paramétrico de

identificação, que vai desde a identificação do usuário e do produto, assim como as equações e seus respectivos coeficientes utilizados, contidos no painel correspondente, assim como as condições de secagem incluídas, estas acrescidas das informações psicrométricas do ar, devidamente identificadas.

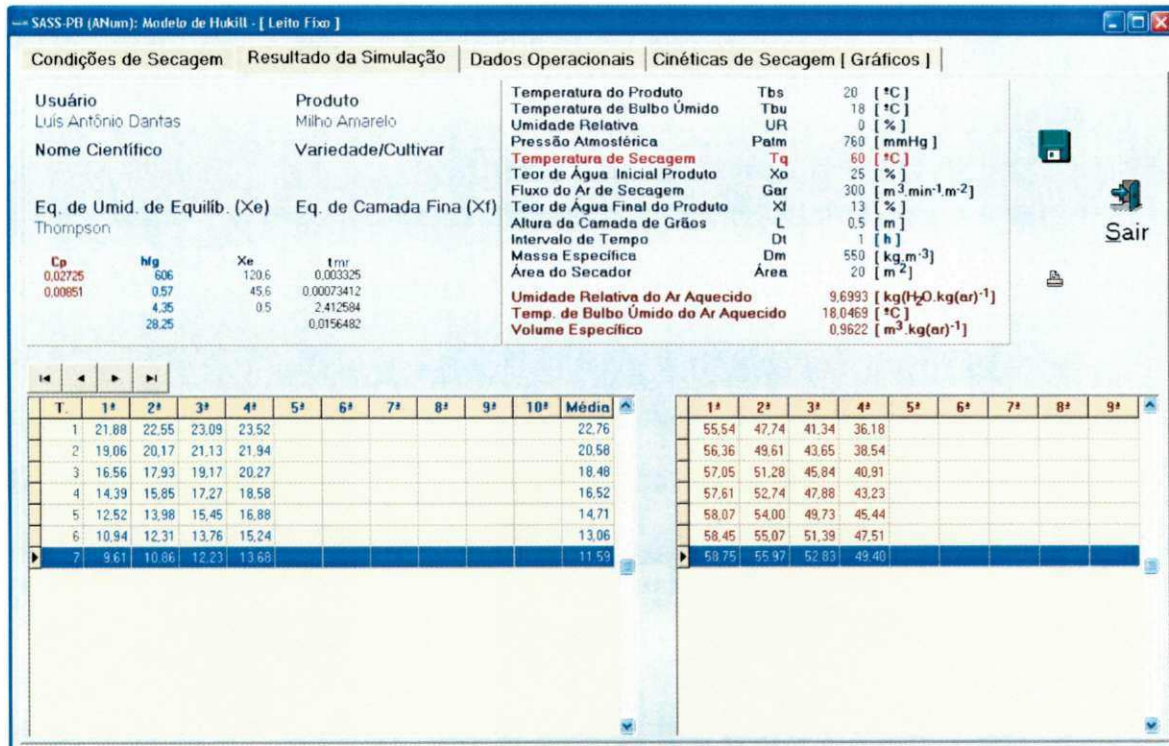


Figura 4.9 – Tela operacional de apresentação dos resultados da simulação.

Os resultados da simulação são mostrados imediatamente após os cálculos, através de dois quadros (*grids*), como ilustrado na Figura 4.9. Além desta disponibilização, os mesmos podem ser impressos, como ilustrado na Figura 4.10, e/ou exportação para outro meio ou dispositivo de armazenamento, utilizando-se das opções disponíveis no botão de ação correspondente - impressora.

UFCG - Universidade Federal de Campina Grande  
 CTRN - Centro de Tecnologia e Recursos Naturais  
 UAEA - Unidade Acadêmica de Engenharia Agrícola  
 LAPPA - Laboratório de Armazenamento e Processamento de Produtos Agrícolas  
 SASS-PB(ANum) - Software Aplicado à Simulação de Secagem de Produtos Biológicos

Página: 1  
 14/06/2012  
 23:33

**Secagem em LEITO FIXO - Modelo de HUKILL: [ Bulbo Seco/Bulbo Úmido ]**

Nº de Camadas ....: 4  
 Grão Selecionado: Milho Amarelo

Tempo	1º Camada		2º Camada		3º Camada		4º Camada		Média
	X Bs%	Temp.	X Bs%	Temp.	X Bs%	Temp.	X Bs%	Temp.	
1ª	21,88	55,54	22,55	47,74	23,09	41,34	23,52	36,18	22,76
2ª	19,06	56,36	20,17	49,61	21,13	43,65	21,94	38,54	20,58
3ª	16,56	57,05	17,93	51,28	19,17	45,84	20,27	40,91	18,48
4ª	14,39	57,61	15,85	52,74	17,27	47,88	18,58	43,23	16,52
5ª	12,52	58,07	13,98	54,00	15,45	49,73	16,88	45,44	14,71
6ª	10,94	58,45	12,31	55,07	13,76	51,39	15,24	47,51	13,06
7ª	9,61	58,75	10,86	55,97	12,23	52,83	13,68	49,40	11,59

Dados de Entrada:

Temperatura do Bulbo Seco 20  
 Temperatura do Bulbo Úmido 18  
 Umidade Relativa  
 Pressão Atmosférica do Ar 760  
 Temperatura do Ar Aquecido 60  
 Umidade Inicial do Produto 25  
 Vazão do Ar de Secagem 300  
 Umidade Final do Produto 13  
 Altura da Camada de Grãos 0,5  
 Incremento de Tempo 1  
 Área do Secador 20

Eq. de Umid. de Equilíbrio Thompson  
 Eq. de Camada fina

Coefficientes Utilizados

Cp	hfg	Xe	Tmr
0,02725	606	120,6	0,003325
0,00851	0,57	45,6	0,00073412
	4,35	0,5	2,412584
	28,25	0	0,0156482

Figura 4.10 – Exemplo de relatório impresso dos dados simulados.

Como pode ser observado, na Figura 4.10, além dos resultados obtidos: tempo, teor de água, temperatura, em cada uma das camadas, e o teor de água médio, disponibiliza-se no mesmo relatório, todas as informações condicionantes: condições de secagem e equações e seus respectivos coeficientes, devidamente identificados.

Dados Operacionais, terceira subopção, disponibiliza a dinâmica das variáveis internas e suas variações no tempo: calor específico do produto; calor latente de vaporização da água do produto; pressão parcial de vapor; pressão de vapor de saturação; razão de mistura do ar de secagem; teor de água do produto; temperatura do produto; etc., como ilustrado na Figura 4.11.

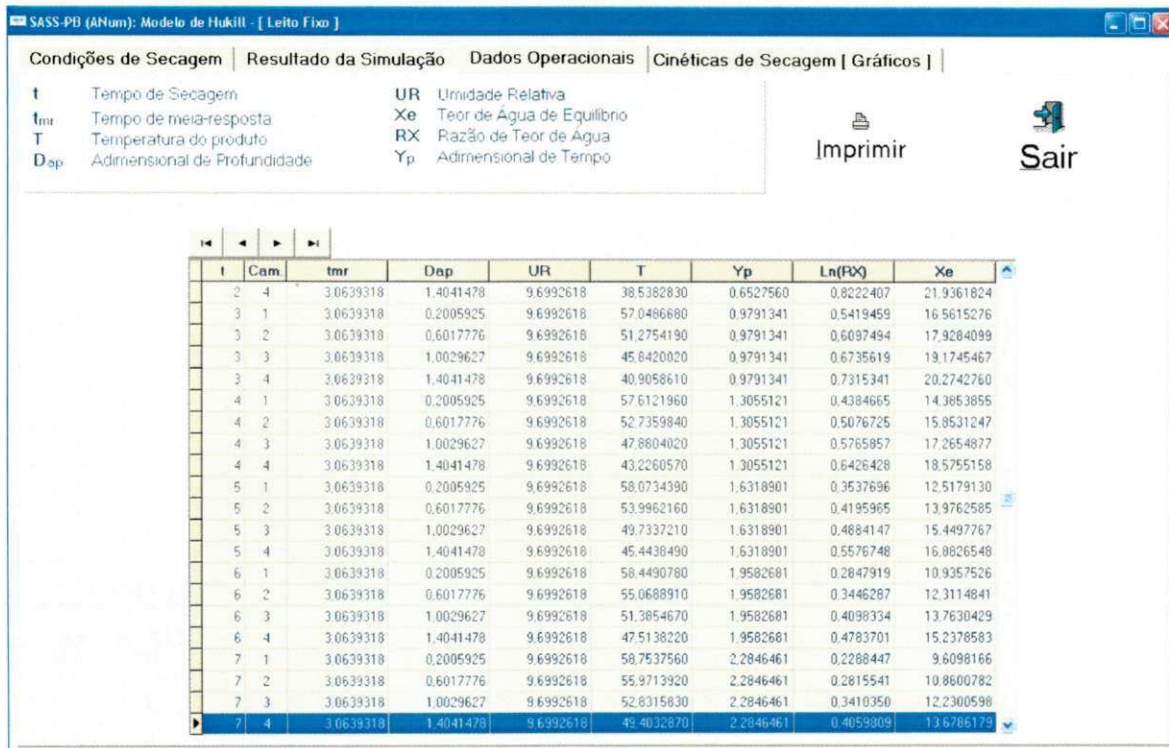


Figura 4.11 – Tela operacional de apresentação dos dados operacionais.

A Figura 4.11, particular ao modelo de Hukill, ilustra a funcionalidade desta subopção, Dados Operacionais, cujo objetivo é fornecer ao usuário, a possibilidade de análise real e imediata, não apenas das condições de secagem, mas principalmente, dos coeficientes e equações utilizados. Tem-se a opção de imprimir estes resultados, em relatório semelhante ao ilustrado na Figura 4.10. Esta opção está disponível para todos os modelos.

Cinéticas de Secagem [ Gráficos ], 4ª aba/orelha funcional, disponibiliza opções para a visualização dos dados obtidos: perda do teor de água do produto – todas as camadas; teor de água, camada a camada; teor de água médio; temperatura do produto em todas as camadas; temperatura camada a camada. Essas opções de visualização e acesso dos dados processados se dão através de botões de ação disponíveis na tela correspondente, como ilustrado na Figura 4.12. Aplica-se a esta opção, a mesma funcionalidade: imprimir, salvar, exportar.

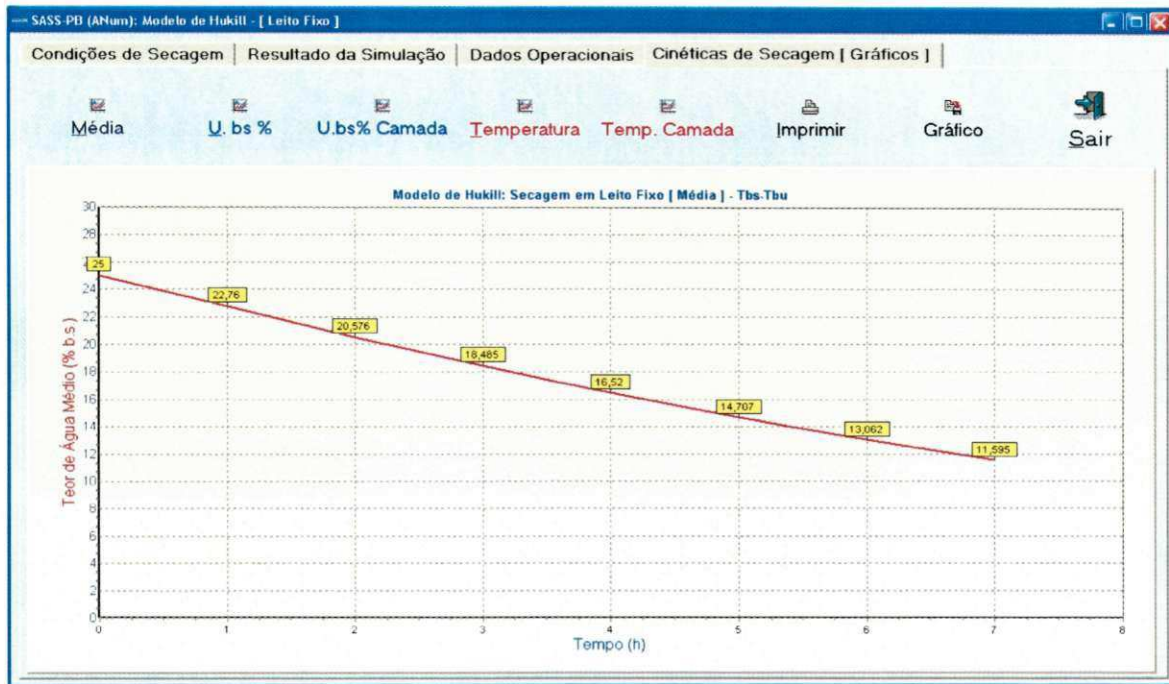


Figura 4.12 – Tela de apresentação dos resultados obtidos: Cinéticas de secagem.

#### 4.1.3. Análises

Esta opção, última de Modelos, tem como objetivo permitir ao usuário a comparação entre os dados experimentais, previamente incluídos, e os dados simulados já calculados. Neste módulo, o usuário poderá identificar a simulação que melhor se ajusta aos dados experimentais como ilustrado na Figura 4.13.

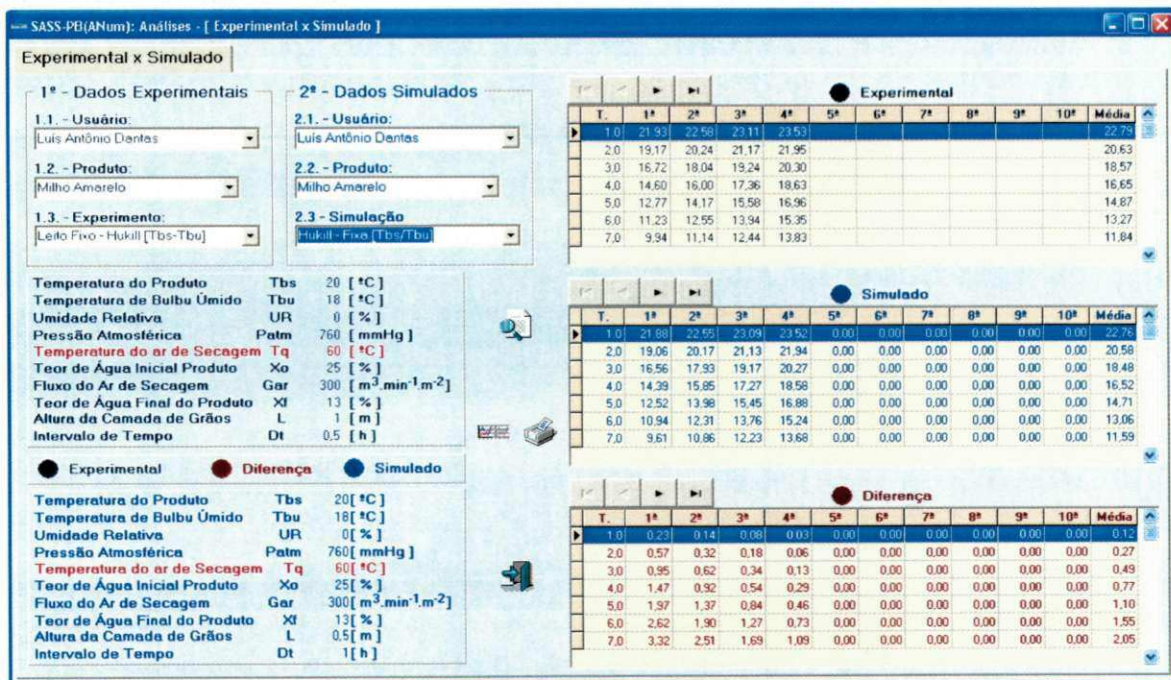
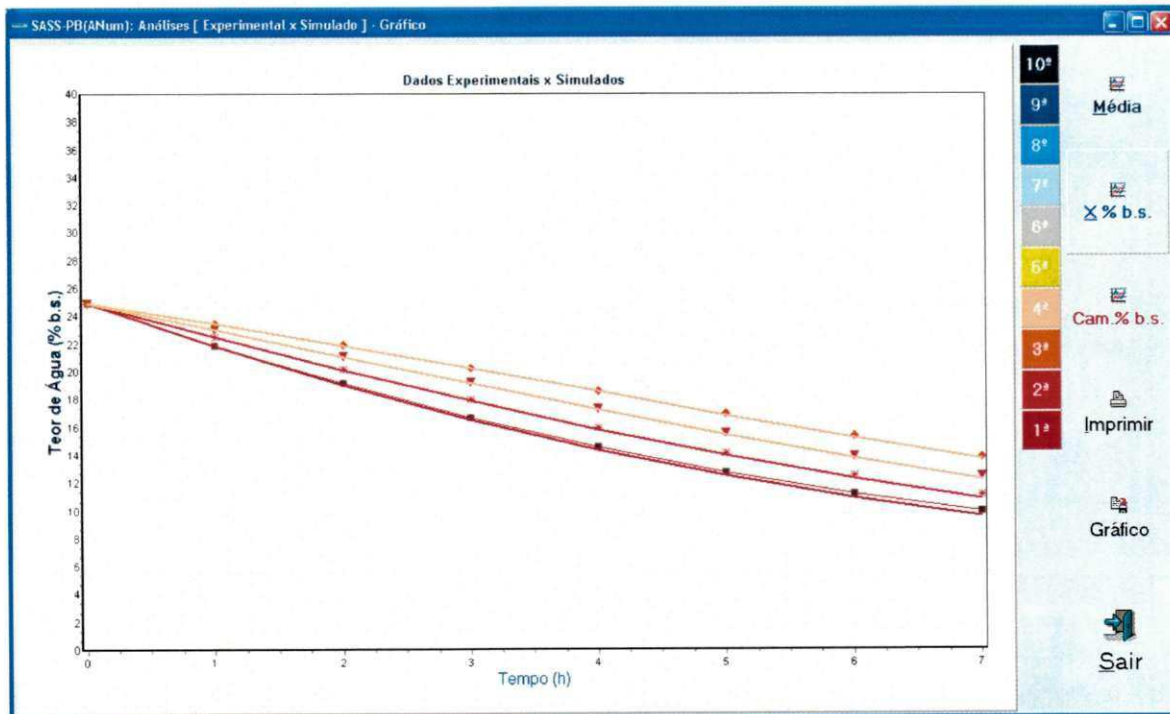


Figura 4.13 – Tela operacional de análise entre os dados experimentais e simulados.

Observa-se na Figura 4.13, a seguinte disposição funcional: Na parte superior esquerda da tela estão dispostos dois quadros: 1º - Dados Experimentais; 2º - Dados Simulados. Cada um desses quadros, contem um conjunto de identificação e seleção: 1.1. Usuário; 1.2. Produto; 1.3. Experimento. Seleccionada a tripla: [ Usuário – Produto – Experimento ], nos quadros correspondentes, o sistema irá buscar no banco de dados, as condições de secagem e dados experimentais e simulados associados, apresentando-os em dois painéis distintamente identificados, conforme legenda à mostra. As medições experimentais e os dados calculados, são apresentados em 2 grids, assim distribuídos: o grid superior apresenta os dados experimentais; o grid intermediário apresenta os dados simulados; o grid inferior apresentará os desvios calculados.

Ainda nesta Figura 4.13, aparecem três botões de ação, dispostos triangularmente, indicando visualmente, de cima para baixo, a precedência entre eles. O botão superior, identificado por uma lupa sobreposta a um formulário, tem como objetivo calcular as diferenças e desvios, Equação (88), entre os dados experimentais e os dados simulados selecionados, disponibilizando-os imediatamente no grid inferior. Mantêm-se, nesta opção, a mesma funcionalidade das demais: visualizar, imprimir e/ou exportar. Na Figura 4.14 está a tela de apresentação das cinéticas dos dados experimentais e simulados. Nela, pode-se observar a possibilidade de se visualizar o teor de água médio, o teor de água em todas as camadas ou o teor de água em cada uma das camadas individualmente.



**Figura 4.14** – Tela de apresentação das cinéticas dos dados experimentais e simulados.

A Figura 4.15 ilustra o formato que o SASS-PB<sub>ANUM</sub> usa na impressão dos dados experimentais, simulados e suas diferenças e respectivos desvios.

UFCG - Universidade Federal de Campina Grande  
 CTRN - Centro de Tecnologia e Recursos Naturais  
 UAEA - Unidade Acadêmica de Engenharia Agrícola  
 LAPP - Laboratório de Armazenamento e Processamento de Produtos Agrícolas  
 SASS-PB(ANum) - Software Aplicado à Simulação de Secagem de Produtos Biológicos

Secador de LEITO FIXO - Modelo de << HUKILL >>

Nº de Camadas ....: 4  
 Grão Selecionado: Milho Amarelo

Dados Experimentais						Dados Simulados					Desvio e Teor de Água [ % ]						
Camadas						Camadas					Camadas						
Tempo	1. <sup>a</sup>	2. <sup>a</sup>	3. <sup>a</sup>	4. <sup>a</sup>	Méd.	1. <sup>a</sup>	2. <sup>a</sup>	3. <sup>a</sup>	4. <sup>a</sup>	Méd.	1. <sup>a</sup>	2. <sup>a</sup>	3. <sup>a</sup>	4. <sup>a</sup>	Méd.	X%	
1,0	21,93	22,58	23,11	23,53	22,79	21,88	22,55	23,09	23,52	22,76	0,05	0,03	0,02	0,01	0,03	X%	
											0,23	0,14	0,08	0,03	0,12		
2,0	19,17	20,24	21,17	21,95	20,63	19,06	20,17	21,13	21,94	20,58	0,11	0,07	0,04	0,01	0,06	X%	
											0,57	0,32	0,18	0,06	0,27		
3,0	16,72	18,04	19,24	20,30	18,57	16,56	17,93	19,17	20,27	18,48	0,16	0,11	0,07	0,03	0,09	X%	
											0,95	0,62	0,34	0,13	0,49		
4,0	14,60	16,00	17,36	18,63	16,65	14,39	15,85	17,27	18,58	16,52	0,21	0,15	0,09	0,05	0,13	X%	
											1,47	0,92	0,54	0,29	0,77		
5,0	12,77	14,17	15,58	16,96	14,87	12,52	13,98	15,45	16,88	14,71	0,25	0,19	0,13	0,08	0,16	X%	
											1,97	1,37	0,84	0,46	1,10		
6,0	11,23	12,55	13,94	15,35	13,27	10,94	12,31	13,76	15,24	13,06	0,29	0,24	0,18	0,11	0,21	X%	
											2,62	1,90	1,27	0,73	1,55		
7,0	9,94	11,14	12,44	13,83	11,84	9,61	10,86	12,23	13,68	11,59	0,33	0,28	0,21	0,15	0,24	X%	
											3,32	2,51	1,69	1,09	2,05		
<b>X% Médio</b>											0,2	0,15	0,1	0,06	0,13		
<b>Desvio Médio</b>											1,59	1,11	0,71	0,4	0,91		
Dados de Entrada		EXPERIMENTAL	SIMULADO														
Temperatura do Bulbo Seco		20	20														
Temperatura do Bulbo Úmido		18	18														
Umidade Relativa																	
Pressão Atmosférica do Ar		760	760														
Temperatura do Ar Aquecido		60	60														
Umidade Inicial do Produto		25	25														
Fluxo do Ar de Secagem		300	300														
Umidade Final do Produto		-	-														
Altura da Camada		1	5														

Figura 4.15 – Relatório de análise dos dados experimentais e simulados.

#### 4.1.4 Psicrometria

Esta opção permite o cálculo das propriedades psicrométricas do ar, a partir da temperatura de bulbo seco ( $T_{bs}$ , °C) e temperatura de bulbo úmido ( $T_{bu}$ , °C) ou a partir da temperatura de bulbo seco ( $T_{bs}$ , °C) e umidade relativa ( $UR$ , %). Ambas as opções, utilizam a pressão atmosférica ( $P_{atm}$ , mmHG), conforme Figura 4.16.



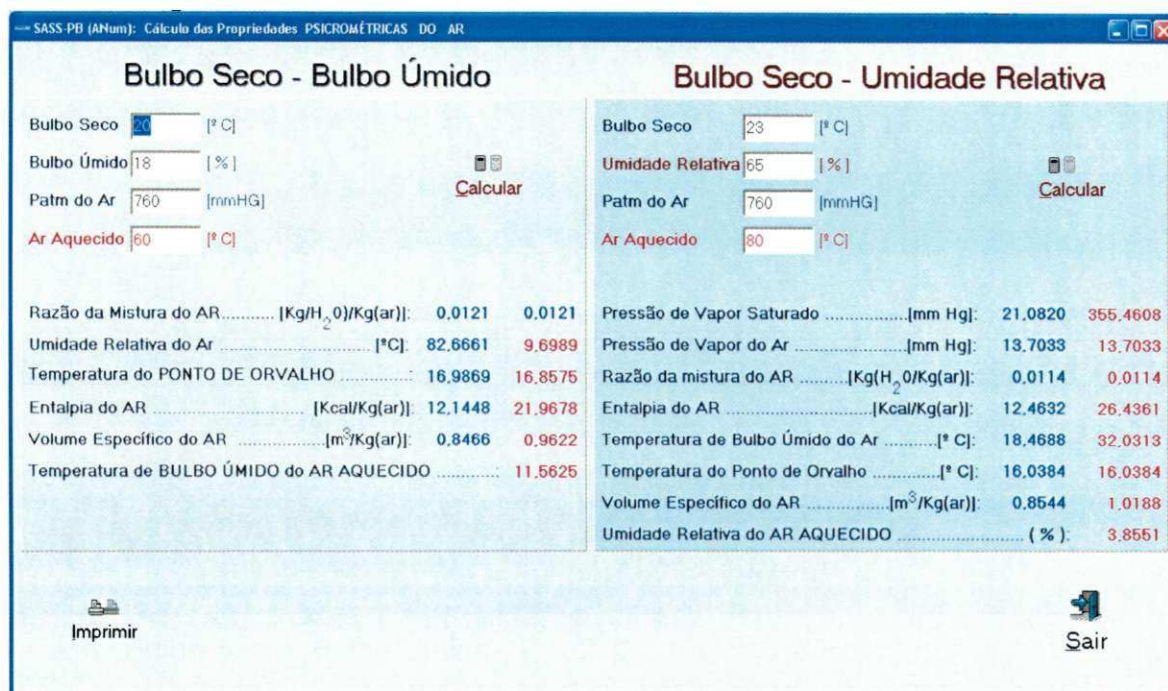


Figura 4.16 – Tela operacional para o cálculo das propriedades psicrométricas do ar.

Observa-se nesta Figura 4.16, a disposição dos dados em dois painéis distintos. Em ambos, os dados cálculos estão dispostos em duas colunas. A primeira destina-se à apresentação dos dados calculados a partir da temperatura do bulbo seco, com a fonte em azul claro. A segunda, a partir da temperatura do ar aquecido, com a fonte em vermelho. Os resultados podem ser impressos no formato ilustrado na Figura 4.17.

UFCG - Universidade Federal de Campina Grande  
 CTRN - Centro de Tecnologia e Recursos Naturais  
 UAEEg - Unidade Acadêmica de Engenharia Agrícola  
 LAPP - Laboratório de Armazenamento e Processamento de Produtos Agrícolas  
 SASS-PB<sub>ANUM</sub> - Software Aplicado à Simulação de Secagem de Produtos Biológicos

Página: 1  
 29/05/2012  
 10:45

Cálculo das Propriedades Psicrométricas do AR

Dados de Entrada					
Bulbo Seco - Bulbo Úmido			Bulbo Seco - Umidade Relativa		
Temp. de BULBO SECO	20	[ °C ]	Temp. de BULBO SECO	23	[ °C ]
Temp. de BULBO ÚMIDO	18	[ °C ]	Umidade Relativa do AR	65	[ % ]
Temp. do AR AQUECIDO	60	[ °C ]	Temp. do AR AQUECIDO	80	[ °C ]
Pressão Atmosférica do AR	760	[ mm Hg ]	Pressão Atmosférica do AR	760	[ mm Hg ]

Saída - Resultados					
	B.S./B.U.		B.S./U.R.		Unidade
Razão da Mistura do Ar	0.0121	0,0121	0.0114	0,0114	[(kg/H <sub>2</sub> O)/kg(ar)]
Umidade Relativa do Ar	82.6689	9,6993	-----	-----	[ % ]
Temperatura do Ponto de Orvalho	16.9874	16,8581	16.0384	16,0384	[ °C ]

Figura 4.17 – Relatório dos dados psicrométricos calculados.

Vê-se, a partir da Figura 4.17, os dados de entrada para ambas as opções de cálculo:  $[T_{bs}, T_{bu}]$  e  $[T_{bs}, UR]$ , na parte superior e dispostos lado a lado, seguindo a formatação de entrada. Os dados resultantes da temperatura do ar aquecido, para melhor conforto visual, estão em negrito.

As Figuras [ 4.1 – 4.17 ] elencadas encerram a apresentação operacional do SASS-PB<sub>ANUM</sub>. Resguardando-se as características inerentes a cada um dos modelos aplicados aos secadores específicos, toda a operacionalização segue o mesmo critério e apresentação 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 utilização da ferramenta.

#### **4.1.5 A opção Sobre**

Esta opção presta-se à identificação, responsabilidade e direito autoral.

## **4.2. Discussão dos Resultados**

Para a validação do SASS-PB<sub>ANUM</sub>, foi adotada a seguinte metodologia. Inicialmente foram comparados dados disponibilizados pela literatura, fornecidos por outras aplicações voltadas à simulação de secagem e, em seguida, foram feitas validações com dados experimentais. Esta metodologia é justificada pelas características do software, uma vez que as demais aplicações têm os coeficientes inseridos no código fonte. No SASS-PB<sub>ANUM</sub> estes estarão armazenados em um banco de dados, não estando naturalmente incorporados ao código nativo, compilado, sendo transferidos e associados às equações correspondentes em tempo de execução.

A validação inicial é feita a partir dos dados simulados gerados pelo software SASG<sub>w</sub> - Software aplicado à simulação de secagem de grãos, versão Windows - apresentado por CAVALCANTI MATA *et al.* (1999), para o milho comum utilizando o modelo de Hukill para secador de leito fixo e o modelo de Thompson para secador de leito fixo, fluxo cruzado e fluxo concorrente. A simulação, em ambos os modelos, pode ser feita utilizando-se as temperaturas de bulbo seco e bulbo úmido, ou a temperatura de bulbo seco e a umidade relativa.

**4.2.1. Dados simulados versus SASS-PB<sub>ANUM</sub>**

Neste tópico serão comparados os dados simulados obtidos por CAVALCANTI MATA *et al.* (1999) utilizando o software SASG<sub>w</sub>, para o milho, a partir do modelo de Hukill aplicado a leito fixo e Thompson para leito fixo, fluxo cruzado e fluxo concorrente. Estes dados serão comparados aos dados obtidos em simulações utilizando-se o software SASS-PB<sub>ANUM</sub>, utilizando-se os modelos e secadores supracitados.

**4.2.1.1. Modelo de Hukill – leito fixo**

O modelo de Hukill, aplicado ao secador de leito fixo e ao produto milho comum, constante no software SASG<sub>w</sub>, dispõe os coeficientes das equações como parte integrante do código compilado, isto é, são partes fixas do programa, conforme o conteúdo da Tabela 4.1.

**Tabela 4.1** – Coeficientes utilizados no modelo de Hukill pelo SASG<sub>w</sub>

Equação	Coeficientes			
$t_{mr}$	0,003325;	-0,00073412;	2,412584;	-0,0156482
$h_{fg}$	606;	-0,57;	4,35;	-28,25
$X_e [52,0 \leq UR < 99,9]$	21,2198;	0,0146;	<b>1,8</b> ;	32,00;
$X_e [0,0 < UR \leq 99,9]$	7,4776;	0,4548	<b>1,8</b> ;	32,00;
$c_p$	<b>1,8</b>			

A Tabela 4.2 contem os coeficientes, a partir dos quais foi feita a simulação, utilizando-se do software SASS-PB<sub>ANUM</sub>. Estes estão armazenados em meio exterior ao aplicativo, sendo carregado para a equação correspondente quando da utilização da mesma, em tempo de execução, não sendo, portanto, parte integrante do código.

**Tabela 4.2** – Coeficientes utilizados no modelo de Hukill pelo SASS-PB<sub>ANUM</sub>

Equação	Coeficientes			
$t_{mr}$ – Equação(16)	0,003325;	-0,00073412;	2,412584;	-0,0156482
$h_{fg}$ – Equação (24)	606;	-0,57;	4,35;	-28,25
$X_e$ - Equação (71)	120,5;	45, 6;	0,5;	
$c_p$	0,02725;	0,00851;		

A Tabela 4.3 contem os dados simulados pelo modelo de Hukill em secador de leito fixo, para o milho comum, a partir da temperatura de bulbo seco e temperatura de bulbo úmido. As condições de secagem para esta simulação são: temperatura de bulbo seco (20°C); temperatura de bulbo úmido (18 °C); pressão atmosférica (760 mmHg); temperatura de secagem (60°C); teor de água inicial (25% b.s.); fluxo do ar de secagem (300 m<sup>3</sup> min<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>); teor de água final (13% b.s.); altura da camada (0,5 m); incremento de tempo (1 h); peso específico (550 kg m<sup>-3</sup>); área do secador (20 m<sup>2</sup>). Para estas mesmas condições, utilizando-se o SASS-PB<sub>ANUM</sub>, os coeficientes são transferidos do dispositivo de armazenamento para as equações, em tempo de execução.

**Tabela 4.3** – Modelo de Hukill: SASG<sub>w</sub> x SASS-PB<sub>ANUM</sub>

Hukill - Leito Fixo - Tbs-Tbu										
SASG <sub>w</sub>						SASS-PB <sub>ANUM</sub>				
Camadas						Camadas				
Tempo	1 <sup>a</sup>	2 <sup>a</sup>	3 <sup>a</sup>	4 <sup>a</sup>	Média	1 <sup>a</sup>	2 <sup>a</sup>	3 <sup>a</sup>	4 <sup>a</sup>	Média
0	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00
1	21,93	22,58	23,11	23,53	22,79	21,88	22,55	23,09	23,52	22,76
2	19,17	20,24	21,17	21,95	20,63	19,06	20,17	21,13	21,94	20,58
3	16,72	18,04	19,24	20,30	18,57	16,56	17,93	19,17	20,27	18,48
4	14,60	16,00	17,36	18,63	16,65	14,39	15,85	17,27	18,58	16,52
5	12,77	14,17	15,58	16,96	14,87	12,52	13,98	15,45	16,88	14,71
6	11,23	12,55	13,94	15,35	13,27	10,94	12,31	13,76	15,24	13,06
7	9,94	11,14	12,44	13,83	11,84	9,61	10,86	12,23	13,68	11,59

As diferenças observadas na simulação estão dispostos na Tabela 4.4, a seguir.

**Tabela 4.4** – Modelo de Hukill – Diferenças observadas: SASG<sub>w</sub> x SASS-PB<sub>ANUM</sub>

Hukill - Leito Fixo - Tbs-Tbu										
Diferenças: SASG <sub>w</sub> - SASS-PB <sub>ANUM</sub>						Desvios: SASG <sub>w</sub> x SASS-PB <sub>ANUM</sub> (%)				
Camadas						Camadas				
Tempo	1 <sup>a</sup>	2 <sup>a</sup>	3 <sup>a</sup>	4 <sup>a</sup>	Média	1 <sup>a</sup>	2 <sup>a</sup>	3 <sup>a</sup>	4 <sup>a</sup>	Média
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1	0,05	0,03	0,02	0,01	0,03	0,23	0,13	0,09	0,04	0,13
2	0,11	0,07	0,04	0,01	0,05	0,57	0,35	0,19	0,05	0,24
3	0,16	0,11	0,07	0,03	0,09	0,96	0,61	0,36	0,15	0,48
4	0,21	0,15	0,09	0,05	0,13	1,44	0,94	0,52	0,27	0,78
5	0,25	0,19	0,13	0,08	0,16	1,96	1,34	0,83	0,47	1,08
6	0,29	0,24	0,18	0,11	0,21	2,58	1,91	1,29	0,72	1,58
7	0,33	0,28	0,21	0,15	0,25	3,32	2,51	1,69	1,08	2,11

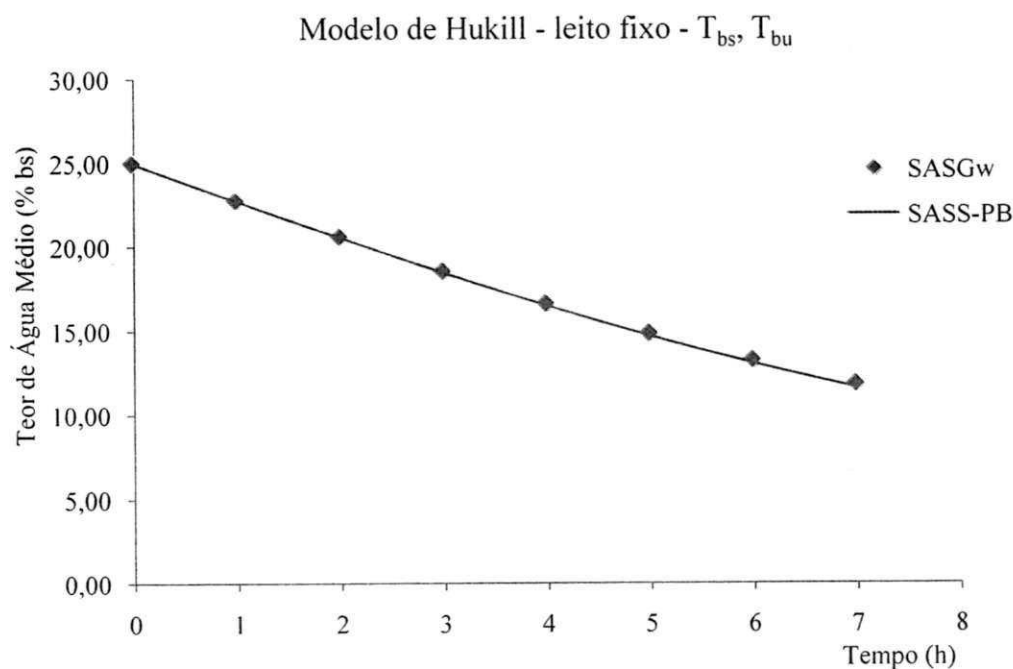
A partir da Tabela 4.4 é possível verificar as diferenças pontuais, camada a camada em cada hora transcorrida. Os desvios correspondentes representam, respectivamente: |1,38|%, |0,97|%, |0,62|% e |0,35|% nas 1ª, 2ª, 3ª e 4ª camadas, o que representa em teor de água: |0,14|%, |0,11|%, |0,08|% e |0,05|%, respectivamente. O desvio médio observado é da ordem de |0,80|% correspondendo a |0,09|% do teor de água.

No SASG<sub>w</sub>, são utilizadas duas equações distintas para a determinação do teor de água de equilíbrio, em faixas distintas da umidade relativa. Neste mesmo software, o calor específico do produto é um valor previamente calculado.

No SASS-PB<sub>ANUM</sub> utiliza-se, para todo o escopo da umidade relativa, a equação proposta por Thompson e o calor específico é determinado a partir da equação correspondente, em tempo de execução.

Pode-se concluir que as diferenças e desvios observados, devem-se as particularidades implementadas em cada um dos aplicativos e que o SASS-PB<sub>ANUM</sub>, simula satisfatoriamente a secagem a partir deste modelo.

A Figura 4.18 contém o gráfico ilustrativo dos teores de água médio obtidos a partir dos aplicativos confrontados.



**Figura 4.18** – Teor de água médio: Modelo de Hukill – leito fixo.

**4.2.1.2. Modelo de Thompson – leito fixo**

São comparados os dados obtidos por CAVALCANTI MATA *et al.* (1999) - SASG<sub>W</sub> utilizando o modelo de Thompson para o secador de leito fixo, com coeficientes ajustados ao milho comum. Os coeficientes utilizados nas equações, neste software, são parte integrante do código compilado, e estão dispostos na Tabela 4.5.

**Tabela 4.5** – Coeficientes utilizados no modelo de Thompson – leito fixo - SASG<sub>W</sub>

Equação	Coeficientes			
$R_c$ – Equação (59)	580			
$c_p$ – Equação (25)	0,35;	0,851;		
$h_{fg}$ – Equação (24)	606;	-0,57;	4,35;	-0,2825
$X_e$ - Equação (71)	120,5;	45,6;	0,5;	
$t_{eq}$ – Equação (80.b)				
$A$ - Equação (82)	-1,706;	0,0088;		
$B$ - Equação (81)	148,7;	-0,059;		

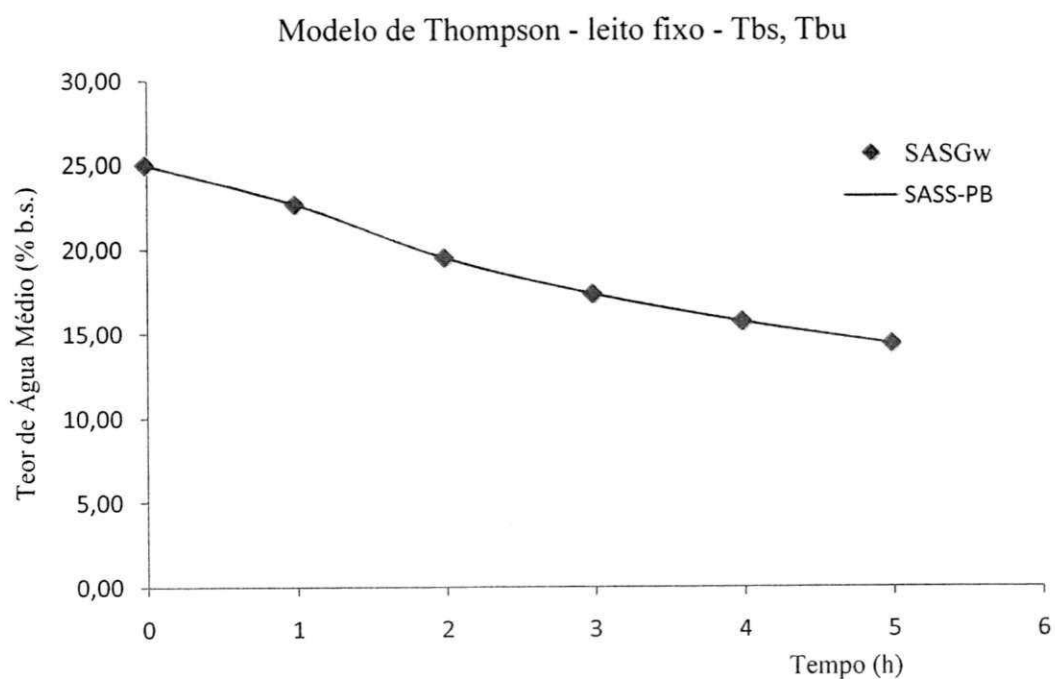
Este mesmo conjunto de dados é utilizado no SASS-PB<sub>ANUM</sub> e estão armazenados em meio exterior ao aplicativo, sendo carregados para a equação correspondente quando da utilização da mesma, em tempo de execução, não fazendo parte do código fonte do aplicativo.

A Tabela 4.6 contem os dados simulados pelo modelo de Thompson em secador de leito fixo, para o milho comum, a partir da temperatura de bulbo seco e temperatura de bulbo úmido. As condições de secagem para esta simulação são: temperatura de bulbo seco (20 °C); temperatura de bulbo úmido (18 °C); pressão atmosférica (760 mmHg); temperatura de secagem (60 °C); teor de água inicial (25% b.s.); fluxo do ar de secagem (15 m<sup>3</sup> min<sup>-1</sup> min<sup>-2</sup>); teor de água final (15% b.s.); altura da camada (0,4 m); incremento de tempo (1 h). Para estas mesmas condições, utilizando-se o SASS-PB<sub>ANUM</sub>, os coeficientes são transferidos do dispositivo de armazenamento para as equações, em tempo de execução.

**Tabela 4.6** – Modelo de Thompson – leito fixo: SASG<sub>w</sub> x SASS-PB<sub>ANUM</sub>

Thompson - Leito Fixo - Tbs-Tbu										
SASG <sub>w</sub>						SASS-PB <sub>ANUM</sub>				
Camadas						Camadas				
Tempo	1 <sup>a</sup>	2 <sup>a</sup>	3 <sup>a</sup>	4 <sup>a</sup>	Média	1 <sup>a</sup>	2 <sup>a</sup>	3 <sup>a</sup>	4 <sup>a</sup>	Média
0	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00
1	19,80	21,78	23,22	25,81	22,65	19,80	21,78	23,22	25,81	22,65
2	16,89	18,81	20,41	21,89	19,50	16,89	18,81	20,41	21,89	19,50
3	14,96	16,64	18,15	19,62	17,34	14,96	16,64	18,15	19,62	17,34
4	13,55	15,02	16,39	17,15	15,68	13,55	15,02	16,39	17,75	15,68
5	12,47	13,76	14,99	16,23	14,36	12,47	13,76	14,99	16,23	14,36

A partir dos dados constantes na Tabela 4.6 observa-se uma total coincidência entre os dados obtidos nos softwares SASG<sub>w</sub> e SASS-PB<sub>ANUM</sub>. A partir disto, pode-se afirmar que a metodologia utilizada no SASS-PB<sub>ANUM</sub> é segura e apresenta dados compatíveis com a metodologia padrão, como ilustrado na Figura 4.19.

**Figura 4.19** – Teor de água médio: Modelo de Thompson - leito fixo.

#### 4.2.1.3. Modelo de Thompson – fluxo cruzado

Em sequência às análises, serão comparados os dados obtidos por CAVALCANTI MATA *et al.* (1999) - SASG<sub>w</sub> utilizando o modelo de Thompson para o secador de fluxo cruzado, com coeficientes ajustados ao milho comum. Os coeficientes utilizados nas equações, integrados ao código fonte, estão dispostos na Tabela 4.5. As equações de determinação do teor de água de equilíbrio e equação de camada fina são as propostas por Thompson. Os coeficientes A e B necessários à determinação do tempo equivalente têm como formulação matemática, a polinomial dependente da temperatura e exponencial, respectivamente, como notificadas na Tabela 4.7 abaixo.

**Tabela 4.7** – Coeficientes utilizados em Thompson – fluxo cruzado – SASS-PB<sub>ANUM</sub>

Equação	Coeficientes			
$R_c$ – Equação (59)	580			
$c_p$ – Equação (25)	0,35;	0,85;		
$h_{fg}$ – Equação (24)	606;	-0,57;	4,35;	-0,2825
$X_e$ - Equação (71)	120,5;	45, 6;	0,5;	
$t_{eq}$ – Equação (80.b)				
$A$ – Equação (82)	1,706;	0,0088;		
$B$ - Equação (81)	148,7;	-0,059;		

O conjunto de coeficientes utilizado pelo software SASG<sub>w</sub>, é também utilizado pelo SASS-PB<sub>ANUM</sub>. Sendo que, neste último, os mesmos estão armazenados em meio magnético exterior, não fazendo parte do código fonte compilado, sendo carregado quando da seleção dos mesmos, em tempo de execução, não fazendo parte do código fonte do aplicativo.

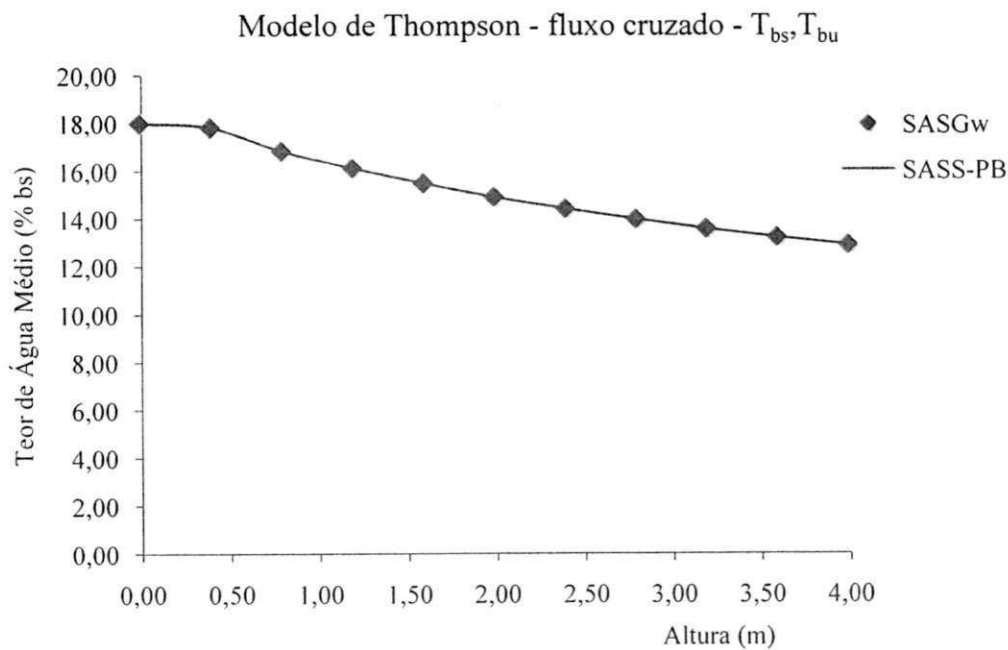
A Tabela 4.8 contem os dados simulados pelo modelo de Thompson em secador de fluxo cruzado, para o milho comum, a partir da temperatura de bulbo seco e temperatura de bulbo úmido. As condições de secagem para esta simulação são: temperatura de bulbo seco (20 °C); temperatura de bulbo úmido (18 °C); pressão atmosférica (760 mmHg); temperatura de secagem (60 °C); teor de água inicial (18% b.s.); fluxo do ar de secagem (20 m<sup>3</sup> min<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>); velocidade do produto (0,033 m min<sup>-1</sup>); altura da camada (4 m); divisão da camada (0,4 m); espessura da camada (0,25 m).



**Tabela 4.8** – Modelo de Thompson – fluxo cruzado: SASG<sub>W</sub> x SASS-PB<sub>ANUM</sub>

Thompson - Fluxo Cruzado - T <sub>bs</sub> -T <sub>bu</sub>									
SASG <sub>W</sub>					SASS-PB <sub>ANUM</sub>				
Camadas					Camadas				
Altura	1 <sup>a</sup>	2 <sup>a</sup>	3 <sup>a</sup>	Média	1 <sup>a</sup>	2 <sup>a</sup>	3 <sup>a</sup>	Média	
0,40	17,09	17,74	18,64	17,82	17,09	17,74	18,64	17,82	
0,80	16,15	16,97	17,04	16,85	16,15	16,97	17,04	16,85	
1,20	15,36	16,22	16,84	16,14	15,36	16,22	16,84	16,14	
1,60	14,71	15,55	13,23	15,50	14,71	15,55	13,23	15,50	
2,00	14,16	14,98	15,65	14,93	14,16	14,98	15,65	14,93	
2,40	13,68	14,47	15,14	14,43	13,68	14,47	15,14	14,43	
2,80	13,26	14,02	14,68	13,99	13,26	14,02	14,68	13,99	
3,20	12,89	13,62	14,26	13,59	12,89	13,62	14,26	13,59	
3,60	12,55	13,25	13,88	13,23	12,55	13,25	13,88	13,23	
4,00	12,25	12,92	13,53	12,90	12,25	12,92	13,53	12,90	
Média	14,55	15,25	15,54	15,77	14,55	15,25	15,54	15,77	

Observa-se, na Tabela 4.8, uma total convergência dos dados de ambos os aplicativos, como representada pela Figura 4.20. Testes efetuados na fase de desenvolvimento, através de simulações sucessivas, apresentaram a mesma estabilidade. A partir do exposto, pode-se concluir que o SASS-PB<sub>ANUM</sub> simula, satisfatoriamente, o modelo de Thompson aplicado ao secador de fluxo cruzado.



**Figura 4.20** – Teor de água médio: Modelo de Thompson - fluxo cruzado.

## 4.2.1.4. Modelo de Thompson – fluxo concorrente

Serão comparados os dados obtidos por CAVALCANTI MATA *et al.* (1999) - SASG<sub>w</sub> utilizando o modelo de Thompson para o secador com fluxo concorrente, com coeficientes ajustados ao milho comum. Os coeficientes utilizados nas equações, integrados ao código fonte, estão dispostos na Tabela 4.9. As equações de determinação do teor de água de equilíbrio e equação de camada fina são as propostas por Thompson. Os coeficientes A e B necessários à determinação do tempo equivalente, têm como formulação matemática, a polinomial dependente da temperatura e exponencial, respectivamente.

**Tabela 4.9** – Coeficientes usados no modelo de Thompson – fluxo concorrente - SASG<sub>w</sub>

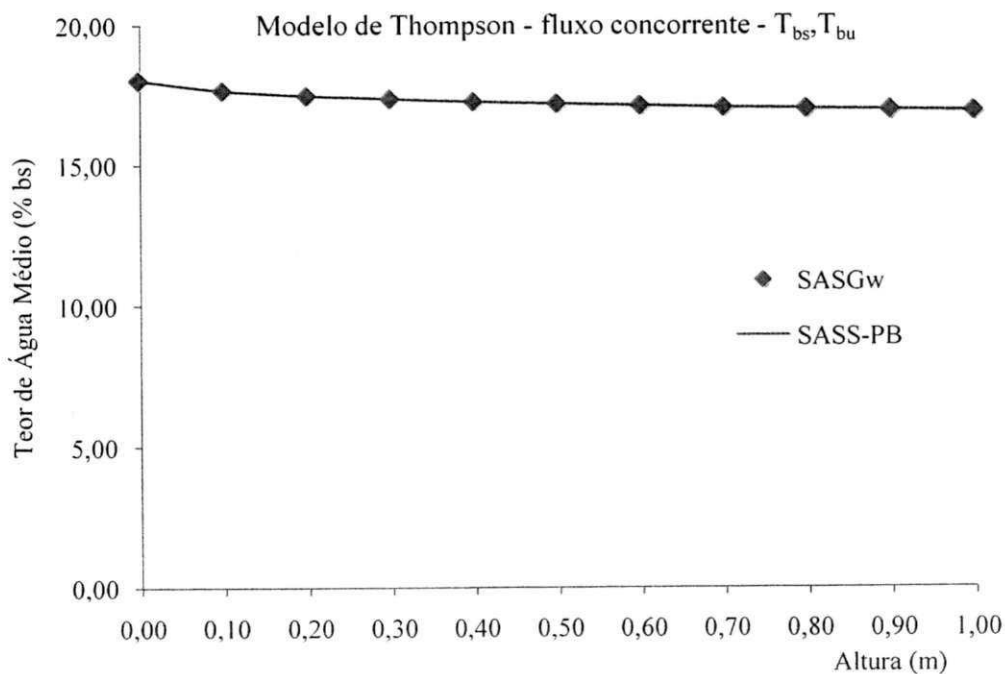
Equação	Coeficientes			
$c_p$ – Equação (25)	0,35;	0,00851;		
$h_{fg}$ – Equação (24)	606;	-0,57;	4,35;	-0,2825
$X_e$ - Equação (71)	120,5;	45, 6;	0,5;	
$t_{eq}$ – Equação (80.b)				
$A$ – Equação (82)	1,706;	0,0088;		
$B$ – Equação (81)	148,7;	-0,059;		

Estes mesmos coeficientes são utilizados no SASS-PB<sub>ANUM</sub>. Na Tabela 4.10 estão alocados os dados simulados pelo modelo de Thompson em secador de fluxo concorrente, para o milho comum, a partir da temperatura de bulbo seco e temperatura de bulbo úmido. As condições de secagem para esta simulação são: temperatura de bulbo seco (20 °C); temperatura de bulbo úmido (18 °C); pressão atmosférica (760 mmHg); temperatura de secagem (60 °C); teor de água inicial (18% b.s.); fluxo do ar de secagem (30 m<sup>3</sup> min<sup>-1</sup> min<sup>2</sup>), velocidade do produto (0,017 m min<sup>-1</sup>); altura da camada (1 m); divisão da camada (0,1 m).

**Tabela 4.10** – Modelo de Thompson – fluxo concorrente: SASG<sub>W</sub> x SASS-PB<sub>ANUM</sub>

Thompson - Fluxo Concorrente - T <sub>bs</sub> -T <sub>bu</sub>				
	SASG <sub>W</sub>	SASS-PB <sub>ANUM</sub>	Diferença	Diferença %
Altura	X% b.s.	X% b.s.	X% b.s.	X% b.s.
0,00	18,00	18,00	0,00	0,00
0,10	17,64	17,64	0,00	0,00
0,20	17,46	17,46	0,00	0,00
0,30	17,34	17,34	0,00	0,00
0,40	17,24	17,24	0,00	0,00
0,50	17,16	17,16	0,00	0,00
0,60	17,09	17,09	0,00	0,00
0,70	17,03	17,03	0,00	0,00
0,80	16,98	16,98	0,00	0,00
0,90	16,93	16,93	0,00	0,00
1,00	16,89	16,89	0,00	0,00

Pode-se observar na Tabela 4.10, uma total coincidência dos dados, podendo-se concluir que o software SASS-PB<sub>ANUM</sub>, simula satisfatoriamente a secagem a partir do modelo de Thompson para secador de fluxo concorrente. Esse resultado pode ser visualizado a partir do exposto na Figura 4.21, cujas cinéticas representam os teores de água obtidos em ambos os aplicativos.



**Figura 4.21** – Teor de água: Modelo de Thompson – fluxo concorrente.

#### 4.2.2. Dados experimentais versus SASS-PB<sub>ANUM</sub>

Neste tópico são comparados os dados experimentais obtidos por (FORTES, 1973; CANEPPELE, 1993; OLIVEIRA 2006) para o milho Yellow-Dent (Becks 65), arroz longo e feijão macassar respectivamente, contidos nos apêndices dos referidos autores. Esses dados experimentais estão dispostos e identificados nas tabelas correspondentes, na coluna Exp.

##### 4.2.2.1. Dados experimentais: milho – Yellow-Dent (Becks 65)

Os dados experimentais utilizados, são os obtidos por FORTES (1973), e estão dispostos no Apêndice B, páginas 179 e 181, do referido autor. Inicialmente, foram comparados os dados da página 179, que estão sob as seguintes condições de secagem: temperatura do produto (24°C); umidade relativa (45,8 %); teor de água inicial (29,8% b.s.); velocidade do ar de secagem (1,51 m s<sup>-1</sup>); temperatura de secagem (47,2 °C). Os dados experimentais foram comparados com os simulados a partir dos modelos de Thompson e Michigan, aplicados ao secador de leito fixo.

Os coeficientes e as equações utilizadas no modelo de Thompson são as mesmas dispostas na Tabela 4.5, adequados ao milho comum. Na simulação foram utilizadas as seguintes condições: temperatura do produto (24 °C); umidade relativa (45,8 %); pressão atmosférica (760 mmHg); temperatura de secagem (47,2 °C); teor de água inicial (30 % b.s.); fluo do ar de secagem (90 m<sup>3</sup> min<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>); teor de água final (11 % b.s.); altura da camada (0,5 m); incremento de tempo (1 h); número de camadas (4).

Para o modelo de Michigan foram utilizados os coeficientes e as equações descritas por FARIAS (2003), conforme Tabela 4.11, a seguir.

**Tabela 4.11** – Coeficientes usados em Michigan – Yellow-Dent

Equação	Coeficientes			
$c_p$ – Equação (25)	1,361;	3,97;		
$h_{fg}$ – Equação (24)	2502,2;	2,39;	1,2925;	-16,981
$X_e$ – Equação (68)	8,6541E-5;	49,81	1,8634;	
$RX$ – Equação (80.a)				
$A$ – Equação (82)	-1,7054824;	0,00087917;		
$B$ – Equação (81)	148,60862;	-0,059418;		

As condições para a simulação utilizadas no modelo de Michigan são: número de pontos nodais (6); número de iterações (2.000.000); tempo máximo de simulação (720.000.000 s); temperatura do produto (24 °C); umidade absoluta (0,01); temperatura de secagem (47,2 °C); pressão atmosférica (101325 N m<sup>-2</sup>); teor de água inicial (0,298% b.s.); velocidade do ar de secagem (0,18 m s<sup>-1</sup>); teor de água final (0,11% b.s.); altura da camada (0,5 m), largura da camada (0,5 m), porosidade (0,44); área específica (784 m<sup>2</sup> m<sup>-3</sup>); massa específica (650 kg m<sup>-3</sup>); condutividade térmica do ar (0,02741 W m<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>).

A Tabela 4.12 contém os dados experimentais e simulados – modelos de Thompson e Michigan - do teor de água médio descritos nos tópicos acima assim como as diferenças calculadas.

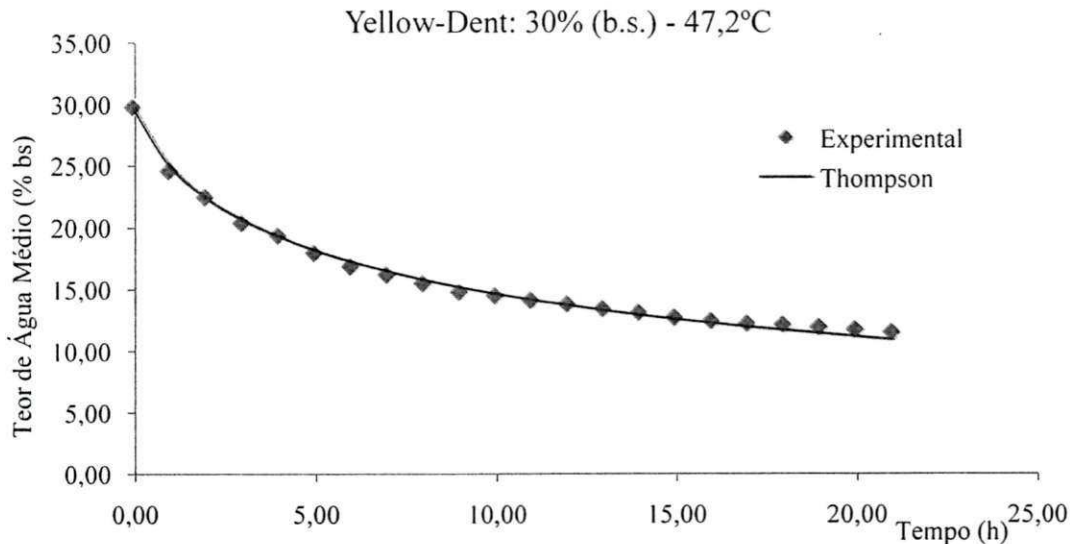
**Tabela 4.12** – Dados experimentais e simulados – Yellow-Dent: 29,8% (b.s.) – 47,2 °C.

Tempo (h)	Teor de Água (% b.s.)			Diferenças		Diferenças %	
	Exp.	Thompson	Michigan	Thompson	Michigan	Thompson	Michigan
0,00	29,80	29,80	29,80	0,00	0,00	0,000	0,000
1,00	24,60	25,11	26,37	0,51	1,77	2,073	7,195
2,00	22,50	22,49	24,15	0,01	1,65	0,044	7,333
3,00	20,40	20,70	22,52	0,30	2,12	1,471	10,392
4,00	19,40	19,34	21,20	0,06	1,80	0,309	9,278
5,00	18,00	18,23	20,09	0,23	2,09	1,278	11,611
6,00	16,90	17,30	19,13	0,40	2,23	2,367	13,195
7,00	16,20	16,51	18,28	0,31	2,08	1,914	12,840
8,00	15,50	15,82	17,52	0,32	2,02	2,065	13,032
9,00	14,80	15,20	16,83	0,40	2,03	2,703	13,716
10,00	14,50	14,65	16,20	0,15	1,70	1,034	11,724
11,00	14,10	14,16	15,62	0,06	1,52	0,426	10,780
12,00	13,80	13,71	15,08	0,09	1,28	0,652	9,275
13,00	13,40	13,30	14,57	0,10	1,17	0,746	8,731
14,00	13,10	12,92	14,11	0,18	1,01	1,374	7,710
15,00	12,70	12,57	13,67	0,13	0,97	1,024	7,638
16,00	12,40	12,25	13,25	0,15	0,85	1,210	6,855
17,00	12,20	11,95	12,86	0,25	0,66	2,049	5,410
18,00	12,10	11,67	12,49	0,43	0,39	3,554	3,223
19,00	11,90	11,41	12,14	0,49	0,24	4,118	2,017
20,00	11,70	11,16	11,80	0,54	0,10	4,615	0,855
21,00	11,50	10,93	11,48	0,57	0,02	4,957	0,174

Analisando-se a Tabela 4.12, pode-se observar que o modelo de Thompson apresenta diferenças inferiores a 1,0 (%), com desvios inferiores a |5,0|%. O desvio médio

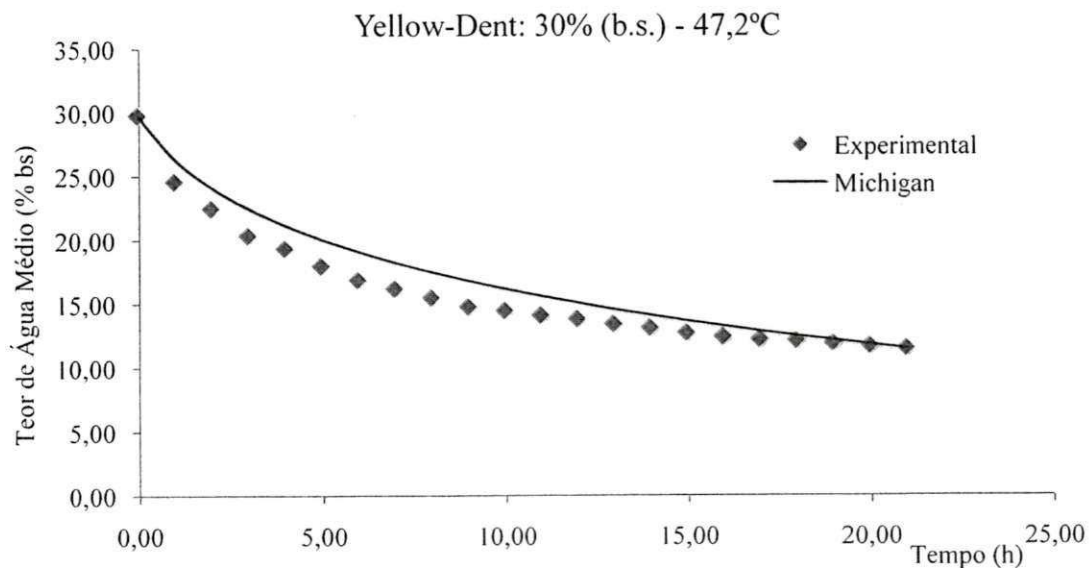
total é de 1,817% o que representa 0,091% do teor de água médio final. No modelo de Michigan observa-se diferenças inferiores a 2,5%, com desvio máximo de 13,724%. O desvio médio final é de 7,863%, que representa um teor de água médio da ordem de 0,570%. Em ambos os modelos percebe-se uma boa representação do processo de secagem, podendo-se concluir a que simulação expressa este fenômeno satisfatoriamente.

As cinéticas de secagem correspondentes aos dados experimentais e simulados, utilizando o modelo de Thompson, estão representados na Figura 4.22.



**Figura 4.22** – Modelo de Thompson: Yellow-Dent: 30% (b.s.) – 47,2°C.

A Figura 4.23, contem as cinéticas de secagem correspondentes aos dados experimentais e simulados, utilizando o modelo de Michigan.



**Figura 4.23** – Modelo de Michigan: Yellow-Dent: 30% (b.s.) – 47,2°C.

Em sequencia são comparados os dados contidos no Apêndice-B, p181, que estão sob as seguintes condições de secagem: temperatura do produto (24 °C); umidade relativa (57,48%); teor de água inicial (30,1 % b.s.); velocidade do ar de secagem (1,63 m s<sup>-1</sup>); temperatura de secagem (75,0 °C). Esses dados serão comparados com os simulados obtidos a partir dos modelos de Thompson e Michigan, aplicados ao secador de leito fixo.

Os coeficientes e as equações utilizadas no modelo de Thompson são as mesmas dispostas na Tabela 6, adequados ao milho comum. Na simulação foram utilizadas as seguintes condições: temperatura do produto (24 °C); umidade relativa (57,48 %); pressão atmosférica (760 mmHg); temperatura de secagem (75,0 °C); teor de água inicial (30 % b.s.); fluxo do ar de secagem (30 m<sup>3</sup> min<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>); teor de água final (8% b.s.); altura da camada (0,5 m); intervalo de tempo (1 h); número de camadas (4).

Para o modelo de Michigan são utilizados os coeficientes e as equações descritas por FARIAS (2003), conforme Tabela 4.12, anteriormente apresentada.

As condições para a simulação utilizadas no modelo de Michigan são: número de pontos nodais (6); número de iterações (2.000.000); tempo máximo de simulação (720.000.000 s); temperatura do produto (24 °C); umidade absoluta (0,01); temperatura de secagem (75,0 °C); pressão atmosférica (101325 N m<sup>-2</sup>); teor de água inicial (0,3% b.s.); velocidade do ar de secagem (0,18 m s<sup>-1</sup>); teor de água final (0,08% b.s.); altura da camada (0,5 m); largura da camada (0,5 m); porosidade (0,44); área específica (784 m<sup>2</sup> m<sup>-3</sup>); massa específica (650 kg m<sup>-3</sup>); condutividade térmica do ar (0,02741 W m<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>).

A Tabela 4.13 contém os dados experimentais e simulados, teor de água médio, descritos nos tópicos acima, assim como as diferenças e respectivos desvios.

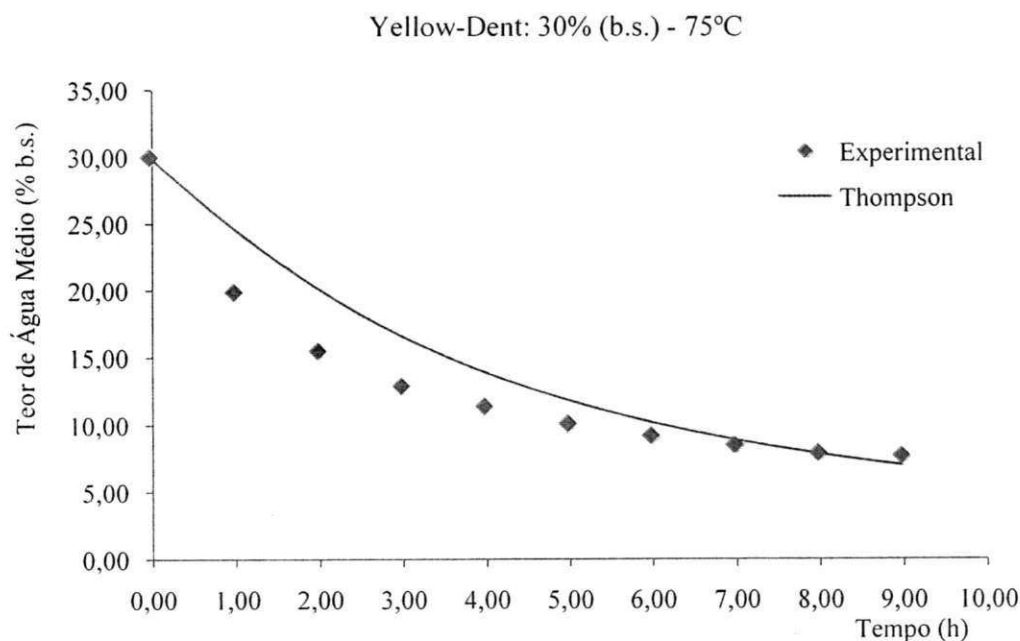
**Tabela 4.13** – Dados experimentais e simulados: Yellow-Dent – 30,10 % (b.s.) – 75 °C.

Tempo (h)	Teor de Água (% b.s.)			Diferenças		Diferenças (%)	
	Exp.	Thompson	Michigan	Thompson	Michigan	Thompson	Michigan
0,00	30,00	30,00	30,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1,00	19,90	24,05	23,38	4,15	3,48	20,85	17,49
2,00	15,50	19,27	19,14	3,77	3,64	24,32	23,48
3,00	12,90	15,88	16,21	2,98	3,31	23,10	25,66
4,00	11,40	13,45	14,02	2,05	2,62	17,98	22,98
5,00	10,10	11,65	12,30	1,55	2,20	15,35	21,78
6,00	9,20	10,26	10,89	1,06	1,69	11,52	18,37
7,00	8,50	9,17	9,72	0,67	1,22	7,88	14,35
8,00	7,90	8,29	8,73	0,39	0,83	4,94	10,51
9,00	7,70	7,56	7,87	0,14	0,17	1,82	2,21

Analisando-se a Tabela 4.13, pode-se observar que os dados obtidos com a simulação utilizando o modelo de Thompson, contem diferenças variando entre  $|0,14|$  e  $|4,14|$ , implicando em  $|1,82|%$  e  $|20,85|%$  de teor de água. O modelo de Michigan apresenta diferenças variando de  $|0,17|$  a  $|3,64|$ , representando desvios entre  $|2,21|%$  e  $|23,48|%$ . O desvio médio final, no modelo de Thompson, é de  $|12,38|%$ , que representa um teor de água médio da ordem de  $|1,65|%$ . Para o modelo de Michigan, este mesmo desvio é da ordem de  $|14,40|%$ , representando um teor de água médio final de  $|1,92|%$ .

Faz-se necessário ressaltar que os coeficientes utilizados em ambos os modelos, Michigan e Thompson, não são particulares ao cultivar (Yellow-Dent). Logo, os resultados simulados e suas respectivas diferenças estão intrinsecamente ligados às equações e aos coeficientes utilizados em ambos os modelos, não implicando em uma comparação direta entre os mesmos, mas em apresentar a versatilidade do Software.

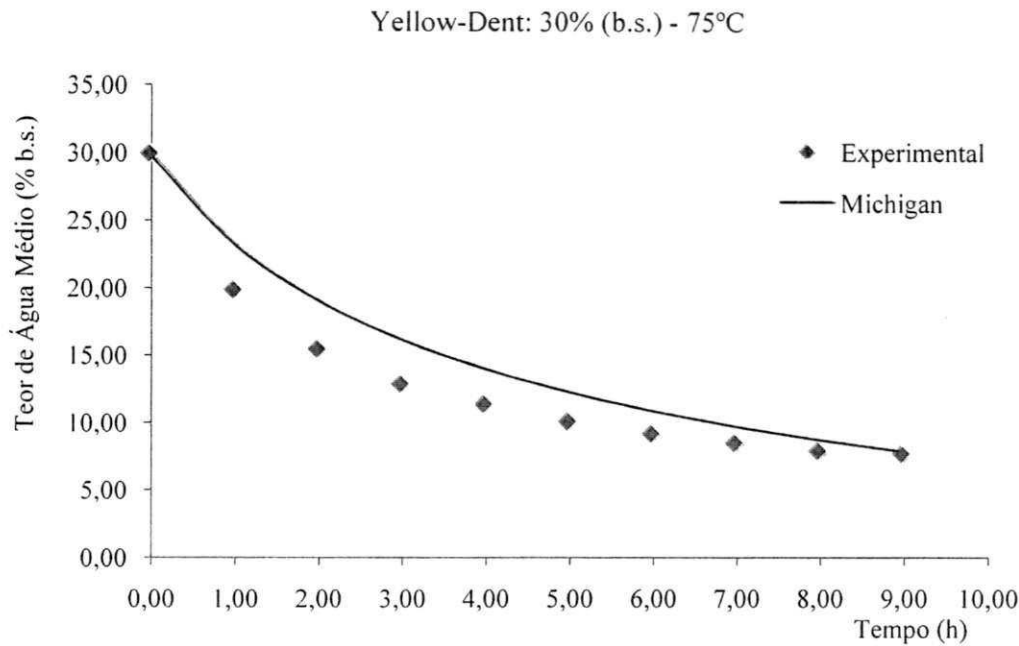
O gráfico representado na Figura 4.24, contem as cinéticas referentes aos teores de água experimental e simulado, obtido utilizando-se o modelo de Thompson.



**Figura 4.24** – Modelo de Thompson: Yellow-Dent – 30,1% (b.s.) – 75 °C.

A Figura 4.25 contem as cinéticas de secagem referentes aos dados experimentais e simulados constantes da Tabela 4.13, obtidos a partir do modelo de Michigan.





**Figura 4.25** – Modelo de Michigan: Yellow-Dent – 30,1% (b.s.) – 75 °C.

#### 4.2.2.2. Dados experimentais: Arroz longo

Os dados experimentais obtidos por CANEPPELE (1993) na secagem de arroz em casca (*Ozira Sativa L.*), cultivar IRGA 500, tipo longo, apêndice B do referido trabalho, como as amostras 1B, 2B e 3B do referido trabalho. Esses dados experimentais estão identificados nas tabelas correspondentes como Exp. e serão comparados aos dados simulados obtidos pelos modelos de Thompson e Michigan.

Os dados obtidos por CANEPPELE (1993), apêndice B – 1B, na secagem de arroz em camada espessa, estão sob as seguintes condições de secagem: temperatura de secagem (59,1 °C); teor de água inicial (22,5% b.s.); velocidade do ar de secagem (1,85 m s<sup>-1</sup>); umidade relativa (79,3 %); altura da camada (0,05 m); largura da camada (0,4 m).

As equações e coeficientes utilizados no modelo de Thompson, são os apresentados por CAVALCANTI MATA *et al.* (1999), dispostos na Tabela 4.14. Foram utilizadas as seguintes condições: temperatura do produto (12 °C); umidade relativa (79,3 %); pressão atmosférica (720 mmHg); temperatura de secagem (59,1 °C); teor de água inicial (22,5 % b.s.); fluxo do ar de secagem (30 m<sup>3</sup> min<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>); teor de água final (8 % b.s.); altura da camada (0,5 m); incremento do intervalo de tempo (1 h); número de camadas (5).

**Tabela 4.14** – Coeficientes usados em Thompson: Arroz longo – 22,5% (b.s.) – 59,1 °C.

Equação	Coeficientes			
$R_c$ – Equação (59)	520;			
$c_p$ – Equação (25)	0,278;	0,96;		
$h_{fg}$ – Equação (24)	597,6;	0,57;	2,0692;	-0,2174;
$X_e$ – Equação (60)	-1,9187E-5;	51,161;	0,40898;	
$t_{eq}$ – Equação (80.b)				
$A$ – Equação (83)	-2445,06;	82, 79;	-1,023;	0,004267;
$B$ – Equação (83)	-449,68;	14,52;	-0,182;	0,000756;

A simulação a partir do modelo de Michigan foi utilizada a formulação apresentada por NOVAES (2010), conforme a Tabela 4.15. As condições de secagem, para este modelo são as seguintes: temperatura do produto (15,5 °C); umidade absoluta (0,01126); pressão atmosférica (101325 N m<sup>-2</sup>); temperatura do ar aquecido (59,1 °C); teor de água inicial (22,5 % b.s.); velocidade do ar de secagem (1,6 m s<sup>-1</sup>); teor de água final (10% b.s.); altura da camada de grãos (0,05 m); largura da camada (1,85 m); porosidade (0,47); área específica (2,361 m<sup>2</sup> m<sup>-3</sup>); massa específica do produto (500 kg m<sup>-3</sup>); condutividade térmica do ar (0,02741 W m<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>); número de pontos nodais (6); número de iterações (2.000.000); tempo máximo de simulação (720.000.000 s);

**Tabela 4.15** – Coeficientes usados em Michigan: Arroz longo–22,5% (b.s.) – 59,1 °C.

Equação	Coeficientes			
$c_p$ – Equação (25)	1,11;	0,0448;		
$h_{fg}$ – Equação (24)	2502,2;	2,39;	2,0692;	-21,739;
$X_e$ – Equação (72)				
$B$ – Equação (72.b)	2,667 x 10 <sup>-7</sup> ;	641,7;	-23,438;	
$C$ – Equação (72.c)	4 x 10 <sup>5</sup> ;	-2,1166;		
$RX$ – Equação (77)				
$A$ – Equação (83) – $X_o = UR$	0,01579;	0,0001746;	-0,01413;	
$B$ – Equação (83) – $X_o = UR$	0,6545;	0,002425;	0,078867;	

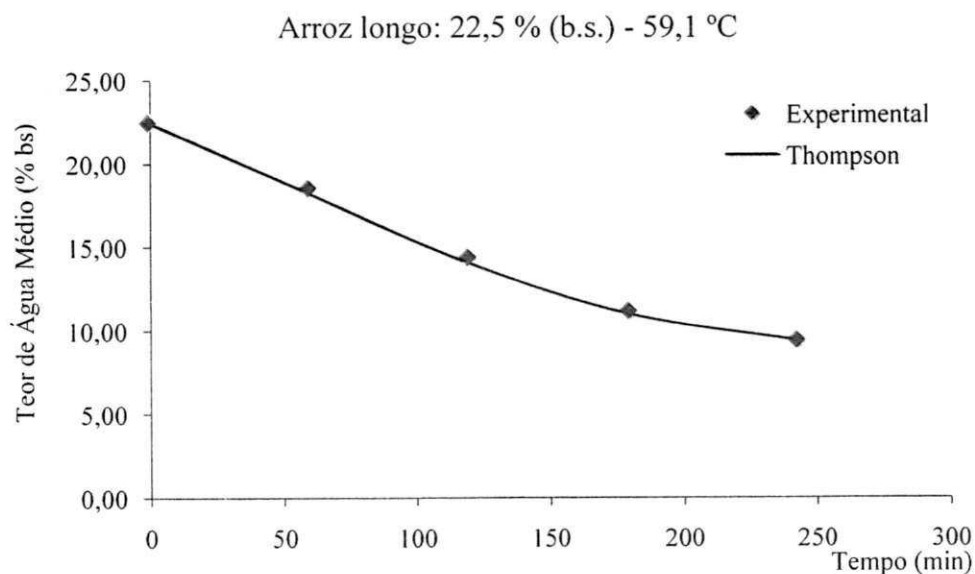
A Tabela 4.16 contém os dados experimentais e simulados referentes a amostra 1B, do referido autor.

**Tabela 4.16** – Dados experimentais e simulados: Arroz longo – 22,5% (b.s.) – 59,1 °C

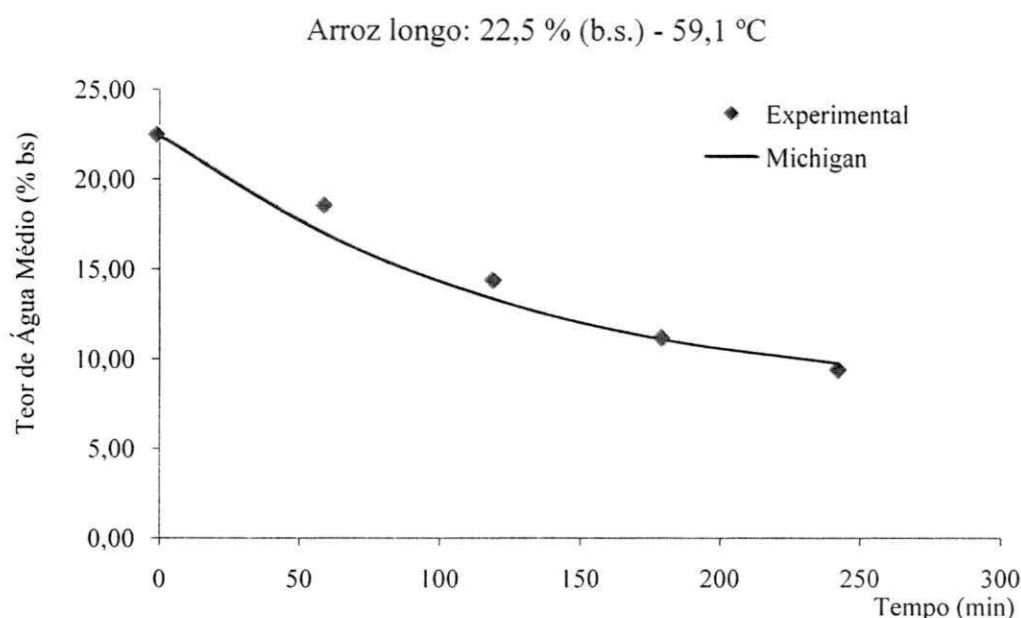
Tempo (min)	Teor de Água (% b.s.)			Diferenças		Desvios %	
	Exp.	Thompson	Michigan	Thompson	Michigan	Thompson	Michigan
0	22,50	22,50	22,50	0,00	0,00	0,00	0,00
60	18,59	18,26	17,00	0,33	1,59	1,78	8,55
120	14,41	14,07	13,35	0,34	1,06	2,36	7,36
180	11,19	11,00	11,11	0,19	0,08	1,70	0,71
243	9,42	9,40	9,77	0,02	0,35	0,21	3,72

A partir do exposto na Tabela 4.16, observa-se que o modelo de Thompson apresenta diferenças inferiores a  $|0,5|$  e desvios não superiores a  $|2,4|%$ . A utilização desse modelo apresenta um desvio médio total de  $|1,16|%$  correspondendo a  $|0,18|%$  do teor de água médio. Para o modelo de Michigan identifica-se uma diferença pontual máxima de  $|1,59|$  e um desvio máximo de  $|8,55|%$ . O desvio médio total é de  $|3,13|%$ , o que representa um teor de água de  $|0,48|$ . Essas diferenças e desvios estão associados aos coeficientes e equações utilizados em ambos os modelos. Pode-se concluir, que ambos os modelos simulam satisfatoriamente a secagem nessas condições.

Na Figura 4.26 é apresentado o gráfico correspondente às cinéticas de secagem constantes na Tabela 4.18, para o modelo de Thompson.

**Figura 4.26** – Modelo de Thompson: Arroz longo – 22,5 % (b.s.) – 59,1 °C.

A Figura 4.27 contém as cinéticas de secagem correspondentes aos dados experimentais e simulados, contidos na Tabela 4.16, referentes à simulação utilizando-se o modelo de Michigan.



**Figura 4.27** – Modelo de Michigan: Arroz longo – 22,5 % (b.s.) – 59,1 °C.

Em sequencia são observados os dados experimentais para as seguintes condições: temperatura de secagem em 59,2°C, teor de água inicial 24,5% (b.s.), fluxo de ar de secagem de 1,85 m/s, umidade relativa de 78,2%, a altura da camada de grãos de 0,1 m e largura de 0,4 m, constantes do Apêndice – 2B, do referido trabalho, CANEPPELE (1993).

São adotados os coeficientes e equações constantes nas Tabelas 4.14 e 4.15, a serem utilizados nos modelos de Thompson e Michigan, respectivamente.

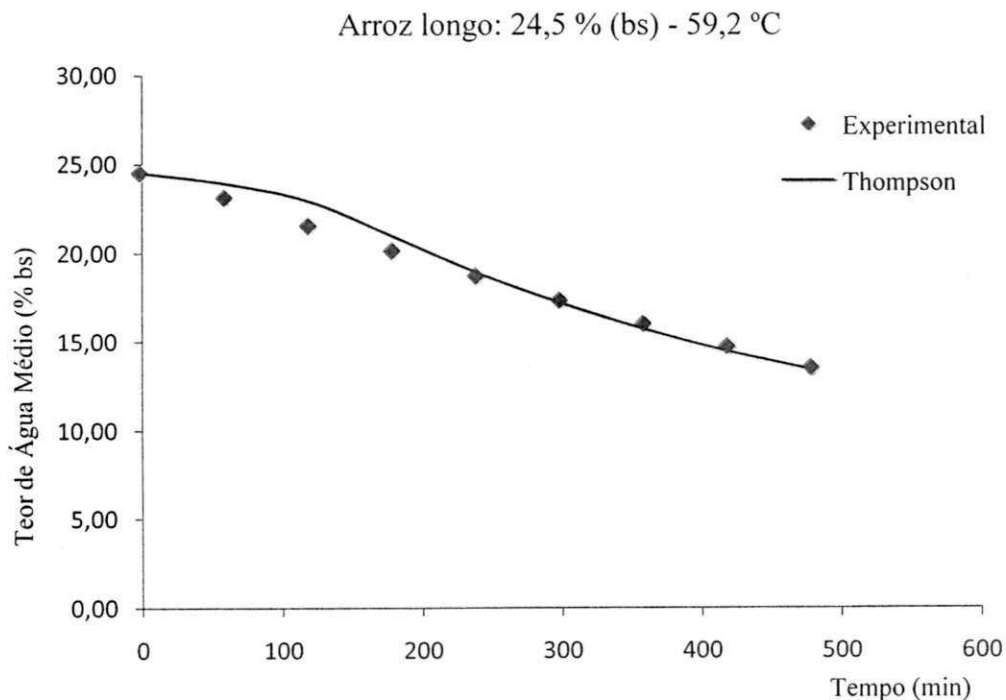
A Tabela 4.17, a seguir, contem os dados experimentais e simulados, assim como as respectivas diferenças percentuais.

**Tabela 4.17** – Dados experimentais e simulados: Arroz longo – 24,5% (b.s.) – 59,2 °C.

Tempo (min)	Teor de Água (% b.s.)			Diferenças		Diferenças %	
	Exp.	Thompson	Michigan	Thompson	Michigan	Thompson	Michigan
0	24,50	24,50	24,50	0,00	0,00	0,00	0,00
60	23,11	23,90	22,12	0,79	0,99	3,42	4,28
120	21,54	22,92	20,17	1,38	1,37	6,41	6,36
180	20,13	20,97	18,56	0,84	1,57	4,17	7,80
240	18,72	18,93	17,16	0,21	1,56	1,12	8,33
300	17,33	17,20	15,95	0,13	1,38	0,75	7,96
360	15,99	15,71	14,88	0,28	1,11	1,75	6,94
420	14,71	14,45	13,95	0,26	0,76	1,77	5,17
480	13,52	13,42	13,12	0,10	0,40	0,74	2,96

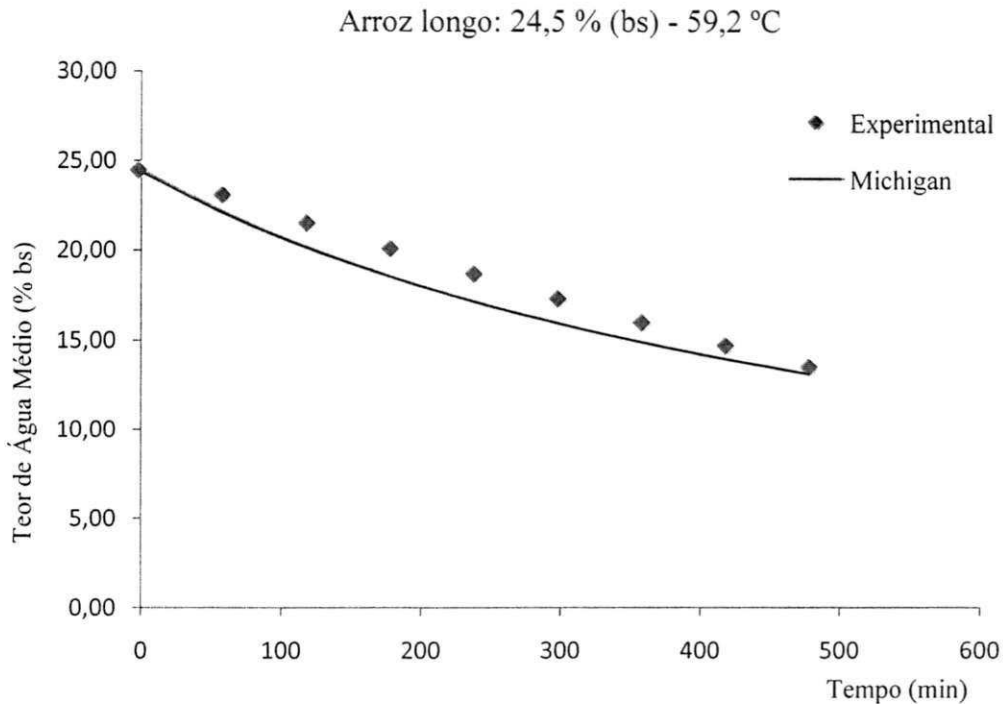
Observando-se os dados expostos na Tabela 4.17 verifica-se que a diferença entre os dados experimentais e simulados variam entre  $|0,10|$  e  $|1,38|$ , no modelo de Thompson, com desvios variando entre  $|0,74|%$  e  $|6,41|%$ , respectivamente. A diferença média total, nesse mesmo modelo, é de  $|0,27|$  que representa  $|1,45|%$  do teor de água médio total. Para o modelo de Michigan, as diferenças variam entre  $|0,40|$  e  $|1,57|$ , representando desvios pontuais entre  $|2,96|%$  e  $|8,33|%$ . Nesse modelo a diferença média total é de  $|1,02|$  que representa um desvio médio total de  $|5,39|%$ . Embora contenham diferenças, significativas em módulo, ambas os modelos apresentam dados médios compatíveis com o fenômeno físico simulado.

A Figuras 4.28 contém o gráfico referentes as cinéticas, experimental e simulada, obtidas a partir do modelo de Thompson.



**Figura 4.28** – Modelo de Thompson: Arroz longo – 24,5 % (b.s.) – 59,2 °C.

A Figura 4.29 contém os gráficos representativos dos dados da Tabela 4.17, correspondentes à simulação utilizando-se o modelo de Michigan e os dados experimentais.



**Figura 4.29** – Modelo de Michigan: Arroz longo – 24,5 % (b.s.) – 59,2 °C.

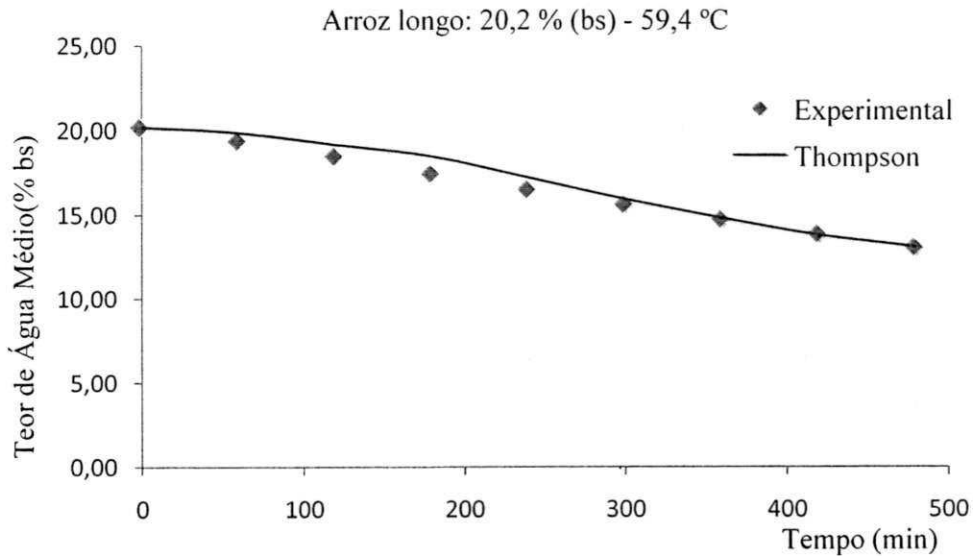
A Tabela 4.18 contém os dados contidos no Apêndice 3B, obtidos por CANEPPELE (1993) sob as condições: temperatura de secagem (59,4°C); teor de água inicial (20,2% b.s.); velocidade do ar de secagem (1,85 m s<sup>-1</sup>); umidade relativa (83%); altura da camada de grãos (0,15 m); altura da camada (0,4 m). Nesta mesma tabela estão os dados simulados no SASG<sub>ANUM</sub>, utilizando os modelos de Thompson e Michigan, a partir das equações e coeficientes elencados nas Tabelas 4.14 e 4.15, como apresentados por CAVALCANTI MATA *et al.* (1999) e NOVAES (2010), respectivamente.

**Tabela 4.18** – Dados experimentais e simulados: Arroz longo – 20,2% (b.s.) – 59,4 °C.

Tempo (min)	Teor de Água % (b.s.)		Diferenças		Diferenças %	
	Exp.	Thompson	Thompson	Michigan	Thompson	Michigan
0	20,20	20,20	0,00	0,00	0,00	0,00
60	19,37	19,87	0,50	0,68	2,58	3,51
120	18,45	19,17	0,72	0,96	3,90	5,20
180	17,42	18,47	1,05	0,95	6,03	5,45
240	16,49	17,22	0,73	0,93	4,43	5,64
300	15,59	15,94	0,35	0,84	2,25	5,39
360	14,71	14,81	0,10	0,70	0,68	4,76
420	13,86	13,80	0,06	0,52	0,43	3,75
480	13,05	13,08	0,03	0,33	0,23	2,53

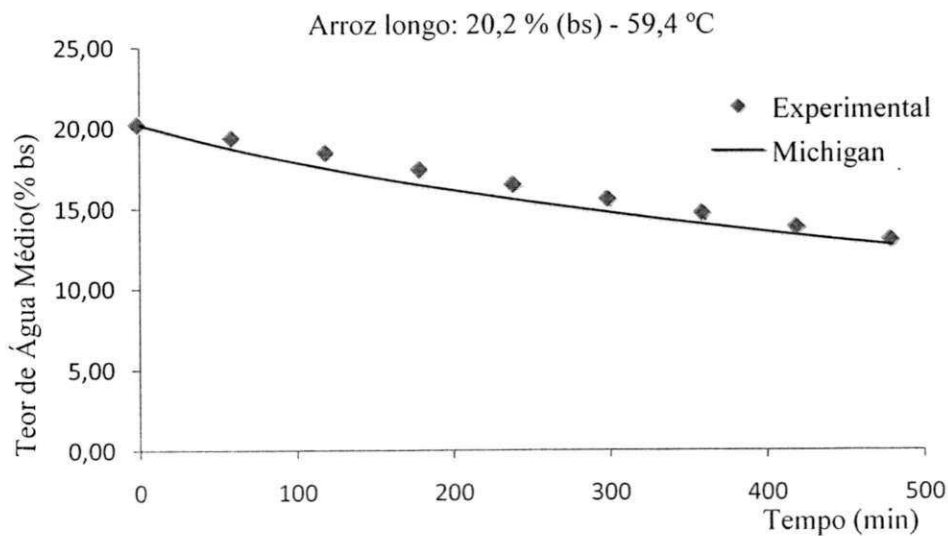
.Na Tabela 4.18 observa-se que as diferenças médias mínimas, verificadas nos modelos de Thompson e Michigan, variam entre |0,03| e |1,05| e |0,33| e |0,96| respectivamente, correspondendo a diferenças totais médias da ordem de |0,23|% e |6,03|% em Thompson e de |2,53|% e |5,64|% em Michigan. Tais diferenças estão dentro da representação matemática utilizada, configurando-se como um bom ajuste.

A Figura 4.30 contém as cinéticas de secagem dos dados experimentais e simulados obtidos utilizando-se o modelo de Thompson.



**Figura 4.30** – Modelo de Thompson: Arroz longo – 20,2 % (b.s.) – 59,4 °C.

A Figura 4.31, contém os gráficos referentes aos dados experimentais e simulados obtidos a partir de simulação utilizando-se o modelo de Michigan, conforme Tabela 4.18.



**Figura 4.31** – Modelo de Michigan: Arroz longo – 20,2 % (b.s.) – 59,4 °C.

Nas comparações supracitadas para o arroz longo, foram utilizados coeficientes e equações determinadas especificamente para este produto a partir de condições particulares conforme a literatura citada. As diferenças e desvios observados nos dados simulados em ambos os modelos, podem ser atribuídos ao escopo dos coeficientes.

#### 4.2.2.3. Dados experimentais: Feijão macassar

A seguir são comparados os dados experimentais obtidos por OLIVEIRA (2006), na secagem de feijão macassar (*Vigna unguiculata (L.) Walpers*) constantes dos Anexos 11, 13 e 16, do referido autor. Esses dados experimentais, estão dispostos nas tabelas correspondentes, como conteúdo da coluna Exp. O teor de água do produto é 21,5% (b.s.) e temperaturas de secagem de 50°, 60° e 70°C, respectivamente, configurando-se em três experimentos distintos, medidos a partir de 4 colunas, camadas de 0,63m de altura por 0,15m de largura. A medição do tempo foi feita em minutos.

Para a comparação dos dados experimentais, a partir do modelo de Thompson, foram utilizados os coeficientes e equações apresentados por SOUZA (2004), conforme Tabela 4.19.

**Tabela 4.19** – Coeficientes usados em Thompson: Feijão macassar.

Equação	Coeficientes					
$R_c$ – Equação (59)	520;					
$c_p$ – Equação (25)	0,357;	0,00178;				
$h_{fg}$ – Equação (24)	606;	0,57;	0,23822;		-0,0469;	
$X_e$ – Equação (67)	0,009668;	0,276015	0,755301;			
$t_{eq}$ – Equação (80.b)						
$A$ – Equação (83)	-891,151;	24,721;	0,00;	0,00;	-0,886;	0,0019;
$B$ – Equação (83)	79,959;	2,15;	0,00;	0,00;	0,078;	-0,003;

Para a simulação a partir do modelo de Michigan, foram utilizados os coeficientes e equações apresentados pelo mesmo autor, OLIVEIRA (2006), que estão dispostos na Tabela 4.20.

Os conjuntos utilizados nas simulações são adequados às condições determinadas pelos autores.



**Tabela 4.20** – Coeficientes usados em Michigan: Feijão macassar.

Equação	Coeficientes			
$c_p$ - Equação (25)	0,35151;	0,00158;		
$h_{fg}$ - Equação (24)	598;	0,57;	4,022198;	-0,005807;
$X_e$ - Equação (68)	0,000246;	54,1022;	1,376941;	
$RX$ - Equação (77.a)				
$A$ - Equação (82)	0,0017795;	-9,04E-5;	1,525E-6;	-85E-9;
$B$ - Equação (82)	-4,5163;	0,28735;	-0,00491;	2,83E-5;

Na simulação utilizando-se o modelo de Thompson foram utilizadas as seguintes condições: temperatura do produto (24 °C); umidade relativa (65%); pressão atmosférica (720 mmHg); temperatura de secagem (50 °C); teor de água inicial (21,5 % b.s.); fluxo do ar de secagem (26,6 m<sup>3</sup> min<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>); teor de água final (11 % b.s.); altura da camada (0,63 m); incremento de tempo (1 h); número de camadas (4).

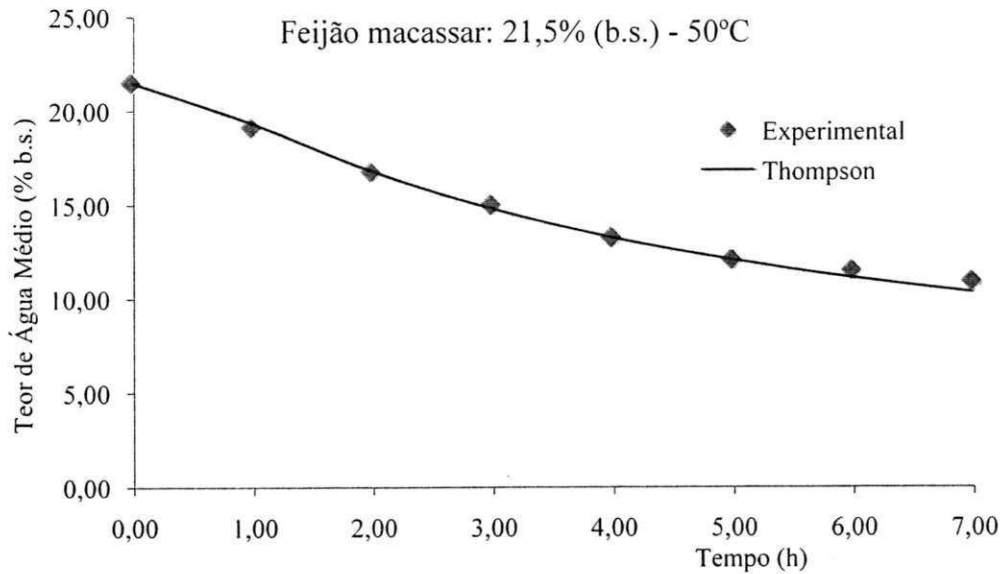
Para a simulação com Michigan as condições de secagem são: temperatura do produto (30 °C); umidade absoluta (0,01126); pressão atmosférica (101325 N m<sup>-2</sup>); temperatura do ar aquecido (50 °C); teor de água inicial (21,5 % b.s.); velocidade do ar de secagem (1,2 m s<sup>-1</sup>); teor de água final (10% b.s.); altura da camada de grãos (0,63 m); largura da camada (0,15 m); porosidade (0,37); área específica (813 m<sup>2</sup> m<sup>-3</sup>); massa específica do produto (786,5 kg m<sup>-3</sup>); condutividade térmica do ar (0,029587 W m<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>); número de pontos nodais (6); número de iterações (2.000.000); tempo máximo de simulação (720.000.000 s);

A Tabela 4.21 contém os dados experimentais e simulados obtidos utilizando-se os modelos de Thompson e Michigan, respectivamente.

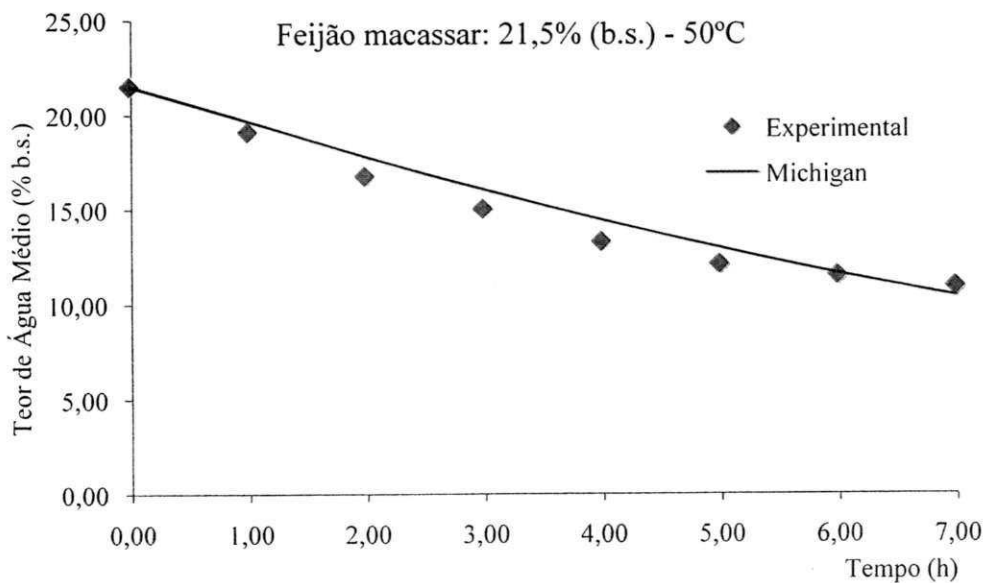
**Tabela 4.21** – Dados experimentais e simulados: Feijão macassar – 21,5% (b.s.) – 50 °C.

Tempo (h)	Teor de Água % (b.s.)			Diferenças		Diferenças %	
	Exp.	Thompson	Michigan	Thompson	Michigan	Thompson	Michigan
0,00	21,50	21,50	21,50	0,00	0,00	0,00	0,00
1,00	19,12	19,35	19,69	0,23	0,57	1,20	2,98
2,00	16,76	16,81	17,82	0,05	1,06	0,30	6,32
3,00	15,00	14,82	16,05	0,18	1,05	1,20	7,00
4,00	13,28	13,28	14,42	0,00	1,14	0,00	8,58
5,00	12,09	12,09	12,94	0,00	0,85	0,00	7,03
6,00	11,51	11,12	11,60	0,39	0,09	3,39	0,78
7,00	10,91	10,34	10,41	0,57	0,50	5,22	4,58

Observando-se a Tabela 4.21, percebe-se que as diferenças vinculadas ao modelo de Thompson, são inferiores a  $|0,6|$ . A média dessas diferenças é de  $|0,11|$ . A média dos desvios é de  $|0,72|%$ , constituindo-se em um bom ajuste, como ilustrado na Figura 4.32. Para o modelo de Michigan, a média dos desvios é de  $|4,58|%$ , que representa  $|0,53|$  de teor de água médio final configurando-se, portanto, em um bom ajuste aos dados experimentais, conforme Figura 4.33.



**Figura 4.32** – Modelo de Thompson: Feijão macassar - 21,5% (b.s.) – 50°C.



**Figura 4.33** – Modelo de Michigan: Feijão macassar - 21,5% (b.s.) – 50°C.

### **4.2.3. Análise comparativa entre os modelos**

A partir dos resultados obtidos nas simulações apresentadas, para os produtos objeto, pode-se concluir que o software SASS-PB<sub>ANUM</sub> simula a secagem de grãos satisfatoriamente, qualquer que seja o modelo utilizado. No entanto alguns aspectos devem ser observados com mais acuidade.

#### **4.2.3.1. Análise dos resultados**

Como puderam ser observados nos tópicos anteriores, os modelos de Thompson (formulação algébrica – solução analítica) e o modelo de Michigan (formulação diferencial – solução numérica), simularam satisfatoriamente o processo físico de secagem dos produtos em teste.

No modelo de Michigan, três parâmetros inerentes à solução numérica têm ingerência direta nos resultados: o número de pontos nodais, o número máximo de iterações e o tempo máximo determinado à simulação.

As diferenças e desvios observados estão associados às características biológico-físicas dos produtos e, por conseguinte, aos coeficientes e equações utilizadas. Desde que se utilizem coeficientes e equações devidamente ajustadas ao produto e as condições reais da experimentação, quaisquer dos modelos pode ser utilizado sem prejuízo dos dados.

#### **4.2.3.2. Análise de desempenho**

Programas computacionais têm características, objetivos, aplicabilidade, exigências distintas, interação com módulos ou processos externos, etc. No caso em foco, têm-se uma aplicação que faz uso de métodos numéricos associados às técnicas de banco de dados que, concomitantemente, faz uso massivo dos dispositivos de armazenamento magnético. Essas atividades (método numérico + população de dados) por si só, são fatores de degradação de desempenho.

Pode-se adotar simplificadaamente, o tempo que cada módulo leva para apresentar os resultados esperados, sem levar em consideração o tempo de utilização efetivo da CPU e/ou ainda o tempo utilizado pelo sistema operacional.

Os módulos que contêm os modelos analíticos, Hukill e Thompson (leito fixo), tiveram seus tempos de resposta ou tempo de vida, inferiores a 300 milissegundos

(00:00:00:300), para as mesmas condições de secagem, variando-se apenas o número de camadas (4 a 10), em todas as simulações efetuadas.

Os módulos que contêm o modelo diferencial de Michigan apresentaram tempos de respostas entre 4 segundos (6 pontos nodais) e 150 segundos (25 pontos nodais) mantidas as mesmas condições de secagem, na máquina utilizada no desenvolvimento.

Esses tempos de resposta podem ser atribuídos a linguagem compilada utilizada no desenvolvimento do software, cujo código fonte está distribuído em 960 (Novecentas e Sessenta) páginas, conforme Apêndice B.

#### 4.2.4. Dados psicrométricos

Alguns dados psicrométricos calculados pelo aplicativo foram comparados com os apresentados por CAVALCANTI MATA *et al.* (1999), conforme as Tabelas 4.26, 4.27 e 4.28. São feitas comparações para condições de propriedades psicrométricas do ar e para o processo de aquecimento do ar de secagem.

A Tabela 4.24 contém os dados psicrométricos calculados a partir de: temperatura de bulbo seco (25 °C); umidade relativa (70%); pressão atmosférica (760 mmHg).

**Tabela 4.24** – Propriedades psicrométricas do ar –  $P_{atm} = 760$  mmHg.

Variáveis Observadas	SASS-PB	Biagi e		ASHRAE	
	ANUM	Dalbello	%		%
Temperatura em b.s. (°C)	25,00	25,00		25,00	
Umidade Relativa (%)	70,00	70,00		70,00	
Temperatura em b.u. (°C)	20,93	20,97	0,19	21,00	0,33
Temperatura de Orvalho	19,12	19,14	0,10	19,00	0,63
Entalpia (kJ kg <sup>-1</sup> de ar seco)	60,54	60,58	0,06	61,00	0,75
Volume Específico (m <sup>3</sup> (kg de ar seco) <sup>-1</sup> )	0,86	0,86		0,86	

Na Tabela 4.24, observa-se que o maior percentual de diferença entre os dados cálculos pelo SASS-PB<sub>ANUM</sub> e a Carta Psicrométrica da ASHRAE é de |0,75|% para a Entalpia, de |0,63|% para a Temperatura de Orvalho e de |0,33|% para a Temperatura de bulbo úmido. Pode-se considerar como adequadas as equações utilizadas no cálculo das propriedades termodinâmicas do ar.

A Tabela 4.25 contém os dados psicrométricos calculados a partir de: temperatura de bulbo seco (25 °C); umidade relativa (70%); pressão atmosférica (695,10 mmHg).

**Tabela 4.25** – Propriedades psicrométricas do ar –  $P_{atm} = 695,10$  mmHg.

Variáveis Observadas	SASS-PB	Biagi e		ASHRAE	
	ANUM	Dalbello	%		%
Temperatura em b.s. (°C)	25,00	25,00		25,00	
Umidade Relativa (%)	70,00	70,00		70,00	
Temperatura em b.u. (°C)	20,86	20,97	0,52	20,97	0,52
Temperatura de Orvalho	19,12	19,14	0,10	19,14	0,10
Entalpia (kJ.kg <sup>-1</sup> de ar seco)	63,96	63,97	0,01	62,39	2,51
Volume Específico (m <sup>3</sup> (kg de ar seco) <sup>-1</sup> )	0,95	0,95		0,95	

Na Tabela 4.25 identificam-se diferenças percentuais calculadas, da ordem de |2,51|% e de |0,52|% para a Entalpia e a temperatura de bulbo úmido, respectivamente. Como são diferenças não significativas, pode-se considerar como satisfatórios os resultados obtidos a partir das equações implementadas no código computacional na determinação das propriedades termodinâmicas do ar.

A Tabela 4.26, contem os dados psicrométricos do ar, calculados a partir do aquecimento do ar (45 °C), sob as seguintes condições: temperatura de bulbo seco (25 °C); umidade relativa (70%); pressão atmosférica (695,10 mmHg).

**Tabela 4.26** – Propriedades psicrométricas para o ar aquecido –  $P_{atm} = 695,10$  mmHg.

Variáveis Observadas	SASS-PB	Biagi e		ASHRAE	
	ANUM	Dalbello	%		%
Temperatura em b.s. (°C)	45,00	45,00		45,00	
Umidade Relativa (%)	70,00	70,00		70,00	
Temperatura em b.u. (°C)	25,78	26,44	2,50	26,40	2,34
Temperatura de Orvalho	19,12	19,14	0,10	19,14	0,10
Entalpia (kJ.kg <sup>-1</sup> de ar seco)	84,62	81,24	4,16	82,00	3,19
Volume Específico (m <sup>3</sup> (kg de ar seco) <sup>-1</sup> )	0,94	0,92	2,17	0,95	1,05

Na Tabela 4.26, observa-se que as maiores diferenças calculadas são de |3,19|%, |2,39|% para a Entalpia e a temperatura de bulbo seco, em comparação aos dados observados por BIAGI e DALBELLO (1994) e a carta psicrométrica da ASHRAE, respectivamente, podendo ainda ser considerado como uma diferença aceitável.

## 5. CONCLUSÕES

Diante dos resultados obtidos apresentam-se as conclusões:

- O sistema disponibiliza, em um único módulo operacional, os modelos de: Hukill para secador de leite fixo; Thompson para o secador de leite fixo, fluxo cruzado e fluxo concorrente; Michigan para o secador de leite fixo e fluxo cruzado, simulando satisfatoriamente;
- O sistema está associado a uma base de dados especificamente modelada, cujo escopo alcança todas as informações necessárias à simulação e eventuais comparações, possibilitando a inclusão de dados experimentais, identificando usuário, produto e condições de secagem como: Modelo utilizado; produto em análise; equação de equilíbrio higroscópico, utilizada, e seus coeficientes; equação de camada fina, utilizada, e seus coeficientes; os coeficientes da equação de calor específico e os coeficientes da equação do calor latente de vaporização da água do produto ficam armazenados permanentemente;
- Os dados referentes às condições de secagem, simulação, são permanentemente associados ao experimento específico;
- Pode-se associar a um único produto, um grande número de experimentações;
- Dados internos ao processo de simulação como variação da umidade relativa, da água de equilíbrio, da temperatura do produto são armazenados na base modelada;
- O sistema disponibiliza um módulo de inserção para dados experimentais;
- O sistema disponibiliza um módulo de comparação entre os dados experimentais e os dados simulados, apresentando as diferenças e desvios correspondentes;
- O sistema apresenta tempos de resposta extremamente importantes;
- O sistema é construído a partir de linguagem de programação compilada, independentemente ambientes de ligação, interpretadores, com o sistema operacional;
- O software SASS-PB<sub>ANUM</sub> possibilita uma melhor e mais eficiente prática de experimentação computacional na área de simulação de secagem.
- O sistema tem um módulo exclusivo para o cálculo das propriedades psicrométricas do ar, simulando satisfatoriamente para a faixa de temperatura de 1 a 150°C.

## 6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Sugere-se:

- Introdução de módulos que possibilitem a utilização de *PARSERS* matemáticos;
- Adicionar outros métodos numéricos ao modelo de Michigan;
- Estender a característica do sistema para software dedicado e de prospecção, com a agregação das sugestões anteriores;
- Modelagem de uma base dados que comporte a dinâmica funcional de um software de prospecção;
- Desenvolvimento de módulos voltados à rede internacional de computadores, que possibilitem o acesso remoto à base de dados;
- Desenvolvimento de aplicativos voltados à internet que possibilitem a utilização do sistema SASS-PB<sub>ANUM</sub> remotamente;
- Disponibilização do sistema em um servidor web.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMARAL, T. R. do.; VITOR, J. F. A.; SOUZA, J. L. F. **Uma formulação de Petrov-Galerkin aplicada à simulação de secagem de grãos.** In: ENCONTRO REGIONAL DE MATEMÁTICA APLICADA E COMPUTACIONAL, 1, 11 - 13 de Novembro de 2010, São João del-Rei, MG; pg 218 - 224
- 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.
- BAKKER-ARKEMA, F. W.; LEREW, L. R.; DE BOER, S.F.; ROTH, M. G. Grain drier simulation. Research Report, n. 224, 1974. p.2-23.
- 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.
- 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. **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.
- CAVALCANTI MATA, M. E. R. M.; ALMEIDA, F. A. C.; DUARTE, M. E. M. Secagem de sementes. In: ALMEIDA, F. A. C.; DUARTE, M. E. M.; CAVALCANTI MATA, M. E. R. M. **Tecnologia de armazenagem em sementes.** 271-370. 2006. Campina Grande: UFCG.



- CAVALCANTI MATA, M. E. R. M.; ALMEIDA, F. A. C.; DUARTE, M. E. M. Secagem de sementes. In: ALMEIDA, F. A. C.; DUARTE, M. E. M.; CAVALCANTI MATA, M. E. R. M. **Tecnologia de armazenagem em sementes**. 2006. CP, 2012. Comunicação verbal recebida pelo pesquisador Luís Antônio Dantas, da UFCG/CTRN/UAEAG, em 01/02/2012. Campina Grande-PB.
- CORRÊA, P. C. **Simulação de café em camada espessa**. 1982. 47 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG.
- CORRÊA, P.C.; RESENDE, O.; MARTINAZZO, A. P., GONELI, A.L.D., BOTELHO, F.M. Modelagem para a descrição do processo de secagem do feijão (*Phaseolus vulgaris L.*). **Revista de Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.27, n.2, p.501-510, 2007.
- CORRÊA, P.C.; RESENDE, O.; SILVIA, A., JAREN, C., OLIVEIRA, G.H.H., Modelos matemáticos para descrever a taxa de contração volumétrica de feijão-vermelho durante a secagem. **Revista de Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.31, n.4, , p. 716-726, 2011.
- DANTAS, L. A. **Desenvolvimento de um programa computacional dinâmico para simulação de secagem de grãos e sementes**. 2007. 204 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande-PB.
- DANTAS, L. A.; CAVALCANTI MATA, M. E. R. M.; BRAGA, M. E. D. Desenvolvimento de um programa computacional dinâmico para simulação de secagem de grãos e sementes. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v. 13, n.3, p. 309-318, 2011.
- FARIAS, R. P. de, **Simulação da secagem de produtos biológicos em secador de fluxos cruzados**. 2003. 70 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica\_ - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande-PB.
- FARIAS, R. P. de; SANTIAGO, D. V; LIMA, A. G. B. de, **Drying of grains in vonvyor dryer and cross flow: A numerical solution using finite-volume method**. *Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais*, v. 6, n. 1, p. 1-16, 2004.
- FIOREZE, R. Princípios de secagem de produtos biológicos. João Pessoa: Editora Universitária/UFPB, 2004, 229 p.
- FORTES, M., **A non-equilibrium thermodynamics approach to transport phenomena in capillary-porous media with special reference to drying of grains and foods**. 1973. 226 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Purdue University,

Agricultural Engineering Department, West Lafayette, Lafayette, IN., USA.

FREITAS FILHO, P. J. de. Introdução à modelagem e simulação de sistemas com aplicações em Arena. Florianópolis. Editora Visual Books, 2008, 384 p.

GAVIRA, M. de O., **Simulação Computacional como uma ferramenta de Aquisição de conhecimento**. 2003.157 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos-SP.

GOYALDE, N. A., MELO, E. C., ROCHA, R. P., GONELI, A. L. D., ARAUJO, F. L., Mathematical modeling of the drying kinetics of sugarcane slices. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v. 11, n. 2, p. 117-121, 2009.

HENAO, J. D.; QUEIROZ, M. R. de.; HAJ-ISA, N. M. A. Umidade de equilíbrio de café cereja descascado baseada em métodos estático e dinâmico. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v.13, n.4, p.470–476, 2009.

HOLANDA, P. R. H. de, **Secador para casulos do bicho-da-seda: desenvolvimento, simulação e experimentação**. 2007. 162 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande-PB.

HURTADO, F. S. V. **Uma formulação de volumes finitos baseada em elementos para a simulação do deslocamento bifásico imiscível em meios porosos**. 2005. 151 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis-SC.

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, 1947, 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.

MARTINAZZO, A. P., CORREA, P. C., RESENDEN, O. MELO, E. C. Análise e descrição matemática da cinética de secagem de folhas de capim-limão. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola Ambiental**, Viçosa-MG, v.11, n.3, p.301-306, 2007.

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.

- MOREY, R. V.; CLOUD, H. A. & NELSON, W.W. **Simulation of solar energy grain drying** - Minnesota contribution. Agricultural Engineering Department, University of Minnesota. St. Paul, Minnesota, 1976. 43 p.
- NOVAES, T. L. C. C., **Simulação da secagem de arroz em secador de leito fixo via volumes finitos**. 2010. 65 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife – PE.
- OLIVEIRA, J. R., **Desenvolvimento de um sistema de secagem para camada fina e espessa: comparação entre modelos matemáticos para grãos de feijão macaçar (*Vigna unguiculata (L.) Walpers*)**. 2006. 140 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande-PB.
- PEDGEN, C. D.; SHANON, R. E.; SADOWSKI, R. P. Introduction to simulation using SIMAN. McGraw-Hill, NY. 2. Ed. 1990.
- PETRY, V. J., **Desenvolvimento de um modelo para a transferência de calor e massa em meios granulares**. 2010. 93 p. Tese (Doutorado em Matemática Aplicada) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre-RS.
- PICELLI, R. M, ARRIECE, L. S., SARTORI, D. J. M., Umidade de Equilíbrio de Sementes Pioneiras: Isotermas de Dessorção e Adsorção para *cecropia glaziovii* SNETHLADE, VIII Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Iniciação Científica, 2009, Uberlândia, Minas Gerais.
- PONTES, S. F. O., SANTOS, C. T., BONOMO, R. C. F., PONTES, L. V., FONTAN, R. D. I., Determinação das curvas de secagem em camada delgada de pimenta de cheiro (*Capsicum chinense*). **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v. 11, n. 2, p. 143-148, 2009.
- 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.
- RESENDE, O.; CORRÊA, P. C.; GONELI, A. L. D.; BOTELHO, F. M.; RODRIGUES, S. Modelagem matemática do processo de secagem de duas variedades de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.). **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v.10, n.1, p.17-26, 2008.

- RODRIGUES, E. SILVA, J. N.; SOUZA, C. M. A.; LACERDA FILHO, A.F., CHAVES, M. A., Simulação da secagem de Abacaxi em fatias em secador de Leito Fixo. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, MG. v.16, n.4, p.381-393, Out./Dez., 2008.
- SOUZA, 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.
- THOMPSON, T. L. **Predicted performances and optimal designs of convection grain dryers**. 1967. 85 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Purdue University, Agricultural Engineering Department, West Lafayette, Lafayette, IN., USA.
- TRIVELATO, G. C., **Técnicas de modelagem e simulação de sistemas dinâmicos**. INPE-9665-NTC/358. 2003. 19 p. INPE – São José dos Campos - SP.
- VITORINO, R. B. **Modelagem e simulação matemática do processo de secagem de milho**. 2009. 52. F. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade da Grande Dourados, Dourados – Mato Grosso do Sul-MS.