



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO – UFPE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

SIMULAÇÃO DA SECAGEM DE ARROZ EM SECADOR DE LEITO FIXO VIA
VOLUMES FINITOS

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA

Autor: Thiago Luis Costa Cavalcanti Novaes
Orientador: Prof. Dr. José Carlos Charamba Dutra
Co-Orientador: Prof. Dr. Jorge Recarte Henríquez Guerrero

Área: Térmica

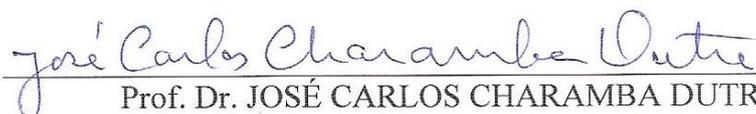
Recife, setembro de 2010.

“SIMULAÇÃO DA SECAGEM DE ARROZ EM SECADOR DE LEITO FIXO VIA VOLUMES FINITOS”.

THIAGO LUIS COSTA CAVALCANTI NOVAES

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: PROCESSOS E SISTEMAS TÉRMICOS
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA/CTG/EEP/UFPE

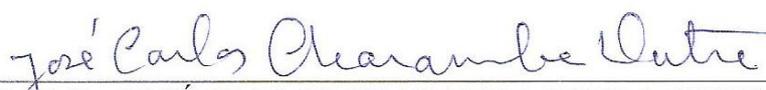


Prof. Dr. JOSÉ CARLOS CHARAMBA DUTRA
ORIENTADOR/PRESIDENTE

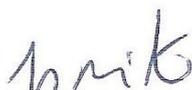

Prof. Dr. JORGE RECARTE HENRIQUEZ GUERRERO
CO-ORIENTADOR


Prof. Dr. SEVERINO LEOPOLDINO URTIGA FILHO
COORDENADOR DO CURSO

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. JOSÉ CARLOS CHARAMBA DUTRA (UFPE)


Prof. Dr. JORGE RECARTE HENRIQUEZ GUERRERO (UFPE)


Prof. Dr. JOÃO PEREIRA DE BRITO FILHO (UFPE)


Prof. Dr. ANTONIO GILSON BARBOSA DE LIMA (UFPE)

N935s

Novaes, Thiago Luis Costa Cavalcanti.

Simulação da secagem de arroz em secador de leito fixo via volumes finitos / Thiago Luis Costa Cavalcanti Novaes. - Recife: O Autor, 2010.

xiii, 69 folhas, il : figs., tabs.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2010.

Orientador: Prof^o. Dr. José Carlos Charamba Dutra.
Inclui Bibliografia.

1. Engenharia Mecânica. 2. Arroz. 3. Secagem. 4. Modelagem. 5. Simulação. 6. Volumes Finitos. I. Dutra, José Carlos Charamba (Orientador). II. Título.

UFPE

621 CDD (22. ed.)

BCTG/2010-270

DEDICATÓRIA

À minha família.

Aos meus colegas de mestrado.

A toda comunidade científica.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por me guiar.

Ao colega Alvaro Antonio Uchoa pela contribuição, no desenvolvimento do trabalho e pela amizade.

Aos colegas Jorge Ribeiro, Thiago Parente, Gutenberg, Ricardo Arruda, Waldízia, Ravi, Jacek, Heber, Marcos, Renato e Ronaldo pela amizade durante o mestrado.

Ao Professor Dr. José Carlos Charamba Dutra pela confiança e ensinamentos.

Ao Professor Dr. Jorge Recarte Henriquez Guerrero pela participação, pelos ensinamentos e pelas valiosas sugestões dadas ao trabalho.

Ao Professor Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima pela contribuição incondicional, mesmo a distância, pela paciência e pelos ensinamentos indispensáveis.

Ao Professor João Pereira de Brito Filho pela participação na banca de defesa.

Ao Eng. Mecânico Ricardo Aurélio Fragoso de Sousa pelos conhecimentos repassados.

À secretária do DEM, Eliane, pelo apoio.

À UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO.

À CAPES pela concessão da bolsa de estudos.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	VIII
LISTA DE TABELAS	X
NOMENCLATURA.....	XI
CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO	14
1.2 Motivação do trabalho	15
1.3 Objetivo geral	16
1.4 Objetivos específicos.....	16
1.5 Estrutura da dissertação	16
CAPÍTULO 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1 Processo de secagem	17
2.2 Modelos matemáticos	19
2.3 Outros trabalhos na área de secagem.....	22
2.4 Sistema de secagem	26
2.5 Aspectos científicos e mercadológicos do arroz.....	31
2.5.1 Ciclo produtivo do arroz.....	31
2.5.2 Aspectos mercadológicos da cultura de arroz no cenário nacional e mundial	34
CAPÍTULO 3. MATERIAIS E MÉTODOS	37
3.1 Caracterização do problema	37
3.2 Equações matemáticas.....	38
3.2.1 Balanço de energia para o produto	39
3.2.2 Balanço de massa para o produto	40
3.2.3 Balanço de energia para o ar.....	41
3.2.4 Balanço de massa para o ar.....	41
3.3 Condições de contorno	42
3.4 Solução numérica	42
3.4.1 Simulação numérica	42
3.4.2 O Método dos volumes finitos	43
3.4.3 Malha numérica	43
3.4.4 Discretização das equações	44
3.4.4.1 Balanço de energia para o produto	45
3.4.4.2 Balanço de massa do produto	45
3.4.4.3 Balanço de energia para o ar.....	46
3.4.4.4 Balanço de massa do ar	47
3.5 Propriedades termofísicas do grão de arroz e da mistura ar-vapor d'água.....	47

3.5.1 Grão (arroz)	47
3.5.2 Mistura ar-vapor	48
CAPÍTULO 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	50
CAPÍTULO 5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	62
5.1 Conclusões.....	62
5.2 Sugestões para trabalhos futuros	62
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	64

RESUMO

A Rizicultura, ou seja, a cultura de arroz é uma atividade muito antiga. O arroz é um grão muito consumido em todo o mundo. Seu ciclo produtivo é composto de várias etapas, tais como: plantio, colheita, recebimento, secagem, armazenamento, polimento, separação e classificação, embalagem e distribuição. Quando colhido, apresenta alto teor de umidade, em torno de 25 a 40% (b.s). Devido a esse fato, o grão deve ser submetido ao processo de secagem, chegando a um teor de mais ou menos 12% (b.s), com a finalidade de impedir ou minimizar a proliferação de microorganismo que venha a prejudicar a qualidade do arroz. Dessa forma o produto pode ser armazenado por longos períodos. Dentro desse contexto, o presente trabalho tem como objetivos modelar matematicamente o processo de secagem em leito fixo para descrever as trocas de energia e massa entre o arroz longo em casca e o ar no interior do secador e simular computacionalmente o processo para várias condições de temperatura, umidade relativa, vazão específica do ar e alturas do leito. As equações são resolvidas numericamente, usando o método dos volumes finitos. A validação da simulação é realizada através de experimentos propostos na literatura. Os resultados simulados e experimentais apresentam boa concordância para os valores do teor de umidade do produto ao longo do leito durante a secagem. Verifica-se que o teor de umidade do produto diminui com o passar do tempo, o tempo de secagem dos grãos depende da espessura da camada utilizada, o aumento de temperatura do ar de secagem proporciona aumento na velocidade de secagem e a metodologia aplicada para análise do processo, bem como o programa utilizado para a simulação são bem aceitos.

Palavras-chave: arroz, secagem, modelagem, simulação, volumes finitos.

ABSTRACT

Rice plating, it means, the culture of rice is a very ancient activity. Rice is a grain widely consumed throughout the world. Its production cycle is composed of several steps, such as planting, harvesting, receiving, drying, storage, grinding, separation and classification, packaging and distribution. When harvested, has a high moisture content, around 25-40% (db). Because of this, the grain must undergo a drying process, reaching a level of about 12% (db), in order to prevent or minimize the proliferation of microorganisms that may impair the quality of rice. Hence, the product can be stored for long periods. Within this context, this study aims to mathematically model the drying process in a fixed bed to describe the exchanges of energy and mass between the long grain rice in husk and the air inside the dryer, and also, simulate, computationally, the process for various conditions of temperature, relative humidity and specific airflow rate and bed heights. The equations are solved numerically using the finite volume method. The validation of the simulation is performed by experiments proposed in the literature. The simulated and experimental results show good agreement for the values of the moisture content of the product along the bed during drying. It was verified that the moisture content of the product decreases over time, the drying time of the grains depends on the thickness used, the increase in drying air temperature provides an increase in drying rate and, the analysis's methodology of process, and also the program used for simulation are well accepted.

Keywords: rice, drying, modeling, simulation, finite volumes.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1- Etapas de beneficiamento do arroz.	15
Figura 2.1 - Processo de secagem.....	18
Figura 2.2 - Esquema de secagem utilizado para os experimentos.	22
Figura 2.3 - Comportamento da umidade do produto em base seca obtida a partir das simulações, utilizando a equação de Page e os experimentos.	23
Figura 2.4 - Esquema do experimento.....	24
Figura 2.5 - Comportamento da umidade do produto em função do tempo para várias temperaturas do ar de secagem, utilizando o modelo proposto por Midilli et. al.....	24
Figura 2.6 - Esquema da operação de um secador de leito fixo: a) operando com fluxo de ar normal e b) operando com fluxo de ar reverso.....	25
Figura 2.7 - Comportamento da umidade do produto em função do tempo, a partir de dados simulados e experimentais. À temperatura do ar de secagem é 70°C e à altura do leito 0,05m.	26
Figura 2.8 - Sistema de secagem em camada fixa ou leito fixo	27
Figura 2.9 - Sistema de secagem em fluxo cruzado.	27
Figura 2.10 - Sistema de secagem em fluxo contracorrente.....	28
Figura 2.11 - Sistema de secagem em fluxo concorrente.....	28
Figura 2.12 - Sistema de secagem em cascata ou misto.....	29
Figura 2.13 - Sistema de secagem rotativo.....	29
Figura 2.14 - Sistema de secagem leito fluidizado.....	30
Figura 2.15 - Secador utilizando o processo de seca-aeração.	30
Figura 2.16 - a) Planta de arroz e b) panícula.....	31
Figura 2.17 - Seção transversal de uma raiz madura de arroz.....	31
Figura 2.18 - Estrutura do grão e suas principais partes.....	32
Figura 2.19 - Germinação de semente de arroz.....	33
Figura 2.20 - Estágios de germinação da semente de arroz.	33
Figura 2.21 - Grãos de arroz. a) Em casca; b) Beneficiados (tipo longo).	34
Figura 2.22 - Produção e estoques mundiais de arroz em casca.....	35
Figura 2.23 - Produção e consumo mundiais de arroz beneficiado.....	36
Figura 3.1 - Esquema do processo de secagem.	38
Figura 3.2 - Fração volumétrica do volume de arroz.	39
Figura 3.3 - Função do método numérico.	43
Figura 3.4 - Volume de controle para o problema advectivo/difusivo.....	44
Figura 3.5 - a) Volume de controle utilizado e b) Malha dividida em 20 camadas.	45

Figura 4.1 - Comparação entre os dados numéricos e experimentais (Zare et al. (2006)) do teor de umidade do produto, durante processo de secagem de grão de arroz em casca com altura do leito $H=0,25$ m e os valores tomados em $y=0,09$ m.	51
Figura 4.2 - Teste de malha para o comportamento da umidade do produto em função do tempo para: dez, vinte, trinta, quarenta, cinquenta, sessenta e setenta pontos do leito e valores tomados em $y=H$	52
Figura 4.3 - Comportamento do teor de umidade do produto em função do tempo para três valores diferentes de vazões específicas do ar ($0,22 \text{ kg/m}^2\text{s}$, $0,44 \text{ kg/m}^2\text{s}$ e $0,88 \text{ kg/m}^2\text{s}$) e os valores tomados em $y=H$	53
Figura 4.4 - Comportamento do teor de umidade do produto em função do tempo para alturas de leitos, $H=0,25$ m e $H= 0,50$ m e os valores tomados em $y=H$ m.	53
Figura 4.5 - Comportamento do teor de umidade do produto em função do tempo para umidades relativas do ar de secagem de: $UR=30\%$ e $UR=60\%$ e os valores tomados em $y=H$ m.	54
Figura 4.6 - Distribuição da umidade do produto em função do tempo para diferentes temperaturas do ar de secagem e os valores tomados em $y=H$	55
Figura 4.7 - Distribuição da umidade do produto em função da altura do leito para nove tempos de secagem, considerando o leito com altura $H=0,50$ m.	55
Figura 4.8 - Distribuição do teor de umidade do produto em função do tempo, para três pontos do leito ($y=0,0$ m, $y=0,25$ m e $y=0,50$ m) de secagem, considerando o leito com altura $H=0,50$ m.	56
Figura 4.9 - Distribuição da temperatura do produto em função do tempo para nove tempos de secagem, considerando o leito com altura $H=0,50$ m.	57
Figura 4.10 - Distribuição da temperatura do produto em função do tempo para três pontos do leito ($y=0,0$ m, $y=0,25$ m e $y=0,50$ m) de secagem, considerando o leito com altura $H=0,50$ m.	57
Figura 4.11 - Distribuição de temperatura do ar em função da altura do leito para nove tempos de secagem, considerando o leito com altura $H=0,50$ m.	58
Figura 4.12 - Distribuição da temperatura do ar de secagem em função do tempo para três pontos do leito ($y=0,0$ m, $y=0,25$ m e $y=0,50$ m) de secagem, considerando o leito com altura $H=0,50$ m.	59
Figura 4.13 - Distribuição de umidade relativa do ar em função da altura do leito para doze tempos de secagem, considerando o leito com altura $H=0,50$ m.	59
Figura 4.14 - Distribuição da umidade relativa do ar em função do tempo para três pontos do leito ($y=0,0$ m, $y=0,25$ m e $y=0,50$ m) de secagem, considerando o leito com altura $H=0,50$ m.	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Modelos matemáticos.....	20
Tabela 2.2 - Modelos matemáticos utilizados por Hacıhafızoglu et al. (2008) nas simulações.	23
Tabela 2.3 - Classificação dos sistemas de secagem.....	26
Tabela 2.4 - Faixas de temperaturas para cada fase da planta de arroz.....	34
Tabela 2.5 - Produção nacional do produto por região.....	35
Tabela 3.1 - Condições de contorno e iniciais.....	42
Tabela 3.2 - Propriedades termofísicas do grão de arroz.....	48
Tabela 3.3 - Propriedades termodinâmicas para mistura ar-vapor.....	48
Tabela 4.1 – Casos de processos de secagem analisados.....	50

NOMENCLATURA

Letras Latinas

A	Parâmetro da Eq. (3.8)	[K]
A*	Área específica	[m ² /m ³]
A _{partícula}	Área de uma partícula	[m ²]
a*	Parâmetro da Eq. (2.4) e Eq.(2.5)	[adimensional]
a ₀	Parâmetro da Eq. (2.5)	[adimensional]
b	Parâmetro da Eq. (2.9)	[adimensional]
B	Parâmetro da Eq. (3.8)	[K]
C	Parâmetro da Eq. (3.8)	[K]
Bi	Número de Biot para transferência de calor	[adimensional]
Bi _m	Número de Biot para transferência de massa	[adimensional]
b.s	Base seca	[kg/kg]
b.u	Base úmida	[kg/kg]
c _a	Calor específico do ar de secagem	[J/kgK]
c _p	Calor específico do produto	[J/kgK]
c _v	Calor específico do vapor d'água	[J/kgK]
c _w	Calor específico da água líquida	[J/kgK]
d.b	Base seca	[kg/kg]
$\frac{d\bar{M}}{dt}$, $\frac{\partial \bar{M}}{\partial t}$	Taxa média de secagem	[(kg/kg)/s]
D	Coefficiente de difusão	[m ² /s]
dy	Dimensão da fração volumétrica	[m]
dz	Dimensão da fração volumétrica	[m]
E	Energia	[J]
f	Função	[-]
H	Espessura da camada de produto	[m]
h _c	Coefficiente de transferência de calor por convecção	[W/m ² K]
h _m	Coefficiente de transferência de massa por convecção	[W/m ² K]
h _v	Calor latente de vaporização da água do produto	[J/kg]
K	Constantes de secagem utilizadas nas Eqs. (2.2, 2.3, 2.4, 2.5, 2.6, 2.7 e 2.8)	[s ⁻¹]
k _{cond}	Condutividade térmica	[W/mK]

L	Comprimento do corpo	[m]
M	Teor de umidade do produto	[kg/kg]
\bar{M}	Teor médio de umidade do produto	[kg/kg]
M_0	Teor de umidade inicial do produto	[kg/kg]
\bar{M}_0	Teor médio de umidade inicial do produto	[kg/kg]
M_e	Teor de umidade de equilíbrio do produto	[kg/kg]
\bar{M}_e	Teor médio de umidade de equilíbrio do produto	[kg/kg]
M_f	Teor de umidade final do produto	[kg/kg]
\bar{M}^*	Razão de umidade média do produto	[kg/kg]
MR	Razão de umidade do produto	[kg/kg]
n	Parâmetro da Eq. (2.3)	[Adimensional]
n_p	Número de partículas do leito	[-]
n_{py}	Número de pontos do leito	[Adimensional]
P_a	Pressão parcial de vapor d'água no ar	[N/m ²]
P_{atm}	Pressão atmosférica	[N/m ²]
P_g	Pressão parcial de vapor d'água na superfície do produto	[N/m ²]
P_{vs}	Pressão de vapor saturado	[N/m ²]
R_{cond}	Resistência térmica condutiva	[K/W]
R_{conv}	Resistência térmica convectiva	[K/W]
q_a	Vazão específica de massa de ar	[kg/m ² s]
R	Constante universal dos gases	[J/molK]
S	Área de troca de calor	[m ²]
T_a	Temperatura do ar de secagem	[°C]
T_{ent}	Temperatura do ar de secagem na entrada do secador	[°C]
t	Tempo	[s]
UR	Umidade relativa do ar de secagem	[dec]
V_{leito}	Volume do leito	[m ³]
$V_{partícula}$	Volume de uma partícula do leito	[m ³]
X	Parâmetro da Eq. (3.4)	[°C]
x_a	Teor de umidade absoluta do ar de secagem	[kg/kg]
x_{ent}	Teor de umidade absoluta do ar de secagem na entrada do secador	[kg/kg]
Y	Parâmetro da Eq. (3.4)	[°C]
y	Posição com relação a um ponto dentro da camada de produto	[m]
w_a	Velocidade do ar de secagem	[m/s]

Letras gregas

Δt	Incremento no tempo	[s]
Δy	Incremento na direção y	[m]
Δz	Incremento na direção z	[m]
ε	Porosidade do leito	[decimal]
∇	Gradiente	[-]
ρ_a	Densidade do ar	[kg/m ³]
ρ_p	Densidade do produto	[kg/m ³]
θ	Temperatura do produto	[°C]
$\bar{\theta}$	Temperatura média do produto	[°C]
$\bar{\theta}_0$	Temperatura média do produto no início do processo de secagem	[°C]
μ_a	Viscosidade dinâmica do ar de secagem	[kg/ms]

Φ_e	Propriedade de interesse localizada na face do volume de controle leste	[-]
Φ_E	Propriedade de interesse localizada no centro do volume de controle leste	[-]
Φ_w	Propriedade de interesse localizada na face do volume de controle oeste	[-]
Φ_W	Propriedade de interesse localizada no centro do volume de controle oeste	[-]

Superescrito

o Anterior

Subescrito

a Ar
c Convecção
e Equilíbrio
f Final
o Inicial
p Produto
sat Saturado
v Vapor
w Água

CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO

O cultivo de arroz, chamado de orizicultura ou rizicultura, acontece há muitos anos. O grão tem sua origem na Ásia onde é cultivado há 5.000 anos pelos chineses. No Brasil, relata-se que desde 1587 lavouras arrozeiras já ocupavam terras na Bahia. Em 1766, a Coroa Portuguesa autorizou a instalação da primeira descascadora de arroz no Brasil, na cidade do Rio de Janeiro, segundo o Ministério da Agricultura do Brasil (2009).

De acordo com a *Food Agriculture Organization* (FAO-2009), a China é o maior produtor mundial, seguido pela Índia, Indonésia, Bangladesh, Vietnã, Tailândia, Myanmar, Filipinas e Brasil.

O arroz representa alimento de primeira necessidade para mais da metade da população mundial. Constitui a fonte principal de energia para a dieta dos povos que vivem no Extremo-Oriente, região onde se cultiva e se consome nove décimos desse cereal produzido no mundo. Nessa área, mais de 500 milhões de pessoas vivem quase que exclusivamente à base de arroz.

Fora do Extremo-Oriente, o arroz faz parte da dieta de muitos outros povos, com mais ou menos intensidade, conforme a região e suas possibilidades econômicas. De modo geral, vai se estendendo e firmando-se pelo mundo todo, principalmente nas regiões menos evoluídas e de poder aquisitivo menor, tais como a África, América Latina e Oriente Médio. Na América, o Brasil ocupa lugar de destaque, sendo o maior produtor. Na escala mundial, está entre os 10 primeiros, apesar de representar tão somente 2%, no cálculo total. Tem pela frente, apenas os países maiores produtores do Extremo-Oriente. Sob o ponto de vista de produtividade, o Brasil apresenta, em virtude do seu sistema de plantio (de sequeiro, inteiramente sujeito às oscilações climáticas), uma das mais baixas produções do mundo.

Mais da metade da colheita mundial é absorvida na própria área de produção. Anualmente, mais de 150 milhões de hectares são plantados pelo mundo todo, com produção de cerca de 400 milhões de toneladas. A *Food Agriculture Organization* (FAO-2009) estima a colheita mundial em mais de 50 milhões de dólares por ano.

Do ponto de vista de parâmetros como clima, temperatura, ventos, água e solo, têm-se características muito importantes para o desenvolvimento e qualidade final do produto.

O arroz é planta hidrófila, ou seja, possui afinidade com a água. Por esse motivo, as culturas irrigadas são as mais desejáveis. As várzeas melhores são aquelas que oferecem um sub-solo impermeável, a uns 20 a 25 cm da superfície, porque possibilitam grande economia de água necessária à irrigação. As várzeas arenosas são as piores, devido serem porosas e profundas, exigem grandes quantidades de água.

Dentre as etapas utilizadas para obtenção do arroz, podem-se citar: a plantação, o cultivo, a colheita, o recebimento, o descarregamento, a pré-limpeza, a secagem, o armazenamento, a limpeza, o descascamento, o polimento, a separação, a classificação, a embalagem, o armazenamento e a distribuição (centros de comércio e consumidores finais). Uma fase de grande importância, tanto para qualidade como para a produtividade, é a secagem dos grãos. A Figura 1.1 ilustra o fluxograma relativo às etapas para obtenção do arroz.

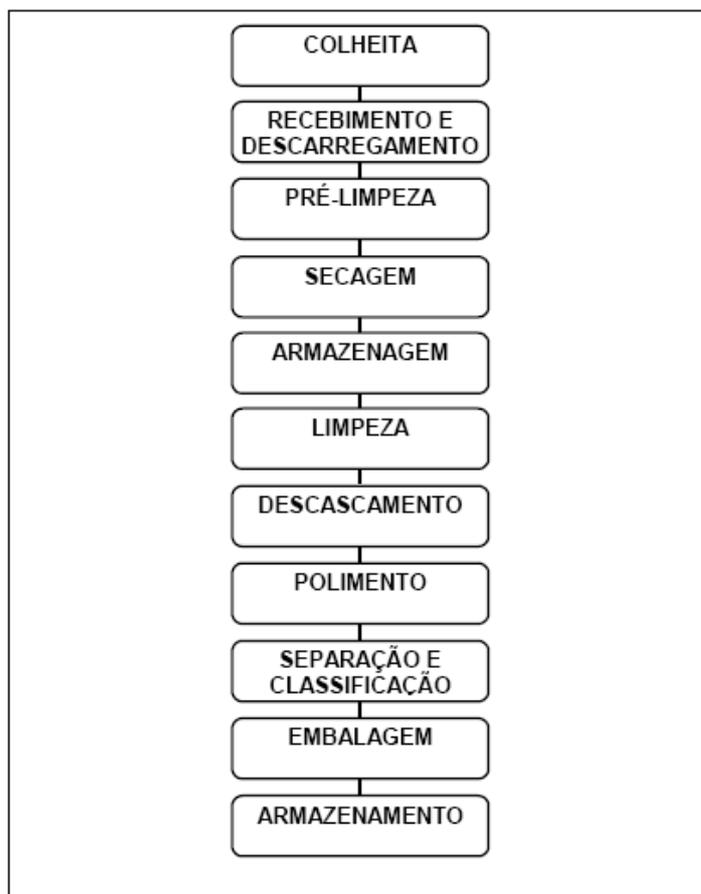


Figura 1.1- Etapas de beneficiamento do arroz.
FONTE: Ludwig (2004). (Com modificações).

Tendo em vista que o arroz é plantado em áreas alagadas, seu teor de umidade é bastante elevado. Assim, é indispensável a realização da secagem desses grãos. No entanto, esse processo deve ter seus parâmetros controlados para que não haja perda na qualidade e nem na produtividade.

1.2 Motivação do trabalho

A ideia de desenvolver o presente trabalho surgiu durante o período em que o autor frequentava o curso de graduação. A linha de pesquisa foi utilizada naquele momento para analisar a secagem de casulos do bicho-da-seda.

Buscando aproximar o trabalho de alguma análise relacionada a produtos alimentares, mas que utilizasse a mesma técnica, foi proposto estudo da secagem de arroz.

Outro ponto motivador foi a existência de pesquisas relativas à secagem no Grupo de Engenharia Térmica do DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA da

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO. Dessa forma, procurou-se dar continuidade a essas pesquisas, contudo analisando outro tipo de produto (arroz).

Sendo assim, espera-se poder contribuir para a melhoria da etapa de secagem do arroz, tendo em vista ser um dos momentos mais críticos para a qualidade final do produto.

1.3 Objetivo geral

Buscando dar uma contribuição ao processo de obtenção do arroz, especificamente, à área de secagem do produto, esse trabalho propõe realizar uma análise e uma avaliação do processo de secagem do arroz longo em casca, após a colheita, em secador de leito fixo, usando o método dos volumes finitos. Dar-se-á ênfase aos efeitos causados pela temperatura do ar de secagem, pela vazão específica do ar de secagem e pela espessura da camada de arroz, no teor de umidade ao longo do processo.

1.4 Objetivos específicos

- a) Apresentar um modelo matemático unidimensional do problema e sua resolução usando o método dos volumes finitos;
- b) Analisar o comportamento da temperatura e umidade do ar e do produto, em função do tempo;
- c) Analisar o comportamento da temperatura e umidade do ar e do produto em função da espessura da camada de arroz;
- d) Avaliar o comportamento da temperatura e umidade do ar e do produto, no decorrer do tempo;
- e) Avaliar o comportamento da temperatura e umidade do ar e do produto com a espessura da camada de arroz.

1.5 Estrutura da dissertação

O trabalho está dividido em cinco capítulos onde são mostradas as etapas de desenvolvimento teórico do estudo da secagem de arroz em secador de leito fixo.

No capítulo 1, apresenta-se uma introdução do trabalho onde são definidos: o objetivo geral, os objetivos específicos, a motivação e a estruturação da dissertação.

O capítulo 2 é dedicado à revisão bibliográfica, contendo os trabalhos mais recentes na área e conceitos fundamentais para o desenvolvimento da dissertação.

No capítulo 3, apresenta-se a metodologia utilizada para a simulação da secagem, ou seja, a caracterização do problema, os balanços de energia e massa, a discretização das equações, as considerações e as propriedades termofísicas do grão e do ar.

No capítulo 4, apresentam-se os resultados e as discussões das simulações realizadas.

O capítulo 5 contém as conclusões e sugestões para trabalhos futuros relacionados à secagem de arroz.

Por último, é apresentada a bibliografia utilizada para o estudo.

CAPÍTULO 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Processo de secagem

Segundo Lima (1995) apud Novaes (2005), a secagem é um processo termodinâmico, por meio do qual ocorre a redução do teor de umidade do corpo quando ele recebe energia. O ar aquecido é um fornecedor de calor no processo de secagem; assim suas propriedades termodinâmicas têm que ser bem avaliadas. Torna-se importante o conhecimento de parâmetros envolvidos no processo, tais como: temperatura, umidade relativa e umidade absoluta, vazão específica do ar, teor de umidade inicial do produto, entre outros, de tal maneira que sob determinadas condições operacionais se possa obter um produto com características satisfatórias do ponto de vista físico, químico e biológico, seja para consumo imediato ou para armazenamento. Vale frisar que a remoção excessiva de umidade durante a secagem pode provocar no produto, tensões que venham a resultar em perda da qualidade.

Em relação aos grãos em geral, por exemplo, milho, soja, arroz, entre outros, sabe-se que são colhidos com alto teor de umidade, devendo ser secos para reduzir o valor desse parâmetro e reduzir a deterioração causada por microorganismos, segundo Giner e Bruce. (1998) e Rumsey e Rovedo (2001), apud Pereira (2004).

Segundo Ghosh et al. (2008), os grãos colhidos apresentam, em geral, um alto teor de umidade. De acordo com De Padua et al. (1985) apud Bunyawanchakul et al. (2007), o grão de arroz quando colhido, apresenta, em média, uma umidade em torno de 24 a 28% (b.u.), enquanto que um valor seguro de umidade para o armazenamento seria em torno de 14% (b.u). Esse fato ratifica a importância da secagem para esses produtos.

Conforme Discroll e Adanezak (1987) apud Bunyawanchakul et al. (2007), com uma umidade em torno de 18-19% em base úmida, o grão pode ser armazenado por até três semanas, sem excessiva diminuição da qualidade.

Do ponto de vista do processo de secagem, a condição necessária e suficiente para que ela ocorra é que a pressão parcial de vapor d'água, na superfície do produto, seja maior que a pressão parcial de vapor d'água no ar. A Figura 2.1 ilustra o fenômeno de secagem.

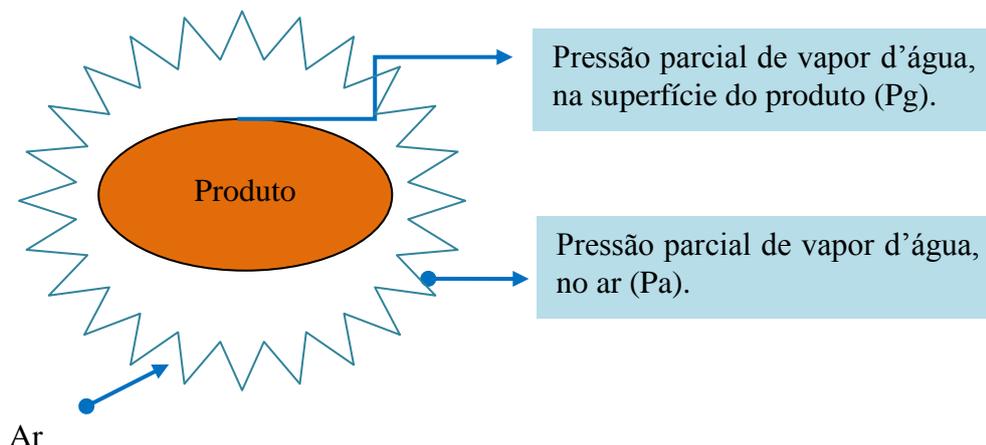


Figura 2.1 - Processo de secagem.
 FONTE: Silva et al. (2000). (Com modificações).

Em suma, para que ocorra a transferência de massa têm-se as seguintes situações:

- a) $P_g > P_a$: ocorre a secagem;
- b) $P_g < P_a$: umedecimento do produto;
- c) $P_g = P_a$: equilíbrio higroscópico.

A razão de secagem é afetada por inúmeros fatores, tais como: a umidade inicial do produto, a temperatura de secagem, a umidade relativa, a velocidade do ar, o tipo do grão, o método de secagem e o tipo de secador, conforme Hacıhafizoglu et al. (2007).

Segundo Lima (1995), pesquisadores de todo o mundo têm trabalhado, analisando os processos de secagem. Alguns consideram as condições externas, como temperatura do ar, velocidade e umidade relativa, correlacionadas à taxa de secagem dos produtos, enquanto outros dão ênfase às condições internas, levando em consideração o movimento da água no seu interior. O conhecimento desses mecanismos internos, no transporte da água, é de fundamental importância, quando se tenta descrever a migração da água, na massa de um produto.

Como exemplo de trabalho nessa área, pode-se citar Miketinac et al. (1992) onde eles assumem que a transferência de massa (umidade) em direção à superfície do grão é devido à difusão de líquido ou devido ao efeito cumulativo de líquido e difusão de vapor antes da transferência de massa por convecção.

Hacıhafizoglu et al. (2007) desenvolveram estudos sobre a secagem de arroz, utilizando o modelo de difusão de líquido para camada fina.

A migração de água no interior de produtos biológicos ainda não é bem conhecida. Alguns pesquisadores afirmam que no fenômeno de secagem, a migração da água pode ser uma combinação de movimentos por difusão de líquido e de vapor, cada um predominando, em determinadas etapas da secagem, segundo Steffe e Singh (1980). A seguir são citados alguns mecanismos de transporte de água, segundo Fortes e Okos, (1980); Hall (1980); Strumillo e Kudra (1986); Brooker et al. (1992) e Lima (1995):

- transporte por difusão líquida: ocorre devido a gradientes de concentração de água;
- transporte por difusão de vapor: ocorre devido a gradientes de concentração de água e pressão parcial do vapor (causado por gradientes de temperatura);
- transporte por efusão (escoamento Knudsen): ocorre quando o diâmetro médio dos poros por onde o vapor migra tem tamanho equivalente ao das moléculas que compõem o

vapor. É importante para condições de alto vácuo, como por exemplo, secagem por congelamento;

- transporte de vapor por termofusão: ocorre devido aos gradientes de temperatura;
- transporte de líquido por forças capilares: ocorre devido aos fenômenos de capilaridade;
- transporte de líquido por pressão osmótica: ocorre devido à força osmótica;
- transporte de líquido por gravidade: ocorre devido à ação de forças gravitacionais;
- transporte de líquido e de vapor: ocorre, devido à diferença de pressão total, causada pela pressão externa, contração, alta temperatura e capilaridade.

No trabalho de Ghosh et al. (2008) é realizada uma modelagem matemática do processo de secagem em grãos de trigo e os resultados validados com dados obtidos através de imagens do movimento de massa (umidade) fornecidas por ressonância magnética. Para essa análise, foi considerado um material higroscópico, como o arroz, poroso, com os poros parcialmente preenchidos com líquido e parcialmente com mistura de ar-vapor d'água. A alta temperatura do ar de secagem proporciona a transferência de calor por convecção do ar para a superfície do grão de trigo e por condução para o seu interior.

Existem vários modelos classificados em semiteóricos e empíricos utilizados para descrever o processo de secagem de grãos em camada fina, ou seja, ao nível de uma partícula, e em camada espessa, ao nível do secador. Processos específicos para grãos já foram revistos e comparados por Jayas et al. (1991); Cenkowski et al. (1993); Pabis et al. (1998); Parde et al. (2003); Ghosh et al. (2004); Hall (2007). Esses modelos podem prever perda de umidade a partir da massa de grãos durante a secagem, mas não podem prever a distribuição de umidade e temperatura dentro de cada grão durante a secagem.

2.2 Modelos matemáticos

Segundo Lima (1995) apud Novaes (2005), no meio científico mundial, os diversos processos de secagem têm sido descritos e modelados matematicamente por muitos pesquisadores, ao longo de muitas décadas. Buscando correlacionar os dados experimentais da secagem de um produto a um modelo matemático, os estudiosos da área de secagem vêm difundindo uma série de modelos que representam a cinética de secagem para cada tipo de produto.

Cihan et al. (2007) propõem o estudo de alguns modelos para secagem de arroz em camada fina. As umidades do produto para cada modelo são simuladas durante certo período de tempo e depois é feita uma análise estatística dos resultados encontrados com os modelos e comparados com os experimentais para avaliar o melhor modelo para a condição determinada.

Bunyanichakul et al. (2007) propuseram a modelagem e simulação de um secador pneumático para arroz. Foram realizados balanços de massa e energia, obtendo-se equações diferenciais ordinárias não-lineares que foram resolvidas numericamente.

Segundo Novaes (2004), os modelos empíricos e semiempíricos são utilizados para descrever a secagem em camada fina, isto é, ao nível da partícula. A Tabela 2.1 apresenta alguns exemplos desses modelos. Esses modelos são baseados em análise concentrada. Nos modelos de parâmetros concentrados, deve-se fazer referência aos números de Biot. O primeiro deles é o número de Biot para transferência de calor que é dado pela relação entre a resistência térmica condutiva e a resistência térmica convectiva. Segundo Incropera e De Witt (1998), se $Bi \ll 1$ a resistência térmica condutiva no interior do sólido é muito menor do que a resistência térmica convectiva, e por isso supõe-se que a distribuição de temperatura é uniforme ao longo do sólido em qualquer instante do processo transiente. O Biot para transferência de calor é dado pela Eq. (2.1a). O segundo deles é o número de Biot para transferência de massa (Bi_m) que é dado pela relação entre a resistência interna à transferência

de massa de uma espécie e a resistência à transferência de massa da espécie na camada limite. O Biot para transferência de massa é dado pela Eq. (2.1b)

$$Bi = \frac{R_{cond}}{R_{conv}} = \frac{hL}{k_{cond}} \quad (2.1a)$$

$$Bi = \frac{h_m L}{D} \quad (2.1b)$$

Tabela 2.1 - Modelos matemáticos.

Nome	Modelo	Referência	Eq
Newton	MR = exp(-kt)	O'Callaghan et al. (1971)	(2.2)
Page	MR = exp(-kt ⁿ)	Agrawal and Singh (1977)	(2.3)
Henderson e Pabis	MR = a*exp(-kt)	Chhinman (1984)	(2.4)
Logarithmic	MR = a ₀ + a*exp(-kt)	Chandra and Singh (1995)	(2.5)

As equações empíricas possuem uma relação direta entre o conteúdo de água no produto e o tempo de secagem. As semiempíricas são análogas à lei de Newton para o resfriamento, assumindo que a taxa de secagem é proporcional à diferença entre o teor de água do produto e seu o respectivo teor de água e de equilíbrio para as condições de secagem especificadas. As equações teóricas, geralmente, levam em consideração a difusão de líquido e/ou vapor dentro do produto.

Rumsey e Rovedo (2001) aplicaram um modelo dinâmico para secagem em fluxo cruzado de arroz. Eles determinaram os efeitos da umidade inicial do produto, da temperatura do ar de secagem. Os resultados foram validados através de dados experimentais.

Srivastava e Jonh (2002) utilizaram equações semiempíricas para camada fina para prever a umidade relativa do ar, temperatura do ar e a temperatura dos grãos para diferentes alturas de um leito fixo de grãos em estado transiente.

Segundo Parti (1990), Simmonds et al. (1953) figuram como os primeiros pesquisadores a aplicarem o modelo semiempírico análogo à lei de Newton para o resfriamento, sugerido por Lewis, apud Jayas et al. (1991). Neste modelo, a taxa de secagem é função do teor de água do produto em qualquer tempo de secagem e do seu teor de água de equilíbrio nas condições de secagem.

Matematicamente tem-se a Eq. (2.6).

$$\frac{d\bar{M}}{dt} = K(\bar{M} - \bar{M}_e) \quad (2.6)$$

Definindo o parâmetro adimensional $\bar{M}^* = \frac{\bar{M} - \bar{M}_e}{\bar{M}_o - \bar{M}_e}$ e integrando a Eq. (2.6) em relação ao tempo, tem-se a Eq. (2.2).

$$\bar{M}^* = e^{(-Kt)} \quad (2.2)$$

Apesar da Equação (2.2) ter sido bastante aplicada sucessivamente por numerosos pesquisadores, esse modelo não apresentou resultados satisfatórios em alguns casos, e modificações foram requeridas. Esse modelo é também conhecido como a “lei exponencial”.

Segundo Barre et al. (1971), não é dada a devida atenção ao efeito da velocidade na constante de secagem. No entanto há grande evidência de que a velocidade tem amplo efeito

na constante de secagem em leito espesso, e propõem modificações na equação para o cálculo da constante de secagem.

Uma pequena modificação na Equação (2.2), envolvendo a adição de um termo exponencial, na variável tempo, gera um novo modelo exponencial mais preciso para descrever as variações dos dados medidos. Este modelo é expresso pela Eq. (2.7).

$$\bar{M}^* = A_1 e^{(-Kt^K)} \quad (2.7)$$

A Equação (2.7) é conhecida como equação de Page para camada fina.

Dentre os inúmeros modelos matemáticos de secagem em camada fina, usados por pesquisadores para descrever a retirada de água nos produtos biológicos, Cihan et al. (2007) selecionaram dez modelos para serem ajustados a dados experimentais de secagem de arroz, por serem os mais usados. Concluíram, com base nos coeficientes de determinação e variâncias, que o melhor modelo é o representado pela Eq. (2.8).

$$\bar{M}^* = A_1 e^{(-Kt^n)} + bt \quad (2.8)$$

Vale a pena ressaltar que em todos os modelos aqui referenciados, as constantes de secagem K podem ser determinadas sem referência à forma e às variações dimensionais do material secado. Isso pode ser vantajoso em casos onde a geometria da partícula não pode ser especificada com precisão ou onde não ocorrem grandes variações geométricas do produto durante a secagem, segundo Rapusas e Driscoll (1995).

Pode-se mostrar de forma geral que as variações do teor de umidade do produto, no processo de secagem, é função da temperatura, da umidade relativa do ar, da velocidade do ar, da umidade inicial do produto, do tempo e de outros. A Equação (2.9) expressa o teor de umidade em função dos parâmetros citados.

$$\bar{M}^* = f(T_a, UR, w_a, \bar{M}_o, t, \varepsilon \text{ e outros}) \quad (2.9)$$

Outros tipos de modelos a serem considerados são os difusivos. Eles são baseados em análise distribuída. São baseados na difusão de líquido e ou vapor dentro do produto e descrevem as taxas de transferência de calor e de massa como função da posição dentro do sólido e do tempo de secagem. Consideram-se ainda as resistências aos fluxos de calor e de massa externos e internos.

A difusão da água em termos do gradiente de concentração no produto é estabelecida pela Eq. (2.10) que representa a segunda lei de Fick.

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \nabla \cdot (D \nabla M) \quad (2.10)$$

De uma maneira geral, o coeficiente de difusão D é considerado constante ou dependente da temperatura e/ou do teor de umidade do produto. Sabe-se que a pressão mecânica reduz a porosidade e em consequência a difusividade da umidade no produto. Portanto, a pressão tem efeito negativo, na difusividade da água, segundo Saravacos (1995).

2.3 Outros trabalhos na área de secagem

Buscando contribuir para o conhecimento de trabalhos mais recentes na área de secagem de grãos, mais especificamente, de arroz, são apresentadas a seguir algumas pesquisas sobre o assunto.

Ondier et al. (2010) propuseram experimentos e simulações para analisar a secagem de arroz em camada fina, utilizando baixas temperaturas (26°C a 34°C) e umidade relativa do ar de secagem (19% a 68%). A Figura 2.2 ilustra o esquema utilizado para os experimentos. O aparelho possui 16 bandejas onde são inseridos os grãos. Ar aquecido circula pelas bandejas, retirando a umidade do produto. Foram utilizados para os experimentos grãos de arroz longos e médios em casca colhidos em Stuttgart.

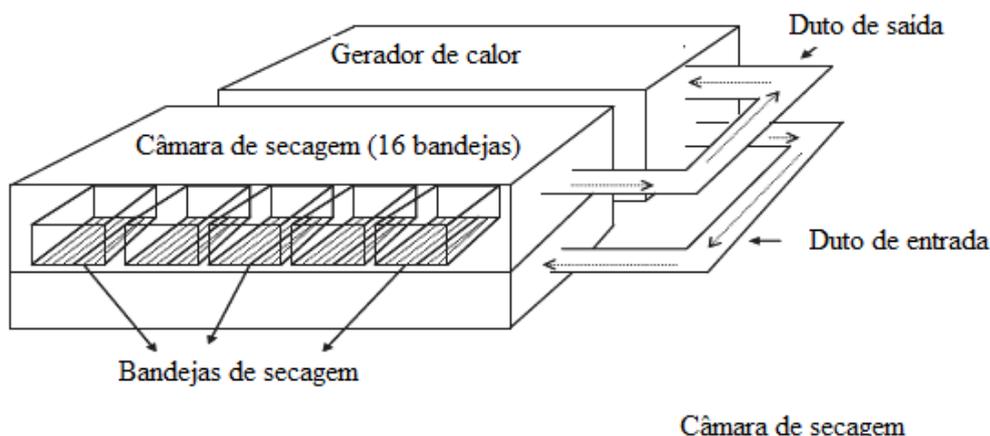


Figura 2.2 - Esquema de secagem utilizado para os experimentos.
 FONTE: Ondier et al. (2010). (Com modificações).

Os objetivos desse trabalho foram:

- Estabelecer as curvas de secagem em camada delgada;
- Determinar diferenças na taxa de secagem que resultam de diferentes temperaturas e umidades relativas do ar;
- Analisar a efeito dessas condições de secagem sobre a qualidade do arroz através de parâmetros como cor e quantidade de quebra do produto.

Os autores realizaram algumas combinações de temperatura e umidade relativa para determinar a umidade de equilíbrio do produto. Utilizaram ainda a equação de Page para simular o comportamento da umidade do produto com o tempo. Os resultados mostraram que a duração da secagem pode ser reduzida significativamente diminuindo a umidade relativa em determinada temperatura particularmente em baixas temperaturas. A qualidade do produto foi mantida.

Janjai et al. (2009) analisaram a secagem em camada fina de pedaços de lichia. Utilizaram oito modelos para camada fina e compararam com dados obtidos através de experimentos. Os experimentos foram realizados com temperaturas variando de 50°C a 70°C e umidades relativas entre 10% e 25%. Verificaram que o modelo de Page foi o que mais se adequou, ou seja, os valores preditos e experimentais apresentaram excelente concordância. A Figura 2.3 apresenta os resultados obtidos a partir das simulações e dos experimentos.

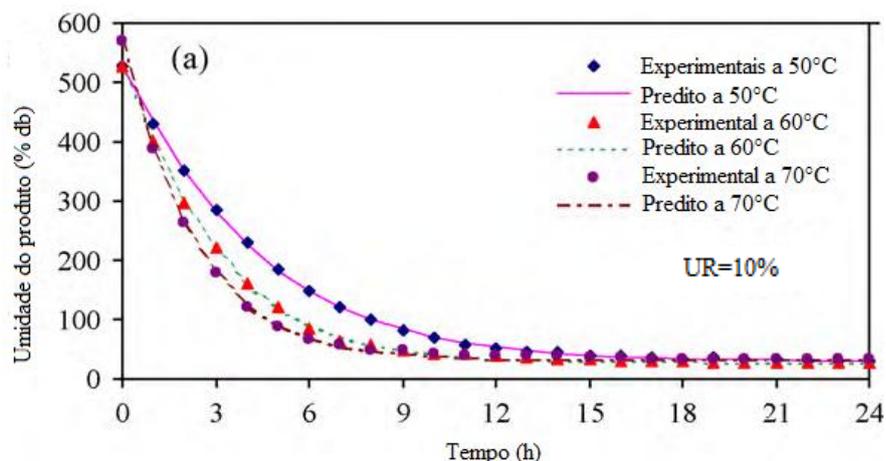


Figura 2.3 - Comportamento da umidade do produto em base seca obtida a partir das simulações, utilizando a equação de Page e os experimentos.

FONTE: Janjai et al. (2009). (Com modificações).

Hacihafizoglu et al. (2008) propuseram uma avaliação de alguns modelos de secagem apresentados na Tabela 2.2, para camada fina.

Tabela 2.2 - Modelos matemáticos utilizados por Hacihafizoglu et al. (2008) nas simulações.

Nome	Modelo	Referência
Newton	$\bar{M}^* = e^{(-Kt)}$	O'Callaghan et al. (1971)
Page	$\bar{M}^* = e^{(-Kt^n)}$	Agrawal and Singh (1977)
Page modificado	$\bar{M}^* = ae^{((-Kt)^n)}$	Diamante e Munro (1993)
Henderson e Pabis	$\bar{M}^* = ae^{(-Kt)}$	Chhinman (1984)
Geométrico	$\bar{M}^* = at^{-n}$	Chandra e Singh (1995)
Wang e Singh	$\bar{M}^* = 1 + at + bt^2$	Wang e Singh (1978)
Midilli et al.	$\bar{M}^* = ae^{(-Kt^n)} + bt$	Midilli et al. (2002)
Logarithmic	$\bar{M}^* = e^{(-Kt^n)}$	Chandra and Singh (1995)

O objetivo foi verificar dentre os modelos, aquele que mais se adequava ao processo de secagem do arroz através de métodos estatísticos. Para isto, utilizaram grãos de arroz longos em casca para as simulações e experimentos. As análises foram realizadas com temperaturas de 40°C, 45°C, 50°C, 55°C e 60°C, velocidades do ar de 1,5m/s e 3m/s e altura do leito de 1 m. A Figura 2.4 ilustra o esquema utilizado para realização dos experimentos.

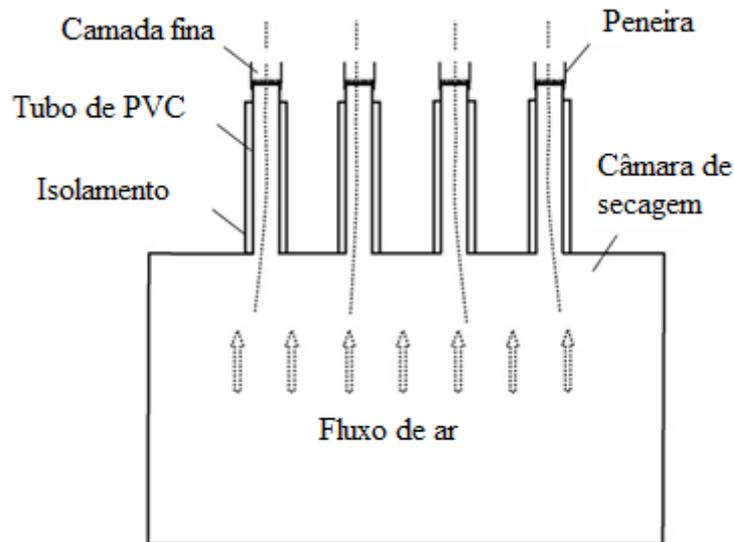


Figura 2.4 - Esquema do experimento.

FONTE: Hacıhafızoglu et al. (2008). (Com modificações).

Como resultados, os autores verificaram que o modelo proposto por Midilli et al. (2002) foi o mais apropriado. A Figura 2.5 mostra o comportamento da umidade do produto em função do tempo para as temperaturas do ar de secagem citadas. Foi utilizado o modelo proposto por Midilli et al. (2002). Pode-se observar que à medida que se aumenta a temperatura do ar de secagem, a taxa de secagem sofre um acréscimo, ou seja, o produto seca mais rápido.

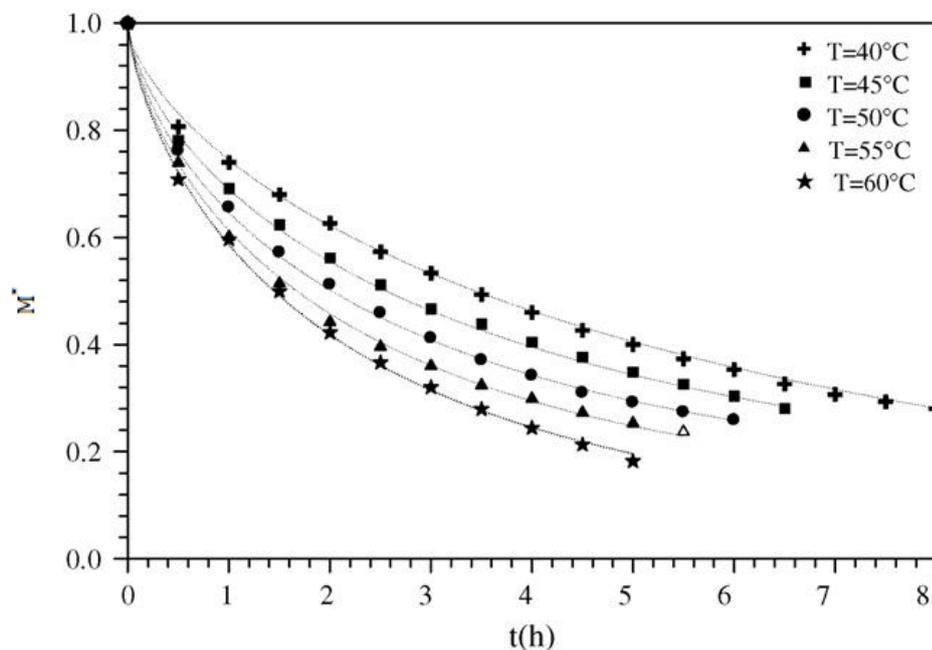


Figura 2.5 - Comportamento da umidade do produto em função do tempo para várias temperaturas do ar de secagem, utilizando o modelo proposto por Midilli et. al.

FONTE: Hacıhafızoglu et al. (2008). (Com modificações).

Dalpasquale et al. (2008) simularam numericamente a secagem de milho em leito fixo baseados no modelo da Universidade de Michigan. Para obtenção das equações que governam

o processo, foram realizados balanços de massa e energia para o ar e para o produto. Utilizaram o método implícito para resolução das equações, devido a sua estabilidade em relação ao incremento, na altura do leito e no tempo. Como resultados, observaram que utilizando incrementos para altura e tempo menores, o tempo computacional era aumentado. Observaram, também, que os dados preditos convergiam para dados experimentais. Concluíram que o método utilizado foi bastante eficaz e que sua estabilidade possibilitou flexibilidade nas simulações.

Ruiz-López et al. (2008) utilizaram equações matemáticas obtidas através de balanços de massa e energia para o produto e para o ar para simular a secagem em leito fixo de alimentos, considerando períodos sem inversão e com inversão do sentido do fluxo de ar. O modelo é validado por meio de dados experimentais. A Figura 2.6 ilustra o esquema experimental utilizado. As simulações e os experimentos foram realizados com alturas do leito de 0,05 m e 0,1 m.

Como resultados, os autores observaram que:

- A inversão do fluxo de ar propiciou uma ligeira redução no tempo de secagem do produto, conforme mostrado na Figura 2.7;
- Os dados simulados apresentaram boa concordância com os dados experimentais;
- Houve um menor aumento na temperatura do produto quando realizada a inversão de sentido do fluxo de ar.

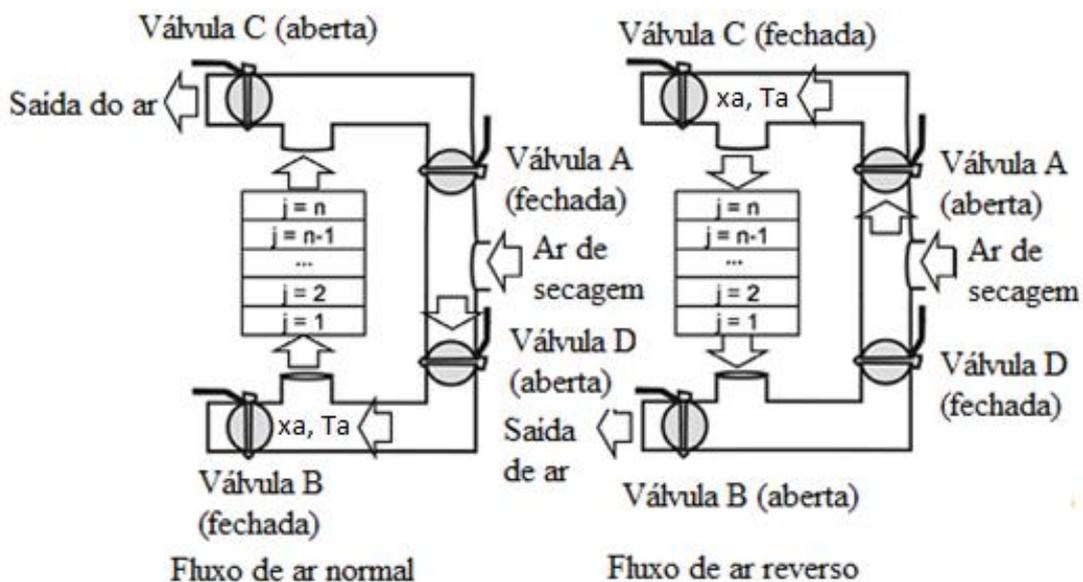


Figura 2.6 - Esquema da operação de um secador de leito fixo: a) operando com fluxo de ar normal e b) operando com fluxo de ar reverso.

FONTE: Ruiz-López et al. (2008). (Com modificações).

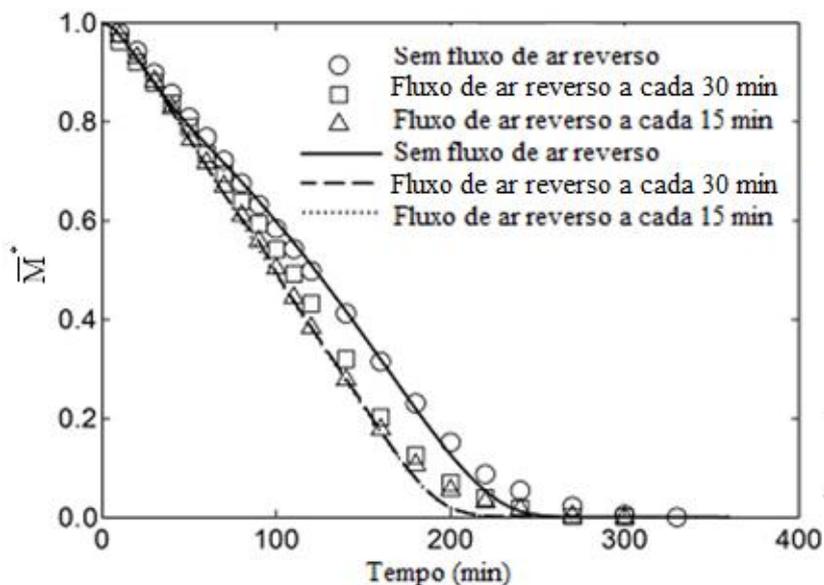


Figura 2.7 - Comportamento da umidade do produto em função do tempo, a partir de dados simulados e experimentais. À temperatura do ar de secagem é 70°C e à altura do leito 0,05m. FONTE: Ruiz-López et al. (2008) (Com modificações).

A partir dos resultados obtidos, concluíram que:

- A secagem ocorre de forma mais uniforme quando houve inversão, no sentido do fluxo de ar;
- A distribuição de temperatura do produto também ficou mais uniforme;

2.4 Sistema de secagem

Não existe, na literatura, uma classificação única para os sistemas de secagem. A Tabela 2.3 ilustra uma possível classificação que será utilizada para fins didáticos.

Tabela 2.3 - Classificação dos sistemas de secagem.

Sistemas de secagem	Natural – no campo, na própria planta				
		Ventilação Natural	Terreiros e paióis		
			Secagem Solar		
			Outros		
	Artificial	Ventilação Forçada	Ar Natural		
			Altas Temperaturas	Quanto aos fluxos	Camada fixa
					Cruzados
					Concorrentes
					Contra-correntes
					Cascata
Rotativo					
Baixas Temperaturas	Quanto à operação	Fluidizado			
		Solar híbrido			
Sistemas Combinados					

FONTE: Silva et al. (2000). (Com modificações).

A secagem natural é aquela que se processa no próprio local de coleta do material, sem intervenção humana.

Já o processo artificial, como o nome já revela, é aquele que ocorre através da utilização de mecanismos ou equipamentos para que haja o fornecimento de energia para o produto. Conforme ilustrado na Tabela 2.3, esse sistema divide-se em natural e forçado. No primeiro caso, ocorre pela ação dos ventos, sem utilização de nenhum meio para forçar a passagem do ar. No segundo caso, tem-se a secagem proveniente de mecanismos, como por exemplo, ventiladores que forçam a passagem do ar através do leito e sobre o produto.

A secagem forçada pode ocorrer a baixas temperaturas, altas temperaturas e sistemas combinados, ou seja, secadores com compartimentos submetidos a temperaturas diferentes.

Nos sistemas a altas temperaturas, têm-se as subclassificações quanto ao fluxo de ar, incidindo no produto e quanto à operação.

Quanto ao fluxo de ar, têm-se: camada fixa ou leito fixo, fluxo cruzado, fluxo contracorrente, concorrentes, cascata, rotativo e leito fluidizado. Em camada fixa, o produto é colocado sobre uma bandeja e o ar passa cruzando-o, promovendo a secagem. Uma característica importante desse sistema é que as camadas de grão devem situar-se entre 0,4 m a 0,6 m, devido à possibilidade de geração de altos gradientes de umidade no decorrer do processo que afetará a qualidade final do produto. A Figura 2.8 ilustra um sistema de secagem em camada fixa.

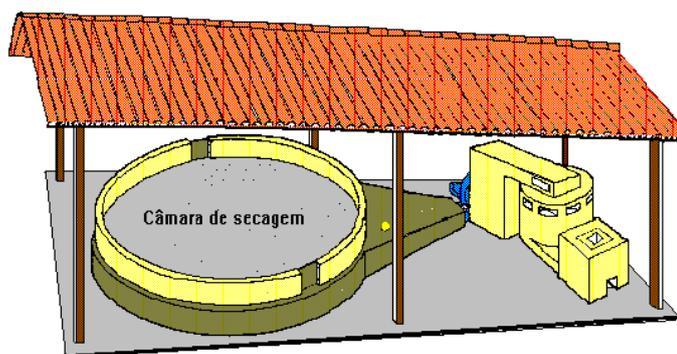


Figura 2.8 - Sistema de secagem em camada fixa ou leito fixo

FONTE: Silva et al. (2000)

Em fluxo cruzado, o produto é colocado em uma esteira, que se movimenta e, conseqüentemente, movimenta o produto. O ar cruza o produto ocorrendo diminuição do teor de umidade. A Figura 2.9 ilustra um secador de fluxo cruzado com o produto mantido na vertical e o ar passando perpendicular por ele.

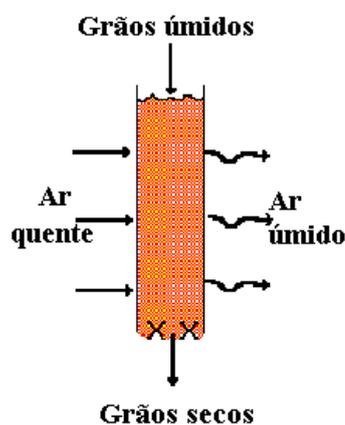


Figura 2.9 - Sistema de secagem em fluxo cruzado.

FONTE: Silva et. al. (2000). (Com modificações).

No sistema contracorrente, o ar passa em um sentido e o grão em outro. A Figura 2.10 ilustra um sistema de secagem contracorrente em torre. O produto é transportado por um elevador que contém recipientes e depois é despejado na parte superior da torre. O ar de secagem é injetado no silo, sendo realizada a secagem do produto.

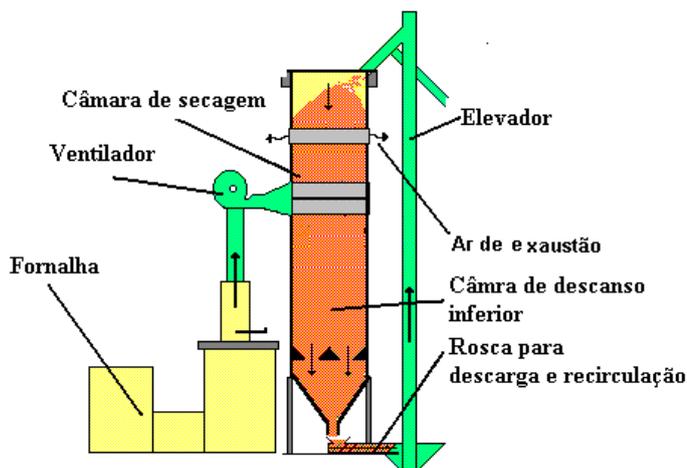


Figura 2.10 - Sistema de secagem em fluxo contracorrente.
FONTE: Silva et. al. (2000). (Com modificações).

No sistema concorrente, o ar e o produto fluem no mesmo sentido. A Figura 2.11 ilustra um sistema de secagem concorrente em torre. O produto é transportado por um elevador que contém recipientes e depois é despejado na parte superior da torre. O ar de secagem é injetado no silo, sendo realizada a secagem do produto.

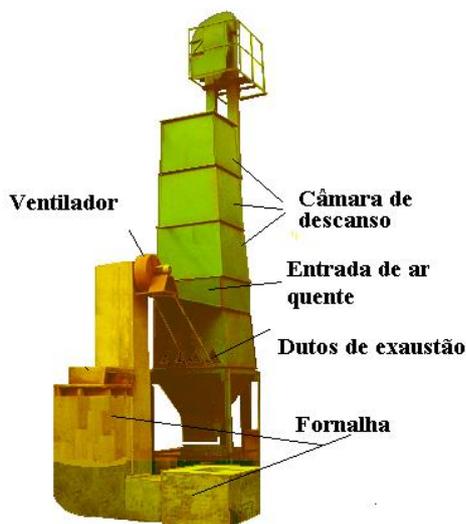


Figura 2.11 - Sistema de secagem em fluxo concorrente.
FONTE: Silva et. al. (2000). (Com modificações).

No sistema em cascata ou misto, o produto passa através de calhas em forma de V que são distribuídas de forma alternada no interior do secador. O ar de secagem entra, percorre as calhas e conseqüentemente percorre o produto em vários sentidos: cruzado, contracorrente e concorrente. A Figura 2.12 ilustra um sistema de secagem em cascata ou misto.

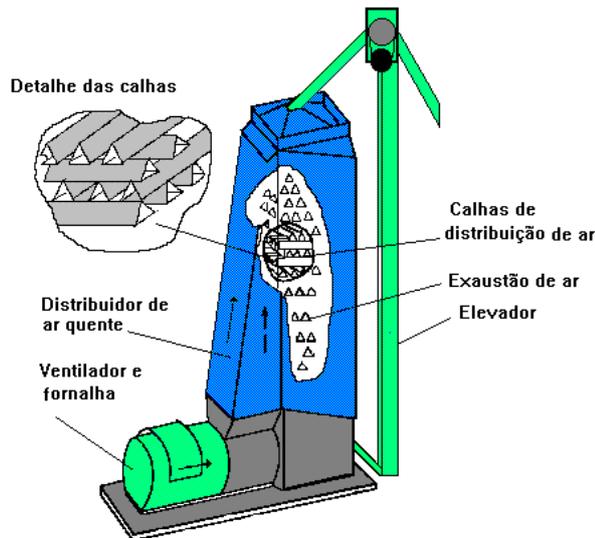


Figura 2.12 - Sistema de secagem em cascata ou misto.
 FONTE: Silva et. al. (2000). (Com modificações).

O sistema rotativo contém um cilindro, geralmente horizontal que sofre rotação entre 1 a 15 rpm. O sistema é dotado de mecanismos de transportes que movimentam o produto da parte inferior para superior onde se encontra a entrada de ar quente. A Figura 2.13 ilustra um secador rotativo.

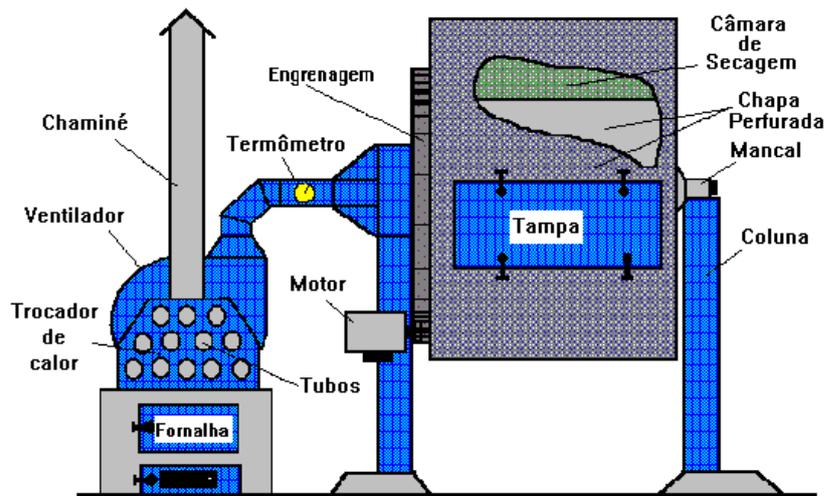


Figura 2.13 - Sistema de secagem rotativo.
 FONTE: Silva et. al. (2000). (Com modificações).

No sistema de leito fluidizado, o ar de secagem cruza o produto, com uma velocidade controlada que se encontra sobre uma placa metálica. Devido à velocidade do ar, o produto passa a flutuar no interior do secador (daí a denominação). A Figura 2.14 ilustra um sistema de leito fluidizado.

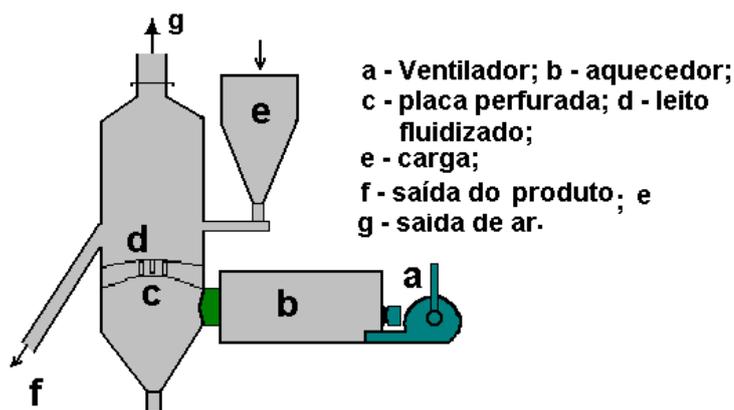


Figura 2.14 - Sistema de secagem leito fluidizado.
FONTE: Silva et. al. (2000). (Com modificações).

Quanto ao modo de operação, são classificados em contínuos e intermitentes ou bateladas. Segundo Costa (2007), nos contínuos, o produto está em movimento, proporcionado por algum mecanismo. Depois de atingido o teor de umidade desejado, o produto é retirado do secador. Já nos secadores em batelada, uma quantidade fixa do produto é inserida no secador e ar o quente é fornecido para promover a secagem do material contido.

Quanto à utilização, são classificados em: combinados e seca-aeração. No primeiro, a secagem utiliza altas e baixas temperaturas. No início do processo, são utilizadas altas temperaturas. Depois, o produto é transferido para outra câmara onde a temperatura do ar é reduzida. Esse procedimento propicia redução substancial de energia (50% aproximadamente), segundo Silva et al. (2000).

O sistema de seca-aeração é uma alteração do sistema de secagem a altas temperaturas. O produto não passa por uma câmara de resfriamento e é transferido para um silo, por um mecanismo transportador onde permanece em repouso para haver uma redistribuição da umidade, no interior do grão que propiciará a retirada de umidade em excesso, quando for aplicada a aeração com baixos fluxos. A Figura 2.15 ilustra um secador, utilizando o processo de seca-aeração.

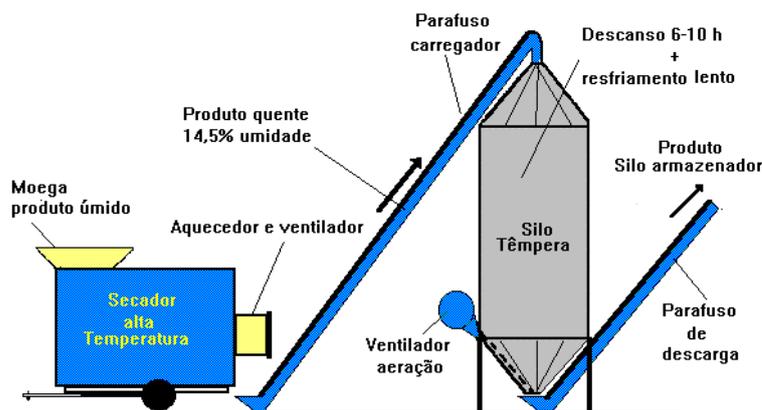


Figura 2.15 - Secador utilizando o processo de seca-aeração.
FONTE: Silva et. al. (2000). (Com modificações).

2.5 Aspectos científicos e mercadológicos do arroz

2.5.1 Ciclo produtivo do arroz

O arroz é uma planta natural, adaptada a solos alagados, formada por raízes, caule, folhas e panículas que, na verdade, é um conjunto de espiguetas. A Figura 2.16a ilustra a planta de arroz e a Figura 2.16b ilustra a panícula que é a inflorescência do arroz.

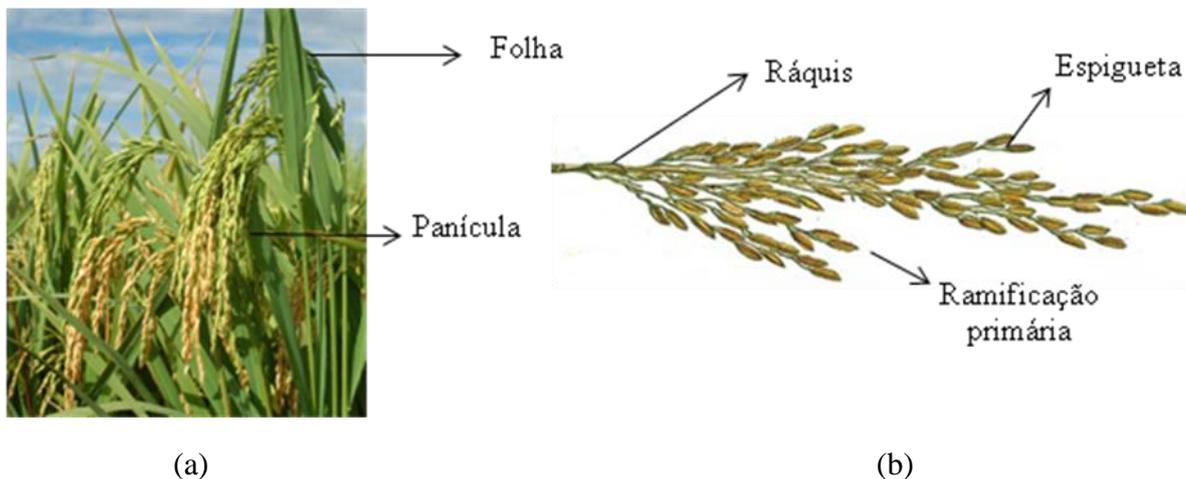


Figura 2.16 - a) Planta de arroz e b) panícula.

FONTE: <http://www.almanaquebrasil.com.br/.../03/sativa.jpg>

<http://www.iapar.br/arquivos/Image/Arroz1.JPG>

Observando a Figura 2.17 tem-se a seção transversal de uma raiz madura de arroz, onde se originam os pelos absorventes que são responsáveis pela absorção de água e nutrientes. O córtex da raiz, geralmente, é constituído de células parenquimáticas, com acentuada presença de espaços intercelulares, com a formação de grandes lacunas, os aerênquimas.

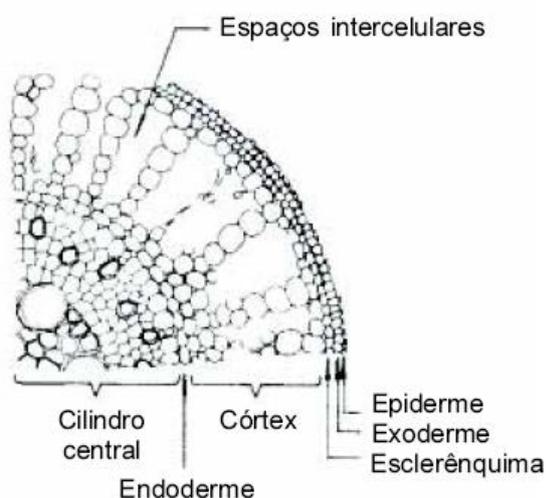


Figura 2.17 - Seção transversal de uma raiz madura de arroz.

FONTE: Guimarães et. al. (2002).

Os principais fatores que determinam o crescimento das raízes e dos pelos absorventes são: a idade da planta, o suprimento de oxigênio, o teor de umidade, a temperatura, a disponibilidade de nutrientes, a pressão osmótica da solução do solo, os níveis tóxicos de elementos, a presença de patógenos, a textura do solo e o método de cultivo.

O grão de arroz é formado basicamente de endosperma e embrião, ou germe. A Figura 2.18 ilustra o grão e suas partes principais.

O tegumento que envolve a semente encontra-se diretamente ligado ao pericarpo, membrana que envolve o fruto. No caso do arroz, toda essa estrutura encontra-se envolvida pela lema e pela pálea, que constituem a casca, conforme Figura 2.18. A lema é maior que a pálea. As laterais da lema revestem as laterais da pálea, de tal forma que o conjunto se fecha firmemente. Segundo Vieira e Carvalho (1999), a casca é porosa, leve e rica em sílica (15% a 18%).

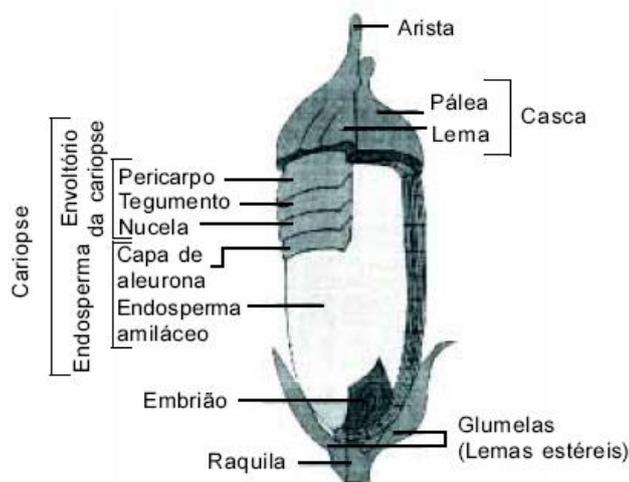


Figura 2.18 - Estrutura do grão e suas principais partes.

FONTE: Juliano (1984).

A principal função da casca é proteger o fruto contra o ataque de insetos ou fungos. A camada de aleuroma constitui a capa mais externa do endosperma, envolvendo também a parte externa do embrião, sendo formada por várias camadas de células parenquimatosas. As células de aleurona são ricas em proteínas e lipídios, segundo Tanaka et al. (1973).

No que diz respeito à germinação da semente, tem-se o desenvolvimento do embrião em radícula e coleótilo, mostrados na Figura 2.19.

O processo de germinação pode ser dividido em embebição, ativação e estágios de crescimento pós-germinação. Quando saturada com água, graças às forças de embebição, a umidade da semente atinge 25-35%. A absorção durante o estágio de ativação é mínima comparativamente ao estágio de embebição. Ao final desse estágio, a ponta do coleótilo emerge a partir da ruptura da casca. Esse estágio é chamado de germinação. Subseqüentemente, o coleótilo cresce e a primeira folha emerge. Os vários estágios da germinação da semente de arroz são mostrados na Figura 2.20.

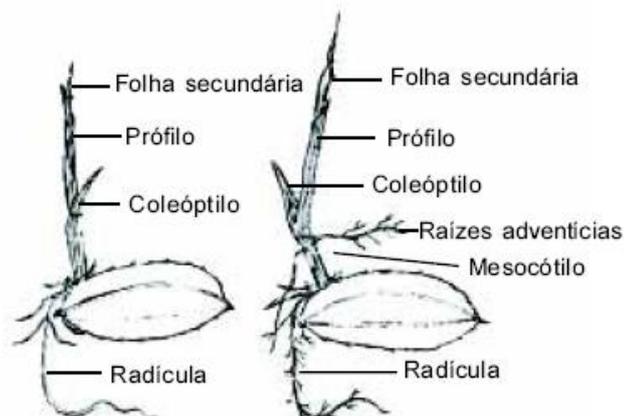


Figura 2.19 - Germinação de semente de arroz.
 FONTE: Chang e Bardenas (1965).

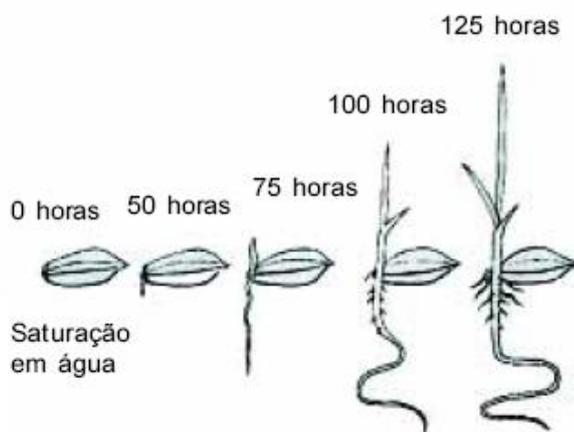


Figura 2.20 - Estágios de germinação da semente de arroz.
 FONTE: Vergara (1979).

Segundo Fageria (1989), em condições normais do solo, as sementes de arroz germinam entre 5 e 7 dias; em condições controladas, entre 4 ou 5 dias. O índice ideal de germinação das sementes é de 80% ou mais. Se o índice de germinação for de 60% a 80%, deve-se usar maior quantidade de semente para compensar a baixa germinação. Se o índice de germinação for inferior a 60%, a semente não é considerada apropriada para o plantio.

Após a germinação vem o período de crescimento da planta. Todo o ciclo, ou seja, desde a germinação até a fase adulta (amadurecimento) tem-se um período de mais ou menos três a seis meses, dependendo das condições ambientais e das técnicas utilizadas. O crescimento da planta de arroz pode ser dividido em três fases principais:

- ✓ Vegetativa;
- ✓ Reprodutiva;
- ✓ Maturação.

A fase vegetativa estende-se da germinação à iniciação do primórdio floral. A fase vegetativa de uma cultivar de 130 a 135 dias de ciclo, em clima tropical, dura, normalmente, 65 a 70 dias e é a fase mais variável

A fase reprodutiva estende-se da iniciação do primórdio floral ao florescimento. Tem duração relativamente constante, durando normalmente 35 dias em condições tropicais,

segundo Vergara (1980). É nessa fase que se inicia o desenvolvimento da panícula que provoca os processos de abertura das flores, polinização e fertilização, isso significa o começo do florescimento. Essa fase tem seu pico do segundo ao quarto dia, após o surgimento da panícula.

A fase de maturação estende-se do florescimento à maturação completa. Segundo Vergara (1980), essa fase é dividida em três subestágios: grão leitoso, pastoso e maturo. Em clima tropical, a fase de maturação dura de 30 a 35 dias, após a emergência das panículas; em regiões temperadas, de 30 a 60 dias, conforme Vergara (1980). Baixa temperatura prolonga a fase de maturação.

A Tabela 2.4 ilustra as principais faixas de temperaturas mínimas, máximas e ótimas desde a germinação até a maturação, segundo Yoshida (1981).

Tabela 2.4 - Faixas de temperaturas para cada fase da planta de arroz.

Estágios de desenvolvimento	Mínima (°C)	Máxima (°C)	Ótima (°C)
Germinação	10	45	20-35
Emergência	12-13	35	25-30
Desenvolvimento da raiz	16	35	25-28
Iniciação do primórdio floral	15	35	25-30
Emergência da panícula	15-20	38	25-28
Maturação	12-18	30	20-25

FONTE: Yoshida (1981). (Com adaptações).

A Figura 2.21a mostra grãos de arroz em casca. A Figura 2.21b mostra grãos de arroz beneficiados e prontos para consumo. De acordo com as normas impostas pelo Ministério da Agricultura, esses grãos são classificados como longo (80% dos grãos inteiros medindo mais ou menos 6 mm de comprimento).

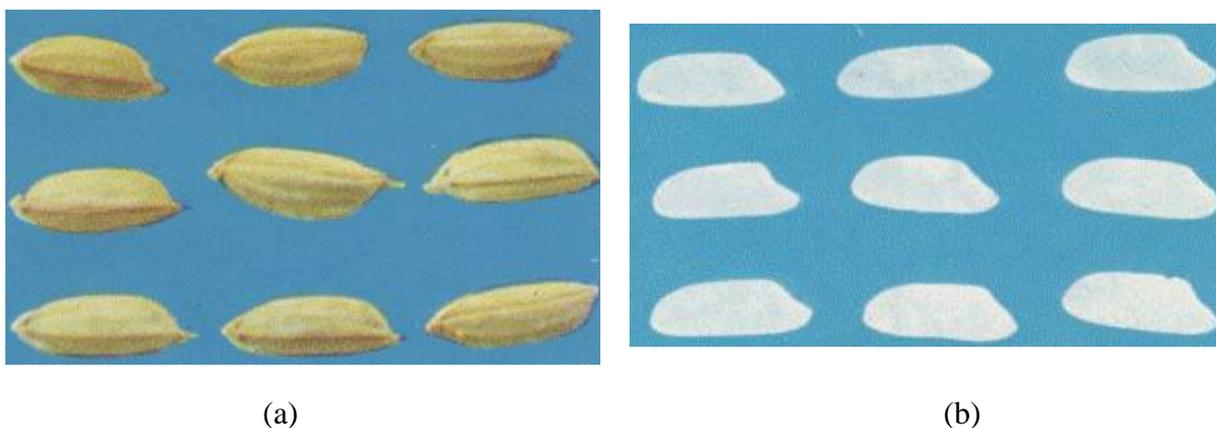


Figura 2.21 - Grãos de arroz. a) Em casca; b) Beneficiados (tipo longo).

FONTE: Silva et. al. (2000). (Com modificações).

2.5.2 Aspectos mercadológicos da cultura de arroz no cenário nacional e mundial

De acordo com empresas especializadas em pesquisas sobre a produção de grãos, mais especificamente, de arroz, a cultura deste produto vem sofrendo certa queda na produção, considerando cada região do país.

Pode-se observar, na Tabela 2.5, o comportamento da produção nacional de arroz.

Tabela 2.5 - Produção nacional do produto por região.

REGIÃO/UF	1998/99	1999/2000	2000/01	2001/02	2002/03	2003/04	2004/05	2005/06	2006/07	2007/08	2008/09 Previsão (1)	2009/10 Estimativa (2)
NORTE	1.098,6	1.150,9	1.121,2	1.090,0	1.261,5	1.330,5	1.529,8	1.014,6	1.116,0	1.036,6	936,3	946,2
RR	50,7	51,2	59,8	66,0	106,4	133,8	135,2	122,2	113,7	127,0	85,3	82,5
RO	154,5	159,6	168,4	131,6	115,7	166,3	223,2	146,7	146,5	144,6	153,4	146,4
AC	27,9	32,4	36,0	31,3	32,6	37,8	35,6	33,2	29,0	20,3	17,6	19,1
AM	30,5	30,8	33,3	20,8	23,2	23,2	23,6	20,8	20,1	9,1	11,2	10,0
AP	0,8	1,0	1,9	1,9	3,6	3,8	4,0	3,7	2,3	3,6	3,9	3,9
PA	417,2	453,9	458,4	467,2	554,8	541,4	652,5	423,2	396,8	310,3	291,8	298,2
TO	417,0	392,0	363,4	371,2	425,2	424,2	455,7	264,8	407,6	421,7	373,1	386,1
NORDESTE	1.120,0	1.337,2	1.004,5	966,4	1.124,8	1.168,3	1.251,8	1.115,1	1.047,3	1.176,7	1.075,9	1.145,8
MA	621,0	717,3	661,1	624,0	706,9	720,1	718,0	708,9	710,8	699,7	605,0	679,6
PI	195,2	251,8	180,6	85,8	197,7	167,6	233,5	195,0	135,6	226,7	213,0	218,6
CE	128,0	169,0	48,2	98,7	99,6	92,3	101,5	113,5	71,0	99,7	104,8	100,5
RN	1,0	1,7	0,9	5,2	7,1	8,0	3,1	3,7	3,6	5,4	8,2	5,6
PB	8,1	14,8	0,6	9,6	10,8	13,2	5,3	10,8	4,8	9,3	8,4	9,7
PE	18,9	19,6	8,5	21,1	17,4	51,7	48,9	21,0	25,5	27,5	26,7	26,0
AL	32,3	32,3	35,1	38,6	12,0	11,9	12,9	13,4	14,0	13,4	16,0	14,5
SE	32,2	37,5	37,5	43,9	42,8	40,4	40,8	33,0	53,2	53,8	37,3	34,2
BA	83,3	93,2	32,0	39,5	30,5	63,1	87,8	15,7	28,8	41,2	56,5	57,1
CENTRO-OESTE	2.330,3	2.428,2	1.684,3	1.650,1	1.749,1	2.517,5	2.660,7	1.139,0	1.180,4	1.068,7	1.257,9	1.157,1
MT	1.715,5	1.890,8	1.267,4	1.215,7	1.289,6	1.932,2	2.043,2	738,8	734,4	683,4	803,90	780,30
MS	252,0	251,4	209,4	218,1	237,6	240,0	236,2	193,3	211,3	188,3	198,8	170,0
GO	359,1	284,1	207,3	216,0	221,8	345,2	381,0	206,8	234,0	196,9	255,2	206,8
DF	3,7	1,9	0,2	0,3	0,1	0,1	0,3	0,1	0,7	0,1	-	-
SUDESTE	485,7	438,0	325,2	343,0	311,6	337,0	379,7	300,8	274,5	239,2	216,1	195,7
MG	324,5	290,7	192,1	210,5	193,6	212,4	256,2	198,9	187,0	143,5	128,4	118,8
ES	20,1	18,6	20,2	13,4	8,0	10,2	11,6	9,8	8,1	5,9	4,5	4,4
RJ	14,7	14,5	11,8	8,3	8,5	8,8	10,2	8,6	8,8	7,9	7,9	7,4
SP	126,4	114,2	101,1	110,8	103,5	105,6	101,7	83,5	70,6	81,9	75,3	65,1
SUL	6.547,6	6.068,8	6.250,8	6.576,6	5.920,1	7.607,1	7.533,0	8.152,2	7.697,7	8.552,8	9.116,4	8.571,5
PR	180,4	176,9	178,6	182,5	180,4	174,6	150,2	180,7	179,3	173,0	171,7	164,4
SC	762,0	804,0	881,7	929,3	1.043,3	999,8	1.049,9	1.099,1	1.099,1	1.018,1	1.039,7	1.063,8
RS	5.605,2	5.087,9	5.190,5	5.464,8	4.696,4	6.432,7	6.332,9	6.872,4	6.419,3	7.361,7	7.905,0	7.343,3
NORTE/NORDESTE	2.218,6	2.488,1	2.125,7	2.056,4	2.386,3	2.498,8	2.781,6	2.129,8	2.163,3	2.213,3	2.012,2	2.092,0
CENTRO-SUL	9.363,6	8.935,0	8.260,3	8.969,7	7.980,8	10.461,6	10.573,4	9.592,0	9.152,6	8.860,7	10.590,4	9.924,3
BRA SIL	11.582,2	11.423,1	10.386,0	10.626,1	10.367,1	12.960,4	13.355,0	11.721,7	11.315,9	12.074,0	12.602,6	12.016,3

FONTE: CONAB (2009).

Diversos fatores podem contribuir para essas variações da produção do produto. Como exemplo: variações climáticas, incentivos financeiros (programas de plantio por parte do governo), problemas na economia mundial, entre outros.

Em 2009, segundo estimativas da *Food Agriculture Organization* (FAO-2009), a produção mundial alcançaria um nível histórico de 683 milhões de toneladas de arroz em casca. Isso representa mais ou menos cerca 456 milhões de toneladas de arroz branco, conforme Figura 2.22 e Figura 2.23. Um aumento de 3,5% decorrente, sobretudo, do aumento da produção indiana.

Produção e estoques mundiais de arroz em casca

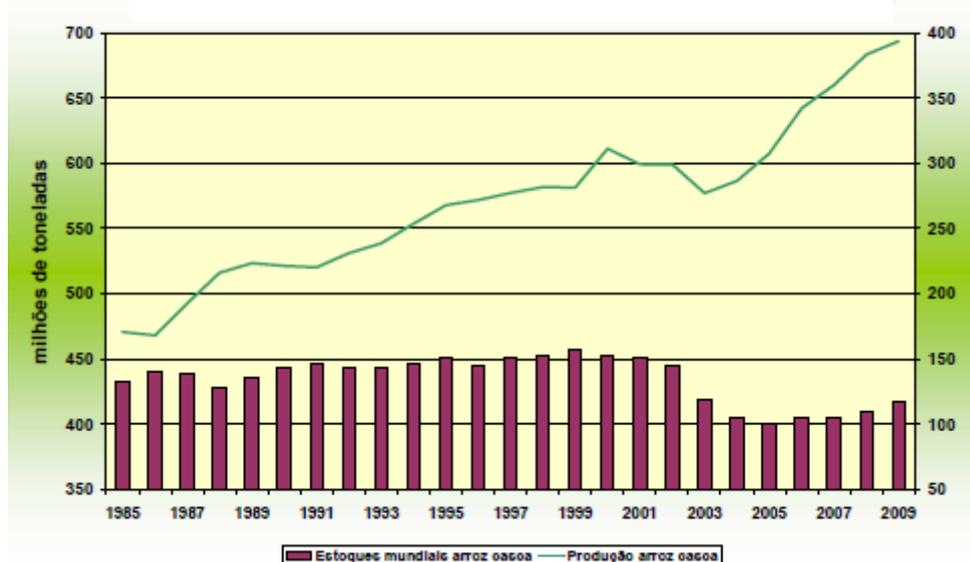


Figura 2.22 - Produção e estoques mundiais de arroz em casca.

FONTE: CONAB (2009).

O salto dos preços mundiais em 2008 e as medidas públicas de incentivo tiveram um impacto positivo no crescimento das áreas arrozeiras, de +2,2% para 159 milhões de hectares. Os rendimentos médios, por sua vez, aumentaram 1,3% para 4,3 t/ha. O comércio mundial deve aumentar para 31 Mt depois da queda de 5% em 2008. Os estoques mundiais, ao final de 2009, foram revisados para 118 milhões de toneladas contra 109 milhões de toneladas em 2008, um aumento de 6%. Essas reservas representam 25,8% das necessidades mundiais, contra 24,4% em 2008.

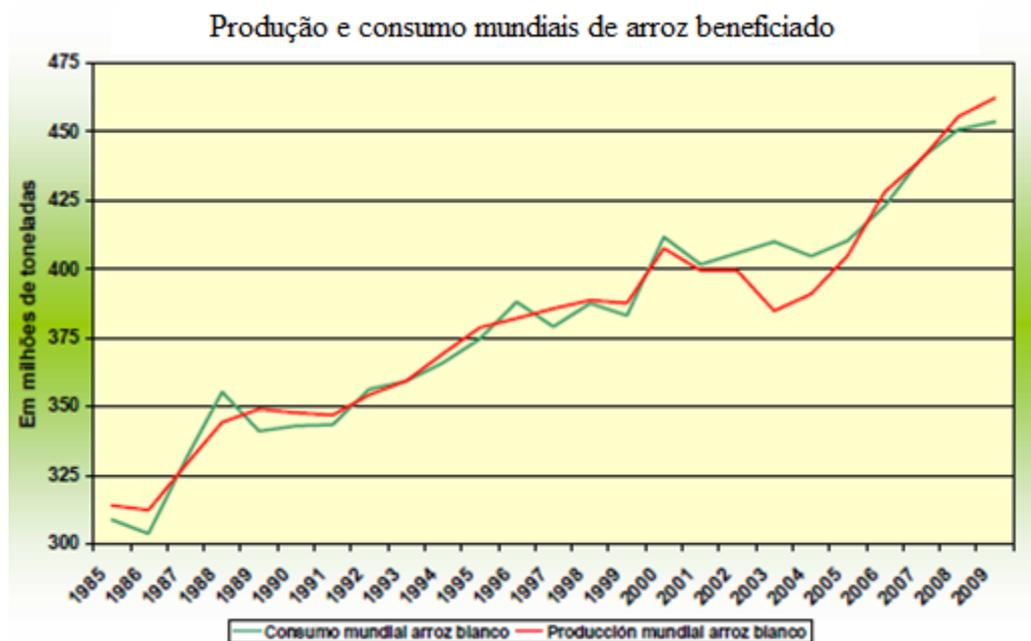


Figura 2.23 - Produção e consumo mundiais de arroz beneficiado.

FONTE: CONAB (2009).

Quanto à produtividade, surpreendentemente, os países com os mais altos índices não estão na Ásia, segundo a equipe do Projeto Arroz Brasileiro (2009). Baseado nas estatísticas da *Food Agriculture Organization* (FAO), o país com produtividade mais elevada para o arroz é o Egito, com aproximadamente 9,5 mil quilos por hectare em 2004. Depois vem a Austrália (8,2 mil kg/ha) e a Grécia (7,9 mil kg/ha). Os Estados Unidos detêm a 4ª produtividade mais elevada, com 7,6 mil kg/ha em 2004. O Uruguai está em 8º lugar (6,6 mil kg/ha), China em 10º (6,3 mil kg/ha), Argentina em 12º (6,2 mil kg/ha). Já a produtividade média brasileira foi de 3,6 mil kg/ha em 2004, ante 1,5 mil kg/ha em 1970. O aumento foi de 58%, mas o resultado ainda deixa o país com a 45ª posição no *ranking*.

CAPÍTULO 3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Caracterização do problema

Neste capítulo serão apresentadas a modelagem matemática e a discretização numérica da secagem de arroz longo em casca em um secador de leito fixo. Foram realizados balanços de massa e de energia para o ar e para o produto, considerando propriedades variáveis, regime transiente, porosidade e a condensação durante o processo de secagem, fornecendo as equações apropriadas para descrever o fenômeno da secagem.

A Figura 3.1 ilustra o esquema utilizado para análise. Apresenta-se um diagrama onde o produto (arroz) encontra-se fixo no interior do secador (leito). A camada de arroz é representada pela altura H e área superficial S . Para o estudo, é tomado um elemento diferencial de volume Sdy , também mostrado na Figura 3.1

O ar entra no secador com suas propriedades físicas conhecidas e cruza o produto que se encontra fixo no interior do equipamento. No início do processo, são conhecidos o teor de umidade e a temperatura do arroz, a temperatura, umidade absoluta e a umidade relativa do ar.

A partir do exposto, pretende-se avaliar o comportamento da umidade e temperatura do produto, além da umidade relativa e temperatura do ar de secagem, em algumas situações específicas do processo de secagem que serão apresentadas no decorrer do trabalho.

Com o objetivo de simplificar a análise do problema, algumas considerações são feitas, tais como:

- Grãos longos em casca;
- Distribuição de umidade é uniforme em toda camada infinitesimal;
- Grãos em forma esferoidal;
- Redução do volume durante o processo de secagem é desprezível;
- Gradiente de temperatura dentro dos grãos individualmente é desprezível;
- A condução de calor de grão a grão é desprezível;
- A distribuição do ar nas camadas é uniforme;
- As paredes do secador são adiabáticas, com capacidade calorífica desprezível;
- As capacidades caloríficas do ar e dos grãos são variáveis durante todo o processo de secagem;
- O efeito da porosidade é considerado.

É importante frisar, que o modelo proposto neste trabalho apresenta algumas diferenças em relação modelo utilizado para validação (Zare et al. (2006)). Dentre elas, podem-se citar: a

consideração da porosidade e os efeitos da variação da temperatura e umidade absoluta do ar com relação ao tempo. Esses fatores tornam o modelo mais realista em relação ao utilizado por Zare et al. (2006).

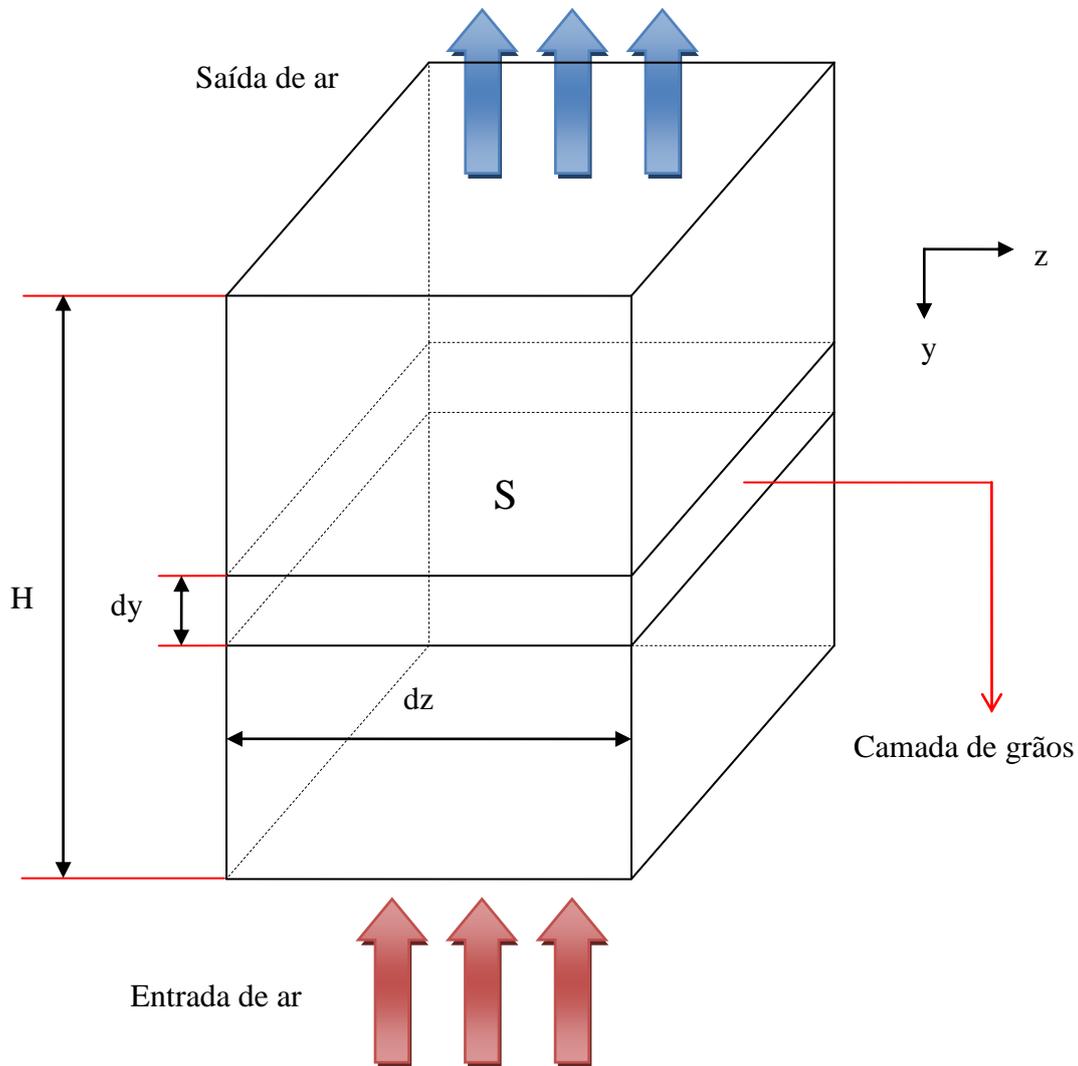


Figura 3.1 - Esquema do processo de secagem.

3.2 Equações matemáticas

Conforme citado, o processo de secagem envolve transferência de calor e de massa simultaneamente. Com base nessa informação, devem ser obtidas equações que governem o processo para que se possam realizar as análises propostas.

Assim as equações representativas das transferências de calor e de massa são obtidas através de balanços de energia e de massa no elemento diferencial.

A Figura 3.2 mostra uma fração volumétrica da massa de grãos que é utilizada para obtenção das equações citadas, no parágrafo anterior.

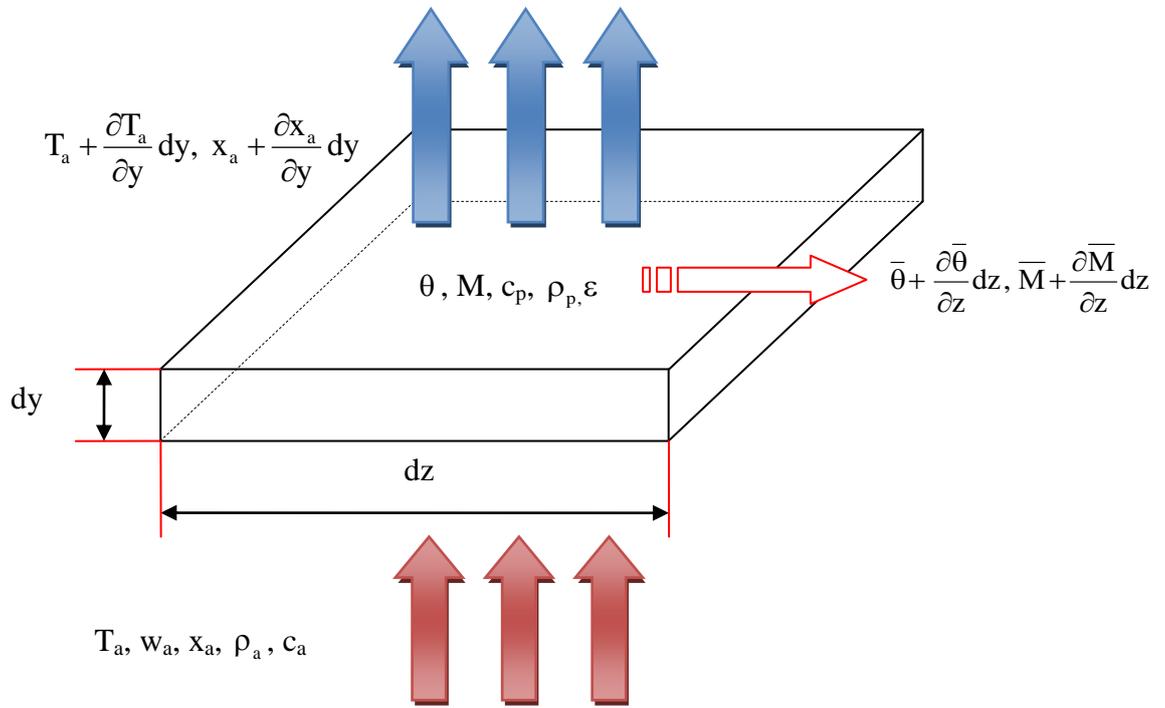


Figura 3.2 - Fração volumétrica do volume de arroz.

3.2.1 Balanço de energia para o produto

A energia transferida por convecção, do ar para o produto, é igual à requerida para aquecer o produto mais a energia requerida para evaporar a água do produto, mais a energia requerida para aquecer o vapor de água evaporada. As Eqs. (3.1) a (3.3) ilustram o balanço de energia citado.

$$E_{\text{convecção}} = E_{\text{aqueçero produto}} + E_{\text{evaporar água}} + E_{\text{aqueçero vapor água}} \quad (3.1)$$

$$A^* h_c (T_a - \bar{\theta}) = (\rho_p c_p + \rho_p c_w \bar{M}) \left(\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial t} \right) - [h_v + c_v (T_a - \bar{\theta})] \rho_p \frac{\partial \bar{M}}{\partial t} \quad (3.2)$$

Reorganizando a Eq. (3.2), tem-se a Eq. (3.3) representando o comportamento da temperatura do produto.

$$\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial t} = \left(\frac{A^* h_c (T_a - \bar{\theta}) + [h_v + c_v (T_a - \bar{\theta})] \rho_p \frac{\partial \bar{M}}{\partial t}}{[(c_p + \bar{M} c_w) \rho_p]} \right) \quad (3.3)$$

onde:

$$A^* = \frac{A_{\text{totaldecatémica}}}{V_{\text{leito}}} = \frac{n_p A_{\text{partícula}}}{n_p V_{\text{partícula}}} = \frac{A_{\text{partícula}}}{V_{\text{partícula}}} (1 - \varepsilon) \quad (3.4)$$

3.2.2 Balanço de massa para o produto

Conforme citado, existem diversos modelos utilizados para analisar o comportamento da transferência de massa durante a secagem. Segundo Fontana (1983), recomenda-se a utilização da equação empírica para camada fina proposta por Wang e Singh (1978) para secagem de arroz em leito fixo (Eq. 3.5).

$$MR = \exp(-Xt^Y) \quad (3.5)$$

onde os coeficientes X e Y são calculados pelas Eqs. (3.6) e (3.7).

$$X = 0,01579 + 0,0001746T_a - 0,01413(\text{UR}) \quad (3.6)$$

$$Y = 0,6545 + 0,002425T_a - 0,078867(\text{UR}) \quad (3.7)$$

O tempo (t) é expresso em minutos, a umidade relativa (UR) é expressa em decimal e a temperatura do ar (T) em °C. A razão de umidade do produto (MR) é expressa pela Equação (3.8) onde o teor de umidade (M) é expresso em decimal (b.s), M_0 é a umidade inicial e M_e a umidade de equilíbrio.

$$MR = \left(\frac{M(t) - M_e}{M_0 - M_e} \right) \quad (3.8)$$

A umidade de equilíbrio (M_e) é independente do tipo de arroz utilizado. A relação empírica recomendada por Zuritz e Singh (1985) para o cálculo de M_e é expressa pela Eq. (3.9). Deve ser utilizada para temperaturas do ar abaixo de 50°C.

$$M_e = 0,01 \left[\frac{A}{B} \right]^C \quad (3.9)$$

$$A = -\ln(1 - \text{UR})T_{\text{abs}} \quad (3.10)$$

$$B = 2,667 \times 10^{-7} \left(1 - \frac{T_{\text{abs}}}{641,7} \right)^{-23,438} \quad (3.11)$$

$$C = \left(\frac{1}{4 \times 10^5 [T_{\text{abs}}]^{-2,1166}} \right) \quad (3.12)$$

onde:

T_{abs} é a temperatura absoluta do ar (K);
 UR é a umidade relativa do ar (decimal)

Para se resolver as equações diferenciais parciais, é necessário conhecer a taxa de secagem do produto. Esse parâmetro é representado pela Eq. (3.13) que é a derivada da Eq. (3.5).

$$\frac{\partial M}{\partial t} = (M_0 - M_e)(XY)t^{(Y-1)}e^{-Xt^Y} \quad (3.13)$$

De acordo com Chian et al. (2007) e Izadifar et al. (2006), o valor da umidade inicial do produto, M_0 , está entre 0,21 e 0,22 (b.s). Kameoka et al. (1986) utilizaram em suas simulações um teor de umidade inicial do produto igual a 0,247 (b.s). Zare et al. (2006) trabalham com valores entre 0,24 e 0,25 (b.s) para a propriedade em questão. No capítulo 4, serão apresentados os valores dos parâmetros utilizados para as simulações.

3.2.3 Balanço de energia para o ar

A energia que entra na área S na posição y , menos a energia que sai da área S na posição $y + dy$ é igual à energia transferida ao produto (por convecção) mais a variação, com relação ao tempo, da entalpia do ar nos espaços vazios. As Eqs (3.14) a (3.16) ilustram o balanço de energia citado.

$$E_{entra} - E_{sai} = E_{convecção} + E_{espaços vazios} \quad (3.14)$$

$$-\frac{\partial[(\rho_a w_a c_a + \rho_a w_a x c_v)T_a]}{\partial y} = A^* h_c (T_a - \bar{\theta}) + \frac{\partial[(\rho_a c_a + \rho_a x c_v \varepsilon)T_a]}{\partial t} \quad (3.15)$$

Reorganizando a Eq. (3.15), tem-se a Eq. (3.16) representando o comportamento da temperatura do ar.

$$\frac{\partial T_a}{\partial t} = -\left(\frac{w_a}{\varepsilon} \frac{\partial T_a}{\partial y}\right) - \left(\frac{h_c A^* (T_a - \bar{\theta})}{\varepsilon \rho_a (c_a + x_a c_v)}\right) \quad (3.16)$$

3.2.4 Balanço de massa para o ar

A quantidade de vapor de água que sai da área S na posição $y + dy$ menos a quantidade de vapor de água que entra na área S posição y mais a variação de umidade do ar nos espaços vazios é igual à umidade cedida pelo produto. As Equações (3.17) a (3.19) ilustram o balanço de massa citado.

$$\text{Quant.vapor}_{sai} - \text{Quant.vapor}_{entra} + \Delta \text{Umidade}_{espaços vazios} = \text{Umidade do produto} \quad (3.17)$$

$$\rho_a \frac{\partial x_a}{\partial t} + \rho_a \frac{w_a}{\varepsilon} \frac{\partial x_a}{\partial y} = -\rho_p \frac{\partial \bar{M}}{\partial t} \quad (3.18)$$

Reorganizando a Eq. (3.18), tem-se a Eq. (3.19) representando o comportamento da umidade absoluta do ar.

$$\frac{\partial x_a}{\partial y} = \left[\frac{\left(-\rho_p \frac{\partial \bar{M}}{\partial t} - \rho_a \frac{\partial x_a}{\partial t} \right) \varepsilon}{\rho_a w_a} \right] \quad (3.19)$$

3.3 Condições de contorno

As Equações (3.3), (3.13), (3.16) e (3.19) são equações diferenciais parciais (EDPs), ou seja, são equações que contêm uma ou mais funções desconhecidas de duas ou mais variáveis e as suas derivadas parciais em relação a essas variáveis.

Um aspecto importante para encontrar a solução de uma EDP é determinar a sua ordem. A ordem é representada pela maior derivada que aparece na equação. A determinação da ordem é importante porque ela fornece o número de constantes a serem determinadas para se chegar à solução. Por exemplo, a solução de uma EDP de quarta ordem tem quatro constantes indeterminadas. Isso significa que quatro restrições devem ser especificadas para que essas quatro constantes indeterminadas possam ser obtidas.

Quando a variável independente é a posição e as condições são especificadas em duas diferentes posições, elas são chamadas de condições de contorno. Quando a variável independente é o tempo e as condições são especificadas em um único instante de tempo, elas são chamadas de condições iniciais.

A partir dessas informações, têm-se as seguintes condições de contorno e iniciais, mostradas na Tabela 3.1, para as Eqs. (3.3), (3.13), (3.16) e (3.19).

Tabela 3.1 - Condições de contorno e iniciais.

Condições de Contorno	Condições Iniciais
$T(y=0, z, t) = T_{ent}$	$\bar{\theta}(y, z, t=0) = \bar{\theta}_0$
$x_a(y=0, z, t) = x_{ent}$	$\bar{M}(y, z, t=0) = \bar{M}_0$

3.4 Solução numérica

3.4.1 Simulação numérica

A utilização de um simulador ou de um método numérico torna-se importante, quando não é possível a obtenção da solução analítica das equações diferenciais que formam o modelo matemático, conforme citado por Maliska (2004). Dessa forma, a função do método numérico é resolver uma ou mais equações diferenciais, substituindo as derivadas por expressões algébricas que envolvem a função de interesse. Tendo em mente que em uma simulação numérica os resultados obtidos são uma aproximação da equação diferencial, quanto maior o número de pontos analisados, mais próximo da solução exata estará a solução numérica.

A primeira etapa do desenvolvimento de um simulador numérico consiste na formulação do problema físico que se deseja representar matematicamente. Em seguida, são feitas as suposições e simplificações compatíveis com o grau que se espera do modelo.

Formulam-se as equações matemáticas que descrevem o problema físico desejado, considerando as hipóteses adotadas. Por fim, a resolução das equações é obtida.

Verifica-se a validade do simulador por meio da calibração com uma solução existente. Por exemplo: comparando os resultados obtidos, no simulador numérico, com as soluções analíticas, com resultados reais ou com resultados obtidos de modelos físicos de laboratório ou de campo. Sendo constatada a validade, o simulador poderá ser utilizado para representar o fenômeno desejado. Caso contrário, volta-se para um novo ciclo em que são reavaliadas as hipóteses adotadas ou até a conceituação do modelo físico.

As equações que descrevem qualquer processo físico são formuladas através da aplicação de um conjunto de leis básicas a uma região do espaço, ou seja, a um volume de controle, ou descrição matemática de um fenômeno de transporte, relacionado com a natureza do processo, ou, ainda, a utilização das equações de estado apropriadas e uso de relações auxiliares, caso seja necessário.

Vários métodos numéricos são utilizados na resolução de equações diferenciais parciais, por exemplo, elementos finitos, diferenças finitas e volumes finitos. Neste trabalho, foi utilizado o método dos volumes finitos devido às não-linearidades das equações utilizadas para as análises do processo de secagem, descrito em seguida.

3.4.2 O Método dos volumes finitos

Consiste em dividir o domínio de estudo em um número finito de subdomínios de volumes de controle, tal que haja um volume de controle ao redor de cada ponto da malha. Segundo Maliska (2004), dessa maneira é possível transformar uma equação diferencial, definida no domínio D , em um sistema de equações algébricas. Na Figura 3.3a e na Figura 3.3b têm-se um domínio D e o mesmo domínio dividido, respectivamente.

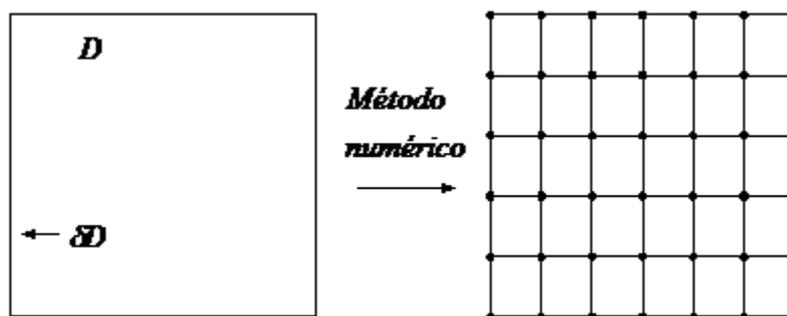


Figura 3.3 - Função do método numérico.

FONTE: Maliska (2004).

Há duas formas se obter as equações algébricas: a primeira é a realização de balanços na propriedade de interesse, nos volumes elementares. A segunda é integrar, no espaço e no tempo, as equações na forma conservativa.

3.4.3 Malha numérica

Segundo Cadé (2005), a discretização das equações deve ser feita para uma malha de volumes que abranja todo o domínio de estudo. Devido a sua simplicidade, as malhas cartesianas são mais utilizadas. As principais vantagens da utilização das malhas cartesianas são a simplicidade na relação dos balanços de massa e energia, e a solução dos sistemas lineares resultantes. No entanto, há alguns pontos negativos, principalmente, na grande dificuldade de se modelar problemas com geometrias complexas.

3.4.4 Discretização das equações

A discretização é feita, integrando todos os termos das equações que governam o fenômeno, no volume e no tempo, para cada volume de controle do domínio. O resultado é a equação discretizada, contendo os valores da variável de interesse para um grupo de pontos da malha. A solução resultante implica que a conservação das quantidades de interesse é satisfeita em qualquer volume de controle e, conseqüentemente, do domínio em estudo, segundo Patankar (1980) e Maliska (2004).

Após a integração das equações diferenciais parciais Eqs. (3.3), (3.13), (3.16) e (3.19), no volume e no tempo, tem-se como resultado um sistema de equações lineares, na sua forma discretizada, representado pelas Eqs. (3.20), (3.25), (3.30) e (3.36).

Por se tratar de um problema de advecção e difusão, é utilizada, nas Equações (3.3), (3.13), (3.16) e (3.19) a função de interpolação espacial *upwind*, isto é, o valor da propriedade, na interface, é igual ao valor da propriedade a montante, e uma formulação explícita, segundo Patankar (1980) e Maliska (1995). A Figura 3.4 mostra um volume de controle usado para determinação do esquema de interpolação *upwind*. Para velocidades positivas, $\phi_w = \phi_W$ e $\phi_e = \phi_P$, onde ϕ representa a propriedade de interesse.

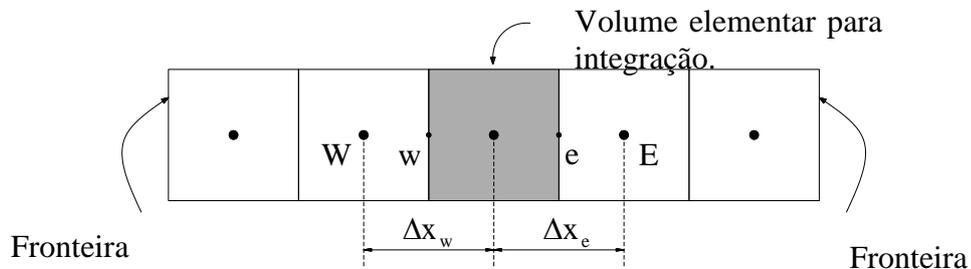


Figura 3.4 - Volume de controle para o problema advectivo/difusivo.
FONTE: Maliska (2004).

A justificativa para escolha dessa função de interpolação é porque a geração dos termos das equações discretizadas são todos positivos. Segundo Maliska (2004), isso proporciona a estabilidade numérica, evitando as oscilações, na obtenção das soluções e na convergência da solução. Ainda segundo Maliska (2004), esse esquema produz soluções coerentes fisicamente. Um ponto negativo é que ele possui a propriedade de suavizar os altos gradientes de temperaturas.

Com relação à escolha da formulação explícita, tem-se a avaliação de todas as propriedades de interesse vizinhas ao ponto de análise (P – Nomenclatura de volumes finitos), no instante anterior e, portanto, já conhecidas, conforme citado por Maliska (2004). Deve-se frisar que essa formulação dá origem a um conjunto de equações algébricas que podem ser resolvidas uma a uma, obtendo-se o valor da propriedade em cada ponto do espaço e no tempo determinado. A Figura 3.5a e a Figura 3.5b ilustram, respectivamente, o volume de controle utilizado para análise e a malha com 20 divisões.

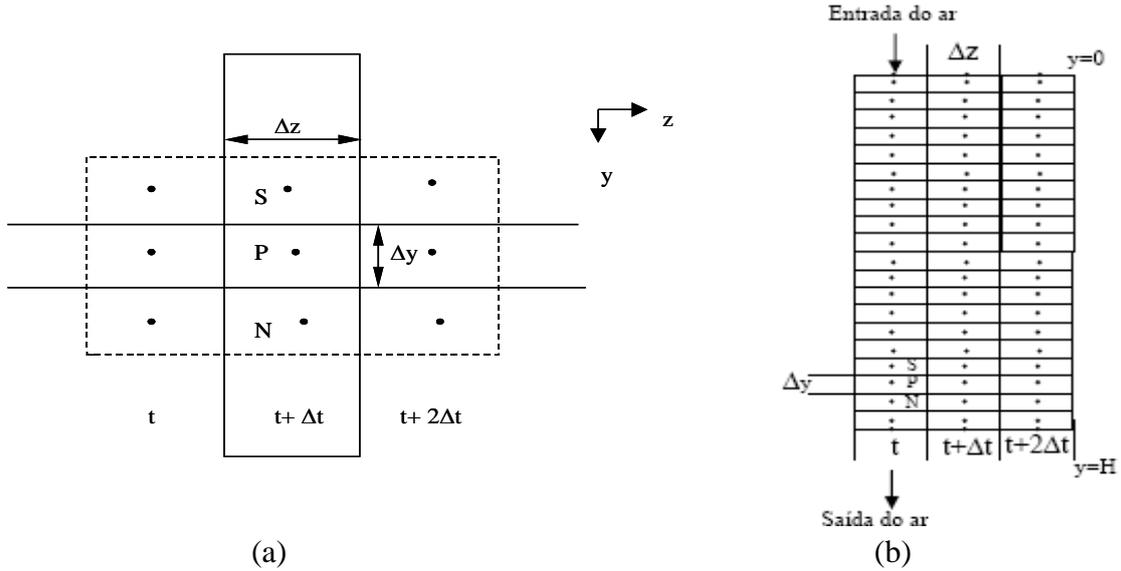


Figura 3.5 - a) Volume de controle utilizado e b) Malha dividida em 20 camadas.

3.4.4.1 Balanço de energia para o produto

Realizando a integração no volume e no tempo da Eq. (3.3), tem-se a Eq. (3.20).

$$\left(\frac{\Delta z}{\Delta t} + \frac{h_c A^* \Delta z}{(c_p + c_w \bar{M}) \rho_p} + \frac{c_v (\bar{M}_p - \bar{M}_p^0) \Delta z}{(c_p + c_w \bar{M})} \right) \theta_p = \left(\frac{h_c A^* \Delta z}{(c_p + c_w \bar{M}) \rho_p} \right) T_p + \frac{(h_v + c_v T_p) (\bar{M}_p - \bar{M}_p^0)}{(c_p + c_w \bar{M})} \Delta z + \frac{\Delta z}{\Delta t} \theta_p^0 \quad (3.20)$$

Colocando a Equação (3.20) na forma dos volumes finitos, tem-se a Eq. (3.21).

$$A_p \bar{\theta}_p = A_p^0 \bar{\theta}_p^0 + S_c^{\bar{\theta}} \quad (3.21)$$

onde:

$$A_p = \left(\frac{\Delta z}{\Delta t} + \frac{h_c A^* \Delta z}{(c_p + c_w \bar{M}) \rho_p} + \frac{c_v (\bar{M}_p - \bar{M}_p^0) \Delta z}{(c_p + c_w \bar{M})} \right) \quad (3.22)$$

$$A_p^0 = \frac{\Delta z}{\Delta t} \quad (3.23)$$

$$S_c^{\bar{\theta}} = \left(\frac{h_c A^* \Delta z}{(c_p + c_w \bar{M}) \rho_p} \right) T_p + \frac{(h_v + c_v T_p) (\bar{M}_p - \bar{M}_p^0)}{(c_p + c_w \bar{M})} \Delta z \quad (3.24)$$

3.4.4.2 Balanço de massa do produto

Realizando a integração no volume e no tempo da Equação (3.13), tem-se a Eq. (3.25).

$$\left(\frac{\Delta z}{\Delta t}\right)M_p = \left(\frac{\Delta z}{\Delta t}\right)M_p^0 + \left(\frac{\overline{M}_p - \overline{M}_p^0}{\Delta t}\right)\Delta z \quad (3.25)$$

Colocando a Equação (3.25) na forma dos volumes finitos, tem-se a Eq. (3.26).

$$A_p \overline{M}_p = A_p^o \overline{M}_p^o + S_c^M \quad (3.26)$$

onde:

$$A_p = \frac{\Delta z}{\Delta t} \quad (3.27)$$

$$A_p^o = \frac{\Delta z}{\Delta t} \quad (3.28)$$

$$S_c^M = \left(\frac{\overline{M}_p - \overline{M}_p^0}{\Delta t}\right)\Delta z \quad (3.29)$$

3.4.4.3 Balanço de energia para o ar

Realizando a integração no volume e no tempo da Equação (3.16), tem-se a Eq. (3.30).

$$\left(\frac{\Delta y}{\Delta t} + \frac{w_a}{\varepsilon} + \frac{A^* h_c \Delta y}{\varepsilon(\rho_a c_a + \rho_a x c_v)}\right)T_p = \frac{w_a}{\varepsilon} T_s + \frac{A^* h_c \Delta y}{\varepsilon(\rho_a c_a + \rho_a x c_v)} \theta_p + \frac{\Delta y}{\Delta t} T_p^0 \quad (3.30)$$

Colocando a Equação (3.30) na forma dos volumes finitos, tem-se a Eq. (3.31).

$$A_p T_p = A_s T_s + A_p^o T_p^o + S_c^T \quad (3.31)$$

onde:

$$A_p = \frac{\Delta y}{\Delta t} + \frac{w_a}{\varepsilon} + \frac{A^* h_c \Delta y}{\varepsilon(\rho_a c_a + \rho_a x c_v)} \quad (3.32)$$

$$A_p^o = \frac{\Delta y}{\Delta t} \quad (3.33)$$

$$A_s = \frac{w_a}{\varepsilon} \quad (3.34)$$

$$S_c^T = \frac{A * h_c \Delta y}{\varepsilon(\rho_a c_a + \rho_a x c_v)} \quad (3.35)$$

3.4.4.4 Balanço de massa do ar

Realizando a integração no volume e no tempo da Equação (3.19), tem-se a Eq. (3.37).

$$\left[\left(\frac{\Delta y}{\Delta t} + \frac{w_a}{\varepsilon} \right) \rho_a \right] x_p = \left(\rho_a \frac{\Delta y}{\Delta t} \right) x_p^0 + \left(\rho_a \frac{w_a}{\varepsilon} \right) x_s - \frac{\rho_p}{\varepsilon} \left(\frac{\overline{M_p} - \overline{M_p^0}}{\Delta t} \right) \Delta y \quad (3.36)$$

Colocando a Equação (3.36) na forma dos volumes finitos, tem-se a Eq.(3.37).

$$A_p x_p = A_s x_s + A_p^o x_p^o + S_c^x \quad (3.37)$$

onde:

$$A_p = \rho_a \left(\frac{\Delta y}{\Delta t} + \frac{w_a}{\varepsilon} \right) \quad (3.38)$$

$$A_p^o = \rho_a \frac{\Delta y}{\Delta t} \quad (3.39)$$

$$A_s = \rho_a \frac{w_a}{\varepsilon} \quad (3.40)$$

$$S_c^x = - \frac{\rho_p}{\varepsilon} \left(\frac{\overline{M_p} - \overline{M_p^0}}{\Delta t} \right) \Delta y \quad (3.41)$$

3.5 Propriedades termofísicas do grão de arroz e da mistura ar-vapor d'água

3.5.1 Grão (arroz)

As propriedades termofísicas tais como, calor de vaporização expresso pela Equação (3.42), calor específico expresso pela Equação (3.43), densidade do sólido seco ilustrado pela Equação (3.44), porosidade expressa pela Equação (3.45), e a área específica expressa Equação (3.46), são apresentadas na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Propriedades termofísicas do grão de arroz.

Expressão	Unid.	Referência	Eq.
$h_v = 2,503 \times 10^6 - 2,386 \times 10^3 (T_{abs} - 273,16)$; $273,16K \leq T_{abs} \leq 533,16K$	$\left(\frac{J}{kg} \right)$	Brooker (1992)	(3.42)
$c_p = 1.109 + 4.480 \overline{M}$	$\left(\frac{J}{kgK} \right)$	Islam M e Jindal V.K.(1981)	(3.43)
$\rho_p = 500$	$\left(\frac{kg}{m^3} \right)$	Wratten et al. (1969) e Morita e Singh (1977)	(3.44)
$\varepsilon = 0,56$	(adm)	Fontana (1983)	(3.45)
Área específica (A^*) = 2.361	$\left(\frac{m^2}{m^3} \right)$	Fontana (1983)	(3.46)

3.5.2 Mistura ar-vapor

As propriedades termodinâmicas para mistura ar-vapor são listadas na Tabela 3.3. São apresentados o calor específico do ar, a densidade do ar, a temperatura absoluta do ar, a constante universal dos gases, a umidade relativa do ar, a pressão de vapor saturado, o calor específico do vapor, o calor específico da água e o coeficiente de transferência de calor por convecção, representados pelas Eqs. (3.47), (3.48), (3.49), (3.50), (3.51), (3.52), (3.53), (3.54), (3.55), (3.56) e (3.57), respectivamente.

Tabela 3.3 - Propriedades termodinâmicas para mistura ar-vapor.

Expressão	Unid.	Referência	Eq.
$c_a = 1.009,26 - 44.040,33 \times 10^{-5} T_a + 6.175,96 \times 10^{-7} T_a^2 - 4.097,2 \times 10^{-10} T_a^3$	$\left(\frac{J}{kgK} \right)$	Holanda (2007)	(3.47)
$\rho_a = \frac{P_{atm} M_a}{R \cdot T_{abs}}$	$\left(\frac{kg}{m^3} \right)$	Mujumdar (1995) e Pakowski (1991)	(3.48)
$T_{abs} = T_a + 273,15$	(K)	Holanda (2007)	(3.49)
$R = 8314,34$	$\left(\frac{J}{molK} \right)$	Holanda (2007)	(3.50)
$P_{atm} = 101325$	(Pa)	Holanda (2007)	(3.51)
$UR = \frac{P_{atm} x_a}{(x_a + 0,622) \cdot P_{vs}}$	(Decimal)	Mujumdar (1995) e Pakowski (1991)	(3.52)

$P_{vs} = 22.105.649,25$			
$\exp \left\{ \frac{\begin{bmatrix} 27.405,53 + 97,5413T_{abs} \\ -0,146244T_{abs}^2 \\ + 0,12558 \times 10^{-3} T_{abs}^3 \\ - 0,48502 \times 10^{-7} T_{abs}^4 \end{bmatrix}}{[4,34903T_{abs} - 0,39381 \times 10^{-2} T_{abs}]} \right\};$	(Pa)	ASHRAE (1988)	(3.53)
$273,16K \leq T_{abs} \leq 533,16K$			
$c_v = 1.883 - 167,37 \times 10^{-3} T_{abs} + 843,86 \times 10^{-6} T_{abs}^2 - 269,66 \times 10^{-9} T_{abs}^3$	$\left(\frac{J}{kgK} \right)$	Mujumdar (1995) e Pakowski (1991)	(3.54)
$c_w = 2.822,32 - 1.182,77 \times 10^{-2} T_{abs} + 3.504,7 \times 10^{-5} T_{abs}^2 - 3.601 \times 10^{-8} T_{abs}^3$	$\left(\frac{J}{kgK} \right)$	Mujumdar (1995) e Pakowski (1991)	(3.55)
$\mu_a = 1,691 \times 10^{-5} + 4,984 \times 10^{-8} T_a - 3,187 \times 10^{-11} T_a^2 + 1,319 \times 10^{-14} T_a^3$	$\left(\frac{kg}{ms} \right)$	Mujumdar (1995) e Pakowski (1991)	(3.56)
$h_c = 0,2755 c_a q_a \left(\frac{2r_{part} q_a}{\mu_a} \right)^{-0,34}$	$\left(\frac{W}{m^2K} \right)$	Brooker (1992)	(3.57)

Para a obtenção dos resultados foi desenvolvido um código computacional no software MATHEMATICA.

CAPÍTULO 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Tabela 4.1 apresenta os casos propostos para análise do processo de secagem. Nesta tabela, M_0 é a umidade inicial do produto, M_f é a umidade final do produto, H é a altura do leito, θ_p é a temperatura inicial do produto, x_{ent} é a umidade absoluta inicial do ar, q_a é a vazão específica da massa de ar, T_{ent} é a temperatura inicial do ar de secagem, UR é a umidade relativa do ar de secagem, t é o tempo de secagem, L é o comprimento do secador e np_y é o número de pontos do leito.

Tabela 4.1 – Casos de processos de secagem analisados.

Caso	Produto				Ar				t (s)	L(m)	np _y
	M_0 (kg/kg)	M_f (kg/kg)	H (m)	θ_p (°C)	x_{ent} (kg/kg)	q_a (kg/m ² s)	T_{ent} (°C)	UR (%)			
1	0,25	0,13	0,25	25	0,0100	0,22	50	13	8000	0,4	70
2	0,33	0,18	0,50	25	0,0100	0,22	50	13	10000	0,4	10
3	0,33	0,20	0,50	25	0,0100	0,22	50	13	10000	0,4	20
4	0,33	0,22	0,50	25	0,0100	0,22	50	13	10000	0,4	30
5	0,33	0,23	0,50	25	0,0100	0,22	50	13	10000	0,4	40
6	0,33	0,24	0,50	25	0,0100	0,22	50	13	10000	0,4	50
7	0,33	0,25	0,50	25	0,0100	0,22	50	13	10000	0,4	60
8	0,33	0,26	0,50	25	0,0100	0,22	50	13	10000	0,4	70
9	0,33	0,20	0,50	25	0,0100	0,44	50	13	11000	0,4	70
10	0,33	0,17	0,50	25	0,0100	0,88	50	13	11000	0,4	70
11	0,33	0,14	0,25	25	0,0100	0,88	50	13	11000	0,4	70
12	0,33	0,20	0,50	25	0,0200	0,88	50	30	9000	0,4	70
13	0,33	0,25	0,50	25	0,0400	0,88	50	60	9000	0,4	70
14	0,33	0,23	0,50	25	0,0034	0,88	30	13	9000	0,4	70
15	0,33	0,20	0,50	25	0,0059	0,88	40	13	9000	0,4	70
16	0,33	0,18	0,50	25	0,0100	0,88	50	13	9000	0,4	70

Neste trabalho, foram utilizados dados de arroz longos em casca obtidos nos Estados Unidos, conforme Tabela (3.2).

Conforme define Maliska (2004), existem dois níveis de erros que podem estar presentes na solução numérica, quando os resultados são comparados com a realidade de um problema físico. No primeiro nível, estão os erros numéricos resultantes da má solução das equações diferenciais. No segundo, estão os erros resultantes do uso de equações diferenciais que não representam adequadamente o fenômeno.

Buscando detectar e corrigir os dois níveis citados, Maliska (2004) sugere a comparação dos resultados simulados. O processo de comparação dos resultados é chamado de validação.

Essa análise deve ser feita, comparando-se os resultados simulados com outras soluções analíticas ou numéricas (validação numérica) ou experimentais (validação física). De forma geral, a validação numérica atesta a qualidade do método empregado e a validação física atesta a fidelidade do método com a realidade.

Diante dessas informações, foi realizada a validação dos dados, utilizando resultados encontrados por Zare et al. (2006). Os autores obtiveram dados numéricos e experimentais da secagem de arroz em casca do tipo longo chamado Hashemi, nativo da região do Irã que foi obtido a partir de um campo de arroz local, no norte do país citado.

A Figura 4.1 ilustra a comparação dos dados simulados neste trabalho com os dados simulados e experimentais obtidos por Zare et al. (2006). A análise dos autores foi realizada em um leito de 0,25 m de altura e os valores do teor de umidade do produto obtidos em $y=0,09$ m (Caso 1, cujos dados estão ilustrados na Tabela. 4.1).

Pode-se observar que houve uma boa concordância entre os valores simulados e os resultados obtidos por Zare et al. (2006), apesar de haver uma pequena discrepância entre os valores simulados e experimentais. O comportamento pode ser justificado pela falta de precisão das equações, no processo de secagem do grão em camada delgada, pela precisão insuficiente da equação da umidade de equilíbrio em umidades relativas do ar acima de 90%, pelos erros de medição dos parâmetros de entrada do secador de grãos, pela variedade do grão utilizado, pelos efeitos da porosidade do grão e pelo modelo matemático considerar variações de temperatura e de umidade absoluta do ar com o tempo.

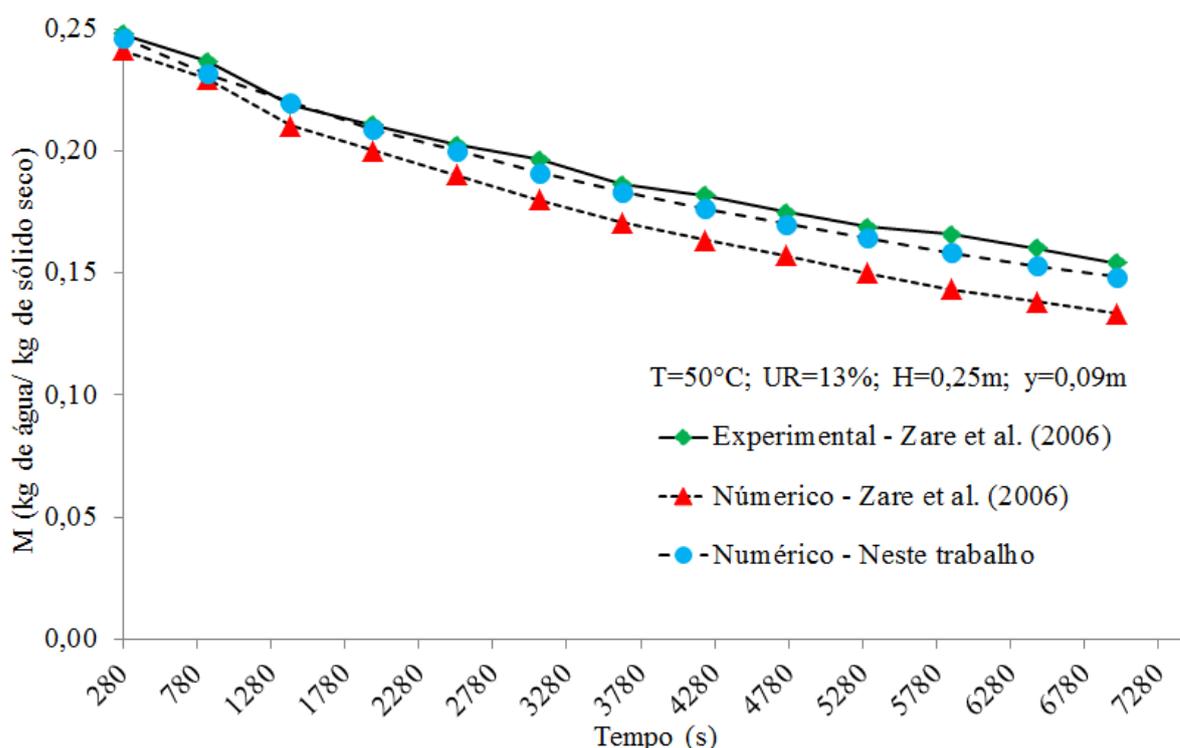


Figura 4.1 - Comparação entre os dados numéricos e experimentais (Zare et al. (2006)) do teor de umidade do produto, durante processo de secagem de grão de arroz em casca com altura do leito $H=0,25$ m e os valores tomados em $y=0,09$ m.

A Figura 4.2 apresenta o comportamento da umidade do produto em função do tempo para divisões do leito em dez, vinte, trinta, quarenta, cinquenta, sessenta e setenta pontos. Pode-se observar que o leito com menor número de camadas tende a secar mais rapidamente. Ao contrário, no caso de maior número de camadas, o processo de secagem tende a ser mais lento. Isso pode ser explicado pelo fato de uma malha com maior número de divisões, ou seja,

uma malha mais refinada representar o problema de forma mais realista. No caso de poucas camadas, as variáveis do processo de secagem tendem a permanecer constantes. Isso porque as iterações ocorrem num menor número de pontos, fazendo com que os efeitos sejam menores (Casos 2, 3 4, 5, 6, 7 e 8, cujos dados estão ilustrados na Tabela 4.1).

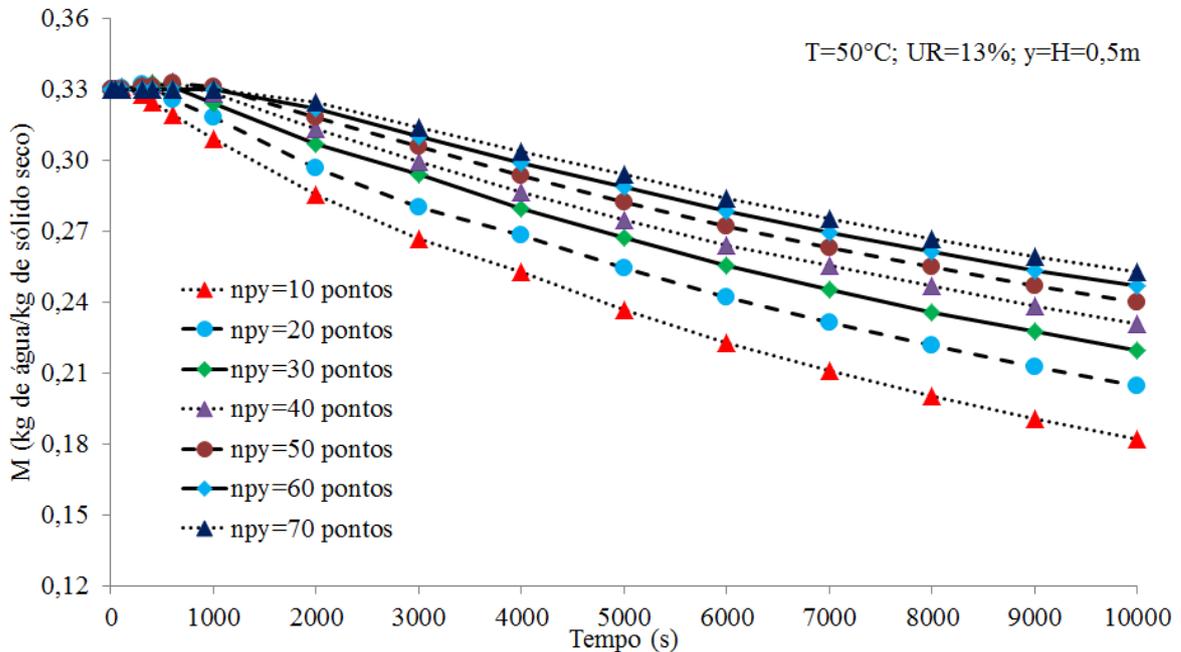


Figura 4.2 - Teste de malha para o comportamento da umidade do produto em função do tempo para: dez, vinte, trinta, quarenta, cinquenta, sessenta e setenta pontos do leito e valores tomados em $y=H$.

A Figura 4.3 ilustra o comportamento do teor de umidade do produto em função do tempo para diferentes vazões específicas do ar de secagem. Pode-se observar que para valores maiores de vazões a secagem ocorre mais rapidamente. Esse comportamento pode ser explicado pelo fato de que se aumentando a vazão específica do ar, o coeficiente de transferência de calor também aumenta, promovendo-se um aumento na troca de calor por convecção e, conseqüentemente, aumentando a taxa de secagem, ou seja, reduzindo o tempo do processo. Outro fato interessante é que quanto maior a vazão específica, mais rapidamente ocorrerá o arrasto de partículas de água quando o ar passar pelo produto. Dessa forma, a taxa de secagem sofrerá um aumento, ou seja, mais rapidamente o produto irá secar. (Casos 8, 9 e 10, cujos dados estão ilustrados na Tabela 4.1).

A Figura 4.4 apresenta o comportamento do teor de umidade do produto em função do tempo para duas alturas do leito ($H=0,25\text{ m}$ e $H=0,50\text{ m}$), mas nas mesmas condições de temperatura, umidade relativa e vazão específica do ar. Pode-se observar que o produto atinge sua umidade de equilíbrio mais rapidamente, quando a camada de grão é menor. Isso pode ser explicado pelo fato de que o ar, ao passar pelo leito, tende a absorver a umidade contida no produto e à medida que o ar percorre, cada camada tende a saturar-se e assim diminuir a capacidade de retirar a umidade do produto. No caso de camadas de alturas maiores, o teor de umidade a ser retirado do produto é maior e, conseqüentemente, o ar satura mais e logo nas primeiras camadas. Isso contribuirá para um aumento do tempo no processo de secagem (Casos 10 e 11 cujos dados estão ilustrados na Tabela 4.1).

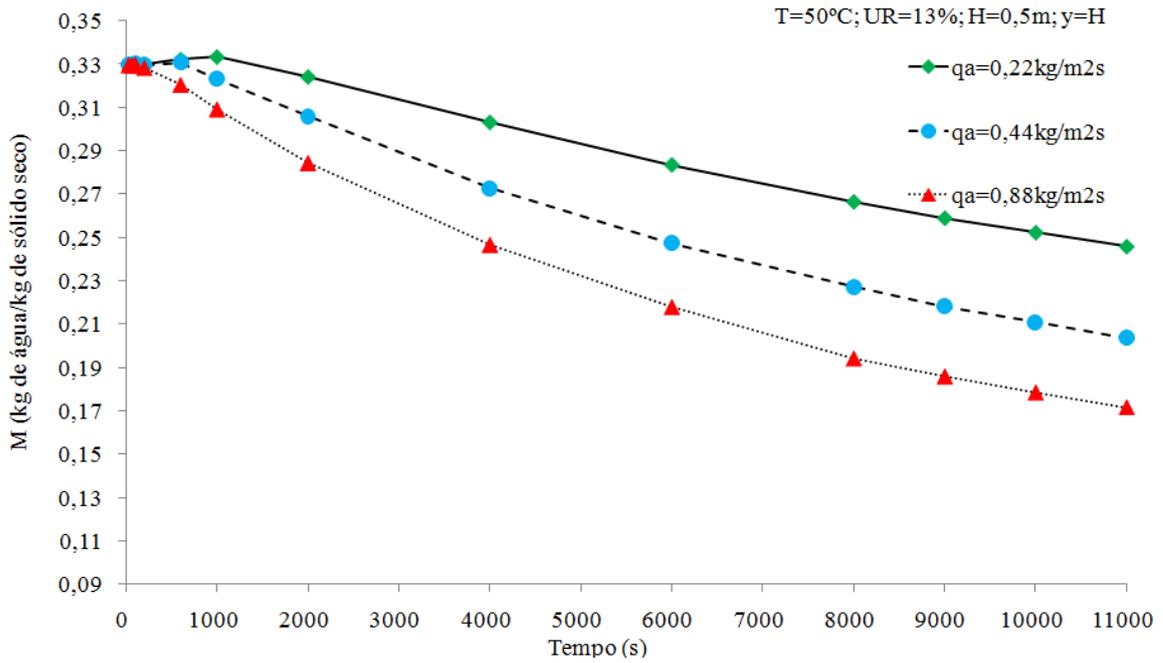


Figura 4.3 - Comportamento do teor de umidade do produto em função do tempo para três valores diferentes de vazões específicas do ar ($0,22\text{ kg/m}^2\text{s}$, $0,44\text{ kg/m}^2\text{s}$ e $0,88\text{ kg/m}^2\text{s}$) e os valores tomados em $y=H$.

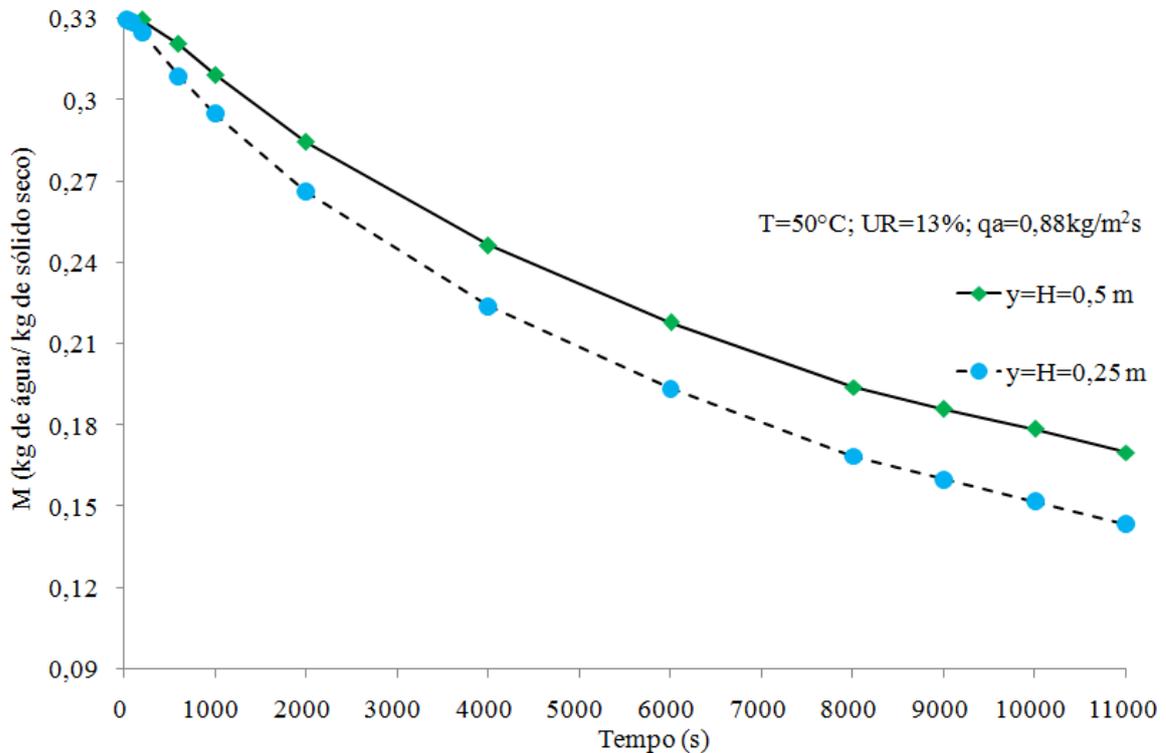


Figura 4.4 - Comportamento do teor de umidade do produto em função do tempo para alturas de leitos, $H=0,25\text{ m}$ e $H=0,50\text{ m}$ e os valores tomados em $y=H$.

Na Figura 4.5, observa-se o comportamento do teor de umidade do produto em relação ao tempo, submetido a uma mesma temperatura do ar de secagem e variando-se a umidade relativa do ar, considerando o ponto $y = H$. Foram utilizados para a análise os casos 12 e 13. Observa-se que para valores maiores de umidade relativa do ar de secagem, o tempo de

secagem aumenta. Caso contrário, isto é, valores menores de umidade relativa proporcionam redução no tempo de secagem. Esse comportamento pode ser explicado pelo fato do ar com umidade relativa mais baixa possuir maior capacidade de receber a umidade do produto. Isso proporciona a retirada da água do produto mais rapidamente.

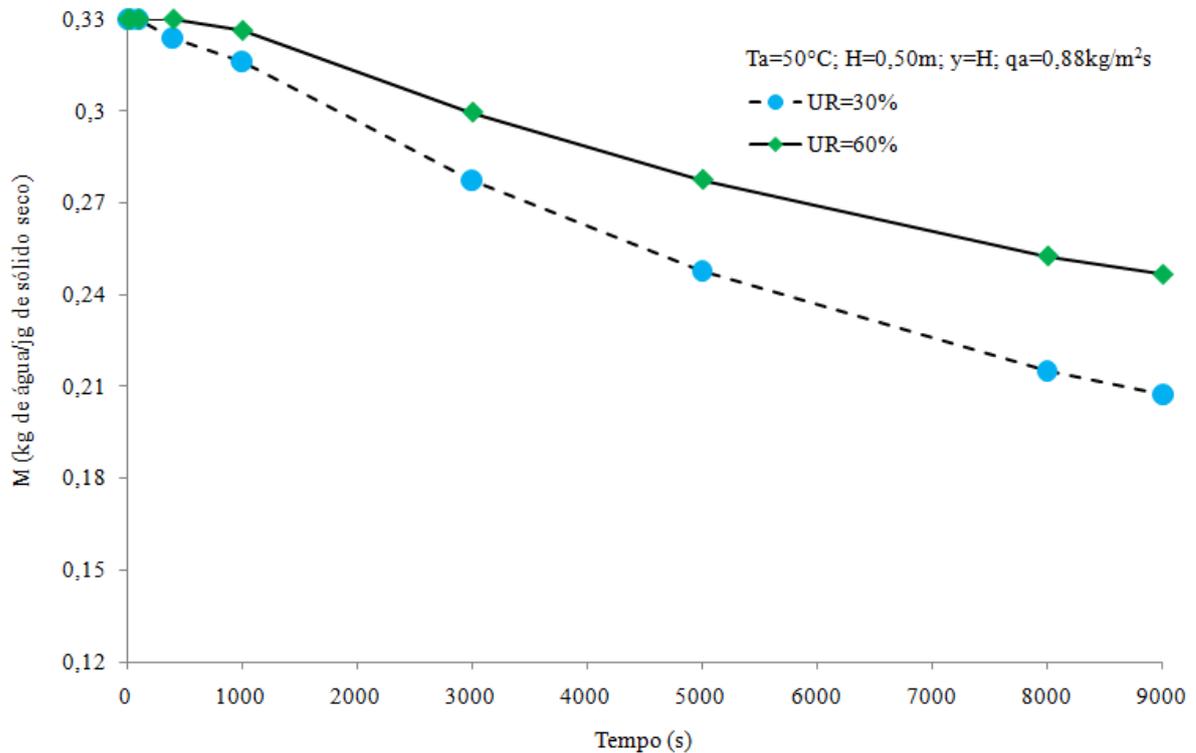


Figura 4.5 - Comportamento do teor de umidade do produto em função do tempo para umidades relativas do ar de secagem de: UR=30% e UR=60% e os valores tomados em $y=H$ m.

Na Figura 4.6, verifica-se o comportamento do teor de umidade do produto, na saída do leito, em função do tempo para valores diferentes de temperatura do ar de secagem, mas nas mesmas condições de umidade relativa e vazão específica do ar. Foram utilizados para a análise os casos 14, 15 e 16. Verifica-se que o aumento da temperatura do ar de secagem provoca um aumento da taxa de secagem e o produto atinge mais rapidamente a sua umidade de equilíbrio. Isso pode ser explicado pelo fato de que o ar com temperatura mais elevada possui uma menor umidade absoluta e, conseqüentemente, uma maior capacidade de absorver umidade.

Na Figura 4.7, tem-se a distribuição do teor de umidade do produto em função da altura do leito. Pode-se observar que no início do processo de secagem o produto apresenta, de forma geral, o teor de umidade uniforme em todas as camadas. Com o passar do tempo, esse valor tende a diminuir, devido ao fornecimento de calor e conseqüentemente maior remoção de água do produto. Verifica-se, ainda, que a perda de umidade do produto ocorre da camada mais baixa para a mais alta, ou seja, a camada que tem contato primeiro com o ar de secagem, em relação à próxima camada, possui um teor de umidade mais baixo que a posterior, considerando-se o mesmo tempo. Foi utilizado para a análise o caso 10.

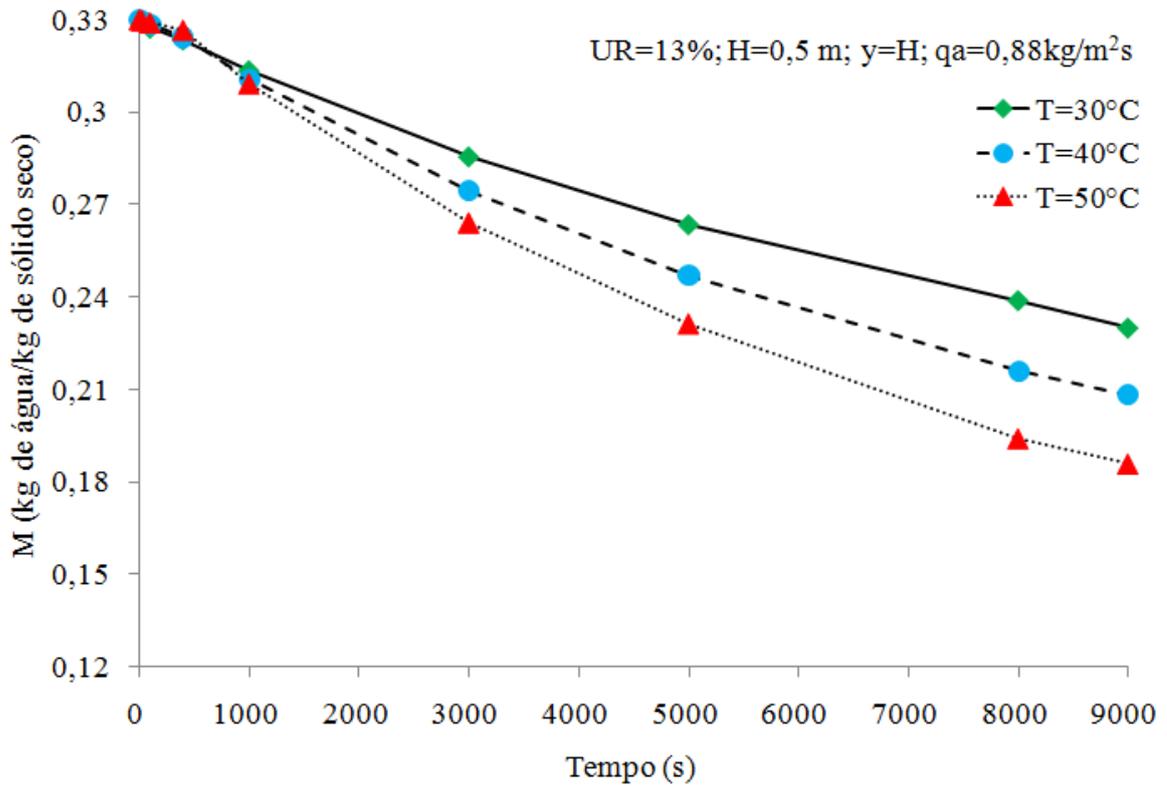


Figura 4.6 - Distribuição da umidade do produto em função do tempo para diferentes temperaturas do ar de secagem e os valores tomados em y=H.

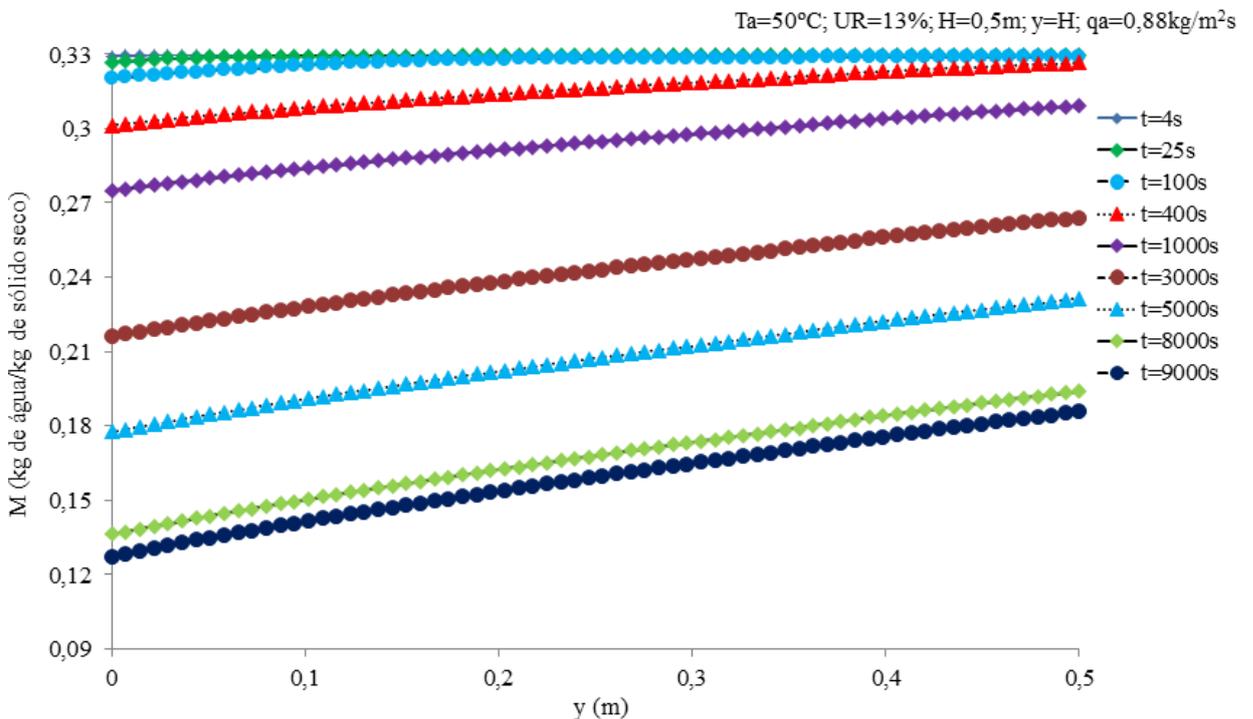


Figura 4.7 - Distribuição da umidade do produto em função da altura do leito para nove tempos de secagem, considerando o leito com altura H=0,50 m.

Na Figura 4.8 ilustra-se a distribuição do teor de umidade do produto em função do tempo para três pontos do leito (y=0,0 m, y=0,25m e y=0,50 m). Pode-se observar que os produtos

da camada inicial ($y=0,0$ m) tendem a ter seu teor de umidade removido mais rapidamente se comparados aos outros dois pontos do leito. Esse fato ocorre devido às camadas mais baixas terem contato com o ar de secagem primeiro que as outras duas. Como o ar está com menor teor de umidade relativa na camada inicial ($y=0,0$ m), ele possui maior capacidade de absorver a umidade vinda do produto. O comportamento da curva de secagem é o mesmo para os três pontos do leito, ou seja, com o passar do tempo o teor de umidade do produto é reduzido, tendendo à umidade de equilíbrio. Foi utilizado para a análise o caso 10.

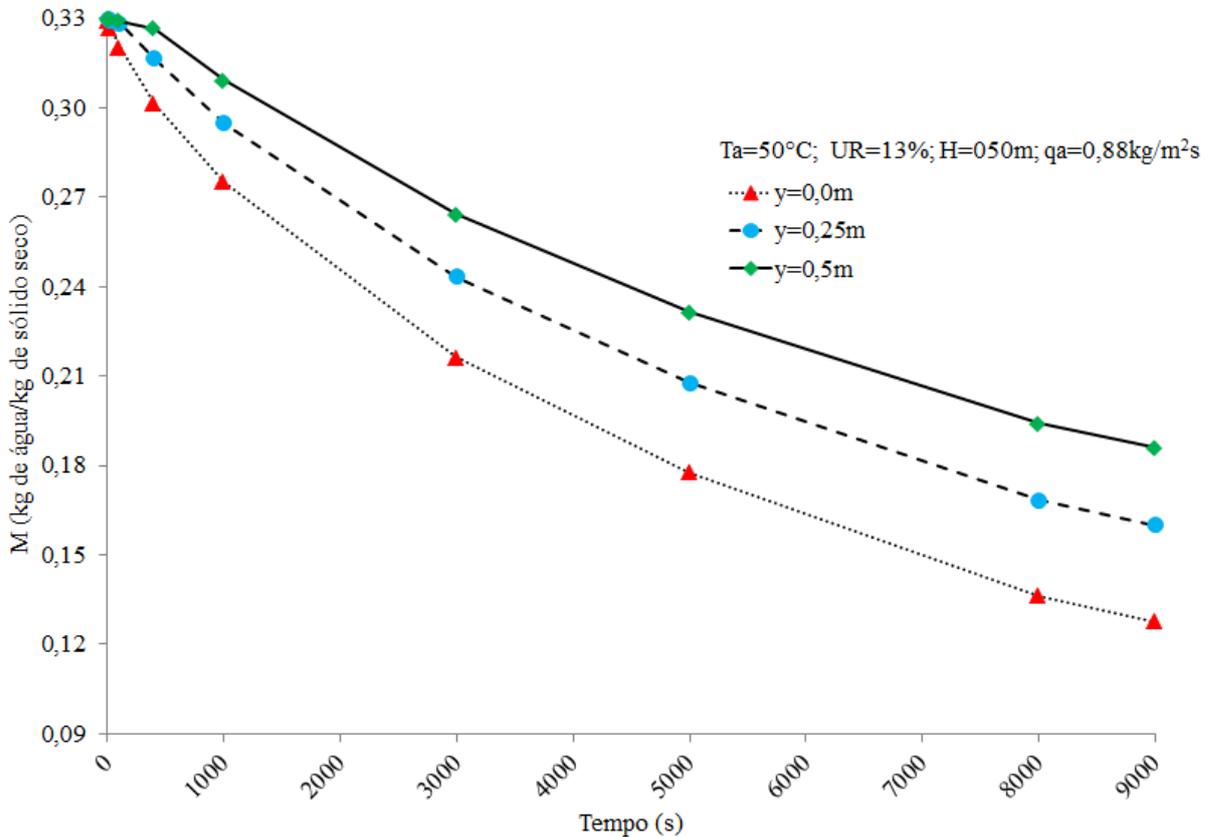


Figura 4.8 - Distribuição do teor de umidade do produto em função do tempo, para três pontos do leito ($y=0,0$ m, $y=0,25$ m e $y=0,50$ m) de secagem, considerando o leito com altura $H=0,50$ m.

A Figura 4.9 revela a distribuição da temperatura do produto em função da altura do leito. Percorrendo-se as camadas do leito, pode-se observar que o valor da temperatura do produto tende a diminuir, considerando-se o mesmo tempo, devido ao aquecimento dos produtos que estão nas camadas mais baixas. Com o passar do tempo, e percorrendo-se todo o leito novamente, pode-se verificar que os produtos vão sendo aquecidos em todos os pontos do leito e tendem a atingir a temperatura do ar de secagem no final do processo. Foi utilizado para a análise o caso 10.

Na Figura 4.10 ilustra-se a distribuição da temperatura do produto em função do tempo para três pontos do leito ($y=0,0$ m, $y=0,25$ m e $y=0,50$ m). Pode-se observar que os produtos da camada inicial ($y=0,0$ m) tendem a ter sua temperatura elevada mais rapidamente se comparados aos outros dois pontos do leito. Esse fato ocorre devido às camadas mais baixas terem contato com o ar de secagem primeiro que as outras duas. O comportamento da curva é o mesmo para os três pontos do leito, ou seja, com o passar do tempo o produto tende a ser aquecido pela energia vinda do ar de secagem. Foi utilizado para a análise o caso 10.

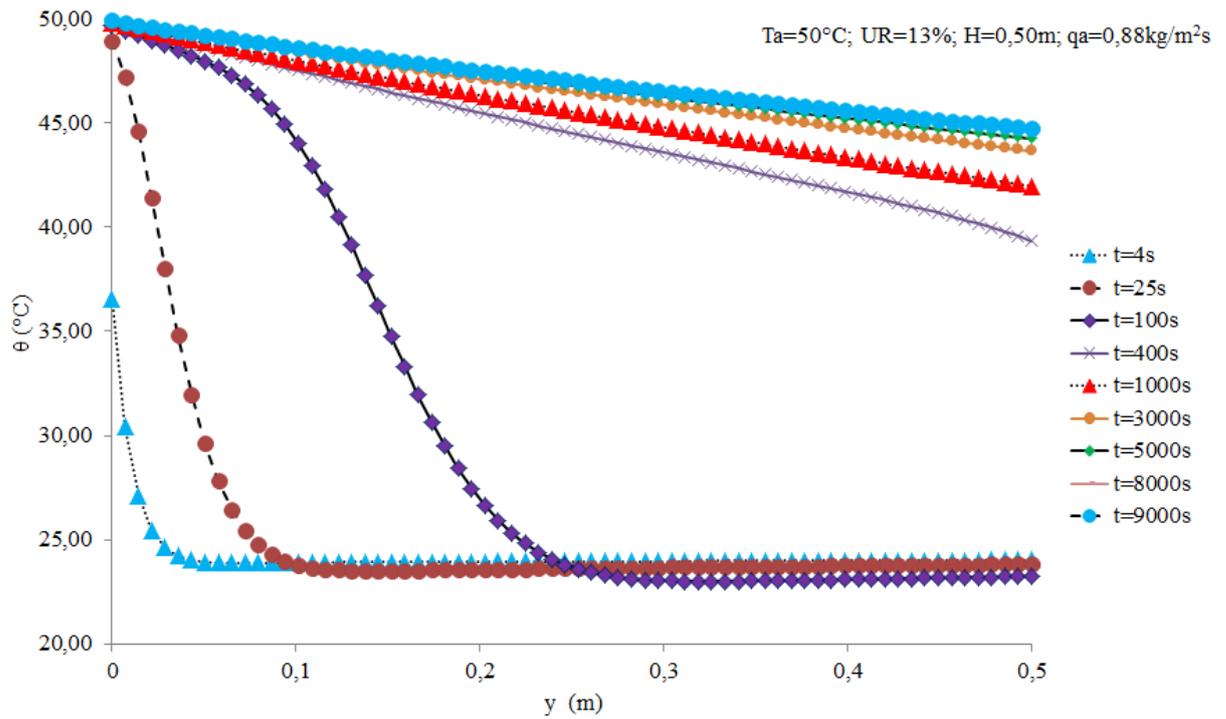


Figura 4.9 - Distribuição da temperatura do produto em função do tempo para nove tempos de secagem, considerando o leito com altura $H=0,50$ m.

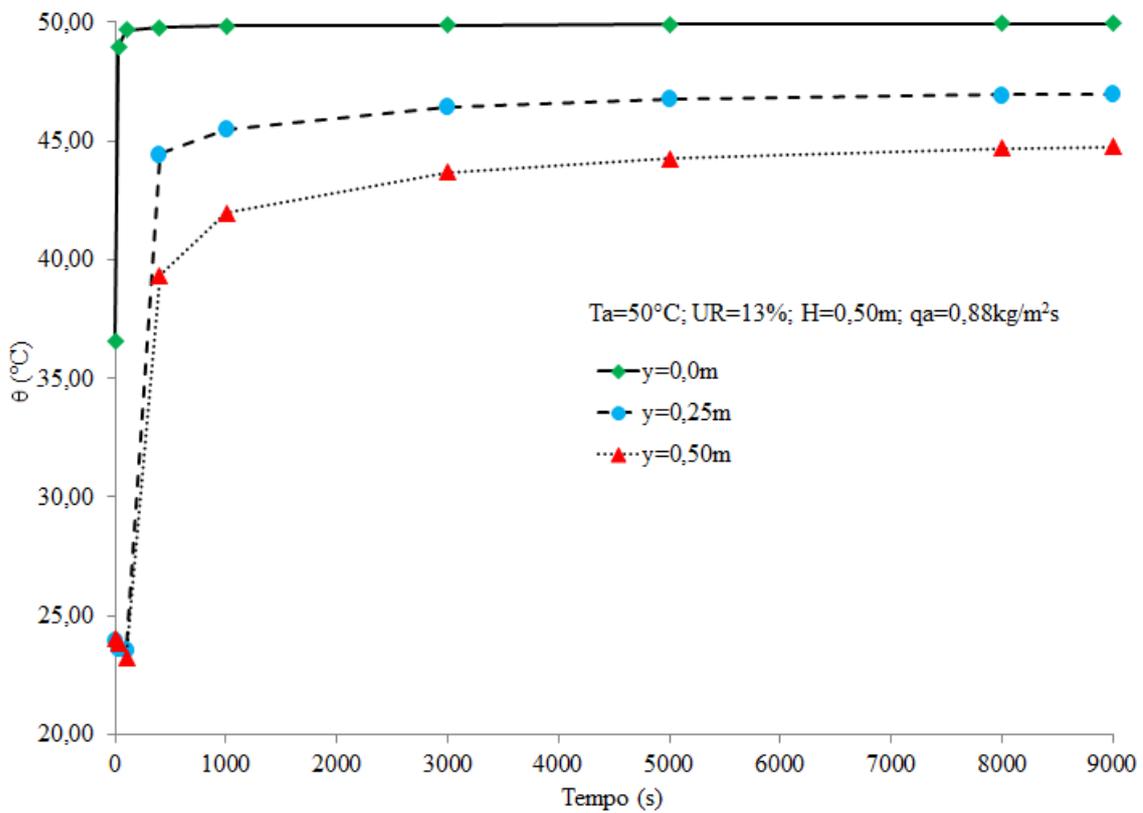


Figura 4.10 - Distribuição da temperatura do produto em função do tempo para três pontos do leito ($y=0,0$ m, $y=0,25$ m e $y=0,50$ m) de secagem, considerando o leito com altura $H=0,50$ m.

A Figura 4.11 ilustra a distribuição da temperatura do ar de secagem em função da altura do leito. Percorrendo-se as camadas do leito pode-se observar que o valor da temperatura do ar tende a diminuir, considerando-se o mesmo período. Com o passar do tempo, e percorrendo-se todo o leito novamente, pode-se verificar que o ar de secagem tende a atingir a temperatura inicial em todas as camadas do leito. Foi utilizado para a análise o caso 10.

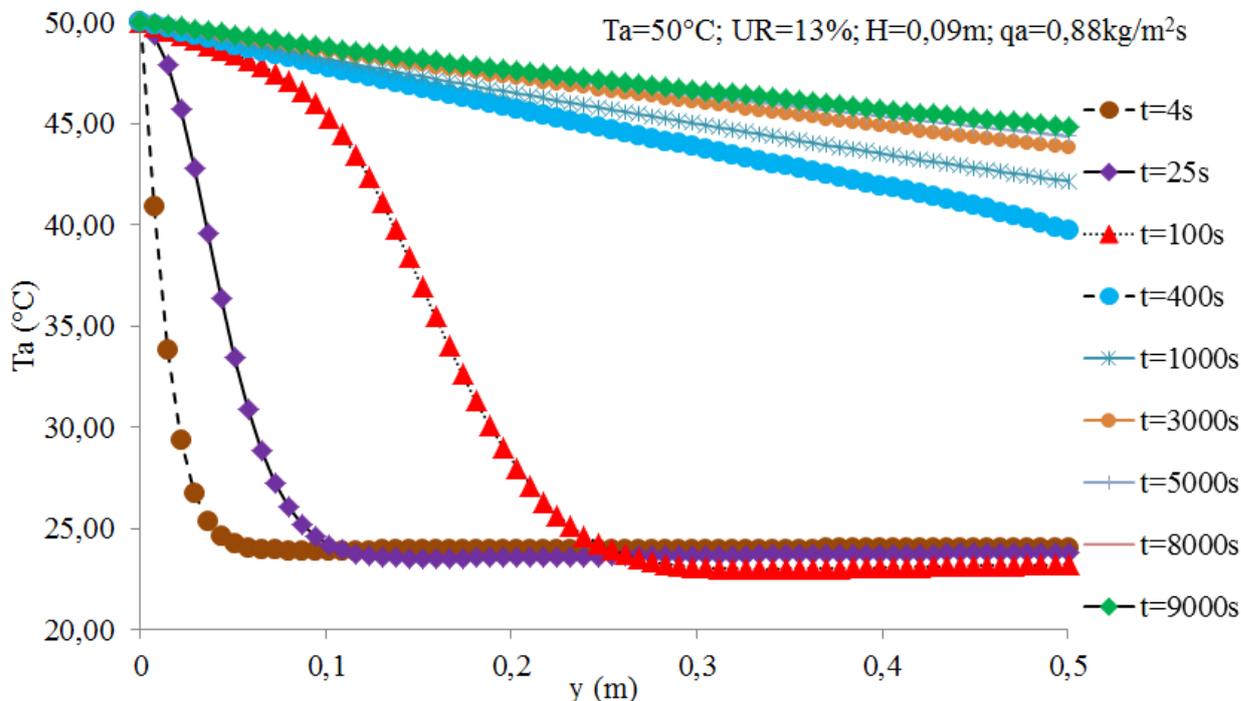


Figura 4.11 - Distribuição de temperatura do ar em função da altura do leito para nove tempos de secagem, considerando o leito com altura $H=0,50$ m.

Na Figura 4.12, observa-se a distribuição da temperatura do ar de secagem em função do tempo para três pontos do leito ($y=0,0$ m, $y=0,25$ m e $y=0,50$ m). Pode-se observar que o ar da camada inicial ($y=0,0$ m) apresenta sua temperatura prescrita de 50°C . Nas outras camadas, $y=0,25$ m e $y=0,50$ m, o ar apresenta temperaturas menores que a prescrita e, com o passar do tempo, tende a elevar sua temperatura. O comportamento da curva é o mesmo para os três pontos do leito, ou seja, com o passar do tempo o ar tende a atingir a temperatura prescrita (50°C). Foi utilizado para a análise o caso 10.

A Figura 4.13 ilustra a distribuição da umidade relativa do ar de secagem em função da altura do leito. Pode-se observar que no início do processo de secagem o ar atinge a saturação, mais ou menos, na metade do leito ($y\sim 0,20$ m) e logo no início do processo de secagem ($t\sim 50$ s). Esse fenômeno ocorre devido ao ar, no início do processo, apresentar sua temperatura baixa e dessa maneira atingir a saturação rapidamente. Outro ponto importante é que, no início da secagem, o produto apresenta um alto teor de umidade que será retirado pelo fornecimento de calor. O agente desse processo, o ar, irá absorver essa água no decorrer do tempo e em alguma (s) camada (s) pode (m) atingir a saturação para aquela temperatura. Nesse momento, a umidade relativa do ar é 100% e sua temperatura se iguala à temperatura de bulbo úmido. Com o aquecimento posterior da temperatura do ar, conforme revela a Figura 4.12, haverá uma elevação da sua capacidade de retenção de líquido, ou seja, sua umidade relativa irá diminuir e, em paralelo, a umidade do produto irá diminuir, ocorrendo a remoção de água do produto. Foi utilizado para a análise o caso 10.

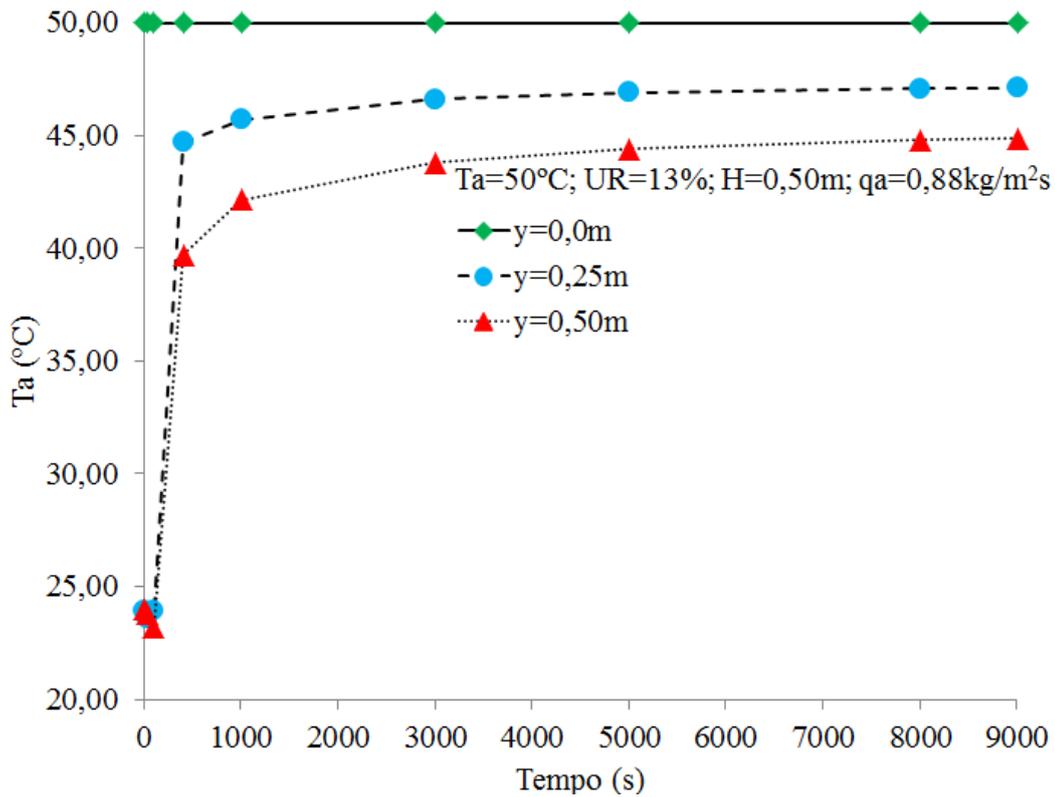


Figura 4.12 - Distribuição da temperatura do ar de secagem em função do tempo para três pontos do leito ($y=0,0\text{ m}$, $y=0,25\text{ m}$ e $y=0,50\text{ m}$) de secagem, considerando o leito com altura $H=0,50\text{ m}$.

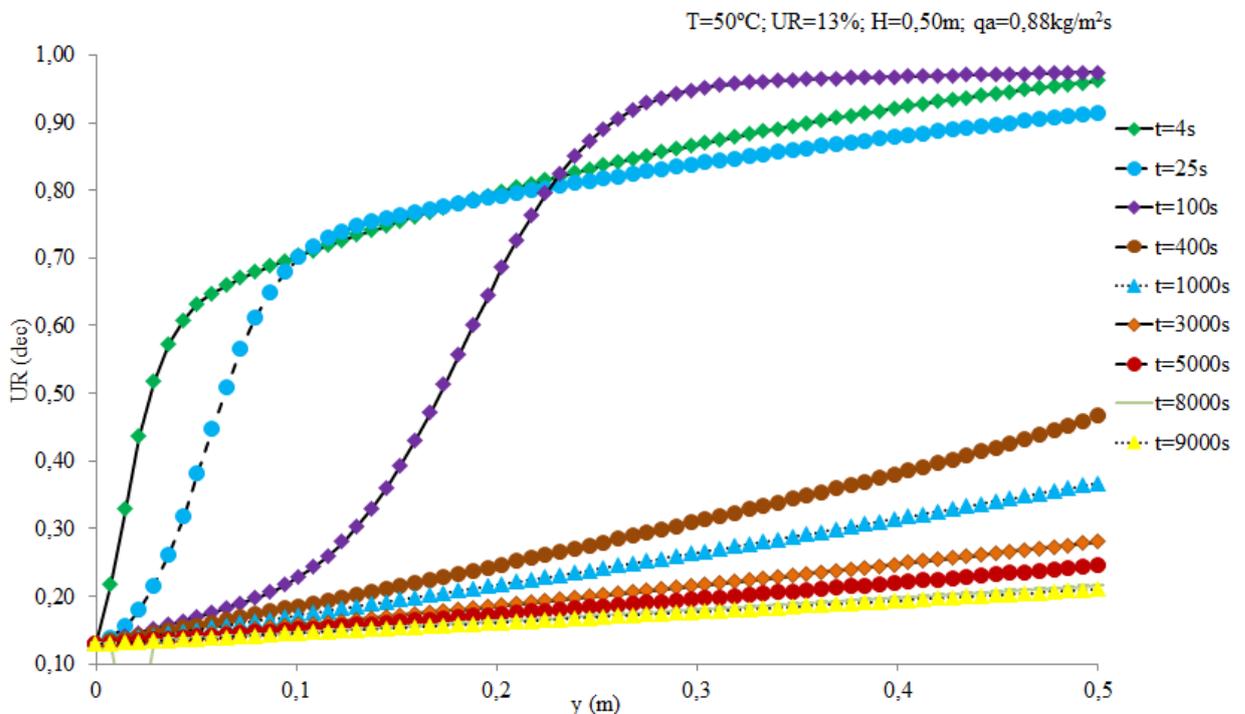


Figura 4.13 - Distribuição de umidade relativa do ar em função da altura do leito para doze tempos de secagem, considerando o leito com altura $H=0,50\text{ m}$.

Na Figura 4.14, observa-se a umidade relativa do ar de secagem em função do tempo para três pontos do leito ($y=0,0$ m, $y=0,25$ m e $y=0,50$ m). Pode-se observar que o ar da camada inicial ($y=0,0$ m) apresenta sua umidade relativa de 13%. Nas outras camadas ($y=0,25$ m e $y=0,50$ m), o ar apresenta umidades relativas maiores que a prescrita, considerando o mesmo tempo. Como mostrado na Figura 4.13, o ar vai absorvendo a umidade proveniente do produto, fazendo com que ocorra essa elevação. Verifica-se que à medida que o tempo passa, há uma redução da umidade relativa do ar, ocasionada pela elevação da temperatura do ar de secagem. O produto encontra-se mais seco e com valor próximo ao da sua umidade de equilíbrio. Foi utilizado para a análise o caso 10.

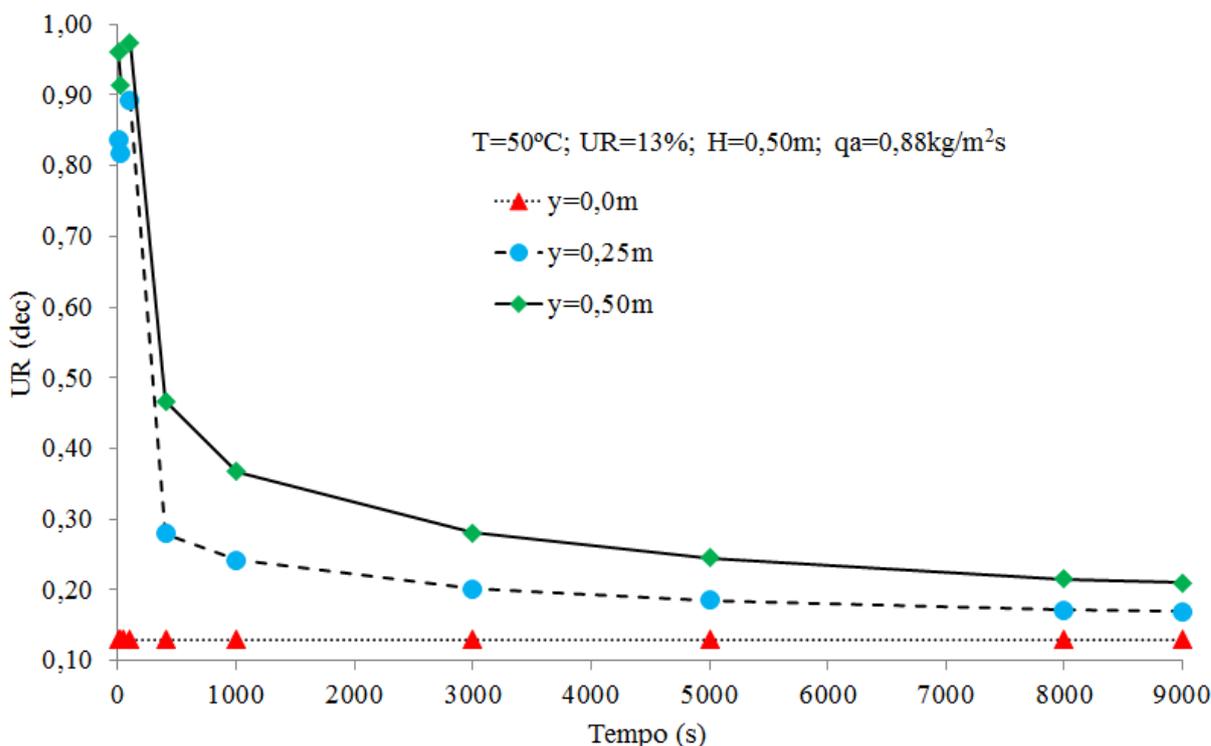


Figura 4.14 - Distribuição da umidade relativa do ar em função do tempo para três pontos do leito ($y=0,0$ m, $y=0,25$ m e $y=0,50$ m) de secagem, considerando o leito com altura $H=0,50$ m.

Após realizar as simulações mostradas anteriormente, ou seja, o teste de malha, a validação do programa, a influência da vazão específica do ar de secagem, a influência da espessura da camada de grãos, a influência da umidade relativa do ar de secagem, a influência da temperatura do ar de secagem, o comportamento da umidade do produto e da umidade relativa do ar de secagem com o tempo e com a camada de grãos e o comportamento da temperatura do produto e do ar, é importante relatar alguns aspectos inerentes ao processo de secagem do arroz em leito fixo.

O primeiro deles é o exposto nos casos 8, 9 e 10, onde se tem a influência da vazão específica do ar de secagem no teor de umidade do produto. Conforme citado, o aumento desse parâmetro favorece a taxa de secagem visto que os teores de umidades finais do produto são: $0,26$ kg/kg, $0,20$ kg/kg e $0,17$ kg/kg para os valores de vazão específica $0,22$ kg/m²s, $0,44$ kg/m²s e $0,88$ kg/m²s, respectivamente. Dessa forma, é importante fazer uma análise relacionando o custo para produzir as vazões citadas, o teor de umidade final e a qualidade final do produto para se obter a melhor combinação entre essas variáveis.

Outra situação interessante é observada nos casos 10 e 11. Verifica-se que secando um leito com o dobro de espessura da camada de arroz, têm-se uma elevação do tempo do

processo. Conforme mostrado, os teores de umidades finais do produto são 0,17 kg/kg e 0,14 kg/kg, para alturas de 0,50 m e 0,25 m respectivamente. Para os casos, é considerado o tempo de processo de 11.000s. É importante frisar o fato de que quanto maior a camada de grãos, o tempo de secagem irá aumentar. Dessa forma, os grãos das camadas inferiores ficarão submetidos ao ar de secagem por mais tempo para que os grãos das camadas superiores atinjam o teor de umidade final. Esse fato poderá alterar negativamente a qualidade do grão.

Nos casos 12 e 13 têm-se a comparação entre o teor de umidade do produto com o decorrer do tempo para umidades relativas do ar de secagem de 30% e 60%. No primeiro caso, o teor de umidade final do produto é 0,20 kg/kg para um tempo de processo de 9.000s. Já o segundo caso, tem-se o teor de umidade final do produto de 0,25 kg/kg para o mesmo tempo citado.

Nos casos 14, 15 e 16 verifica-se que a secagem com temperatura do ar de 30°C a umidade final do produto é 0,23 kg/kg. Para a simulação considerando a temperatura do ar de 40°C a umidade final do produto é 0,20 kg/kg. No caso do processo utilizando a temperatura do ar de 50°C, a umidade final do produto é 0,18 kg/kg. Para todos esses casos, considera-se o tempo de processo de 9.000s. Pode-se observar que o aumento da temperatura do ar de secagem favorece a taxa de secagem. No entanto, a elevação da temperatura do ar pode proporcionar um aquecimento excessivo dos grãos, principalmente em camadas espessas, podendo afetar a qualidade final do produto.

Diante do exposto, no processo de secagem todos os parâmetros relacionados neste trabalho devem ser avaliados para que haja um equilíbrio técnico, financeiro e qualitativo. Buscando, dessa forma, obter bons resultados da secagem de arroz em casca em leito fixo.

CAPÍTULO 5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

5.1 Conclusões

De acordo com os resultados obtidos, pode-se concluir que:

- A metodologia utilizada para análise do processo, bem como o programa usado para simulação são bem aceitos, tendo em vista a validação realizada com dados experimentais e os resultados numéricos obtidos;
- Malhas acima de 30 divisões representam maior tempo computacional. Simulações mostram que nesse caso, é interessante utilizar malhas com 10, 20 ou 30 divisões. É importante frisar que malhas acima de 70 divisões representam o fenômeno de forma mais realista;
- O teor de umidade dos grãos, durante o processo de secagem, diminui com o aumento do tempo;
- O tempo de secagem dos grãos depende da espessura da camada de grãos;
- A velocidade de secagem do produto aumenta sensivelmente ao se aumentar a temperatura do ar de secagem, considerando-se o intervalo de temperatura utilizado (30 a 50°C), caracterizando a forte dependência dessa variável com a secagem;
- Os maiores gradientes de temperatura do ar de secagem dentro do leito, ocorrem nos primeiros instantes do processo, tendo em vista o diferencial de temperatura entre o ar e o material;
- De acordo com a equação utilizada para análise do comportamento do teor de umidade do produto ser para faixa de temperatura do ar de 30 a 50°C, tem-se que para as mesmas condições de secagem, isto é, mesmas propriedades termofísicas, a secagem ocorre de forma mais acelerada à temperatura de 50°C;
- No processo de secagem em leito fixo, é recomendada a utilização de espessura da camada de grão de até 0,5 m devido à dificuldade de secagem, podendo levar a elevados gradientes térmicos e de gradientes de umidade que são prejudiciais à qualidade final do produto;
- Maiores vazões específicas de massa do ar proporcionam redução no tempo de secagem, de acordo com os dados obtidos através das vazões específicas de massa do ar de 0,22 kg/m²s, 0,44 kg/m²s e 0,88 kg/m²s.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

- Modelar matematicamente a secagem de sólidos em outros tipos de secadores;
- Aplicar a metodologia desenvolvida neste trabalho, à simulação da secagem de outros tipos de sólidos;

- Implantar e analisar a utilização de uma fonte de aquecimento para o ar, usando, por exemplo, a energia solar;
- Realizar uma análise econômica do processo de secagem, considerando parâmetros como: altura do leito, temperatura do ar de secagem, umidade relativa do ar, etc.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGRAWAL, Y.C., & SINGH, R.P., 1977, Thin-layer drying studies on short-grain rice, ASAE Paper, No. 77-3531 (St. Joseph, MI, USA).

ASHRAE, Handbook of fundamentals. Am. Soc. Heating, refrigeration and air-conditioning engineers, 1989, New York.

BARRE, H. J., BAUGHMAN, R. & HAMDY, M. Y., Application of the logarithmic model to cross-flow deep-bed grain drying, 1971. Transactions of the ASAE, p. 1061-1064.

BROOKER, D.B. Mathematical model of psychrometric chart, 1967. Transaction. ASAE p. 558-560.

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

BUNYAWANICHKUL, P., WALKER, G.J, SARGISON, J.E. & DOE, P.E. Modelling and simulation of paddy grain (rice) drying in a sample pneumatic dryer. Biosystems Engineering, 2007, p 335-344.

CENKOWSKI, S., JAYAS, D. S. & PABIS, S., Deep-bed grain drying - a review of particular theories, 1993, Drying Technology, vol. 11, p. 1553-1581.

CHANDRA, P.K. & SINGH, R.P., (1995). Applied numerical methods for food and agricultural engineers. (CRC Press, Boca Raton, FL), p. 163–167

CHANG, T.T.; BARDENAS, E.A. The morphology and varietal characteristics of the rice plant. Los Baños: IRRI, 1965. 40p.(IRRI. Technical Bulletin, 4).

CHHINMAN, M.S., 1984, Evaluation of selected mathematical models for describing thin layer drying of in-shell pecans. Trans ASAE, 27: 610–615.

CIHAN, A. KAHVECI, K. & HACIHAFIZOGLU, O. Modelling of intermittent drying of thin-layer rough rice, 2007. Food Engineering, p 293-298.

COSTA, E. C. Secagem industrial, 2007. 196 p. Editora: Edgard Blucher.

DALPASQUALE, V.A., SPERANDIO, D., MONKEN E SILVA, L.H. & KOLLING, E. Fixed-bed drying simulation of agricultural products using a new backward finite difference scheme, 2008. *Applied Mathematics and Computation*, p 590–595.

DE PADUA, D.B. Requirements for drying high moisture content grain in Southeast Asia, preserving grain quality by aeration and in-store drying. *Proceedings of International Seminar*, 1985, p 58-69, Kuala Lumpur, Malaysia.

DIAMANTE, L.M. & MUNRO, P.A., 1993, Mathematical modelling of the thin layer solar drying of sweet potato slices. *Solar Energy*, vol. 51, p. 271–276. Doymaz, I., 2007,

DISCROLL, R. H. & ADANEZQAQ, T., Drying systems for the humid tropics, bulk handling and storage of grain in humid tropics. *Proceedings of International Seminar*, 1987, p 58-69, Kuala Lumpur, Malaysia.

Disponível em: <http://www.almanaquebrasil.com.br/.../03/sativa.jpg>. Acessado em: 10 de agosto de 2010.

Disponível em: <http://www.iapar.br/arquivos/Image/Arroz1.JPG>. Acessado em: 10 de agosto de 2010.

Disponível em: <http://www.agricultura.gov.br/>. Acessado em: 20 de dezembro de 2009.

Disponível em: <http://www.embrapa.gov.br/>. Acessado em: 20 de dezembro de 2009.

Disponível em: <http://www.conab.gov.br/>. Acessado em: 20 de dezembro de 2009.

Disponível em: <http://www.arroz.agr.br/site/estatisticas/index.php>. Acessado em: 15 de janeiro de 2010.

FAGERIA, N.K.; BARBOSA FILHO, M.P.; GARBER, M.J. Nível ótimo de nutrientes e densidade de plantio de arroz para experimentos em casa de vegetação. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, vol.17, n.9, p.1279-1284, 1982b.

FONTANA, C., Concurrent flow versus conventional drying of rice, 1983. *Michigan State University*, East Lansing, Michigan.

FORTES, M. & OKOS, M. R. Drying theories: their bases and limitations as applied to foods and grains, *Advances in drying*. Washington: Hemisphere Publishing Corporation 1980, Chapter Five: p.119-154.

GHOSH, P.K., JAYAS, D.S & AGRAWAL, Y. C., Drying of oilseeds – a review. In: *Recent Research Developments in Crop Science*, p. 71-96.

GHOSH, P.K., JAYAS, D.S., SMITH, E.A., GRUWEL, M.L.H., WHITE, N.D.G. & ZHILKIN, P.A. Mathematical modelling of wheat kernel drying with input from moisture movement studies using magnetic resonance imaging (MRI), Part I: Model development and comparison with MRI observations. *Biosystems Engineering*, 2008.

GINER, S.A. BRUCE, D.M. Two-dimensional model of steady-state mixed-flow grains drying. Part 1: The model. *Journal of Agricultural Engineering Research*, vol. 71, p 37-50.

GUIMARÃES, C.M.; CASTRO, da M. de; MORAIS, O.P.; STONE, L.F. Cultivares tradicionais e melhoradas de arroz de terras altas: características morfológicas do sistema radicular. In: Congresso da Cadeia Produtiva de Arroz, 1.; Reunião Nacional de Pesquisa de arroz, 7., 2002, Florianópolis. Anais... Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2002.

HACIHAFIZOGLU, O., CIHAN, A. & KAHVECI, K. Mathematical modelling of drying of thin layer rough rice, 2008. *Food and Bioproducts Processing*, p 268–275.

HACIHAFIZOGLU, O., CIHAN, A., KAHVECI, K. & LIMA, A.G.B. A liquid diffusion model for thin-layer drying of rough rice. *European Food Research and Technology*, 2007.

HALL, C.W., Reviews on drying. *Drying Technology*, 2007, p 19-28.

HENDERSON, S.M., 1974, Progress in developing the thin-layer drying equation. *Trans ASAE*, 17: 1167–1168.

HOLANDA, P. R. H. Secador para casulos do bicho-da-seda: desenvolvimento, simulação e experimentação. Campina Grande-PB, 2007. 161 p. (Tese de doutorado em Engenharia de Processos / UFCG-PB).

INCROPERA, F.P.; DE WITT, D.P. Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa. 4ª ed. Rio de Janeiro: Editora Guanabara LTC. 1998. 492p.

ISLAM, M. & JINDAL, V. K., Simulation of paddy drying under tropical conditions. *AMA* 1981, 12 (3), p. 37-41.

IZADIFAR, M., BAIK, O. D. & SIMONSON, C. J., Modeling of the packed bed drying of paddy Rice using the local volume averaging (LVA) approach, 2006, *Food Research International*, 39, p. 721-720.

JANJAI, M. P., LAMLERT, N., MAHAYOTHEE, B., BALA, B.K., NAGLE, M., MÜLLER, J. Thin-layer drying of litchi (*Litchi chinensis* Sonn.), 2010. *Food and Bioproducts Processing*.

JAYAS, D. S., CENKOWSKI, S., PABIS, S. & MUIR, W. E. Review of thin-layer drying and rewetting equations. *Drying Technology*, 1991, vol. 9, n. 3, p.551-588.

JULIANO, B.O. Rice starch: production, properties and uses.

KAMEOKA, T., HOSOKAWA, A. & MORISHIMA, H., Simulation of heat and mass transfer during through-drying process, 1986, Tokyo-Japan, 113.

KASSEM, A.S., 1998, Comparative studies on thin layer drying models for wheat, In *Proceedings of the 13th International Congress on Agricultural Engineering*, vol. 6

LIMA, A.G.B. Estudo da secagem e dimensionamento de secador de casulos do bicho-da-seda. Campina Grande-PB, 1995. 190 p. (Dissertação de mestrado em Engenharia Mecânica – Departamento de Engenharia Mecânica/ UFCG-PB).

MALISKA, C.R., Transferência de calor e mecânica dos fluidos computacional, 2004. 2ª ed., editora: LTC.

MIDILLI, A., KUÇUKA, H. & YAPAR, Z., 2002, A new model for single layer drying. Dry Technol, 20(7): 1503–1513.

MIKETINAC, M.J., SOKHANSANJ, S. & TUTEK, Z. Determination of heat and mass transfer coefficients in thin layer drying of grain, 1992. Transaction of the ASAE, p 1853-1858.

MORITA, T. & SINGH, R.P. Physical and thermal properties of short-grain rough rice, 1977. Soc. Agr. Eng., St. Joseph, Michigan.

MUMJUMDAR, A. S., Mujumdar's practical guide to industrial drying – Principles, equipment and new developments, 1995.

NOVAES, T.L.C.C. Simulação numérica da secagem de casulos do bicho-da-seda em secador de leito fixo. Campina Grande-PB, 2005, 78 p. (Trabalho de conclusão de curso – Engenharia Mecânica/UFCG-PB).

O'CALLAGHAN, J.R., MENZIES, D.J. & BAILEY, P.H., 1971, Digital simulation of agricultural dryer performance. Journal Agric Eng Res, 16(3): 223–244.

ONDIER, G.O., SIEBENMORGEN, T.J. & MAUROMOUSTAKOS, A. Low-temperature, low-relative humidity drying of rough rice, 2010. Journal of Food Engineering, p 545–550.

PABIS, S. JAYAS, D. S. & WHITE, N. D. G., Grain drying: a review, 1998, Sciences des Aliments, vol. 23, p. 589-622.

PAKOWSKI, Z., BARTCZAK, Z., STRUMILLO, C. & STENSTROM, S., Evaluation of equations approximating thermodynamics and transport properties of water, steam and air for use in CAD of drying processes, 1991. Drying technology – An International journal, vol. 9, p. 753-773.

PAKOWSKI, Z., MUJUMDAR, A. S., Basic process calculations in drying, 1995. Handbook of Industrial Drying, 2nd. Ed., Marcel Dekker, New York, p 71-112.

PARDE, S., JAYAS, D.S., WHITE, N.D.G. Grain drying: a review. Sciences Aliments, 2003, p 589-622.

PARTI, M. Evaluation of selected mathematical models for grain drying. In: International drying symposium (IDS'90/CHISA'90), 1990, Praha: Proceedings, 1990, vol.3, p.53-162.

PATANKAR, S. V. Numerical heat transfer and fluid flow, New York: Hemisphere Publishing Corporation, 1980, 197 p.

PEREIRA, R.F., SANTIAGO, D.C., HOLANDA, P.R.H. & LIMA, A.G.B., Drying of grains in conveyor dryer and cross flow: a numerical solution using finite volume method. *Revista Brasileira de Produtos Industriais*, Campina Grande-PB, 2004, 16 p, vol. 6.

RAPUSAS, R. S. & DRISCOLL, R. H. The thin-layer drying characteristics of white onion slices, 1995. *Drying Technology*, vol. 13, n. 8-9, p. 1905-1931.

RUIZ-LÓPEZ, I.I., MARTÍNEZ-SÁNCHEZ, C.E., COBOS-VIVALDO, R. & HERMAN-LARA, E. Mathematical modeling and simulation of batch drying of foods in fixed beds with airflow reversal, 2008. *Journal of Food Engineering*, p 310–318

RUMSEY, T.R. & ROVEDO, C.O. Two-dimensional simulation model for dynamic cross-flow rice drying. *Chemical Engineering and Processing*, 1998, vol. 40, p 355-362.

SARAVACOS, G. D., Mass transfer properties of foods. *Engineering properties of foods*. New York, Marcel Dekker, 1995, chapter 2, p. 169-221.

SHARAF-ELDEN, Y.I., BLAISDELL, J.L. & HAMDY, M.Y., 1980, A model of ear corn drying. *Trans ASAE*, 5: 1261–1265.

SILVA, J.S., AFONSO, A.D.L. & DONZELES, S.M.L, *Secagem e Armazenamento de Produtos Agrícolas*, 2000. Editora: LTC.

SIMMONDS, W. H. C., WARD, G. T. & MCEWEN, E., The drying of wheat grain, part I: the mechanism of drying, 1953. *Transactions of the Institute of Chemical Engineers*, vol. 31, p. 265-278.

SRIVASTAVA, V.K. & JONH, J. Deep bed grain drying modeling. *Energy Conversion and Management*, 2002, vol. 43, p 1689-1708.

STEFFE, J. F. & SINGH, R. P. Liquid diffusivity of rough rice components. *Transactions of the ASAE*, 1980, vol. 23, n. 3, p. 767-774.

STRUMILLO, C. & KUDRA, T. *Drying: principles, science and design*. New York: Gordon and Breach Science Publishers, 1986, 448 p.

TANAKA, K.; YOSHIDA, T.; ASADA, K. & KASAI, Z. Subcellular particles isolated from aleurone layer of rice seeds. *Archives on Biochemistry and Biophysics*, New York, v.155, p.136-143, 1973.

VARNAMKHAISTI, M.G., MOBLI, H., JAFARI, A., KEYHANI, A.R., SOLTANABADI, M.H., RAFIEE, S. & KHEIRALIPOUR, K. Some physical properties of rough rice (*Oryza Sativa* L.) grain, 2008. *Journal of Cereal Science*, vol. 47, p. 496-50.

VERGARA, B.S. *A farming's primer on growing*. Los Baños: IRRI, 1979. 221p. VERGARA, B.S. Plant growth and development. In: UNIVERSITY OF THE PHILIPPINES. *Rice production manual*. Laguna, 1970. p.17-37.

VERGARA, B.S. Rice plant growth and development. In: LUH, B.S. (ed.). *Rice: production and utilization*. Davis: Avi, 1980. p.75- 85.

VERMA, L.R., BUCKLIN, R.A., ENDAN, J.B. & WRATTEN, F.T., 1985, Effects of drying air parameters on rice drying models. Trans. ASAE, 296–301.

VIEIRA, N.R. de A. & CARVALHO, J.L.V. de. Qualidade tecnológica. In: VIEIRA, N.R. de A.; SANTOS, A.B. dos; SANTANA, E.P. (ed.). A cultura do arroz no Brasil. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 1999. p.582-604.

WANG, C. Y. & SINGH, R. P. A single-layer drying equation for rough rice, 1978. Am. Soc. Agr. Eng., St. Joseph, Michigan.

WRATTEN, F. T. D., POOLE, J. L., CHESNESS, S. B. & RAMARAO, V. Physical and thermal properties of rough rice, 1969. Trans. ASAE p. 801-803.

YOSHIDA, S. Fundamentals of rice crop science. Los Baños: IRRI, 1981. 269p.

ZARE, D., MINAEI, S., ZADEH, M.M. & KHOSHTAGHAZA, M.H. Computer simulation of rough rice drying in a batch dryer, 2006. Energy Conversion and Management, vol. 47, Issues 18-19, p. 3241-3254.

ZURITZ, C. R. & SINGH, R. P. An equation to compute the heat of evaporation of water for rough rice during drying, 1985. Drying Technology., p. 421-435.