

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

**SECADOR PARA CASULOS DO
BICHO-DA-SEDA:
DESENVOLVIMENTO, SIMULAÇÃO E
EXPERIMENTAÇÃO**

**Autor: Pedro Ronaldo Herculano de Holanda
Orientador: Antonio Gilson Barbosa de Lima**

**Campina Grande, março de 2007
PB - Brasil**

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

**SECADOR PARA CASULOS DO
BICHO-DA-SEDA:
DESENVOLVIMENTO, SIMULAÇÃO E
EXPERIMENTAÇÃO**

**Autor: Pedro Ronaldo Herculano de Holanda
Orientador: Antonio Gilson Barbosa de Lima**

**Curso: Doutorado em Engenharia de Processos
Área de Concentração: Desenvolvimento de Processos**

Tese apresentada ao Programa de Doutorado em Engenharia de Processos, como requisito para a obtenção do título de Doutor em Engenharia de Processos.

**Campina Grande, março de 2007
PB – Brasil**

**DIGITALIZAÇÃO:
SISTEMOTECA - UFCG**

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

H722s

2007 Holanda, Pedro Ronaldo Herculano de.

Secador para casulos do bicho-da-seda: desenvolvimento, simulação e experimentação / Pedro Ronaldo Herculano de Holanda. — Campina Grande: 2007.

161f. : il.

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

Referências.

Orientador: Antonio Gilson Barbosa de Lima.

1. Bicho-da-Seda. 2. Secagem. 3. Secador. 4. Casulo. 5. Experimentação 6. Simulação. I. Título.

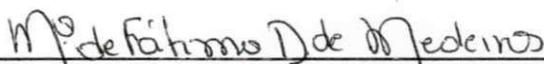
CDU 638.2:66.047

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA TESE DE DOUTORADO DE **PEDRO RONALDO HERCULANO DE HOLANDA** APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PROCESSOS DO CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE.

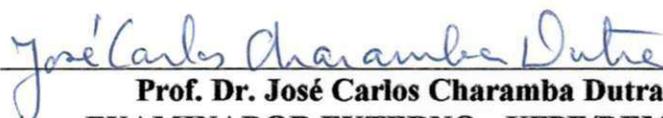
Tese de Doutorado **Aprovada com distinção** em 26 de Março de 2007.



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



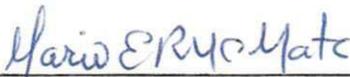
Profa. Dra. Maria de Fátima Dantas de Medeiros
EXAMINADORA EXTERNA - UFRN/DEQ



Prof. Dr. José Carlos Charamba Dutra
EXAMINADOR EXTERNO - UFPE/DEMEC



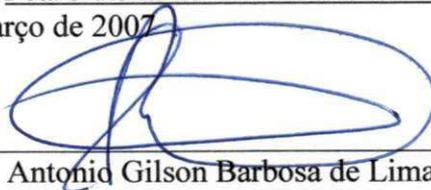
Prof. Dr. Francisco de Assis de Brito
EXAMINADOR EXTERNO - UFCG/UAFA



Prof. Dr. Mário Eduardo Rangel Moreira Cavalcanti Mata
EXAMINADOR INTERNO- UFCG/UAEAg

Campina Grande, Março de 2007.
PB, Brasil

Este exemplar corresponde à versão final da Tese de Doutorado em Engenharia de Processos, defendida por Pedro Ronaldo Herculano de Holanda e aprovada pela banca examinadora em 26 de março de 2007.

A handwritten signature in blue ink, consisting of several overlapping loops and a long horizontal stroke, positioned above a horizontal line.

Prof.Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima (Orientador)
UFCG/CCT/UAEM

DEDICATÓRIA

À minha esposa, Cléa Brasileiro de Holanda e às minhas filhas, Luciana Brasileiro de Holanda e Viviane Brasileiro de Holanda.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente ao meu orientador Prof. Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima, pelo empenho, orientação e incentivo, sem os quais não teria sido possível a conclusão desse trabalho.

À Coordenadora do curso de Doutorado em Engenharia de Processos, Prof^ª. Dr^ª. Odélsia Leonor S. de Alsina, por sua atenção e incentivo.

Ao Prof. Msc. Yoge Jerônimo Ramos da Costa, pelo incentivo, dedicação e ajuda nos instantes finais da conclusão desse trabalho.

Ao Prof. Dr. Mário Eduardo Rangel Moreira Cavalcanti Mata, pelo bom atendimento à mim dispensado nos momentos de dúvidas.

Ao Prof. Msc. João Baptista da Costa Agra de Melo, pela ajuda na compactação dos meus horários didáticos no período de sua coordenação.

Ao Prof. Msc. Erinaldo Clemente dos Santos, por sua atenção e incentivo no seu período de chefia do DEM.

Aos demais professores que ajudaram de forma direta ou indireta ao longo desse trabalho.

"Escolha um trabalho que tu ames,
e não terás que trabalhar
um único dia em tua vida."

Confúcio

SUMÁRIO

1. Introdução	1
2. Revisão da literatura	3
2.1 A sericicultura	3
2.2 Aspectos mercadológico de seda e fio de seda	4
2.2.1 No mundo	4
2.2.2 No Brasil	5
2.3 Casulos do bicho-da-seda: aspectos científicos e tecnológicos	12
2.3.1 Aspectos científicos	12
2.3.2 Aspectos tecnológicos da secagem de casulos do bicho-da-seda	20
2.3.2.1 Processo de secagem	20
2.3.2.2 A secagem de casulos	21
2.4 Modelos matemáticos de secagem	28
2.4.1 Camada fina	28
2.4.1.1 Modelos empíricos e semi-empíricos	29
2.4.1.2 Modelos difusivos	31
2.4.2 Camada espessa	32
2.4.2.1 Modelo da Universidade Estadual de Michigan	32
2.4.2.2 Outros modelos	40

3	Metodologia	48
3.1	Modelagem matemática	48
3.1.2	Solução numérica	54
3.2	Procedimento experimental	57
3.2.1	Aspectos construtivos e funcionamento do secador	57
3.2.1.1	Projeto e construção do secador	57
3.2.2	Procedimento experimental	90
3.2.3	Princípio de funcionamento, controle e segurança do secador	99
4	Resultados e discussões	101
4.1	Validação	101
4.2	Resultados experimentais	106
4.2.1	Teste de desempenho do secador	106
4.2.1.1	Teste para escolha do aquecedor	106
4.2.1.2	Testes para determinação da vazão de ar	109
4.2.1.3	Testes para avaliação da performance do sistema de aquecimento	113
4.2.2	Aspectos técnico e econômico do secador desenvolvido	117
4.2.2.1	Secagem uniforme	117
4.2.2.2	Baixa vibração durante o transporte de produtos	117
4.2.2.3	Custo inicial de investimento e de manutenção	118
4.2.2.4	Espaço físico	118
4.2.2.5	Manutenção, operação e transporte	119
4.2.2.6	Isolação Térmica	119
5	Conclusões e Sugestões	120
5.1	Conclusões	120

5.2 Sugestões para trabalhos futuros	122
Referências bibliográficas	123
Anexos	138

RESUMO

HOLANDA, Pedro Ronaldo Herculano de, *Secador para Casulos do Bicho-da-Seda: Desenvolvimento, Simulação e Experimentação*. Campina Grande: Doutorado em Engenharia de Processos, Universidade Federal de Campina Grande, 2007. 161 p. Tese (Doutorado).

A cultura do bicho-da-seda (Sericultura), é uma atividade em fase de desenvolvimento no mundo inteiro, gerando emprego, renda agrícola e intercâmbio comercial. O casulo produzido pelo bicho-da-seda é constituído de casca, crisálida e espólio, sendo a casca constituída basicamente por sericina e fibroina. Devido ao alto teor de umidade (68 a 70%, em base úmida) e o curto ciclo de vida da crisálida (4 a 5 dias depois da colheita), é necessário que o casulo seja submetido ao processo de secagem, com a finalidade de ser armazenado com baixo teor de umidade (10 a 12% b.s), para posteriormente ser utilizado na Indústria de fiação, onde é transformado em produtos de alto valor comercial. Nesse sentido, esse trabalho tem como objetivo o projeto, a construção e a experimentação de um secador (tipo esteira com fluxos cruzados) e simulação da secagem de casulos do bicho-da-seda. São referenciados aspectos construtivos, funcionamento do secador e uma modelagem matemática para descrever as trocas de energia e massa entre o produto e o ar de secagem no interior do secador. As equações matemáticas foram resolvidas numericamente usando o método de volumes finitos. Resultados do desempenho de componentes do secador experimental e da secagem do casulo (simulada) são discutidos e analisados. Verificou-se que o teor de água do produto, no processo de secagem depende fortemente da temperatura, levemente da espessura da camada de casulos e praticamente independe da velocidade do ar de secagem. O secador desenvolvido tem as seguintes vantagens: versatilidade, baixo custo de construção, totalmente desmontável, boa mobilidade e esteiras controladas eletronicamente.

Palavras-chave: bicho-da-seda, secagem, secador, casulo, experimentação, simulação.

ABSTRACT

HOLANDA, Pedro Ronaldo Herculano de, Dryer for Cocoons of the Silkworm: Development, Simulation and Experimentation. Campina Grande: Doutorado em Engenharia de Processos, Universidade Federal de Campina Grande, 2007. 161 p. Tese (Doutorado).

The culture of the silkworm (sericulture) is an activity in development in all the world generating job, agricultural financial support and commercial exchange. Shell, chrysalis and booty constitute the cocoon produced by *Bombix mori* L. The shell is composed of fibroin and sericin. The cocoon has high initial moisture content (68 – 70% w. b.) and a the chrysalis has a low life cycle (4 – 5 days after harvested). Then, it needs to be submitted to the drying process and to be stored at low moisture content (10 – 12% d. b.) and after it needs to be marketed to produce silk yarns, which are used on the manufacturing of high cost products. In this sense, the goal of this work is to design, to make and to test a cross flow band conveyon dryer and to simulate silk worm cocoon drying.

Building and working aspect of the dryer and mathematical modeling to describe heat and mans transfer between air and product inside the dryer are reported. The mathematical equation are solved numerically using the finite volume method. Results of the performance of the experimental dryer and cocoon drying (simulated) are presented and analyzed. From the results it was verified that during of the drying process, the moisture content of the cocoon depends strongly of the air temperature, slightly of the cocoon layer thinkness and it is almost affected by air flow rate.

The following advantages of the dryer can be cited versatility, low costoff the building, many easy to pieces, good mobility and electronic control of the wire net.

Keywords: silkworm, drying, dryer, cocoon, experimentation, simulation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Produção mundial de casulos verdes no período 2000/02	5
Figura 2.2	Produção brasileira de casulos verdes por ano de safra	6
Figura 2.3	Produção brasileira de casulos verdes por empresa	7
Figura 2.4	Produção brasileira de casulos verdes por estado	7
Figura 2.5	Produção brasileira anual de fios de seda	8
Figura 2.6	Vendas de resíduos de seda	9
Figura 2.7	Quantidade de seda brasileira por continente importador no ano de 2004	10
Figura 2.8	Fios de seda torcidos e grégia exportados para os países dos continentes	11
Figura 2.9	Ciclo vital do bicho-da-seda	13
Figura 2.10	Mariposa saindo do casulo	13
Figura 2.11	Bicho da seda adulto	14
Figura 2.12	Bicho-da-seda fiando a) Iniciando a fiação. b) Casulo suportado pela anafia	14
Figura 2.13	Formas dos casulos do bicho-da-seda a) Cinturada; b) Poteaguuda; c) Oval ou elipsoidal; d) Irregular	15
Figura 2.14	Casulos melhorados devido o cruzamento de raças.	15
Figura 2.15	Vista de um casulo seccionado	17
Figura 2.16	Curva de absorção e dessorção da seda Tasar á 25°C	18
Figura 2.17	Volume elementar de uma camada de produtos	33
Figura 2.18	Esquema do volume de controle diferencial	40
Figura 2.19	Camada elementar de um leito granular	44
Figura 3.1	Representação esquemática do secador tipo esteira com fluxos cruzados	49
Figura 3.2	Esquema da camada de sólido em um secador tipo esteira com fluxos cruzados	49
Figura 3.3	Fração do volume de sólido na camada	49
Figura 3.4	Esquema numérico e o volume de controle utilizados	54
Figura 3.5	Malha com 20 pontos nodais	57
Figura 3.6	a) Disposição dos rodízios na base do secador b) Rodízio esquerdo frontal na base	58
Figura 3.7	Viga “U” enrijecida	59
Figura 3.8	Sub-módulo construído com viga “U” enrijecida e detalhes de acoplamento	59
Figura 3.9	Elementos de fixação/apoio do chassi	60
Figura 3.10	a) Módulo inferior do secador. b) Interior da câmara central; vista do apoio do chassi	61
Figura 3.11	Estrutura do secador com os três módulos sobrepostos	61
Figura 3.12	Vista superior do módulo do secador	61
Figura 3.13	Vistas do secador; a) lateral esquerda; b) lateral direita	61

Figura 3.14 Chassi móvel completo com todos os rolos	63
Figura 3.15 a) Cubo traseiro de bicicleta; b) Rolo tractor 75mm com cubo inserido	64
Figura 3.16 Rolo intermediário 50mm, a) vista frontal; b) vista em ângulo	64
Figura 3.17 Cubo dianteiro de bicicleta semi-inserido no tubo de 50mm	65
Figura 3.18 Detalhe de sustentação no chassi do rolo de 50mm com cubo	65
Figura 3.19 Relação de tamanho entre o casulo, milho, feijão e lentilha	65
Figura 3.20 a) Esteira convencional; b) Convencional seccional; c) Esteira balanceada	66
Figura 3.21 Peças que compõem o sistema de acionamento da esteira	68
Figura 3.22 Conjunto de acionamento, mola, catraca, circuito e solenoide	68
Figura 3.23 Circuito do acionador da esteira	69
Figura 3.24 Aspecto físico do Transistor de Efeito de Campo (FET)	69
Figura 3.25 Aquecedor de ar com resistências blindadas	70
Figura 3.26 Resistência blindada 1000W; Resistências tipo estufa 1000W e 600W	70
Figura 3.27 Aparato para teste a) Resistência blindada. b) Resistência estufa	71
Figura 3.28 a) Suporte das resistências, vista lateral. b) vista frontal	72
Figura 3.29 Resistência com regiões incandescentes	72
Figura 3.30 a) Conjunto de módulos montados; b) conjunto desmontado	73
Figura 3.31 Esquema elétrico dos aquecedores de ar	73
Figura 3.32 Resistências incandescentes com fio resistivo tendendo à brilhante	74
Figura 3.33 Aspecto físico do NE555	74
Figura 3.34 Simulação de carga e descarga de um capacitor	75
Figura 3.35 Esquema do C.I. 555 em operação estável	75
Figura 3.36 a) Forma de onda da carga; b) Forma de onda da descarga	76
Figura 3.37 Controle de um semáforo	77
Figura 3.38 Resultado da saída no circuito da Figura 3.36	78
Figura 3.39 Formas de onda dos sinais de entrada e saídas	79
Figura 3.40 Circuito Integrado CD4017BCN	79
Figura 3.41 Plano de identificação dos diodos que direcionam os sinais de saída	80
Figura 3.42 a) Transistor bipolar b) Acoplador ótico	80
Figura 3.43 Aspecto físico do Triac de potência BT137600E	81
Figura 3.44 Desenho esquemático do circuito de controle desenvolvido pelo autor	82
Figura 3.45 Circuito de lâmpadas no segundo passo sequencial	83
Figura 3.46 Circuito lógico de controle em placa experimental em funcionamento	83
Figura 3.47 Circuito lógico de controle em placa experimental	84
Figura 3.48 Painel de lã de vidro PSI-60	85
Figura 3.49 Ventilador helicoidal	86
Figura 3.50 Ventilador tubo axial	86
Figura 3.51 Ventilador radial	86
Figura 3.52 a) Ventilador e duto. b) Duto com resistências pronto para receber o ventilador	89
Figura 3.53 a) Acoplamento do duto cilíndrico com o prismático. b) Duto prismático onde pode-se ver as inclinações e as entradas de ar quente para a câmara de secagem	89
Figura 3.54 a) Vista superior do duto prismático. b) Vista anterior da curvatura final	89
Figura 3.55 a) Vista posterior da curvatura final. b) Vista geral do conjunto de insuflação e aquecimento	90
Figura 3.56 Termopares no interior da câmara de secagem, entre as duas esteiras	90
Figura 3.57 Termopares vistos no exterior da câmara de secagem	91
Figura 3.58 Localizações esquemática dos termopares no interior da câmara (cotas em metros)	91

Figura 3.59 Monitores de tensão da rede, termômetro/chave e monitor de tensão do ventilador	92
Figura 3.60 Painel de controle	92
Figura 3.61 Tacômetro ótico digital	93
Figura 3.62 Instrumentos e pontos de medição do fluxo de ar na entrada do secador	94
Figura 3.63 Medição do fluxo de ar na 1ª saída da câmara	95
Figura 3.64 Valores de r_i , Δr_i , no ventilador	96
Figura 3.65 Representação da câmara de secagem com suas entradas e saídas	97
Figura 3.66 Ordem de acionamento das resistências nos três casos	98
Figura 3.67 Cabinhos submetidos aos testes de temperatura	100
Figura 4.1 Comparação entre os valores numérico e experimental do teor de água médio durante a secagem de casulos para $H = 0,02m$	102
Figura 4.2 Temperatura do ar dentro do leito durante o processo de secagem do casulo	103
Figura 4.3 Temperatura do casulo dentro do leito durante o processo de secagem	103
Figura 4.4 Umidade absoluta do ar dentro do leito ao longo do processo de secagem	104
Figura 4.5 Umidade relativa do ar dentro do leito ao longo do processo de secagem.	105
Figura 4.6 Pressão de vapor dentro do leito ao longo do processo de secagem.	105
Figura 4.7 Resistência paralela à direção do fluxo de ar sem incandescência	108
Figura 4.8 a) Novo modelo de suporte onde as resistências estão radialmente e paralela ao fluxo. b) Suporte com as resistências no duto	108
Figura 4.9 Pontos de incandescência nos centros dos cones	109
Figura 4.10 Conjunto tubo-axial e duto	109
Figura 4.11 Avaliação da velocidade da massa de ar nas três saídas para $n = 1257rpm$	109
Figura 4.12 Avaliação da velocidade da massa de ar nas três saídas para $n = 510rpm$	110
Figura 4.13 Velocidade do ar na entrada do ventilador	111
Figura 4.14 Velocidade média do ar na saída do secador em função da rotação do ventilador	111
Figura 4.15 Rotação do ventilador quando o aquecedor está ligado ou desligado	112
Figura 4.16 Avaliação do desempenho do aquecedor com alimentação intermitente ao longo do tempo	113
Figura 4.17 Curvas de ajuste do desempenho do aquecedor com alimentação intermitente ao longo do tempo	114
Figura 4.18 Comparação do desempenho do aquecedor com alimentação intermitente e constante	115
Figura 4.19 Comparação da energia aproveitada com alimentação intermitente e constante	116
Figura 4.20 Eficiência energética do aquecedor em função da velocidade média do ar na entrada do ventilador	116

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 Composição média dos casulos verdes	16
Tabela 2.2 Composição média do fio de seda bruta	16
Tabela 2.3 Propriedades físicas das fibras naturais	19
Tabela 2.4 Parâmetros de secagem de casulos do bicho da seda	24
Tabela 3.1 Condições do ar e do casulo usados nesse trabalho e comprimento total percorrido pelo casulo dentro do secador	57
Tabela 3.2 Relação de peças do secador	62
Tabela 3.3 Unidades usadas no temporizador 555	76
Tabela 3.4 Saída versus resistências	80
Tabela 3.5 Características técnicas dos ventiladores testados	88
Tabela 3.6 Características técnicas do ventilador comercial ARGE	88
Tabela 4.1 Experimento com convecção natural	107
Tabela 4.2 Experimento com convecção forçada	107
Tabela 4.3 Parâmetros da Equação de ajuste das curvas da Figura 4.17	114

NOMENCLATURA

Letras latinas

A^*	Área específica	$[m^2/m^3]$
c	Calor específico	$[J/kgK]$
c_a	Calor específico do ar seco à pressão constante	$[J/kgK]$
c_{as}	Calor específico do ar seco	$[J/kgK]$
c_p	Calor específico do produto	$[J/kgK]$
c_v	Calor específico do vapor d'água à pressão constante.	$[J/kgK]$
c_w	Calor específico da água	$[J/kgK]$
C	Capacitância	$[F]$
$d\bar{M}/dt, \partial\bar{M}/\partial t$	Taxa de difusão	$[kg/kg/s]$
D	Coefficiente de difusão	$[m^2/s]$
D^*	Difusividade do ar	$[m^2/s]$
D_{va}	Coefficiente de difusão do vapor no ar	$[m^2/s]$
D_v	Coefficiente de difusão do vapor	$[m^2/s]$
D_{wa}	Coefficiente de difusão de água no ar	$[m^2/s]$
f_1, f_2, f_3, f_4	Equação da camada fina apropriada	$[-]$
\hat{f}	Frequência	$[Hz]$
G_a	Fluxo de massa do ar	$[kg/m^2s]$
H	Espessura da camada de produto	$[m]$
h_c	Coefficiente de transferência de calor por convecção	$[W/m^2K]$
h^*_{fg}	Calor latente de vaporização da água do produto	$[J/kg]$
I	Corrente elétrica	$[A]$
k	Condutividade térmica	$[W/m^2K]$
k_a	Condutividade térmica do ar	$W/m^2 K]$
k_{ep}	Condutividade térmica efetiva do produto	$[W/m^2K]$
k_p	Coefficiente de condutividade térmica do produto	$[W/m^2K]$
\dot{m}	Fluxo de massa	$[kg/s]$

\bar{M}	Teor de umidade médio	[kg/kg]
\bar{M}_e	Teor de umidade de equilíbrio	[kg/kg]
\bar{M}_o	Teor de umidade inicial	[kg/kg]
\bar{M}^*	Razão de umidade média	[kg/kg]
m_{ps}	Massa do produto seco	[kg]
P	Pressão	[Pa]
\dot{Q}	Quantidade de calor	[J]
\hat{R}	Raio do ventilador	[m]
R	Resistência	[ohm]
S	Área de troca de calor	[m ²]
T	Temperatura do ar	[°C]
t	Tempo	[s]
UR	Umidade relativa do ar	[%]
V	Tensão elétrica	[V]
n	Rotação do ventilador	[rpm]
\hat{n}	Número de rodizio	[-]
\bar{w}	Velocidade média do ar	[m/s]
\dot{W}	Potencia elétrica	[W]
w_a	Velocidade do ar	[m/s]
u_p	Velocidade do produto	[m/s]
x	Razão de umidade do ar	[kg/kg]
x_{af}	Razão de umidade do ar, final	[kg/kg]
x_{ao}	Razão de umidade do ar, inicial	[kg/kg]
x_{sat}	Razão de umidade do ar saturado	[kg/kg]
x_f	Razão de umidade final do ar	[kg/kg]
x_o	Razão de umidade inicial do ar	[kg/kg]
y	Posição ao longo da camada de produto	[m]
$\Delta\bar{H}_{dv}$	Calor isostérico médio	[J/kg]

Letras gregas

ρ_p	Densidade do produto	[kg/m ³]
ρ_a	Densidade do ar	[kg/m ³]
θ	Temperatura do produto	[°C]
$\bar{\theta}$	Temperatura média do produto	[°C]
θ_f	Temperatura final do produto	[°C]
η	Eficiência	[%]
τ	Período de temporização	[s]
ε	Porosidade do leito	[decimal]
σ	Coefficiente de tortuosidade	[decimal]

Superescrito

* adimensional
o anterior

Subescrito

a ar
abs absoluta
aq aquecedor
c convecção
e equilíbrio
f final
m massa
o inicial
p produto
s seco
sat saturado
v vapor
w água

CAPITULO 1

INTRODUÇÃO

O inseto bicho-da-seda pertencente à espécie *Bombyx mori L.*, é explorado pelo homem há milênios, sendo essa exploração conhecida como sericicultura. Essa atividade inicia-se com o acasalamento das mariposas, seguido dos ovos e conseqüentemente a evolução para larvas. Dos quatro estágios do bicho-da-seda, isto é: ovo, larva, crisálida e mariposa, para o sericultor a criação se processa no estágio de larva, o mais importante, seguido da secagem que é realizada no terceiro estágio. Durante a criação, o bicho-da-seda alimenta-se exclusivamente de folhas da amoreira. Quando a larva atinge a fase de larva adulta, elas migram para os bosques, estruturas feitas de diversos materiais, tais como: bambu, papelão, plástico, entre outros. Nos bosques, as larvas começam a tecer os casulos que demora de quatro a cinco dias. Novamente, quatro ou cinco dias depois, a crisálida, já mariposa, segrega um muco do estomago com a finalidade de amolecer o casulo, rompê-lo, sair do mesmo e em seguida voar, completando assim o seu ciclo de vida. Se o último ciclo for completado, o fio do casulo torna-se imprestável para fins têxteis. Com a finalidade de aproveitar o fio produzido pelo bicho-da-seda, o último ciclo deve ser interrompido por qualquer processo que venha quebrar a continuidade do ciclo de vida da crisálida. Normalmente é usada a secagem para esse fim. Devido à peculiaridade do casulo, dentre os diversos tipos de secadores existentes, dois se adéquam para esse tipo de secagem, são eles: secador de leito fixo e secador de fluxos cruzados tipo esteira. Esse último é mais usado na área industrial, devido ao processo contínuo, característica desse secador de oferecer maior produtividade. (Fonseca e Fonseca, 1988).

Visando dar uma contribuição à área de secagem e secadores de casulos do bicho-da-seda, esse trabalho constitui uma análise do efeito produzido pelo processo de secagem sobre os casulos do bicho-da-seda, dando ênfase aos problemas causados pela temperatura, fluxo e umidade relativa do ar, espessura da camada de casulos, teor de umidade dos mesmos, na qualidade do fio de seda, no final do processo. Dentre os fatores energéticos citados o calor é o de maior importância, pois deve ser fornecido em um nível certo para matar a crisálida e deixar os casulos em condição de armazenamento. O autor se propõe, em síntese, atingir os seguintes objetivos:

- a) Construir um secador de fluxos cruzados tipo esteira aplicado à secagem dos casulos do bicho-da-seda;
- b) Avaliar o desempenho do secador com ênfase ao aquecimento e fluxo de ar e sua distribuição no interior do mesmo;
- c) Propor uma modelagem matemática para secagem de casulos do bicho-da-seda em um secador de fluxos cruzados tipo esteira com resolução por solução numérica;
- d) Estudar teoricamente o efeito das condições do ar sobre a qualidade do produto durante o processo de secagem;

CAPÍTULO 2

REVISÃO DA LITERATURA

2.1 A sericicultura

A China é considerada a Pátria da seda. Há 4000 anos lá se cria o bicho da seda para a obtenção do fio e confecção de produtos diversos. A seda é produzida principalmente pelas lagartas de certos tipos de mariposas. Distinguem-se os fios de seda produzidos pela lagarta que se alimenta da amoreira e os produzidos por lagartas que se alimentam de plantas silvestres. Esses tipos são as únicas matérias-primas têxteis que a natureza produz já em forma de fio. Durante milênios a fabricação da seda foi um segredo chinês. A sua revelação seria castigada com pena de morte. Era permitido exportar apenas artigos já manufaturados. Chegavam ao Oriente Médio através de caravanas, passando pelo Turquestão Oriental, Pamir e Iran. Esse longo percurso, que durava vários anos, encarecia de tal forma o produto que era vendido ao peso de ouro. Pode-se ver que a seda só poderia e deveria ser usada por gente rica.

No século VI conseguiu-se levar ovos da mariposa da amoreira para Bizâncio. De lá, a criação do bicho da seda e a manufatura do fio espalharam-se pelos países que rodeavam o Mar Mediterrâneo. O Japão teve um extraordinário desenvolvimento, destacando-se também a Síria, seguido pela Arábia, Itália e Espanha.

Com a reativação comercial com a Pérsia, há mais ou menos 2500 anos, e mais tarde com outros países, a exportação de seda grége (combinação de diversos fios babas retirados diretamente dos casulos, formando um fio único, sem torção) e dos tecidos de seda tomou grande importância.

A partir de 1598 a França teve um grande impulso na atividade sericícola com apoio de Henrique IV. Decorridos 250 anos de atividade, a manufatura francesa entrou em declínio, devido a prática de preços abusivos e a ânsia de produzir muito sem cuidar da saúde das larvas, o que acabou provocando doenças que dizimaram os centros produtivos. No Brasil, plantavam-se os primeiros pés de amoreira. Não há registros de fiações nesse período, devido a um tratado assinado por D. Maria I com a Inglaterra, em 1703, estabelecia que Portugal e suas colônias importariam com exclusividade os tecidos ingleses.

No século XIX, D. Pedro I iniciou a implantação da sericicultura no Brasil. Com o apoio de D. Pedro II, a atividade sericícola foi progressivamente alcançando seu desenvolvimento, com a fundação da “Imperial Companhia Seropédica Fluminense”, implantada no município de Itaguaí – RJ. Apesar das amplas instalações da indústria e do grande capital empregado, com o aval de D. Pedro II, o empreendimento fracassou pouco tempo depois, mostrando assim a complexidade da arte de fiar a seda. (Hanada e Watanabe, 1986).

Um desenvolvimento significativo da atividade aconteceu por volta da Segunda Guerra Mundial, mas durou bem pouco tempo. No final da guerra, o Brasil enfrentou uma crise sem precedentes, melhorando na década de 50.(Fonseca e Fonseca, 1988) A partir daí, a sericicultura cresceu consideravelmente, e conseqüentemente a produção de fio e casulos verdes, colocando atualmente o país em quinto lugar na classificação dos maiores produtores de seda do mundo (Figura 2.1).

2.2 Aspectos mercadológico de seda e fio de seda

2.2.1 No mundo

Nos países em que a sericicultura está em fase de desenvolvimento, a indústria sérica é considerada de grande interesse, elevando a taxa de emprego, garantindo renda agrícola compensadora e conseguindo intercâmbio comercial pela exportação de seus produtos.

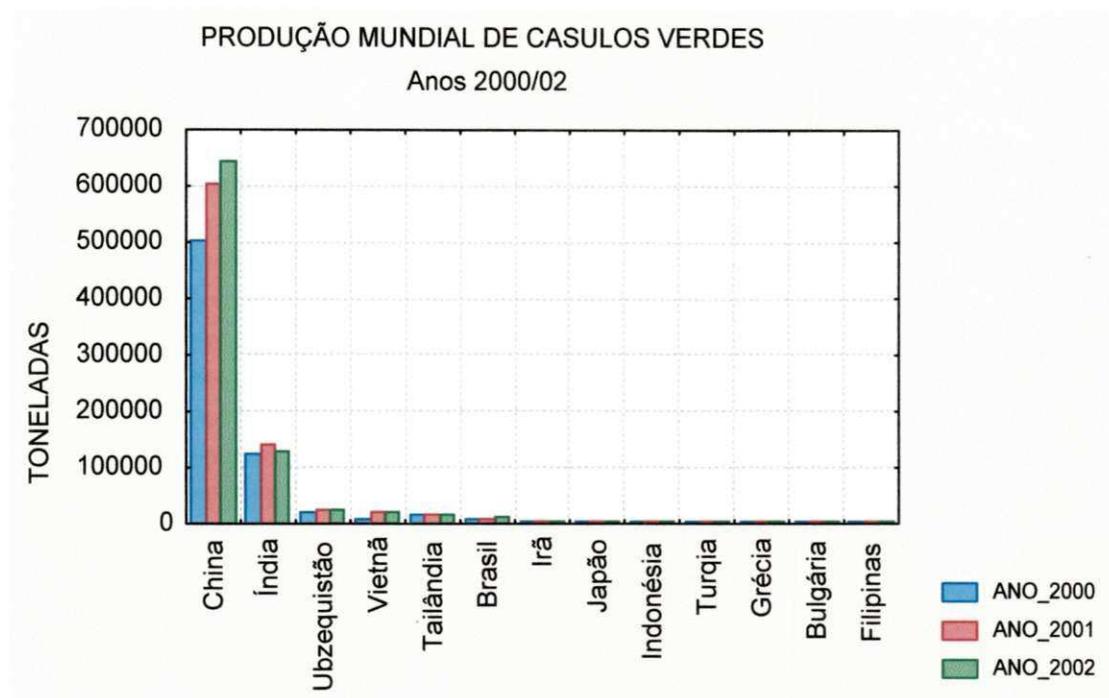


Figura 2.1 - Produção mundial de casulos verdes no período 2000/02.

Fonte: ABRASSEDA (2005)

2.2.2 No Brasil

Atualmente a sericicultura atravessa uma grande baixa na produção, se comparada com as safras 93/94, concentrando suas atividades nos Estados de São Paulo, Paraná e Mato Grosso do Sul. A Figura 2.2 evidencia a produção brasileira de casulos verdes, no período de 1985 a 2005.

De início, no Brasil, a sericicultura caracterizou-se por uma quase total dependência do mercado externo, atravessando fases de grande desenvolvimento, como também de grande depressão. Essas variações foram produzidas basicamente pelas profundas variações de preços dos casulos produzidos, de tal forma que não havia nenhuma uniformidade na expansão da produção de seda. Novas áreas com amoreira foram plantadas e novas regiões produtoras de casulos foram se formando, principalmente nos Estados de São Paulo e Paraná.

Nos últimos anos a produção de seda vem experimentando variações negativas; mesmo assim, com a produção nacional em baixa, o Brasil passou a ocupar o terceiro lugar em exportação de fio de seda, tendo a BRATAC como líder, considerada a maior indústria de fiação de seda do mundo. Atualmente a BRATAC participa com 65% da produção nacional

de fio de seda e 1,90% da produção mundial. Na Figura 2.3 pode-se ver claramente a liderança citada.

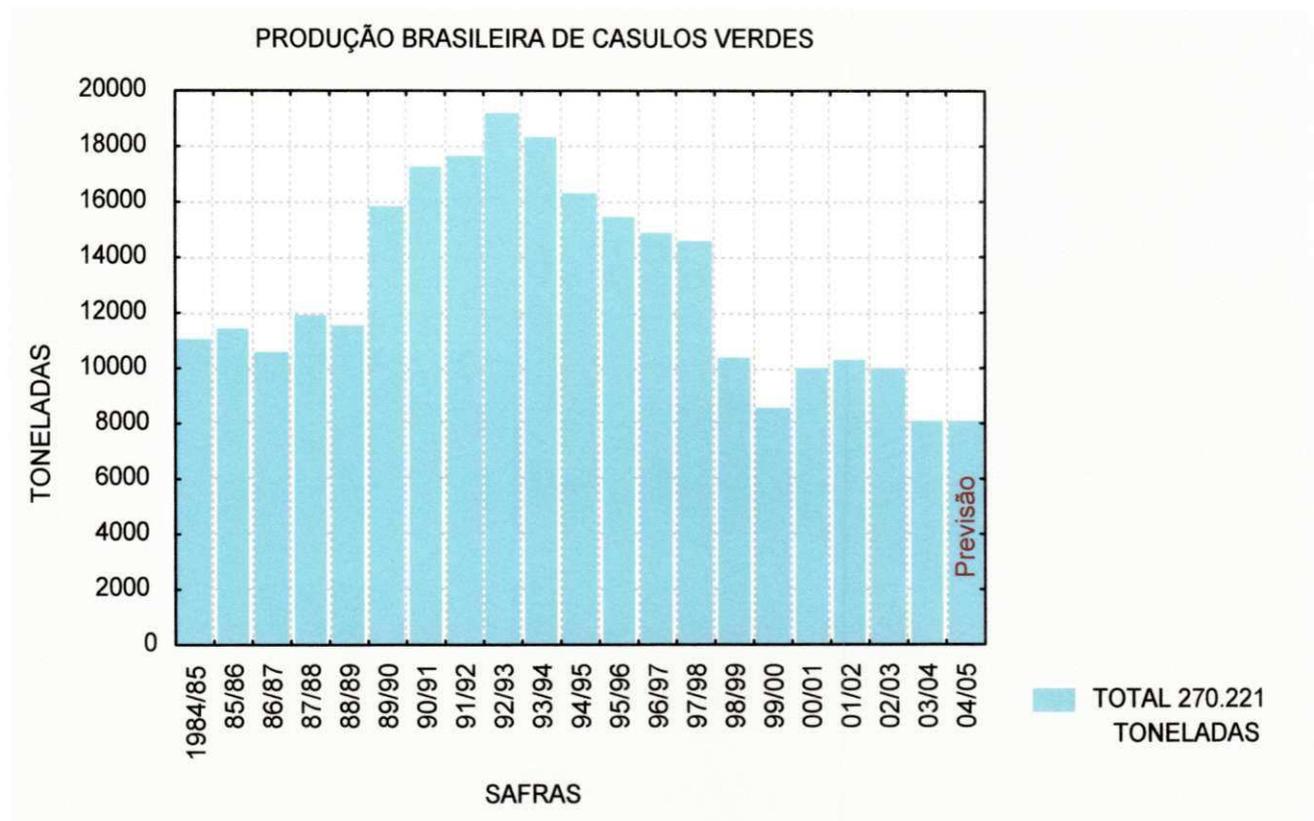


Figura 2.2 - Produção brasileira de casulos verdes por ano de safra.

Fonte: ABRASSEDA (2005)

As empresas Bratac e Kanebo, tem suas produções concentradas no estado do Paraná, enquanto que as demais concentram-se em vários estados brasileiros, com maior concentração nos Estados de São Paulo e Paraná. Nota-se um declínio de produção a partir do estado de Goiás, que teve sua produção extinta desde o ano de 1999. Os estados do Rio Grande do Sul e Espírito Santo contribuíram com uma fase experimental da safra 90/91 à safra 96/97. Daí em diante, não houve mais produção.

O estado do Rio Grande do Norte através de uma unidade da Bratac, em Canguaretama – RN, produziu desde a safra 1984/85 até a safra de 94/95, sendo desativado totalmente a partir dessa safra. O estado de Rondônia contribuiu com 12 toneladas somente nas safras de 90/91, 92/93 e 94/95, época do encerramento total da produção (Figura 2.4).

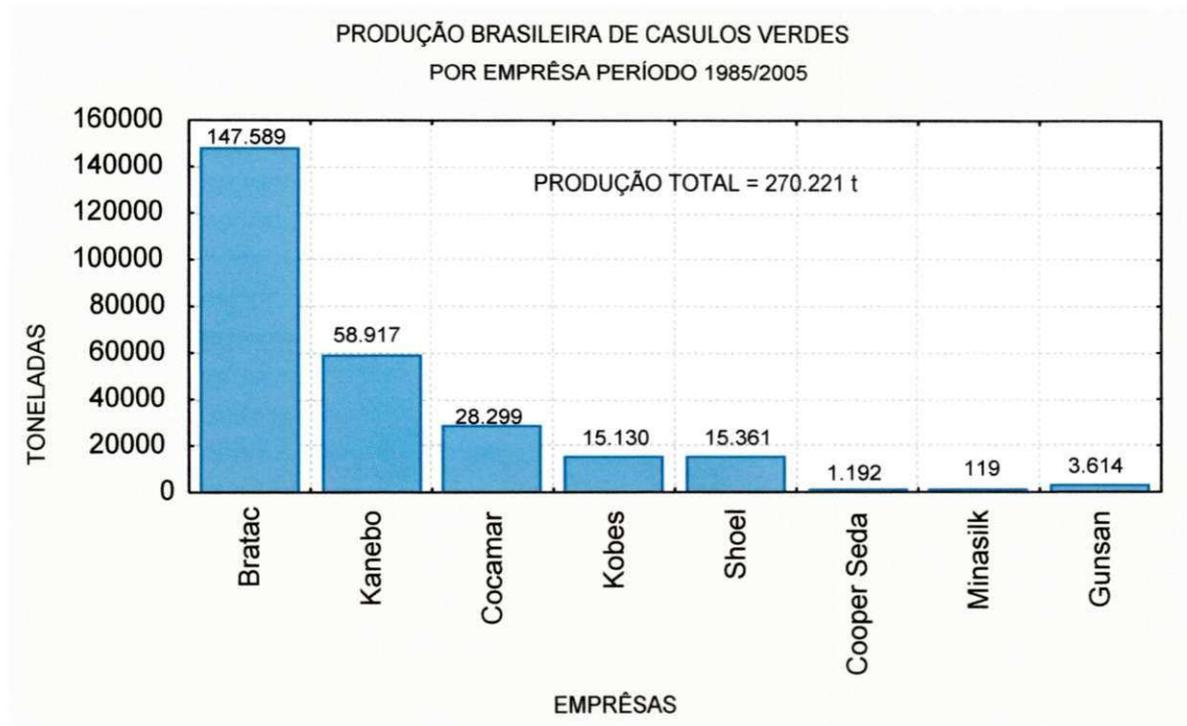


Figura 2.3 - Produção brasileira de casulos verdes por empresa.

Fonte: ABRASSEDA (2005)

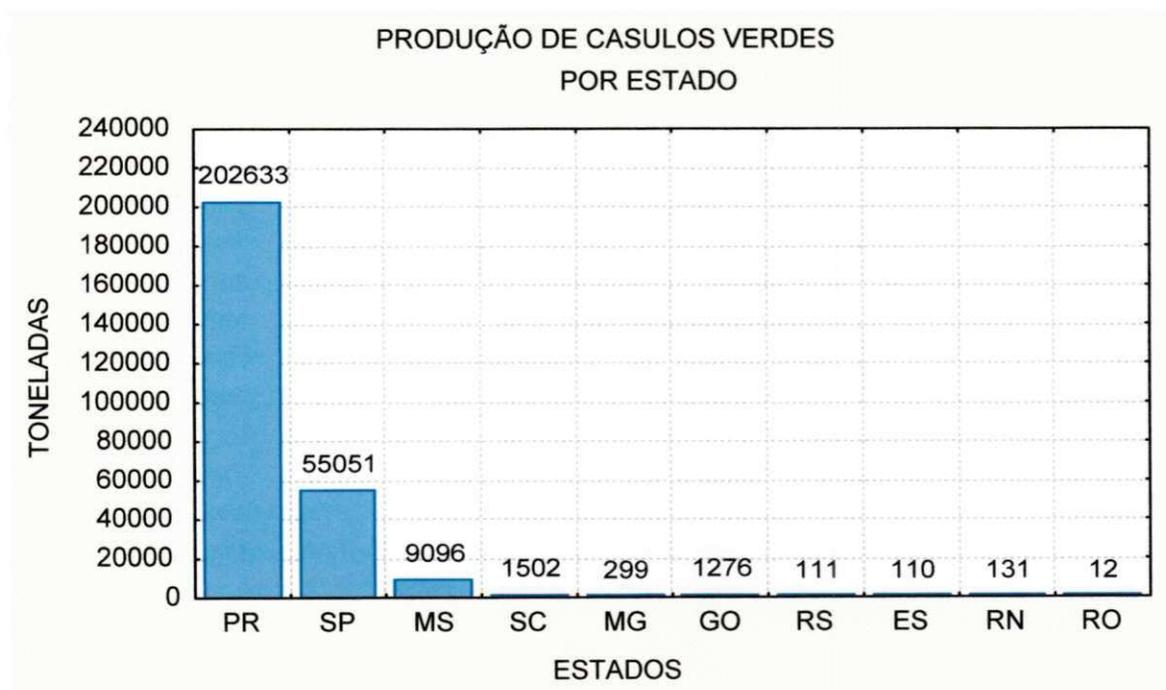


Figura 2.4 - Produção brasileira de casulos verdes por estado.

Fonte: ABRASSEDA (2005)

A exportação brasileira de fio de seda aumentou substancialmente. Do total das exportações de fio de seda, cerca de 72% é dirigido a grandes produtores mundiais, como Japão, China, Cingapura e Coréia do Sul, segundo a CACEX - BB, (Fonseca e Fonseca, 1988). A Figura 2.5 fornece informações relativas à situação real do País, no que diz respeito à produção, consumo interno e exportação de fio de seda no período 1984-2004.

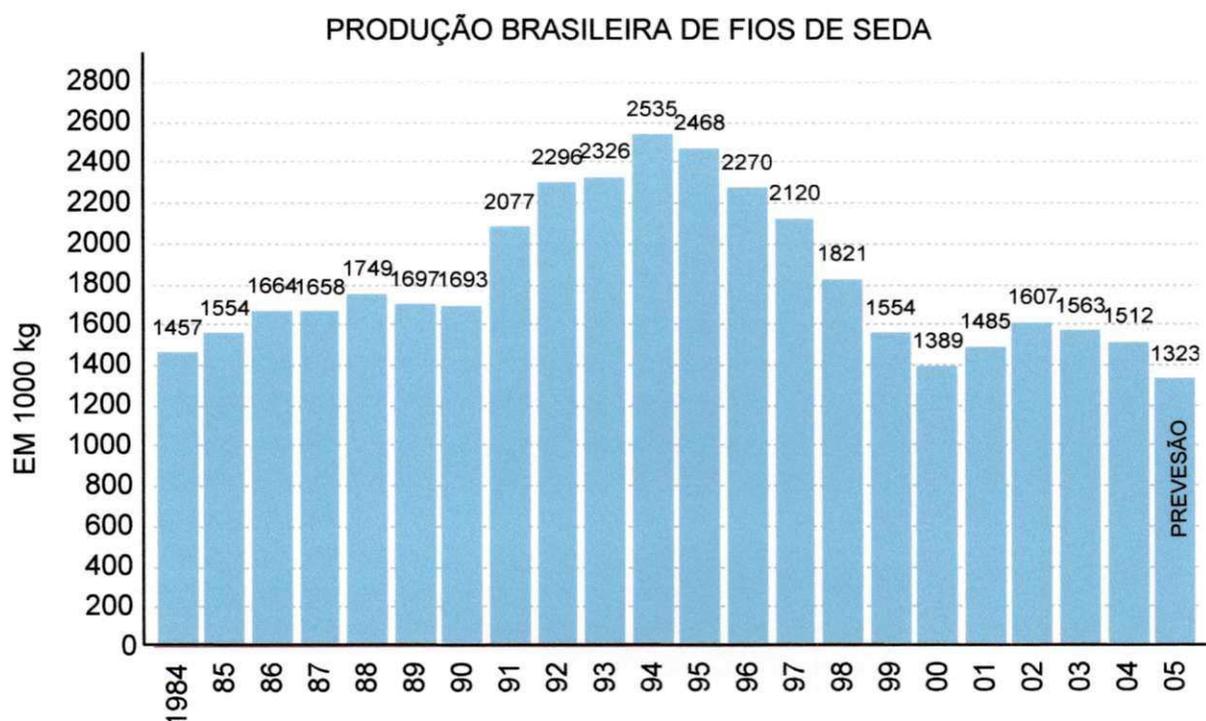


Figura 2.5 - Produção brasileira anual de fios de seda.

Fonte: ABRASSEDA_(2005)

Na década de 90, mais precisamente até o ano de 1993, houve um aproveitamento moderado no mercado interno dos resíduos de seda superado pela exportação nesse mesmo período. A partir de 1993, houve um substancial aumento do consumo interno, enquanto as exportações decresciam em grandes proporções. A partir de 2003 as exportações começaram a superar o consumo interno, assim permanecendo até o ano de 2004. No ano de 2005 houve uma queda em relação ao ano de 2004 tanto no mercado interno quanto no externo. No total, as vendas de resíduos de seda caíram 40,51% em relação as vendas realizadas em 1990 (Figura 2.6).

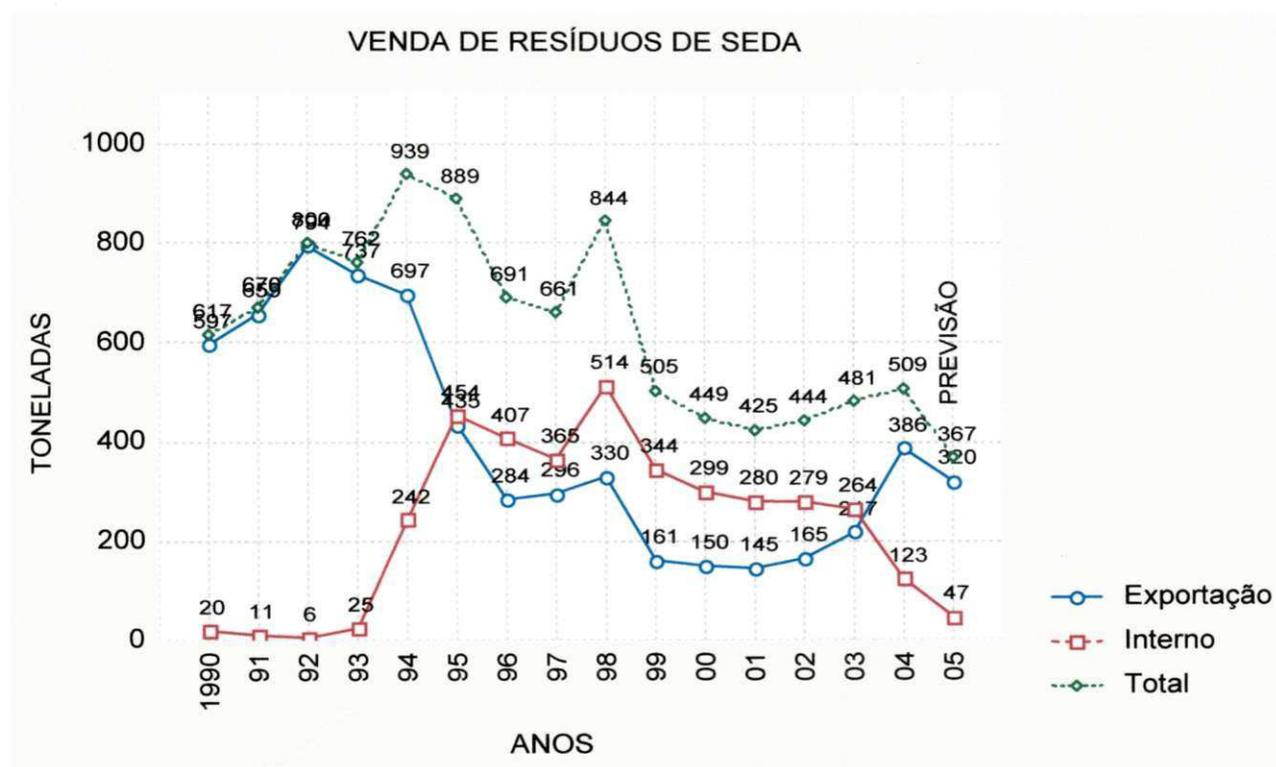


Figura 2.6 - Vendas de resíduos de seda. Fonte: ABRASSEDA (2005)

Na Figura 2.7 pode-se observar que a seda brasileira é exportada para os continentes asiático, europeu, americano e africano. Na Figura 2.8 consta os países componentes desses continentes. Vale salientar que a Tunísia, único representante do continente africano, iniciou a atividade de consumo de produtos oriundos do bicho-da-seda proveniente do Brasil, no ano de 2003, ocupando o 10º lugar. Curiosamente a China iniciou a importação em 2004 ocupando o 11º lugar.

Diante da conjuntura do mercado internacional, o Brasil tem plena possibilidade de incrementar significativamente sua produção. As comunidades asiáticas e europeias dificilmente terão condições de fazer o mesmo. Isto pelas condições de clima e solo, pois enquanto nos países asiáticos e europeus são obtidas, no máximo, três criadas (crias) de lagartas por ano, aqui no nosso país há condições de se obter, no mínimo, seis a sete criadas (crias). As vantagens comparativas do Brasil em relação aos outros países, além do teor líquido de seda em cada casulo, superior ao encontrado nos demais países, podem ainda ser observadas pela qualidade dos fios brasileiros em termos de parâmetros de grande

importância, como: a fiabilidade (grau de desenrolamento do casulo, ou melhor, a facilidade com que o fio de seda desenrola do casulo), cor, brilho e maciez da seda.

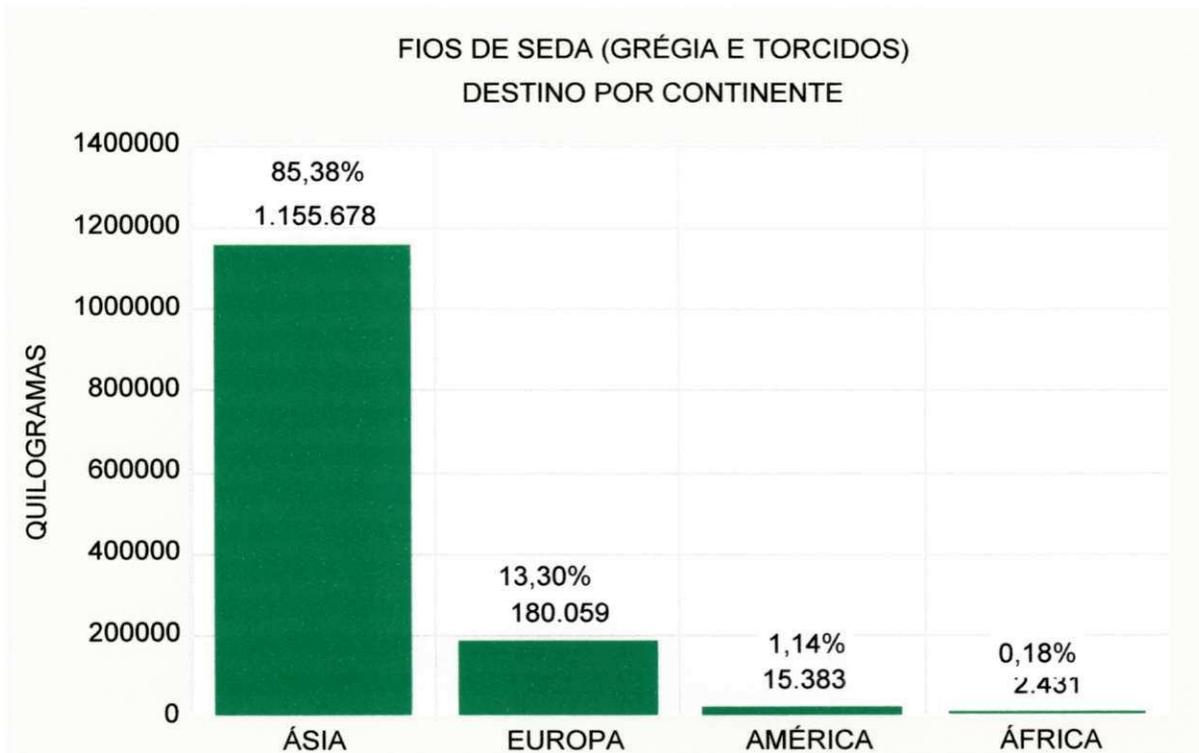


Figura 2.7 - Quantidade de seda brasileira por continente importador no ano de 2004.

Fonte: ABRASSEDA (2005)

Vários países estão relacionados com a tecnologia adotada para obtenção do fio de seda nas condições ideais para exportação e consumo interno. Do exposto, verifica-se que a atividade sericícola é de grande importância para o desenvolvimento regional e do país. Esta relevância está ligada, principalmente, ao fato de ser o fio-de-seda, produto de exportação e, portanto, gerador de divisas, por utilizar mão-de-obra intensiva, fixando o homem no campo e, principalmente, por estar ligada à produção agro-industrial, contribuindo dessa maneira para a geração de empregos rurais e urbanos, além de impulsionar o comércio local e de regiões circunvizinhas.

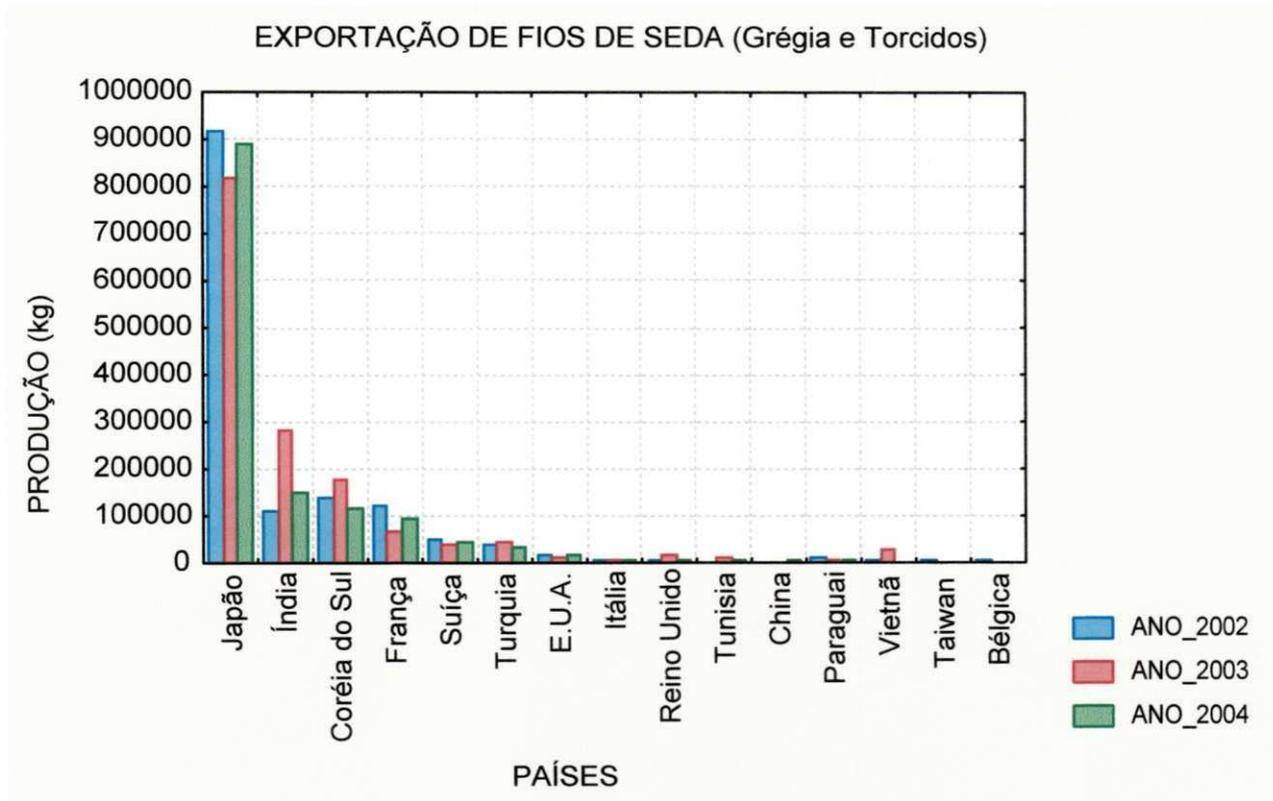


Figura 2.8 - Fios de seda torcidos e grégia exportados para os países dos continentes.

Fonte: ABRASSEDA (2005)

Segundo Hanada e Watanabe (1986), o potencial industrial de uso para a casca do casulo pode ser dividido em dois grupos. O grupo I compreende aqueles usos nos quais a casca é empregada para a obtenção do fio de seda, que por sua vez serve de matéria prima para a fabricação de produtos tais como: camiseta, vestido, paletó, pintura em seda, lenços de seda, etc. O grupo II compreende aqueles usos nos quais se aproveita o envoltório inicial do casulo, a anafia, para produção de bens de consumo tais como; barbante, estofamento, travesseiros, colete a prova de bala entre outros. Em adição, a crisálida tem quase o teor nutritivo da carne bovina e pode ser utilizada como proteínas, adubo, ração, bem como na fabricação de óleo, seus derivados e alimento humano.

Segundo Uchino (2001), o Japão, Coreia e China desenvolveram pesquisas sobre o uso medicinal da seda; com isso, abre-se grande expectativa para o uso como matéria prima para produtos que não sejam só para confecções de vestuário. Recentemente descobriram-se propriedades antes desconhecidas, inclusive medicinais, assim como novos produtos à base de proteína da seda, a saber: pó do fio da seda aplicado em cosméticos, produtos alimentícios,

tais como: biscoitos, balas, bebidas, entre outros. As lagartas desidratadas e moídas, tem produzido compostos macrobióticos, e os casulos moídos produzido chás. Esses dois produtos tem comprovadas propriedades no controle do diabetes, sendo já comercializados.

Com o avanço das pesquisas, o século 21 abrirá uma nova etapa na utilização dos produtos do bicho-da-seda que não sejam aqueles usados desde a antiguidade, melhor aproveitando o potencial dos seus recursos naturais até então desconhecidos.

2.3 Casulos do bicho-da-seda: aspectos científicos e tecnológicos

2.3.1 Aspectos científicos

***Espécies e ciclo vital do bicho-da-seda**

No mundo são conhecidos oito espécies de bicho-da-seda, criados com a finalidade de produzir fios de seda. Atualmente, são produzidos quatro espécies de sedas natural proveniente de insetos: a seda produzida pelo *Bombyx mori L.*, inseto que se alimenta da folha da amoreira, que é a mais importante e contribui com 95% do total da produção mundial; e as produzidas pelas Mouga, Eri e Tasar, responsáveis pelos 5% restantes. A Mouga, a Eri e a Tasar são considerados bichos-da-seda selvagens e alimentam-se de diversas outras espécies de plantas, tais como carvalho e mamoneira.

O bicho-da-seda, durante sua vida, passa por quatro estágios: ovo, larva, pupa (crisálida) e imago (mariposa). A larva nascida de um ovo, com menos de 0,5 mg de peso, alimentando-se com folhas da amoreira, dentro de mais ou menos quatro semanas cresce mais de 10 mil vezes em relação ao seu peso inicial, (Fonseca e Fonseca, 1988). Durante esse período o bicho-da-seda normal exúvia (troca de pele) quatro vezes; ao final começa então a fiar a seda pelo orifício de sua fiandeira a uma razão de 10 a 15 cm/min (Olney, 1947); tece o casulo (invólucro de seda, em que se abriga a larva, para no seu interior se proteger dos agentes externos), encerrando-se nele. O comprimento dos fios de seda nos casulos varia normalmente de 800 a 1500 metros, com espessura de 0,002 mm, (Hanada e Watanabe, 1986), em discordância com alguns autores que chegam a afirmar que seu comprimento pode alcançar até 4 000m e nunca apresenta espessura uniforme (Erhardt et al., 1976). A larva dentro do casulo, através da metamorfose, transforma-se em pupa (ninfa ou crisálida) e essa em

mariposa, que com auxílio de um suco alcalino secretado do estômago, umedece a casca do casulo, amolecendo-a, facilitando assim o rompimento para sua saída (Ver Figuras 2.9 e 2.10). Na Figura 2.11 pode-se observar o bicho da seda na 2ª fase, isto é, a lagarta.

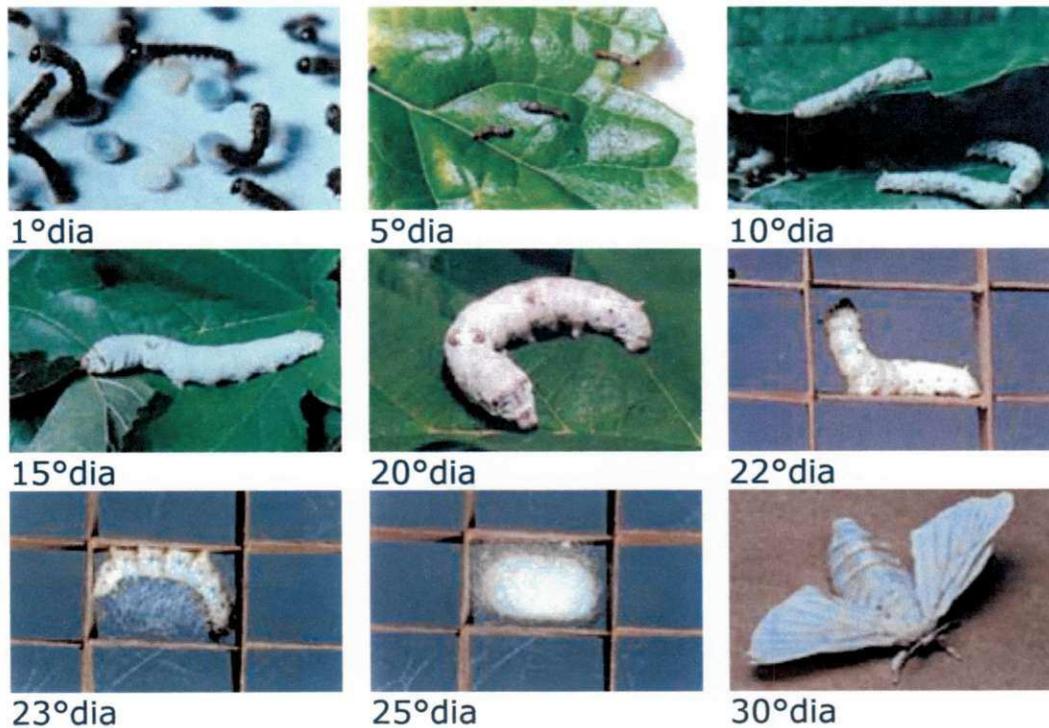


Figura 2.9 - Ciclo vital do bicho da seda. Fonte: www.addizione.org/po/prom.php (2007)



Figura 2.10 - Mariposa saindo do casulo. Fonte: Informativo BRATAC (2003).

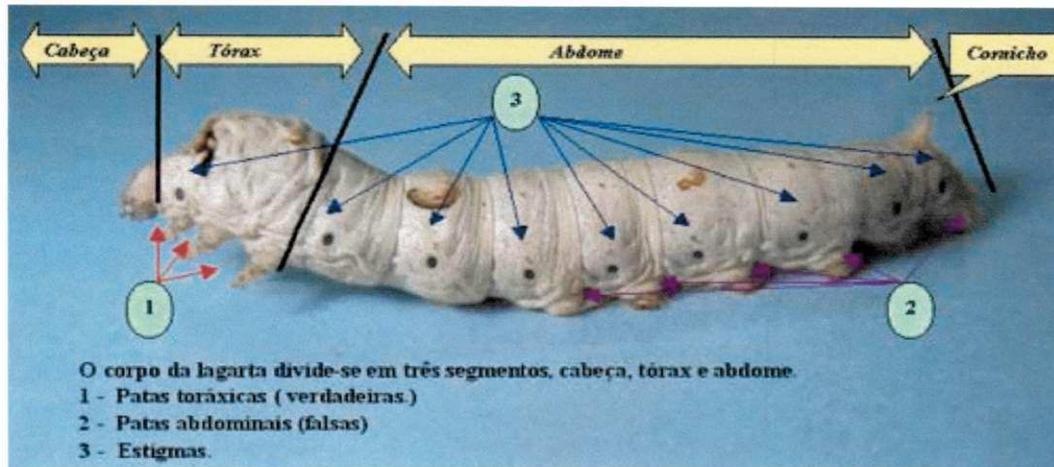


Figura 2.11- Bicho da seda adulto. Fonte: Informativo BRATAC (2003).

***Características físicas e químicas do casulo e fio de seda**

O casulo verde produzido pelo bicho-da-seda, é composto de três partes: a casca a pupa (crisálida) e a exúvia (despojos). A primeira é tecida pela larva, cruzando os filamentos de seda uns sobre os outros, em forma de S ou 8, formando os vários estágios do casulo (Figuras 2.12 a-b). A massa do casulo varia de 1,5 a 2,5 g (Fonseca e Fonseca, 1988). Esse valor está em concordância com Lima (1995), que encontrou em sua pesquisa, uma massa de 1,52g para casulos verdes, depois de retirada a anafaia.

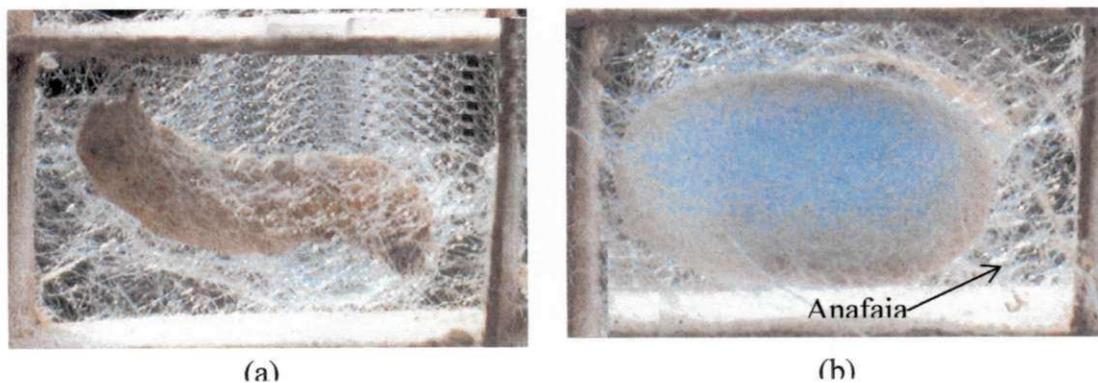


Figura 2.12 - Bicho-da-seda fiando. a) Iniciando a fiação. b) Casulo suportado pela anafaia. Fonte: Revista Globo Rural (1996)

A temperatura, a umidade e a ventilação, bem como o poder nutritivo da amoreira, antes e durante a formação do casulo, influem diretamente tanto no tempo de duração do encasulamento bem como na qualidade dos casulos e no desenrolamento de fios no processo de fiação (Hanada e Watanabe, 1986).

Conforme a raça do bicho-da-seda (Chinesa, Japonesa ou Indiana), a cor e o tipo ou conformação do casulo podem ser diferentes. A cor dos casulos pode ter diversas tonalidades das seguintes cores: branco, amarelo (cor de ouro) ou esverdeada. No que diz respeito à forma geométrica, pode ser esférica, oval ou elipsoidal, cinturada, e ocasionalmente, pode também ser pontiaguda ou fusiforme (Figura 2.13). No caso do Brasil, há uma predominância pela forma elipsoidal com dimensões bastante expressivas, se comparada com às dos grãos de cereais. Na Figura 2.14 pode ser observado um breve resumo de um trabalho de melhoramento de raças desenvolvido na Fiação BRATAC.

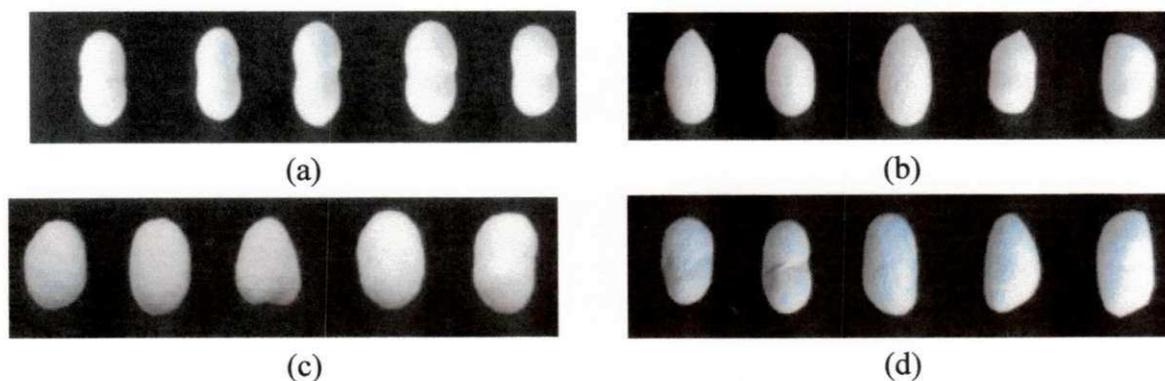


Figura 2.13 - Formas dos casulos do bicho-da-seda. a) Cinturada; b) Pontiaguda; c) Oval ou elipsoidal; d)-Irregular. Fonte: Informativo Técnico BRATAC.

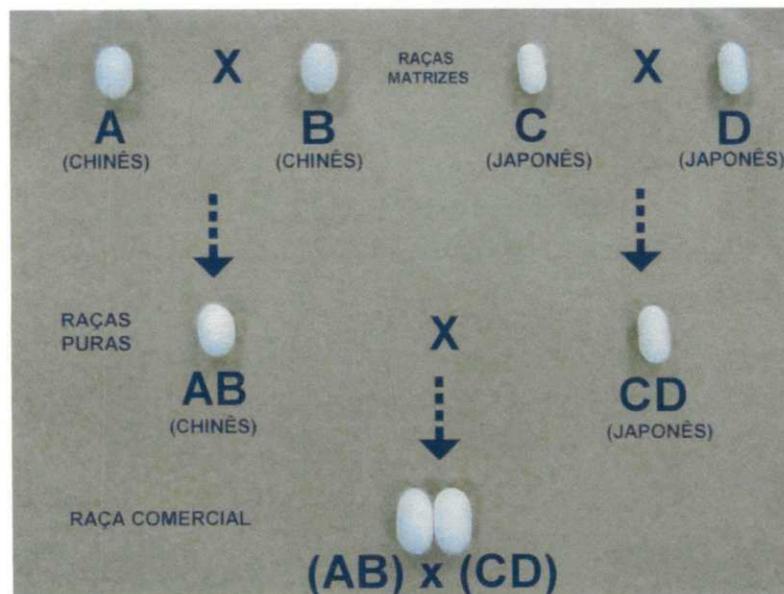


Figura 2.14 - Casulos melhorados devido o cruzamento de raças. Fonte: Informativo Técnico BRATAC.

A composição média dos casulos verdes ou frescos é dada pela Tabela 2.1 (Bianchi, 1945). Como percebe-se pela análise da Tabela 2.1, existe no casulo uma grande quantidade de água, sendo que a maior parte dessa água se encontra na crisálida. A composição média do filamento é dada pela Tabela 2.2 (Fonseca e Fonseca, 1988). Percebe-se que além da existência da fibroína, parte interna do filamento, e da sericina, que circunda a fibroína, há também presente na seda bruta cerca de 2% de cera, e cerca de 1% de material mineral. A sericina tem aparência de uma cola (goma-arábica) e envolve a fibroína do fio-baba de cada casulo, solidificando-se depois de expelida pela larva, quando exposto ao ar por algumas horas (Coutinho Filho, 1973). A quantidade total de sericina presente na seda bruta é variável, dependendo do tipo de seda e da região ou país de sua origem. Ela é o material que produz na fibra a sensação de rigidez e aspereza, e é totalmente solúvel em água quente. A fibroína é a substância protéica que constitui tudo quanto resta da seda bruta depois de completamente purgada, isto é, depois da retirada total da sericina (Bianchi, 1945).

Tabela 2.1- Composição média dos casulos verdes

COMPONENTE	% EM MASSA
Água	68,20 %
Seda grége ¹	14,30 %
Materiais gomosos solúveis em água	0,70 %
Crisálida	16,80 %

Tabela 2.2 - Composição média do fio de seda bruta

COMPONENTE	PERCENTUAL
Fibroína	72 ~ 80 %
Sericina	19 ~ 27 %
Gordura e cera	0,5 ~ 1,0 %
Carboidrato	1,0 ~ 1,5 %
Materiais corantes e inorgânicos	1,0 ~ 1,5 %

¹ A seda grégia (grége), é a seda obtida pela combinação de 3 a 12 fios tirados diretamente dos casulos e formando um único fio sem torção.

Na época de colheita, o casulo possui massa com a seguinte composição média: casca (17,0 a 24,4%), crisálida (75,0 a 82,3%) e exúvia (0,6 a 0,7%) (Fonseca e Fonseca, 1988); dos quais 68,2% é água; 14,3% é de seda grege, 16,8% é crisálida e 0,7% são materiais gomosos solúveis em água (Bianchi, 1945). A casca do casulo, depois de retirada a anafia, é constituída unicamente do fio de seda, que por sua vez é composto basicamente de sericina (20 à 30%) e fibroina (70 à 80%) (Hanada e Watanabe, 1986)(Ver Figura 2.15).

A seda é parte integrante da categoria de produtos higroscópicos. Hess (1941), Bianchi (1945) e Mauersberger (1947), afirmaram que a seda é muito higroscópica, e sob circunstâncias favoráveis, absorverá até 30% de seu peso, em água, e contudo parece ser seca. Essa umidade é adsorvida na superfície interna da fibra. Esses produtos tem a propriedade de realizar trocas de água, sob a forma de vapor, com o ar ambiente que os envolve, por absorção (adsorção) ou dessorção², considerando-se as características hídricas dos produtos e do ar que o circunda.

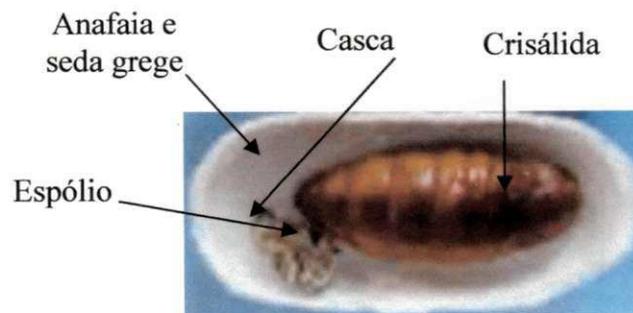


Figura 2.15 - Vista de um casulo seccionado.

Todas as fibras têxteis quando expostas à atmosfera úmida, de UR (umidade relativa) variando de 0 a 100%, a uma certa temperatura, absorve vapor de água até atingir seu equilíbrio. Essas condições quando plotadas em um gráfico, representam a curva de adsorção, semelhante a curva A da Figura 2.16.

² Dessorção = secagem; absorção = reumidificação

Por outro lado, se a fibra for seca quando exposta as condições atmosféricas do ar, a curva obtida assemelha-se a curva B da Figura 2.16. O percentual Regain é o percentual de água que o material possui em relação ao seu peso seco. Essas curvas são de grande importância técnica, uma vez que a água absorvida ou perdida pela fibra têxtil, modifica suas propriedades físicas, tais como: peso, espessura, fiabilidade, alongamento³, etc.

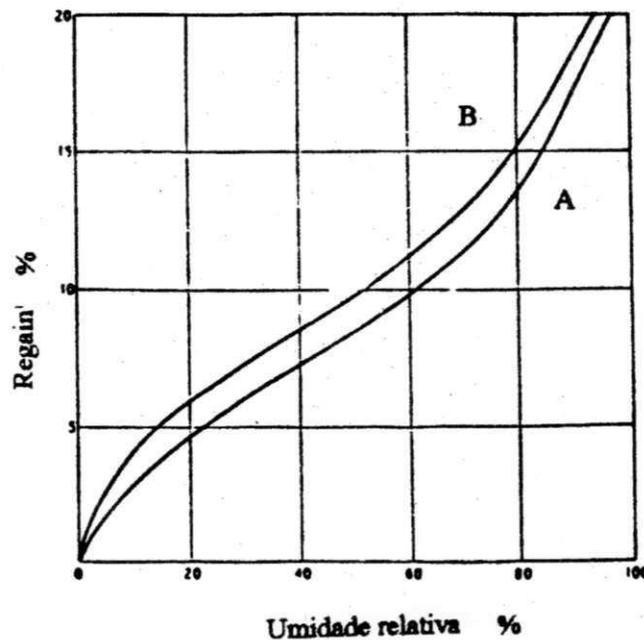


Figura 2.16 - Curva de absorção e dessorção da seda Tasar à 25 °C.

Fonte: Garner (1949).

O equilíbrio higroscópico dos materiais biológicos, a uma certa umidade relativa e temperatura, é mais elevado durante a dessorção do que durante a sorção, e essa diferença está em torno de 1% de teor de água, em base seca (Kosowski, 1977). No caso de grãos, Chung e Pfost, citados por Brooker et al. (1974), afirmam que esse efeito de histerese pode ser devido ao encolhimento do grão durante a dessorção, reduzindo assim, a disponibilidade de água de ligação na sua superfície.

³ O alongamento representa a ductilidade e não deve ser confundido com o alongamento elástico, que representa apenas uma pequena percentagem da ductilidade.

Segundo Hess (1941), Bianchi (1945) e Olney (1947), a seda pode ser aquecida até a temperatura de 140 °C, sem perigo de decomposição, contudo, ela é rapidamente desintegrada a temperaturas superiores a 165 °C, dando como produtos, gases, sólidos e líquidos, semelhantes aos obtidos pela destilação seca das outras substâncias protéicas.

A seda é um mau condutor de calor, possuindo uma condutividade térmica de 0,040 W/m.K, segundo Weast, citado por Hall (1980), e quando submetida a temperatura elevada por tempo prolongado, perde em resistência à ruptura e elasticidade. A seda, bruta ou livre da cola (sericina) é a mais resistente das fibras naturais (Corbman, 1975).

Segundo Woolman e McGowan (1943), a resistência à tração da seda bruta é aproximadamente 441,27 kPa.

O teor de água na fibra têxtil tem uma grande influência na sua deformação, resistência e espessura (Garner, 1949). Tratando-se da seda, essa conserva cerca de 80 a 90% de sua resistência a seco, quando umedecida (Erhardt et al., 1976). Hollen et al. (1979a), publicaram em seu trabalho, uma série de quadros de propriedades físicas das fibras naturais e sintéticas, que foram aqui reagrupados em parte e resumidos, apenas para as fibras naturais (Tabela 2.3). Os números são médios ou medianos, mas podem ser tomados como referência.

Tabela 2.3 - Propriedades físicas das fibras naturais

PROPRIEDADE	FIBRA NATURAL		
	Algodão	Seda	Lã
Resistência à abrasão	decrece →		
Absorção (umidade "Regain")*	7 ~ 11	11	13 ~ 18
Densidade (g/cm ³)	1,52	1,25	1,32
Recuperação elástica (% de recuperação para 2 a 5% de extensão).	75	92	99
Alongamento (% de alongamento até ruptura)			
Úmido	9,5	30	35
Padrão (T = 21,1°C e UR = 65 %).	3 ~ 7	20	25

* A umidade "Regain" é expressada como a percentagem do peso livre de água a uma UR = 65%. Informações adicionais sobre o tema discutido nesta seção podem ser encontradas em Lima e Mata (1995) e nas demais referências citadas.

2.3.2 Aspectos tecnológicos da secagem de casulos do bicho-da-seda

2.3.2.1 O processo de secagem

Secagem é a operação de remoção de parte da água ou qualquer outro líquido de um corpo, através de processos mecânicos ou térmicos. A secagem torna-se indispensável no correto armazenamento e/ou processamento de produtos biológicos. Durante o processo, os produtos biológicos sofrem alterações em suas características físicas e químicas; dependendo da temperatura, os produtos biológicos podem ser afetados em suas estruturas, assim como as sementes podem perder o poder germinativo, ou até mesmo a perda total dos produtos.

Pesquisadores de todo o mundo tem trabalhado analisando os processos de secagem. Alguns consideram as condições externas, tais como temperatura do ar, velocidade e umidade relativa, correlacionadas à taxa de secagem dos produtos, enquanto outros dão ênfase as condições internas dos mesmos, 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.

A seguir são listadas várias teorias que tentam descrever o transporte de água e calor em meios porosos.

- Teoria da difusão líquida;
- Teoria da vaporização-condensação;
- Teoria capilar;
- Teoria de Kricher;
- Teoria de Luikov;
- Teoria de Philip e De Vrie;
- Teoria de Berger e Pei;
- Teoria de Fortes e Okos

Discussão com riqueza de detalhes sobre as teorias de secagem pode ser encontradas em Ibrahim et al. (1997), Fortes e Okos (1980), Alvarenga et al. (1980), Mariz (1986), Keey (1992), Lima (1995).

A migração de água no interior de produtos biológicos ainda não é bem conhecida. Alguns pesquisadores afirmam que nesse fenômeno a migração da água pode ser uma combinação de movimentos por difusão de líquidos e de vapor, cada um predominando em determinadas etapas da secagem (Steffe e Singh, 1980). A seguir são citados alguns mecanismos de transporte de água, fornecidos pela literatura (Fortes e Okos, 1980; Hall, 1980; Strumillo e Kudra, 1986; Brooker et al., 1992; 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 do produto congelado, por sublimação, em “freeze-drying”.
-
- transporte de vapor por termo-fusão: ocorre devido a gradientes de temperatura;
 - transporte de líquido por forças capilares: ocorre devido a fenômenos de capilaridade;
 - transporte de líquido por pressão osmótica: ocorre devido a força osmótica;
 - transporte de líquido por gravidade: ocorre devido a 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.

2.3.2.2 A secagem de casulos

O casulo verde produzido pelo bicho-da-seda, é composto de uma casca exterior onde existe a seda bruta propriamente dita e no interior a crisálida, que ao final de algum tempo se transforma em mariposa, a qual emite uma saliva que rompe o casulo, escapando pela abertura produzida.

A casca é composta de 17 ~ 24% em massa e a crisálida de 76 ~ 83%, sendo que nos casulos verdes, o teor de água inicial na casca é de cerca de 11 à 14% (b.u.) e para a crisálida

este teor varia entre 74 à 78% (b.u.), mais o teor de água desejado ao final do processo é de 10 a 12% (b.s.) (Shiruo, 1986). Sendo assim, a secagem de casulos, tem por objetivos:

- Interromper o processo da metamorfose da crisálida, matando-a. Desta forma evita-se a sua saída dos casulos, como mariposa, o que provoca a perda do casulo pelo rompimento do fio, o que impossibilita o processamento visando a produção de linha, servindo apenas para a produção de materiais semelhantes ao algodão.
- Eliminar a umidade excessiva dos mesmos.

A secagem dos casulos do bicho-da-seda, devido ao seu alto teor de água, (68 à 70% em base úmida⁴) (Bansal e Garg, 1987), o baixo ciclo de vida da crisálida (10 à 12 dias, a partir do início de encasulamento e 4 a 5 dias após a colheita do casulo) (Hanada e Watanabe, 1986) passa a ter relevante importância, na medida em que esses precisam ser armazenados, de forma a minimizar a sua deterioração, evitar o seu rompimento, com posterior inutilização, pela metamorfose da crisálida em mariposa, através da morte da primeira.

Contudo, vale ressaltar que a secagem defeituosa de casulos, provoca dificuldades em se manufaturar os mesmos, detectadas através dos exames de pré-estocagem, que visam principalmente a análise do lote quanto à qualidade de fio e fiabilidade. Essa secagem artificial é realizada atualmente no Brasil, em secadores de fluxos cruzados, com processo de secagem contínua ou intermitente. No entanto, dependendo da produção, a secagem em leito fixo e em camada fina, também são realizadas. O alto preço da seda natural, bem como sua elevada aceitabilidade no mercado nacional e internacional, tem relevante importância na medida em que, para fins de comercialização, seja armazenada em local bem seco (baixa umidade), de forma a evitar tanto a sua deterioração, como também a produção de fungos e ação de outros microorganismos, que contribuem significativamente para sua decomposição com conseqüente perda. Posteriormente será utilizada como matéria-prima nas fábricas de fiar seda, para produção contínua de outros produtos de alto valor comercial.

O comportamento dos casulos verdes, durante o processo de secagem tem sido estudado por Shiruo (1986), Shi-ruo et al.(1992), Lima (1995), Lima e Mata (1996) e Thangavel et al.

⁴ Define-se tradicionalmente, teor de água em base úmida.(b.u.), como sendo a massa de água por unidade de massa total, e teor de água em base seca.(b.s.), a relação massa de água por unidade de matéria seca.

(1996). De acordo com Shiruo (1986), o casulo verde, produzido pelo bicho-da-seda, tem um comportamento especial na secagem, apresentando dois períodos: o período de secagem com velocidade constante e o de velocidade decrescente.

Durante o fenômeno de secagem dos casulos, as suas propriedades tecnológicas podem ser alteradas significativamente; isto deve ser tanto quanto possível evitado. Nesse sentido, as influências da temperatura e da umidade do ar para secagem de casulos do bicho-da-seda têm sido estudadas (Shiruo, 1986; Lima, 1995; Lima e Mata, 1996). Geralmente, no processo de secagem de casulos, faz-se necessário proteger a sericina de excessiva modificação para possibilitar a obtenção de boas características tecnológicas, tais como: alta percentagem de elasticidade (recuperação elástica) e alta percentagem de seda bruta dos casulos. Levando-se em consideração as diferentes combinações de temperatura e umidade do fluido de trabalho, consegue-se casulos de qualidades diferentes.

Além das propriedades tecnológicas, a secagem altera várias características físicas dos casulos quando submetidos a tal processo, entre elas as dimensões e volume. Essas duas últimas podem ser desprezíveis em pesquisa de modelagem e simulação. No caso específico de casulos do bicho-da-seda, a quantidade de água removida, dependendo da temperatura de secagem, pode alcançar os 65% em peso, para uma temperatura de 80°C (Bansal e Garg, 1987), o que acarreta uma modificação relativa embora pequena, no volume dos casulos, mas muito acentuada na crisálida, devido essa conter maior quantidade de água.

O percentual de espaços integrantes em massa de material não consolidada é denominado porosidade; tal parâmetro está associado à passagem de ar pelos grãos, (Mohsenin, citado por Prado, 1978). Lima e Mata (1996), em sua pesquisa sobre casulos verdes em estágio pré-secagem, encontrou para a porosidade do mesmo um valor de 0,147 e uma densidade real de 158,64 kg/m³. Segundo os autores, a baixa densidade e porosidade são devidas a sua geometria arredondada, grande volume e pequena massa.

Para Tsukada (1978), a seda bruta, quando submetida a temperatura acima de 80°C e por tempo prolongado, perde em peso, pela volatilização endotérmica da sericina, e também sofre variação na sua cor. As variações são de branco para amarelo luminoso, amarelo profundo, marrom luminoso e preto ($\approx 190^\circ\text{C}$). Lima (1995), realizando experimentos com

temperatura de 90°C, fluxo de ar de 8345,3 m³/(h.m²) e espesura da camada de casulos de 2,0 cm, observou, apenas qualitativamente, que a casca do casulo foi afetada, evidenciado pela sua coloração amarelada no final do processo, cuja duração foi de aproximadamente 2 horas.

De acordo com Takahashi (1987), a operação de secagem deve ser feita no ponto ideal, isto é, na temperatura certa para matar a crisálida, deixar os casulos em condições ideais de armazenamento e possibilitar a transformação física da sericina, com conseqüente retirada do fio de primeira qualidade.

As formas e temperaturas de secagem de casulos do bicho-da-seda em camada fixa, têm sido fornecidas por diversos autores. Segundo Harper (1921) e Olney (1947), os casulos são postos para secar em temperatura na faixa de 70 a 80°C, com vapor ou ar quente. Quando são secados com vapor, os casulos se mantêm úmidos por um certo período de tempo (10 a 15 min.), e a seguir são postos em locais apropriados até que fiquem secos.

De acordo com Marsh (1948), o procedimento é aquecer o casulo por 10 minutos em vapor ou em um forno à temperatura na faixa de 60 a 70°C, por 3 horas. Tal resultado está em concordância com os valores apresentados por Silva (1982), que sugere um período de 3 horas e 75 °C para a temperatura de secagem.

Molnár et al. (1962) citam experimentos controlados com métodos radioativos, os quais indicam que, em comparação com o tratamento de aquecimento usual de 90 ~ 96°C, a utilização de ondas eletromagnéticas do tipo radiação γ (Gama) como fonte de energia para o aquecimento dos casulos, resulta numa alta taxa de mortalidade das crisálidas do bicho-da-seda.

Bansal e Garg (1987) fornecem os seguintes parâmetros de secagem de casulos do bicho-da-seda contidas na Tabela 2.4. Da análise dos dados nessa tabela, verifica-se uma redução de 82,86% do valor inicial do produto ao final do processo de secagem

Tabela 2.4 Parâmetros de secagem de casulos do bicho-da-seda

Teor de Umidade	Porcentagem	Temperatura Máxima
Umidade inicial (b.u.)	68 ~ 70	80 ° C
Umidade final (b.u.)	10 ~ 12	

Lima (1995) e Lima e Mata (1996), realizaram experimentos de secagem de casulos com ar quente, em leito fixo, nas temperaturas de 70, 83 e 90°C. Nessa pesquisa, os autores concluíram que a taxa de secagem do casulo é fortemente dependente da temperatura, levemente da espessura da camada de casulos (obviamente para pequenas espessuras) e praticamente independente do fluxo específico do ar de secagem. Essa última conclusão permitiu caracterizar o processo de secagem como difusional interno.

Posteriormente, Lima e Mata (1997), com base nos trabalhos de Lima (1995) e Lima e Mata (1996), apresentaram uma equação empírica para calcular a constante de secagem de casulos do bicho-da-seda, em camada fina, que é dependente da temperatura e independente do fluxo do ar de secagem. Observe-se que implicitamente, esse procedimento assume análise concentrada do fenômeno e que o processo é controlado externamente. No entanto, conseguiu-se excelentes resultados, para tempos de aproximadamente 2 horas de secagem.

Shi-Ruo et al. (1992), realizando estudos preliminares de secagem de casulos, em leito fixo, em dois estágios e em estágio simples, com vapor superaquecido, concluíram que a taxa de secagem desse produto é mais rápida se comparada com a obtida usando ar quente, nas mesmas condições termodinâmicas. Segundo os autores, essa nova técnica oferece uma alternativa viável para secagem do produto, mas com a ressalva que ela precisa ainda ser estudada com maior ênfase.

Thangavel et al. (1996), estudando o processo de secagem e sufocamento de casulos (crisálidas) para longa armazenagem, concluíram que: a) usando ar quente a 80 e 90 °C, os casulos (crisálidas) poderão ser sufocados por 12 e 10 minutos, respectivamente, que o teor de umidade de equilíbrio será atingido dentro de duas horas e que os casulos poderão ser armazenados por duas semanas, sem problema; b) usando vapor a 90 °C, os casulos (crisálidas) deverão ser sufocados por um período de 20 minutos.

No processo de secagem dos casulos verdes, em fluxos contínuos, geralmente adota-se o aquecimento com ar quente. Shiruo (1986) referencia que muitas experiências foram feitas anteriormente nesse processo de secagem, mas a máxima temperatura de ar quente usada nunca era maior que 100 °C. Ainda segundo o autor, após uma série de pesquisas, opiniões muito diversas e confusas, sustenta-se que a máxima temperatura de secagem de casulos não será acima de 115 °C.

De acordo com a Fiação de Seda Bratac S/A, faz-se necessário um controle muito rigoroso de temperatura para os diversos tipos de casulos, visando a escolha da faixa ideal para cada tipo de casulo verde. Segundo ela, utilizando-se uma faixa de temperatura de 120° C, provocará a morte da crisálida e uma dificuldade em se fiar esses casulos, com um número acentuado de emendas. Para o caso de secar os mesmos em temperaturas baixas, haverá dificuldades no cozimento e na manufaturação do fio, provocados pelas emendas e paradas sucessivas das máquinas. Em ambos os casos, se acentuam uma enorme redução da produção.

Fonseca e Fonseca (1988) demonstraram que a secagem é realizada fazendo-se atravessar uma corrente de ar quente, sobre a massa de casulos verdes, com uma temperatura de cerca de 100 a 110 °C; terminando entre 40 e 50°C. A regressão progressiva da temperatura se faz à medida que se vai completando a secagem do casulo.

Novaes (2005) reporta um estudo teórico da secagem do casulo do bicho-da-seda em secador de leito fixo. Todas as equações do balanço de energia e massa, do produto e ar de secagem, foram resolvidas usando o método dos volumes finitos. O autor concluiu que:

- O teor de umidade dos casulos durante o processo de secagem diminui com o aumento do tempo. A secagem dos casulos depende da espessura da camada e independe do fluxo de ar.
- A velocidade de secagem dos casulos aumenta sensivelmente se aumentar a temperatura do ar.
- Os maiores gradientes de temperatura de secagem no interior do leito ocorre nos instantes iniciais do processo.

Lima (1995), estudando a secagem de casulos em fluxo cruzado, realizou experimentos em dois secadores industriais, sendo um localizado na cidade de Maringá-PR, de propriedade da COCAMAR, e outro na cidade de Canguaretama-RN, de propriedade da Fiação de Seda Bratac S.A. No primeiro secador, que contém 8 câmaras de secagem, a temperatura variou de 125°C, para a temperatura da 1ª câmara de secagem, até 62°C para a última câmara. Para o segundo secador, que contém apenas seis câmaras de secagem, a temperatura variou de 105°C para a primeira câmara, até 60 °C para a última. Em ambos os casos, não houve problemas de supersecagem e deterioração do produto.

Shiruo (1986) afirma que uma das formas amplamente usada na China de reduzir as influências das temperaturas e umidade do ar quente sobre os casulos, é utilizar um processo duplo de secagem, que consiste em submeter os casulos verdes à duas câmaras de ar quente à temperaturas diferentes em ordem decrescente. Esse procedimento permite a obtenção de casulos secos de qualidade aceitável para comercialização. O autor sugere as seguintes condições favoráveis de secagem, para o referido processo:

- secagem primária T = 100 a 110 °C e UR = 10%;
- secagem secundária T = 80 a 90 °C e UR = 10 a 20%

Dados técnicos fornecidos pela YAMATO SANKO MFG. CO., LTD., do secador de fluxos cruzados "YAMATO" COCOON DRYING MACHINE, modelo 65-13P-25W-BL-K são os seguintes:

- temperaturas alta 120°C ~ 100°C e média a baixa: 95°C ~ 50°C;
- a massa do casulo após secagem varia com relação à massa inicial de 42 a 40%, o que corresponde a uma variação na quantidade final de água de 11,2 a 8,2%, tomando por base os valores apresentados por Bianchi (1945), para a composição média dos casulos verdes, e uma variação na umidade final (b.u.) de 20,5 à 26,0 pontos percentuais, ou seja, 25,8 a 35,1% (b.s.).

De forma geral percebe-se que: o casulo produzido pelo bicho-da-seda, material de forma variável porém definida, é atualmente comercializado com o objetivo de se gerar fio de seda e conseqüentemente produtos de alto valor agregado, a partir de sua industrialização. O casulo comercial é resultante de um conjunto de operações tecnológicas na cultura da amoreira e criação do bicho-da-seda, que tem por finalidade modificar as características físicas e químicas, qualitativa e/ou quantitativamente dos casulos verdes, características essas que são indispensáveis para o seu melhor aproveitamento e comercialização futura. A tecnologia de secagem dos casulos verdes é detida pelas grandes empresas de fiação, tais como: Fiação de Seda Bratac S.A. e COCAMAR (Cooperativa dos Cafeicultores e Agropecuarista do Maringá Ltda.), que absorvem quase toda a produção de casulos do país, requerendo novos estudos nessa área.

2.4 Modelos matemáticos de secagem

No meio científico mundial, os diversos processos de secagem têm sido descritos e modelados matematicamente por muitos pesquisadores ao longo de muitas décadas. Recentemente muitos modelos de secagem vêm sendo apresentados, alguns simples e outros sofisticados. Para 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. Dependendo da espessura da camada do material estudado, esses modelos podem ser classificados em modelos de secagem em camada fina (modelos ao nível de partícula) e em camada espessa (modelos ao nível de secador). A importância prática da secagem em camada fina é muito limitada, porque geralmente os materiais são secos em camadas espessas, estacionárias ou em movimento. Entretanto, como será mostrado posteriormente, os modelos mais usados pelos pesquisadores levam em consideração propriedades termo-físicas, cinéticas de secagem, balanço de massa e energia no secador, ratificando assim a necessidade de se dispor de uma equação para a cinética de secagem do material em camada fina para determinadas condições operacionais pré-estabelecidas.

2.4.1 Camada fina

Empíricas, semi-empíricas e teóricas são as classificações das equações de camada fina. Essas equações não levam em consideração os efeitos da variação da temperatura no processo de secagem, assumindo que o produto alcança a temperatura média do ar imediatamente, no começo do processo de secagem.

As equações empíricas e semi-empíricas admitem processo isotérmico e desprezam a resistência de transferência de massa interna, enquanto que as teóricas admitem equilíbrio de temperatura entre o produto e sua vizinhança, como também consideram desprezível a transferência de massa na superfície do produto.

As equações empíricas possuem uma relação direta entre o conteúdo de água no produto e o tempo de secagem, enquanto que as semi-empíricas são análogas à lei de Newton para o resfriamento, assumindo que a taxa de secagem é proporcional à diferença entre o conteúdo de água do produto e seu respectivo conteúdo de água de equilíbrio para as

condições de secagem especificadas. As equações teóricas geralmente levam em consideração a difusão de líquido e/ou vapor dentro do produto.

As taxas de transferência de calor e de massa no produto como um todo são descritas por modelos concentrados, ignorando as resistências internas dessas transferências. Já os modelos distribuídos descrevem essas mesmas taxas em função da posição no interior do produto e do tempo de secagem. Os modelos de parâmetros concentrados são aplicados para número de Biot de transferência de massa menor que 10 e número de Biot de transferência de calor menor que 1,5 (Parti, 1993). Obviamente, essa afirmação depende da geometria do corpo em estudo.

2.4.1.1 Modelos empíricos e semi-empíricos

Segundo Parti (1990), Simmonds et al. figuram como os primeiros pesquisadores a aplicarem o modelo semi-empírico análogo à lei de Newton para o resfriamento, sugerido por Lewis, citado por Jayas et al. (1991). Nesse modelo, a taxa de secagem é função do conteúdo de água do produto em qualquer tempo de secagem e do seu conteúdo de água de equilíbrio nas condições de secagem. Em simbologia matemática tem-se:

$$\frac{d\bar{M}}{dt} = -k_1(\bar{M} - \bar{M}_e) \quad (2.1)$$

Definindo o parâmetro adimensional $\bar{M}^* = \frac{\bar{M} - \bar{M}_e}{\bar{M}_0 - \bar{M}_e}$ e integrando a Equação 2.1 em relação ao tempo tem-se:

$$\bar{M}^* = \exp(-kt) \quad (2.2)$$

Apesar dessa equação ter sido bastante aplicada sucessivamente por numerosos pesquisadores, esse modelo não apresentou resultados satisfatório em alguns casos, e modificações são então requeridas. Esse modelo é também conhecido como a “lei exponencial”. Na Equação 2.1, k_1 também depende do tempo de residência, além disso, Misra

e Brooker (1980), encontraram que a UR também tem um efeito na taxa de secagem. A consideração em que a Equação 2.2 está fundamentada em alguma insuficiência, devido à linearidade das isotermas de sorção da maior parte dos produtos, sendo observadas apenas dentro da faixa de UR entre 0,2 e 0,8 (Beke e Vaz, 1994).

Segundo Barre et al. (1971), não se tem dado a devida atenção ao efeito da velocidade na constante de secagem, no entanto há grande evidência que a velocidade tem amplo efeito na constante de secagem em leito espesso, e propõe modificações na equação para o cálculo da constante de secagem.

Uma pequena modificação no modelo, 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, especialmente para o 1^o estágio do processo de secagem. Esse modelo é expresso por:

$$\bar{M}^* = A_1 \exp(-k_1 t^{K_2}) \quad (2.3)$$

O modelo 2.3 é conhecido como equação de Page para camada fina (Sokhansanj, 1984; Parti, 1990; Zhang e Litchfield, 1991; Jayas et al., 1991; Brooker et al., 1992; Soponronnarit et al., 1996; Tagawa et al. (1996); Lima e Rocha, 1997; Park et al., 1997; Cavalcanti Mata e Menegalli, 1997; Afonso Júnior e Corrêa, 2000; Basunia e Abe, 2001; Oliveira, 2006).

Dentre inúmeros modelos matemáticos de secagem em camada fina, usados por pesquisadores para descrever a retirada de água nos produtos biológicos, Lima et al (1998), selecionaram quatro modelos para serem ajustados aos dados experimentais de secagem de casulos do bicho-da-seda, por serem os mais usados. Concluíram, com base nos coeficientes de determinação e variâncias, que o melhor modelo é o representado pela equação abaixo.

$$\bar{M}^* = A_1 \text{Exp}(k_1 t) + A_2 \text{Exp}(k_2 t) \quad (2.4)$$

Vale a pena ressaltar que em todas as equações aqui referenciadas, as constantes de secagem K_i , podem ser determinadas sem referência a forma e as 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 (Rapusas e Driscoll, 1995).

Finalizando a discussão antecedente, pode-se mostrar, de forma geral, que as variações do teor de umidade do produto em processo de secagem, segundo descrição de um modelo em camada fina sob condições constantes do ar, pode ser expresso pela equação seguinte:

$$\bar{M}^* = f(T_a, UR_a, v_a, \bar{M}_o, t, \text{encolhimento e outros})$$

No entanto, convém ressaltar a importância do conhecimento dos efeitos da secagem sobre as propriedades físicas, químicas e biológicas do produto secado, uma vez que afetam sensivelmente os fenômenos de transferência de massa, principalmente em alimentos.

2.4.1.2 Modelos difusivos

Os autores mencionados a seguir consideram a difusão de água líquida como principal mecanismo de transporte de água em produtos sob secagem (Brooker et al., 1992; Sarker et al., 1994; Zogzas e Maroulis, 1996; Liu e Simpson, 1997; Park et al., 1997; Freire e Chau, 1997; Baroni e Hubinger, 1997; Sabadini et al., 1997; Park e Brod, 1997; Tolaba et al., 1997; Quintana-Hernandez et al., 1997; Li et al., 1997; Lima, 1999; Carmo, 2000; Oliveira, 2001; Farias, 2002; Nascimento, 2002; Derdour e Desmorieux, 2004; Lim et al., 2004; Lima et al., 2004; Rodriguez et al., 2005; Porto e Lisboa, 2005; Carmo e Lima, 2005).

A difusão da água em termos do gradiente de concentração no produto é estabelecida pela segunda lei de Fick, e por isso tem sido muito utilizada.

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \nabla \cdot (D \nabla M) \quad (2.5)$$

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 (Karathanos et al., citados por Saravacos, 1995).

2.4.2 Camada espessa

De maneira expressiva a secagem em camada fina não altera as condições do ar de secagem. Entretanto, quando o material forma uma camada espessa, as propriedades termodinâmicas do ar de secagem são modificadas acentuadamente. Nesse caso, seu potencial de secagem diminui. Em virtude disso, os modelos de secagem em camada espessa são mais completos que os de camada fina, possuindo equações mais complexas que levam em consideração as transferências de calor e massa entre o produto e o ar que o circunda.

2.4.2.1 Modelo da Universidade Estadual de Michigan

Esse modelo tem sido usado para avaliar e simular a secagem de produtos biológicos, baseando-se nas idéias de Shumann, Van Arsdel e Klapp, citados por Bakker-Arkema et al. (1974). Nesse modelo, citado por Bakker-Arkema et al. (1974), Martins e Mata (1984) e Mata (1985) e Brooker et al (1992), foram assumidas as seguintes suposições:

- a redução de volume durante a secagem é desprezível;
- o gradiente de temperatura dentro dos grãos individualmente é desprezível;
- a condução de calor de partícula para partícula é desprezível;
- a distribuição do ar na massa de grãos é uniforme;
- as paredes do secador são adiabáticas, com capacidade calorífica desprezível;
- as capacidades caloríficas do ar e dos sólidos são constantes durante pequenos intervalos de tempo;
- as variações da temperatura e a razão de umidade do ar com respeito ao tempo são desprezíveis, quando comparadas com as variações de temperatura e razão de umidade com respeito à posição;

$$\frac{\partial T}{\partial t} \ll \frac{\partial T}{\partial y} \quad \text{e} \quad \frac{\partial x}{\partial t} \ll \frac{\partial x}{\partial y}$$

- uma equação fidedigna de secagem em camada fina e de umidade de equilíbrio é conhecida.

Os modelos de secagem apresentados a seguir são aplicáveis à secagem em camada espessa de grãos e são fundamentadas nas leis de transferência de calor e massa

➤ **Secagem em camada estacionária**

O modelo de secagem em camada estacionária é baseado nos balanços de massa e energia, escritas para um volume diferencial ($S dy$) localizado numa posição arbitrária da camada de produtos biológicos, conforme Figura 2.17. Esse modelo é aplicado para a secagem de grãos em silos e em batelada.

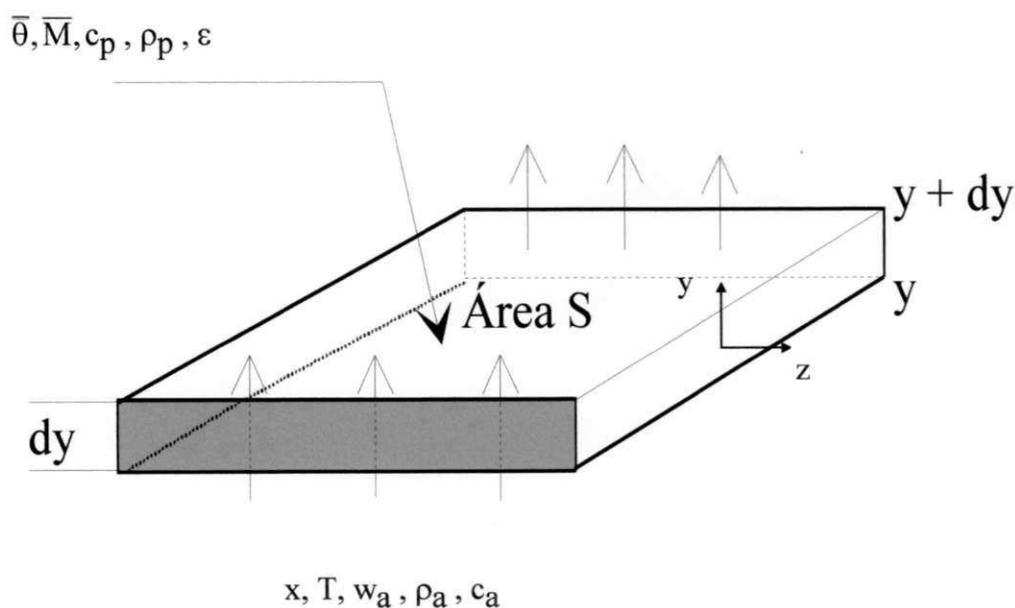


Figura 2.17 - Volume elementar de uma camada de produtos.

As equações que podem ser obtidas são descritas a seguir:

• **Balço 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 a energia transferida ao produto, por convecção, mais a variação, com relação ao tempo, da entalpia do ar nos espaços vazios.

Por meio de símbolos matemáticos, tem-se:

$$\begin{aligned} & (\rho_a w_a c_a + \rho_a w_a x c_v) S T dt - (\rho_a w_a c_a + \rho_a w_a x c_v) \left(T + \frac{\partial T}{\partial y} dy \right) S dt = \\ & = A^* h_c (T - \bar{\theta}) S dy dt + (\rho_a c_a + \rho_a x c_v) \epsilon S dy \frac{\partial T}{\partial t} dt \end{aligned} \quad (2.6a)$$

Efetuada as devidas simplificações e reagrupando os termos, obtém-se:

$$\frac{\partial T}{\partial y} = - \frac{h_c (T - \bar{\theta}) A^*}{\rho_a w_a (c_a + x c_v)} \quad (2.6b)$$

- **Balanco de energia para o produto**

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

Através da simbologia matemática, tem-se:

$$\begin{aligned} A^* h_c S (T - \bar{\theta}) dy dt = & (\rho_p c_p + \rho_p c_w \bar{M}) S dy \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial t} dt - h^*_{fg} \rho_a w_a \frac{\partial x}{\partial y} dy S dt - \\ & - c_v (T - \bar{\theta}) \rho_a w_a \frac{\partial x}{\partial y} dy S dt \end{aligned} \quad (2.7a)$$

Reagrupando, obtém-se:

$$\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial t} = \frac{h_c A^*}{\rho_p c_p + \rho_p c_w \bar{M}} (T - \bar{\theta}) + \left[\frac{h^*_{fg} + c_v (T - \bar{\theta})}{\rho_p c_p + \rho_p c_w \bar{M}} \right] \rho_a w_a \frac{\partial x}{\partial y} \quad (2.7b)$$

- **Balço de massa para o ar**

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

Quando apresentado em símbolos matemáticos, tem-se:

$$\rho_a w_a S x dt - \rho_a w_a S \left(x + \frac{\partial x}{\partial y} dy \right) dt + \epsilon S \rho_a \frac{\partial x}{\partial t} dy dt = \rho_p S \frac{\partial \bar{M}}{\partial t} dy dt \quad (2.8a)$$

Efetutando as devidas simplificações e reagrupando os termos, obtém-se:

$$\frac{\partial x}{\partial y} = - \frac{\rho_p}{\rho_a w_a} \frac{\partial \bar{M}}{\partial t} \quad (2.8b)$$

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

- **Balço de massa para o produto**

O teor de umidade do produto pode ser obtido usando-se uma equação empírica de camada fina, apropriada para cada produto, que é dada por:

$$\frac{\partial \bar{M}}{\partial t} = f_1 \quad (2.9)$$

em que (f_1) representa uma equação de camada fina adequada.

Para resolver quaisquer dos modelos matemáticos, torna-se necessário que as condições iniciais e de contorno sejam conhecidas. Essas condições são: (a) a temperatura e o teor de umidade iniciais do grão, (b) a temperatura e a razão de umidade iniciais do ar de secagem. Para os modelos de secagem em camada fixa as condições de contorno são:

$$\begin{aligned}
 T(y=0, t) &= T_{ent} & \bar{\theta}(y, t=0) &= \bar{\theta}_o \\
 \bar{M}(y, t=0) &= \bar{M}_o & x(y=0, t) &= x_{ent}
 \end{aligned}$$

➤ **Secagem em fluxo concorrente**

Em secadores de fluxos concorrentes, o ar e o produto escoam na direção y , perpendicular a z , no mesmo sentido. Os balanços de energia e de massa são obtidos de forma semelhante ao que foi feito para camada estacionária. Portanto, fazendo-se os balanços de energia e de massa para o ar de secagem e para o produto, obtém-se o seguinte sistema de equações:

$$\frac{\partial T}{\partial y} = \frac{-h_c A^*}{\rho_a w_a c_a + \rho_a w_a c_v x} (T - \bar{\theta}) \quad (2.10)$$

$$\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial y} = \left(\frac{h_c A^*}{\rho_p v_p c_p + \rho_p v_p c_w \bar{M}} (T - \bar{\theta}) \right) - \left(\frac{h^*_{fg} + c_v (T - \bar{\theta})}{\rho_p v_p c_p + c_w \bar{M} \rho_p v_p} \rho_a w_a \frac{\partial x}{\partial y} \right) \quad (2.11)$$

$$\frac{\partial x}{\partial y} = \frac{\rho_p v_p \partial \bar{M}}{\rho_a w_a \partial y} \quad (2.12)$$

$$\frac{\partial \bar{M}}{\partial t} = f_2 \quad (2.13)$$

onde (f_2) representa uma equação de camada fina apropriada. Para os modelos de secagem em fluxo concorrente as condições de contorno são:

$$\begin{aligned}
 T(y=0, t) &= T_{ent} & \bar{\theta}(y, t=0) &= \bar{\theta}_o \\
 \bar{M}(y=0, t) &= \bar{M}_o & x(y=0, t) &= x_{ent}
 \end{aligned}$$

➤ **Secagem em fluxo contracorrente**

Nos secadores de fluxo contracorrente, o fluxo de ar e o fluxo de produtos fluem na direção y , perpendicular a z , porém em sentidos contrários. De forma semelhante ao que foi

feito para camada estacionária, procede-se nesse caso para obter os balanços de energia e de massa, conseguindo-se o seguinte sistema de equações:

$$\frac{\partial T}{\partial y} = \frac{h_c A^*}{\rho_a w_a c_a + \rho_a w_a c_v x} (T - \bar{\theta}) \quad (2.14)$$

$$\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial y} = \left(\frac{h_c A^*}{\rho_p v_p c_p + \rho_p v_p c_w \bar{M}} (T - \bar{\theta}) \right) + \left(\frac{h^*_{fg} + c_v (T - \bar{\theta})}{\rho_p v_p c_p + c_w \bar{M} \rho_p v_p} \rho_a w_a \frac{\partial x}{\partial y} \right) \quad (2.15)$$

$$\frac{\partial x}{\partial y} = \frac{\rho_p v_p \partial \bar{M}}{\rho_a w_a \partial y} \quad (2.16)$$

$$\frac{\partial \bar{M}}{\partial t} = f_3 \quad (2.17)$$

em que (f_3) representa uma equação de camada fina adequada. Para os modelos de secagem em fluxo contracorrente as condições de contorno são:

$$\begin{aligned} T(y = L, t) &= T_{ent} & \bar{\theta}(y = 0, t) &= \bar{\theta}_o \\ \bar{M}(y = 0, t) &= \bar{M}_o & x(y = L, t) &= x_{ent} \end{aligned}$$

➤ Secagem em fluxo cruzado

Os secadores de fluxos cruzados caracterizam-se pelo cruzamento do fluxo de ar e o fluxo de produtos, pois enquanto o ar flui na direção y o produto flui na direção z . Os balanços de energia e de massa obtém-se de forma semelhante ao que foi feito para a camada estacionária. Portanto, tem-se o seguinte sistema de equações:

$$\frac{\partial T}{\partial y} = \frac{-h_c A^*}{\rho_a w_a c_a + \rho_a w_a c_v x} (T - \bar{\theta}) \quad (2.18)$$

$$\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial z} = \left(\frac{h_c A^*}{\rho_p v_p c_p + \rho_p v_p c_w \bar{M}} (T - \bar{\theta}) \right) + \left(\frac{h^*_{fg} + c_v (T - \bar{\theta})}{\rho_p v_p c_p + c_w \bar{M} \rho_p v_p} \rho_a w_a \frac{\partial x}{\partial y} \right) \quad (2.19)$$

$$\frac{\partial x}{\partial y} = \frac{\rho_p v_p}{\rho_a w_a} \frac{\partial \bar{M}}{\partial z} \quad (2.20)$$

$$\frac{\partial \bar{M}}{\partial t} = f_4 \quad (2.21)$$

em que (f_4) representa uma equação de camada fina adequada. Para os modelos de secagem em fluxos cruzados as condições são:

$$\begin{aligned} T(y = 0, t) &= T_{ent} & \bar{\theta}(y, t = 0) &= \bar{\theta}_o \\ \bar{M}(y, t = 0) &= \bar{M}_o & x(y = 0, t) &= x_{ent} \end{aligned}$$

Para resolver os sistemas de equações oriundos do modelo da Universidade Estadual de Michigan, é necessário usar técnicas numéricas de volumes finitos, diferenças finitas ou elementos finitos uma vez que a solução analítica é impossível.

O modelo aqui referenciado foi utilizado por Bakker-Arkema et al. (1971), para determinar o efeito da área superficial do grão nas taxas de transferência de calor e massa, com grande sucesso.

Bakker-Arkema et al. (1974) fornecem em seu trabalho o modelo da Universidade Estadual de Michigan na forma discretizada, escrito em linguagem Fortran, bem como os resultados da simulação de secagem de milho, utilizando o referido modelo.

Walker e Bakker-Arkema (1981), investigando a secagem de arroz em multi estágio, à alta temperatura, em secadores de fluxo concorrente, utilizaram o modelo da Universidade Estadual de Michigan.

Martins (1982) utilizou o modelo da Universidade Estadual de Michigan na simulação da secagem de milho em leito fixo. Nesse caso, as equações diferenciais foram convertidas em diferenciais ordinárias por meio de discretização da variável espacial, utilizando um programa computacional desenvolvido por Hindmarsh.

Bakker-Arkema et al. (1987), utilizaram o modelo aqui referenciado para estudar a taxa de secagem de 3 variedades de grãos: milho, arroz e trigo, em secadores de fluxo concorrente, com grande sucesso. Nesse trabalho são fornecidos ainda, resultados da performance da secagem de grão em um secador de fluxo concorrente de dois estágios.

Vasconcelos e Alsina (1992) utilizaram o modelo da Universidade Estadual de Michigan para simular a secagem de feijão carioca, considerando o mesmo, segundo eles, satisfatório, com algumas restrições, após a comparação dos resultados teóricos com os experimentais.

Além desses, outros pesquisadores têm utilizado o modelo aqui descrito, além dos que foram anteriormente citados. Fasina et al. (1997) estudaram o resfriamento e secagem de grãos de alfafa em fluxo cruzado; Costa et al. (1997) pesquisaram a secagem de sementes de soja, em fluxo concorrente e contracorrente; Li et al. (1997) simularam o processo de secagem de grão de trigo e arroz, em secadores circulares recirculante, em fluxos cruzados. Sousa et al. (2004) reportam um modelo fenomenológico pseudo-transiente para descrever as trocas de energia e massa em secador do tipo contra corrente; Cao et al. (2004) apresenta uma pesquisa sobre a modelagem e simulação de secadores de grãos, de fluxo misturado, avalia aspectos energético de construção do secador e qualidade do grão.

Giner e Estrebou (2004) apresentam em seu trabalho, um programa computacional (FluX) para simulação de secadores de fluxos cruzados, onde fazem a aplicação para trigo e avalia a performance do secador e a qualidade do grão pós-secagem.

Assis et al. (2004) reportam um estudo da secagem de ração de soja em um secador de leito móvel concorrente com perfil de velocidade do ar e porosidade não-uniformes.

Farias (2003) e Farias et al. (2004) apresentam um estudo teórico da secagem de grão de milho em secador de esteira contínuo e fluxos cruzados. Resultados numéricos foram comparados aos dados experimentais do teor de umidade reportado na literatura e uma boa aproximação foi obtida.

2.4.2.2 Outros modelos

Franca et al. (1994), pesquisando a secagem contínua e intermitente de milho em camada espessa, utilizaram um modelo com base no esquema da Figura 2.18. O modelo é descrito por:

$$\frac{\partial(\rho_a x)}{\partial t} + \nabla \cdot \left(\rho_a \frac{\bar{v}}{\varepsilon} x \right) = -\frac{\rho_p}{\varepsilon} \frac{\partial \bar{M}}{\partial t} \quad (2.22)$$

$$\frac{\partial(\rho_a T)}{\partial t} + \nabla \cdot \left(\rho_a \frac{\bar{v}}{\varepsilon} T \right) = -\frac{h_c A^* (T - \bar{\theta})}{\varepsilon (c_a + x c_v)} \quad (2.23)$$

$$\frac{\partial(\rho_p \bar{\theta})}{\partial t} = \frac{h_c A^* (T - \bar{\theta})}{(c_p + c_w \bar{M})} + \frac{h_{fg} + c_v (T - \bar{\theta})}{c_p + c_w \bar{M}} \rho_p \frac{\partial \bar{M}}{\partial t} \quad (2.24)$$

Na discretização do sistema de equações acima, foram utilizadas as técnicas de elementos finitos e volumes finitos. Ambas apresentaram comportamento de solução muito próximo do que foi apresentado, utilizando-se o método de diferenças finitas.

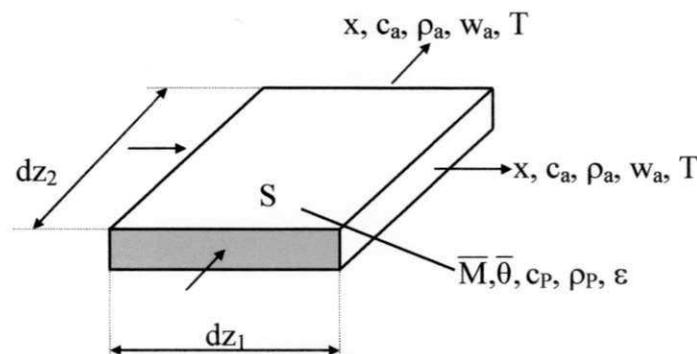


Figura 2.18 - Esquema do volume de controle diferencial

Nganhou et al. (1992), propuseram um modelo unidimensional para prever a taxa de transferência de calor e massa em leito espesso de cacau, fixo. As equações de conservação, de acordo com a Figura 2.17, são as seguintes:

✓ Fase sólida

- massa

$$(1 - \varepsilon)\rho_p \frac{\partial \bar{M}}{\partial t} = (1 - \varepsilon)\rho_p D \frac{\partial^2 \bar{M}}{\partial y^2} - \dot{m} \quad (2.25)$$

- energia

$$(1 - \varepsilon)\rho_p c_p \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial t} = (1 - \varepsilon)k_p \frac{\partial^2 \bar{\theta}}{\partial y^2} - \dot{m}h_{fg} + h_c A^*(T - \bar{\theta}) \quad (2.26)$$

✓ Fase gás

- massa

$$\varepsilon\rho_p \frac{\partial x}{\partial t} + \varepsilon\rho_p w_a \frac{\partial x}{\partial y} = \varepsilon\rho_a D_{va} \frac{\partial^2 x}{\partial y^2} + \dot{m} \quad (2.27)$$

- energia

$$\varepsilon\rho_a c_a \frac{\partial T}{\partial t} + \varepsilon\rho_a c_a w_a \frac{\partial T}{\partial y} = \varepsilon k_a \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} - h_c A^*(T - \bar{\theta}) \quad (2.28)$$

em que $\dot{m} = \rho_a h_m A^*(x_{sat} - x)$ é a taxa de evaporação de massa por unidade de volume.

Kameoka et al. (1986), propuseram um modelo de secagem de grão (considerado heterogêneo) em camada espessa, descrito pelas equações abaixo, de acordo com a Figura 2.17.

✓ Grão

- Balanço de energia

$$(1 - \varepsilon)k_p \frac{\partial^2 \theta_f}{\partial y^2} - (1 - \varepsilon)c_p \rho_p \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial t} - h_c A^*(T - \bar{\theta}) = 0 \quad (2.29)$$

- Balanço de massa

Para a determinação do teor de umidade médio no tempo foi utilizado o modelo de difusão líquida.

✓ Ar

- Balanço de energia

$$-\varepsilon\rho_a c_a \frac{\partial T}{\partial t} - \rho_a c_a w_a \frac{\partial T}{\partial y} + k_a \varepsilon \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} - h_c A^* (\theta_f - T) - \rho_p h_{fg} \frac{\partial \bar{M}}{\partial t} = 0 \quad (2.30)$$

- Balanço de massa

$$\varepsilon\rho_a \frac{\partial x}{\partial t} + \rho_a w_a \frac{\partial x}{\partial y} = D^* \frac{\partial^2 x}{\partial y^2} - \rho_p \frac{\partial \bar{M}}{\partial t} \quad (2.31)$$

sendo:

$$D^* = \frac{1}{0,622} \frac{D_v \varepsilon P}{RT_{abs} \sigma} \quad (2.32)$$

Fioreze et al. (1984/1985) utilizaram o modelo de Thompson, para simular a secagem de raspas de mandioca em camada espessa. Segundo eles, o modelo se ajustou bem aos dados experimentais, com a ressalva de que os dados obtidos possuíam erros dentro dos limites aceitáveis do processo de secagem.

Ezeike e Otten (1981), pesquisando o processo cíclico de secagem de grãos, propuseram um modelo teórico baseado nas considerações termodinâmicas de distribuição de massa, trabalho e calor dentro do grão. Nesse trabalho, foi investigado o comportamento dinâmico de um leito de milho submetido a fluxo de calor intermitente. As seguintes equações foram derivadas do balanço de massa e energia em um volume diferencial do leito:

a) Período de aquecimento

- Processo de transporte externo

$$\frac{\partial x}{\partial t} = -\frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon \rho_a} \rho_p \frac{\partial \bar{M}}{\partial t} - \frac{v_o}{\varepsilon} \frac{\partial x}{\partial z} \quad (2.33)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -\frac{h_c A^* (T - \bar{\theta})}{\varepsilon (\rho_a c_a + \rho_a c_v x)} - \frac{v_o}{\varepsilon} \frac{\partial T}{\partial z} + \frac{(1-\varepsilon) \rho_p c_v (T - \bar{\theta})}{\varepsilon (\rho_a c_a + \rho_a c_v x)} \frac{\partial \bar{M}}{\partial t} \quad (2.34)$$

$$\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial t} = \frac{h_c A^* (T - \bar{\theta})}{(1-\varepsilon) (\rho_p c_p + \rho_p c_w \bar{M})} + \frac{h_{fg} \rho_p}{(\rho_p c_p + \rho_p c_w \bar{M})} \frac{\partial \bar{M}}{\partial t} \quad (2.35)$$

- Processo de transporte interno

$$\frac{\partial M(r,t)}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left[r^2 D(T,M) \frac{\partial M}{\partial r} \right] \quad (2.36)$$

$$\frac{\partial \theta(r,t)}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left[r^2 \alpha(\theta, M) \frac{\partial \theta}{\partial r} \right] \quad (2.37)$$

b) Período de repouso

c)

- Processo de transporte externo

$$\frac{\partial x}{\partial t} = D_{wa} \frac{\partial^2 x}{\partial z^2} \quad (2.38)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -\frac{h_r A^* (T - \theta)}{\varepsilon (\rho_a c_a + \rho_a c_v x)} \quad (2.39)$$

$$\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial t} = \frac{h_c A^* (T - \bar{\theta})}{(1-\varepsilon) (\rho_p c_p + \rho_p c_w \bar{M})} + \frac{k_{ep}}{(\rho_p c_p + \rho_p c_w \bar{M})} \frac{\partial^2 \bar{\theta}}{\partial z^2} \quad (2.40)$$

Os processos de transporte interno são representados pelas mesmas equações já apresentadas.

Giner et al. (1996) simulando a secagem de trigo em secadores de fluxo cruzado e leito fixo, chegaram a um modelo matemático de transferência de calor e massa para leito fixo. Quatro equações foram conseguidas para a camada de grãos e o fluxo de ar (Figura 2.19). São elas:

$$\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial t} = - \frac{h_c A^* (T - \bar{\theta}) - \rho_s \left(- \frac{d\bar{M}}{dt} \right) [h_{fg}^* + c_v (T - \bar{\theta})]}{\rho_{ps} (c_{ps} + c_w \bar{M})} \quad (2.41)$$

$$\frac{\partial x}{\partial z} = \frac{(1 - \varepsilon)}{G_a} \rho_{ps} \left(- \frac{d\bar{M}}{dt} \right) \quad (2.42)$$

$$\frac{\partial T}{\partial z} = - \frac{h_c A^* (1 - \varepsilon) (T - \bar{\theta})}{G_a (c_{as} + c_v x)} \quad (2.43)$$

$$\frac{d\bar{M}}{dt} = \begin{cases} - (\bar{M} - \bar{M}_e) \left[\frac{A^* \sqrt{\frac{D}{\pi}} - 0,331 A^{*2} Dt}{1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} A^* \sqrt{Dt} + 0,331 A^{*2} Dt} \right] & \text{para } A^{*2} (Dt)^{1/2} < 0,98 \\ - (\bar{M} - \bar{M}_e) \frac{\pi^2}{a} A^{*2} D & \text{para } A^{*2} (Dt)^{1/2} > 0,98 \end{cases} \quad (2.44)$$

Segundo os autores, o modelo foi adequado para descrever os referidos processos de secagem, apresentando, no entanto, algumas recomendações para o uso do modelo em fluxo cruzado. Nesse trabalho, o modelo foi validado em escala industrial, visando obter economia de energia no processo.

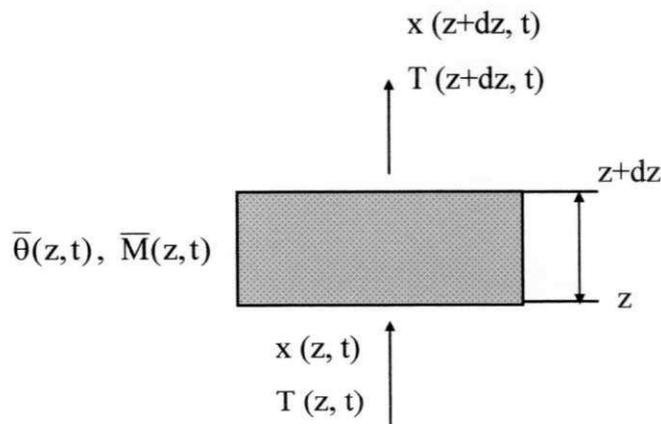


Figura 2.19 - Camada elementar de um leito granular

Jumah et al. (1996), pesquisaram a secagem de grãos em batelada intermitente e constante, em secador tipo “spouted bed” de jato rotativo. Utilizaram o seguinte conjunto de equações:

- Balanço macroscópico

$$\dot{m}_a (x_{af} - x_{ao}) = -m_{ps} \frac{d\bar{M}}{dt} \quad (2.45)$$

$$\dot{m}_a (c_a + c_v x_{ao}) (T_{ent} - T_f) - m_{ps} \Delta \bar{H}_{dv} \frac{d\bar{M}}{dt} = m_{ps} (c_p + c_w \bar{M}) \frac{d\bar{\theta}}{dt} \quad (2.46)$$

- Cinética térmica e de secagem de uma partícula simples

$$\frac{\partial M(r,t)}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left[r^2 D \frac{\partial M}{\partial r} \right] \quad (2.47)$$

$$\rho_s c_p \frac{\partial \theta(r,t)}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left[r^2 k_p \frac{\partial \theta}{\partial r} \right] \quad (2.48)$$

Nessa pesquisa, os dados numéricos foram comparados com dados experimentais, apresentando bom ajuste.

Eltigani e Bakker-Arkema (1987) estudaram o controle automático de secadores de grãos de fluxo cruzado, desenvolveram um modelo matemático transiente, constituído pelas seguintes equações:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = - \frac{h_c A^* (T - \bar{\theta})}{\varepsilon (\rho_a c_a + \rho_a c_v x)} - \frac{w_a}{\varepsilon} \frac{\partial T}{\partial y} \quad (2.49)$$

$$\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial t} = \frac{h_c A^* (T - \bar{\theta})}{(\rho_p c_p + \rho_p c_w \bar{M})} + \left[\frac{c_v (T - \bar{\theta}) + h_{fg}^*}{(c_p + c_w \bar{M})} \right] \frac{\partial \bar{M}}{\partial t} - u_p \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial z} \quad (2.50)$$

$$\frac{\partial x}{\partial t} = \frac{\rho_p}{\varepsilon \rho_a} \frac{\partial \bar{M}}{\partial t} + \frac{w_a}{\varepsilon} \frac{\partial x}{\partial y} \quad (2.51)$$

$$\frac{\partial \bar{M}}{\partial t} = -u_p \frac{\partial \bar{M}}{\partial z} \quad (2.52)$$

A equação de camada fina utilizada foi a do modelo de Thompson. Como aplicação, foi testado o controle da secagem de milho, com grande sucesso.

Martinez-Vera et al. (1995), investigando a secagem de grãos (arroz e milho) em batelada, em leito fluidizado, propuseram um sub-modelo composto por apenas duas equações dadas por:

- Balanço de umidade

$$-m_{ps} \frac{d\bar{M}}{dt} = G_{as} (x_f - x_o) \quad (2.53)$$

- Balanço de energia

$$m_{ps} c_p \frac{d\bar{\theta}}{dt} = G_{as} (c_{as} + x_o c_v) (T_{ent} - \bar{\theta}_o) - G_{as} (x_f - x_o) \Delta \bar{H}_{dv} \quad (2.54)$$

Unido a essas equações encontra-se o conhecimento de duas medidas de temperatura do leito, separadas por um intervalo de tempo, o que possibilita a solução do sistema de equação. Esse modelo foi utilizado por Martinez-Vera et al. (1997), para simular a secagem de milho em secador de leito fluidizado, em batelada, sendo que dessa feita, o modelo de difusão líquida, considerando partícula esférica, foi usado para descrever a cinética de secagem do produto, considerando o coeficiente de difusão dependente da temperatura do ar e do teor de umidade do material.

Liu e Bakker-Arkema (1997) apresentaram o desenvolvimento de modelos estocásticos para secagem de grãos. Segundo os autores, modelos como o da Universidade Estadual de Michigan, que são do tipo determinístico e que calculam o teor de umidade final do produto na saída do secador, consideram que o teor de umidade na entrada do secador é igual ao teor de umidade médio. Contudo, esta consideração é muito simplificadora, gerando assim a

necessidade de modificações para modelos do tipo estocástico, que aceita distribuição não uniforme do teor de umidade inicial.

No mesmo trabalho Liu e Bakker-Arkema (1997) apresentaram os modelos para secagem em camada fina e espessa (concorrente, contracorrente e fluxo cruzado), assumindo que o teor de umidade inicial tem distribuição normal. A comparação entre os dados experimentais e simulados, mostrou um aceitável ajuste.

Além desses trabalhos, outros pesquisadores também estudaram o processo de secagem em fluxos cruzados, por exemplo: Motta-Lima et al. (1996), Qi e Krishnan, (1996), Pimentel et al. (1998), Yang e Siebemmorgem (2000), Rumsey, e Rovedo, (2001); Archila et al. (2001), Wright, et al. 2003; Campbell, et al. (2003); Schluterman, (2004); Zactiti et al. (2004). Stakic, (2005).

CAPÍTULO 3

METODOLOGIA

Esse item é direcionado à modelagem matemática e simulação numérica da secagem de produtos biológicos, em particular casulos do bicho-da-seda, em um secador de fluxos cruzados. Nessas condições, é apresentado um modelo melhorado baseado no modelo da Universidade Estadual de Michigan, para a realização dos balanços de massa e energia para o ar e para o produto, considerando as propriedades variáveis, a inclusão de todos os termos transientes aplicados para o ar e produto, porosidade e condensação do vapor de água no produto, fornecendo equações adequadas, para descrever o processo de secagem. O modelo da Universidade de Michigan, conforme apresentado no capítulo 2, não considera os termos transientes da temperatura e umidade absoluta do ar.

3.1 Modelagem matemática

As equações que representam os balanços de massa e energia para o ar e para o produto, são obtidas considerando as Figuras 3.1 e 3.3. Na primeira, encontra-se um esquema de um secador tipo esteira com fluxos cruzados; na segunda e na terceira, uma fração volumétrica desse secador. O secador apresentado na Figura 3.1 é composto de três câmaras de secagem com insuflação e exaustão de ar independentes. A câmara de secagem A é a de temperatura mais elevada, e a câmara de secagem C é a que possui menor temperatura de ar de secagem.

Os casulos entrando na parte superior, são transportados ao longo de cada câmara em esteiras transportadoras com a mesma velocidade de deslocamento.

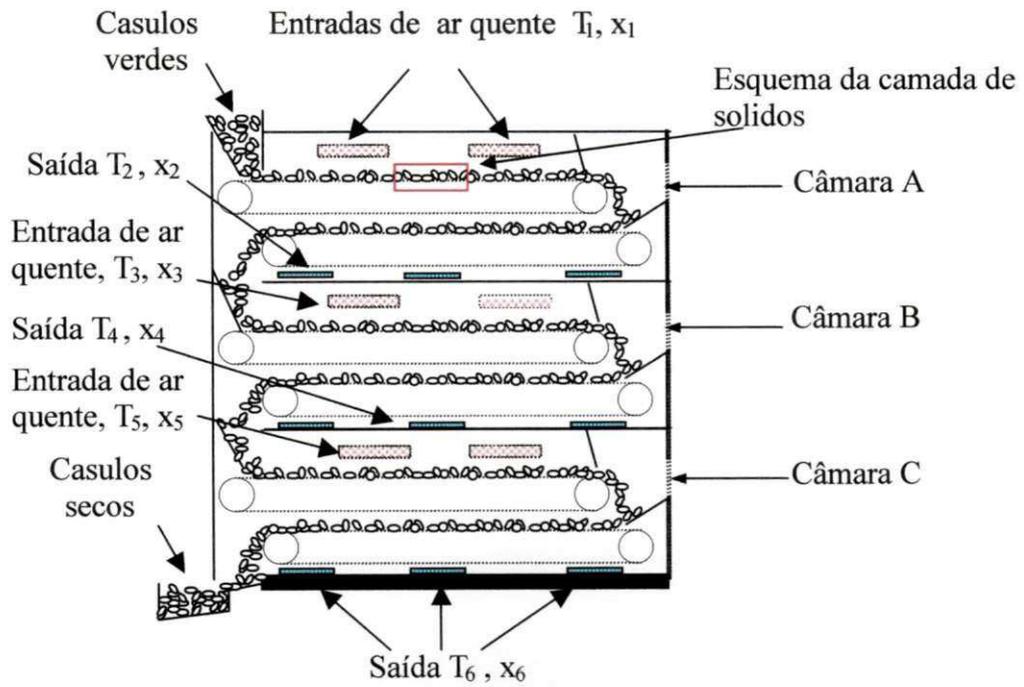


Figura 3.1- Representação esquemática do secador tipo esteira com fluxos cruzados.

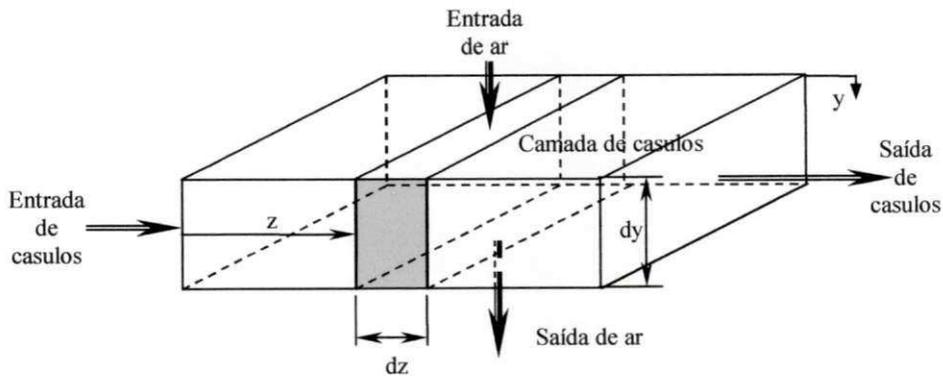


Figura 3.2 - Esquema da camada de sólido em um secador tipo esteira com fluxos cruzados

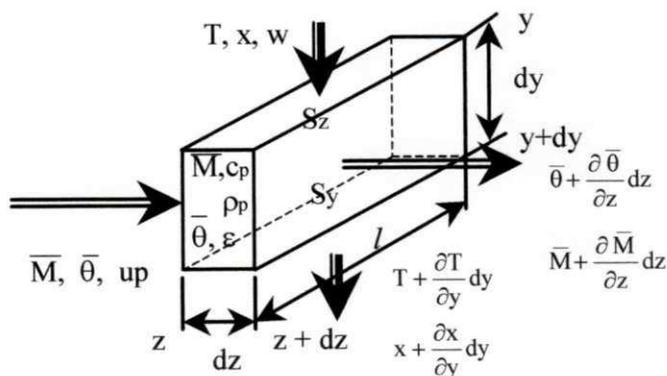


Figura 3.3 - Fração do volume de sólido na camada.

A Figura 3.3 representa uma ampliação da parte sombreada vista na Figura 3.2. Nessa Figura, pode-se ver que o ar entra na parte superior da camada e sai na inferior, enquanto que o casulo entra no lado esquerdo e sai no direito, trocando massa e energia com o ar. Desta forma as equações que constituem o modelo matemático são quatro: energia para o ar e para o produto, e massa para o ar e para o produto, cujas equações são descritas a seguir:

- **Balço 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 a energia transferida ao produto, por convecção, mais a variação com relação ao tempo da energia do ar nos espaços vazios.

$$-\frac{\partial[(\rho_a w_a c_a + \rho_a w_a x c_v)T]}{\partial y} = A^* h_c (T - \bar{\theta}) + \frac{\partial[(\rho_a c_a + \rho_a x c_v \varepsilon)T]}{\partial t} \quad (3.1)$$

- **Balço de energia para o produto**

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

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

- **Balço de massa para o ar**

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

$$\frac{\partial(\rho_a w_a x)}{\partial y} - \frac{\partial(\varepsilon \rho_a x)}{\partial t} = \rho_p \frac{\partial \bar{M}}{\partial t} \quad (3.3)$$

• **Balço de massa do produto**

O teor de água do produto pode ser obtido usando-se uma equação empírica de camada fina, apropriada para cada produto. Nesse estudo, utilizou-se as equações obtidas para o casulo do bicho-da-seda. Lima et al. (1998) reportaram que dentre quatro equações analisadas, a Equação 3.4, apresentou melhor ajuste para descrever a secagem do casulo.

$$\frac{\partial \bar{M}}{\partial t} = a_1^* \text{Exp}(-k_1 t) \quad (3.4)$$

onde: $a_1^* = k_1 M_0 A_1$ e A_1 uma constante.

As seguintes condições de contorno e inicial foram usadas:

$$\begin{array}{ll} \bar{M}(y, t = 0) = \bar{M}_0 & \bar{\theta}(y, z = 0, t = 0) = \theta_0 \\ T(y = 0, z \leq L/3, t) = T_1 & x(y = 0, z \leq L/3, t) = x_1 \\ T(y = 0, L/3 < z \leq 2L/3, t) = T_3 & x(y = 0, L/3 \leq z \leq 2L/3, t) = x_3 \\ T(y = 0, 2L/3 < z \leq L, t) = T_5 & x(y = 0, 2L/3 \leq z \leq L, t) = x_5 \end{array}$$

De acordo com a equação 3.4, Lima (1995) reporta em uma pesquisa, baseando-se em experimentos realizados e simulação numérica, que as melhores condições para a secagem de casulos em secador com fluxos cruzados, em Campina Grande, são $T = 105^\circ\text{C}$, 90°C e 60°C . Nas 1ª, 2ª e 3ª camadas de secagem (Figura 3.1), respectivamente. Dessa forma, o autor propôs as seguintes equações de camada fina para descrever a taxa de secagem:

$$\frac{\partial \bar{M}}{\partial t} = -0.000403427e^{-0.00018984805t} \quad 0 \leq t \leq 7200s \quad e \quad T = 105^\circ\text{C} \quad (3.5)$$

$$\frac{\partial \bar{M}}{\partial t} = -0.00017550e^{-0.00012847830t} \quad 7200 \leq t \leq 14400s \quad e \quad T = 98^\circ\text{C} \quad (3.6)$$

$$\frac{\partial \bar{M}}{\partial t} = -0.00000133872e^{-0.000005738817t} \quad 14400 \leq t \leq 21666s \quad e \quad T = 60^\circ\text{C} \quad (3.7)$$

Informações adicionais sobre o trabalho de Lima (1995) foram dadas no Capítulo 2 dessa pesquisa.

O calor latente de vaporização e o calor específico do casulo, densidade do sólido seco, volume, área de superfície, área de superfície específica, e fração volumétrica do leito são determinadas por:

$$h_{fg} = 352,8(374,14 - T)^{0,33052} \text{ (kJ/kg)} \quad \text{(Pakowski et al., 1991)}$$

$$c_p = 3,6 \text{ kJ/kgK} \quad \text{(Lima et al., 1997)}$$

$$\rho_p = 158,64 \text{ kg/m}^3 \quad \text{(Lima, 1995; Holanda et al., 2004)} \quad (3.8a-f)$$

$$V = \frac{4}{3} \pi L_2 L_1^2 \text{ (m}^3\text{)} \quad \text{(Lima et al., 2002)}$$

$$S = 2\pi L_1 L_2 \left\{ \frac{L_1}{L_2} + \frac{\arcsin \left[\sqrt{1 - \left(\frac{L_1}{L_2} \right)^2} \right]}{\sqrt{1 - \left(\frac{L_1}{L_2} \right)^2}} \right\} \text{ (m}^2\text{)} \quad \text{(Lima et al., 2002)}$$

$$A^* = \frac{S(1 - \varepsilon)}{V} = 271,71 \text{ m}^2 / \text{m}^3$$

$$\varepsilon = 0,147 \quad \text{(Lima, 1995; Holanda et al., 2004)}$$

onde S e V são a área de superfície e volume dos casulos, respectivamente. O parâmetro A^* foi obtido, considerando o casulo como um elipsóide de revolução com dimensões para o eixo principal $L_2 = 2,90 \text{ cm}$ e $L_1 = 1,63 \text{ cm}$ para o eixo secundário obtidas a partir de experimentos.

Para o calor específico utilizou-se a equação sugerida por (Jumah et al., 1996), e para a densidade, temperatura absoluta, constante universal dos gases, umidade relativa, pressão de saturação de vapor e pressão atmosférica local, foram utilizadas as equações que se encontram no trabalho de Rossi, (1987); como segue:

$$c_a = 1,00926 - 44,04033 \cdot 10^{-5} T + 6,17596 \times 10^{-7} T^2 - 4,0972 \times 10^{-10} T^3 \text{ kJ/kgK}$$

$$\rho_a = \frac{P_{\text{atm}} M_a}{R T_{\text{abs}}} \text{ (kg/m}^3\text{)}$$

$$T_{\text{abs}} = T_a + 273,15 \text{ K} \quad (3.9a-g)$$

$$R = 8314,34 \text{ J/kg}$$

$$P_{\text{atm}} = 101325 \text{ Pa}$$

$$UR = \frac{P_{\text{atm}} X_a}{(X_a + 0,622) \cdot P_{\text{vs}}}$$

$$P_{\text{vs}} = 22105649,25 \text{Exp}\{-27405,53 + 97,5413 T_{\text{abs}} - 0,146244 T_{\text{abs}}^2 + 0,12558 \times 10^{-3}$$

$$T_{\text{abs}}^3 - 0,48502 \times 10^{-7} T_{\text{abs}}^4\} / [4,34903 T_{\text{abs}} - 0,39381 \times 10^{-2} T_{\text{abs}}] \text{ (Pa)}$$

O calor específico de água nas fases líquidas e vapor são determinadas por (Jumah et al., 1996):

$$c_v = 1,8830 - 0,16737 \times 10^{-3} T_{\text{abs}} + 0,84386 \times 10^{-6} T_{\text{abs}}^2 - 0,26966 \times 10^{-9} T_{\text{abs}}^3 \text{ (kJ/kgK)} \quad (3.10a)$$

$$c_w = 2,82232 + 1,18277 \times 10^{-2} T_{\text{abs}} - 3,5047 \times 10^{-5} T_{\text{abs}}^2 + 3,6010 \times 10^{-8} T_{\text{abs}}^3 \text{ (kJ/kgK)} \quad (3.10b)$$

O coeficiente de transferência de calor usado na equação seguinte foi obtido por (Incropera e De Witt, 2003):

$$h_c = (k_a / d)(2 + 0,6 \text{Re}^{1/2} \text{Pr}^{1/3}) \text{ (W/m}^2\text{°C)} \quad (3.11)$$

onde $\text{Re} = \frac{\rho_a w_a d}{\mu_a}$ é o número de Reynolds e $\text{Pr} = \frac{c_a \mu_a}{k_a}$ é o número de Prandtl. Nessas equações, d é o diâmetro de uma esfera de volume igual ao volume do casulo considerado como elipsóide.

A velocidade da esteira transportadora usada nas simulações foi $u_p = 0,00133\text{m/s}$, baseando-se em dados experimentais obtidos em secadores industriais por Lima (1995).

3.1.2 Solução numérica

O problema em regime transiente em estudo, pode ser solucionado usando o método numérico de volumes finitos (Maliska, 2004; Pantankar, 1980). Na Figura 3.3, pode-se ver o esquema numérico e o volume de controle analisados nesse trabalho.

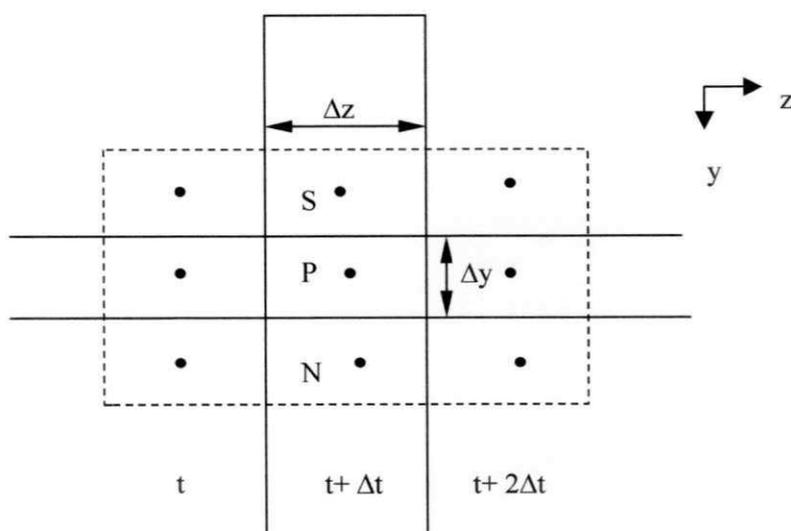


Figura 3.4 - Esquema numérico e o volume de controle utilizados.

Após a integração das equações diferenciais parciais, (Equações 3.1 – 3.4), no volume e no tempo, tem-se como resultado um sistema de equações lineares, na sua forma discretizada como segue:

- **Balço de energia para o ar**

$$A_p T_p = A_s T_s + A_p^o T_p^o + S_c^T \quad (3.9a)$$

onde:

$$A_p = \frac{\Delta y}{\Delta t} + \frac{w_a}{\epsilon} + \frac{A^* h_c \Delta y}{\epsilon(\rho_a c_a + \rho_a x c_v)} \quad (3.9b)$$

$$A_s = \frac{w_a}{\varepsilon} \quad (3.9c)$$

$$A_p^o = \frac{A^* h_c \Delta y}{\varepsilon(\rho_a c_a + \rho_a x c_v)} \quad (3.9d)$$

$$S_c^T = \frac{\Delta y}{\Delta t} \quad (3.9e)$$

• **Balço de energia para o produto**

$$A_p \bar{\theta}_p = A_p^o \bar{\theta}_p^o + S_c^T \quad (3.10a)$$

onde:

$$A_p = \frac{\Delta z}{\Delta t_m} + \frac{h_c A^* \Delta z}{\rho_p c_p + \rho_p c_w \bar{M}} + \frac{c_v \rho_p \frac{\partial \bar{M}}{\partial t} \Delta z}{\rho_p c_p + \rho_p c_w \bar{M}} \quad (3.6b)$$

$$A_p^o = \frac{\Delta z}{\Delta t_m} \quad (3.6c)$$

$$S_c^T = \frac{(h^*_{fg} + c_v T_p) \rho_p \frac{\partial \bar{M}}{\partial t}}{\rho_p c_p + \rho_p c_w \bar{M}} \Delta z + \frac{h_c A^* \Delta z}{\rho_p c_p + \rho_p c_w \bar{M}} \quad (3.6d)$$

Sendo $\Delta t_m = (npy - 1) \Delta t$ e npy o número de pontos nodais na direção y .

• **Balço de massa do ar**

$$A_p x_p = A_s x_s + A_p^o x_p^o + S_c^x \quad (3.7a)$$

onde:

$$A_p = \rho_a \frac{\Delta y}{\Delta t} + \rho_a \frac{w_a}{\varepsilon} \quad (3.7b)$$

$$A_s = \rho_a \frac{W_a}{\varepsilon} \quad (3.7c)$$

$$A_p^o = \rho_a \frac{\Delta y}{\Delta t} \quad (3.7d)$$

$$S_c^x = -\frac{\rho_p}{\varepsilon} \frac{\partial \bar{M}}{\partial t} dy \quad (3.7e)$$

- **Balço de massa do produto**

$$A_p \bar{M}_p = A_p^o \bar{M}_p^o + S_c^M \quad (3.8a)$$

onde:

$$A_p = \frac{\Delta z}{\Delta t_m} \quad (3.8b)$$

$$A_p^o = \frac{\Delta z}{\Delta t_m} \quad (3.8c)$$

$$S_c^M = (a_1^* e^{-k_1 t}) \Delta z \quad (3.8d)$$

Nas equações 3.1 e 3.3 utilizou-se o esquema upwind como função de interpolação para os termos convectivos e um procedimento parabólico na direção z (Patankar, 1980; Maliska, 2004).

Para a obtenção dos resultados, foi desenvolvido um código computacional em linguagem do programa Mathematica® e usado uma malha de 20 pontos nodais, obtida após refinamento de malha ver Figura 3.5. Assumiu-se que todo secador se comporta como uma única esteira transportadora, disposta longitudinal e horizontalmente aquecida em três regiões distintas, representando as três câmaras de secagem da Figura 3.1. No anexo A, apresenta-se código computacional desenvolvido.

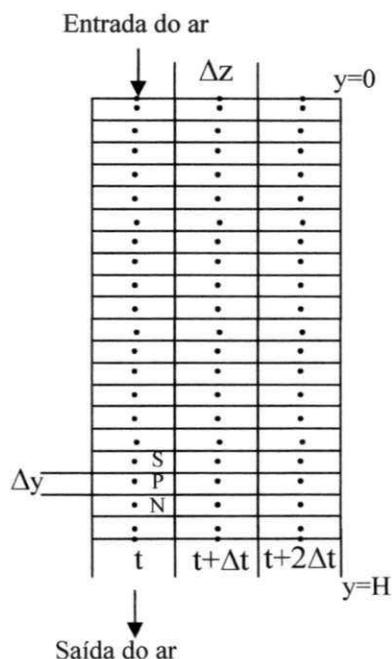


Figura 3.5 - Malha com 20 pontos nodais.

Para analisar os efeitos das condições do ar de secagem na remoção de água dos casulos, sete condições para simulações foram escolhidas de acordo com as condições dos secadores industriais existentes nas cidades de Canguaretama - RN e Maringá - PR, reportados por Lima (1995). Na Tabela 3.1 estão presentes as condições de secagem usadas nesse trabalho.

Tabela 3.1- Condições do ar e do casulo usados nesse trabalho e comprimento total percorrido pelo casulo dentro do secador.

Bicho-da-seda			Ar							L (m)
M_0 (kg/kg)	H (m)	θ_0 (°C)	x_1 (kg/kg)	x_3 (kg/kg)	x_5 (kg/kg)	w_a (m/s)	T_1 (°C)	T_3 (°C)	T_5 (°C)	
2.125	0.02	28.3	0.0173108	0.0173108	0.0173108	0.3	105	90	60	28.2

3.2 Procedimento experimental

3.2.1 Aspectos construtivos e funcionamento do secador

Visando dar uma contribuição à área de secagem de casulos do bicho-da-seda e desenvolvimento de novos secadores mais eficientes energeticamente e de custo mais reduzido, apresenta-se a seguir o projeto e construção de um novo secador tipo esteira transportadora com fluxos cruzados de baixo custo construtivo e principalmente operacional.

O secador similar na Figura 3.1 medindo 2500x1200x2120mm, possui três câmaras de secagem, com seis esteiras transportadoras, sendo duas esteiras em cada câmara, deslocando-se com velocidade constante e sincronizada. Cada câmara de secagem possui sistema independente de aquecimento, insuflação e exaustão de ar. Cada módulo contém duas esteiras que se movimentam em sentidos contrários, medindo cada uma 2500x500mm. Em cada módulo o deslocamento do ar é realizado por um ventilador axial de 1/5 HP com 400mm de diâmetro, capaz de deslocar 70m³/s e de exercer um diferencial de pressão igual a 98,06 Pa.

a) Base de sustentação do secador

Construída com cantoneiras de abas iguais, com 2 ½” x 3/16” formando um retângulo com 2500 x 1200mm, é apoiada em seis rodízios (GS52NRF) dispostos conforme pode-se ver na Figura 3.6 a-b; esses rodízios têm capacidade para suportar 300kg/unidade.

Os dois rodízios do lado esquerdo e do lado direito são móveis, enquanto os dois da direita tem sistema de imobilização.

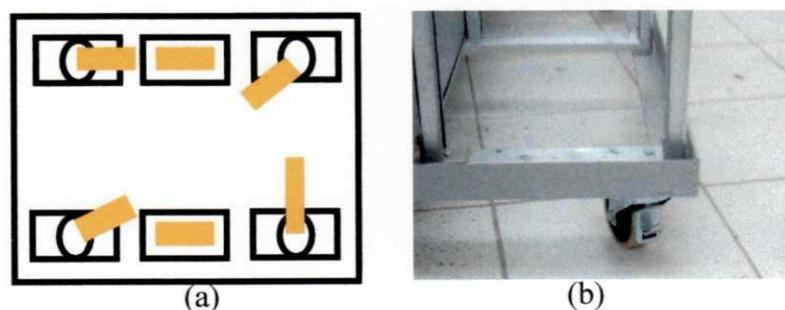


Figura 3.6 - a) Disposição dos rodízios na base do secador, b) Rodízio esquerdo frontal na base.

Todas as informações aqui contidas foram obtidas no catálogo da NOVEX-Rodas e Rodízios. Segundo a NOVEX, a carga em kg por rodízio é calculada da seguinte maneira: carga total = peso da carga + peso do equipamento. Considerando piso liso e a carga sólida, a carga total é dividida por (n-1), ou seja $CR = CT/(n - 1)$, onde CR é a carga por rodízio, CT é a carga total e n é o número de rodízio usados em qualquer equipamento.

b) Estrutura metálica

A parte estrutural do secador é constituída por perfis de aço do tipo Viga “U” enrijecida, conforme pode-se ver na Figura 3.7. Oferece baixo custo, resistência mecânica, leveza e facilidade no acoplamento entre as peças. A estrutura foi idealizada e construída com as peças componentes unidas por parafusos cabeça sextavada de 6x19mm, evitando-se dentro do possível o uso de solda, uma vez que qualquer modificação atual ou futura se tornará fácil de ser realizada.



Figura 3.7 - Viga “U” enrijecida.

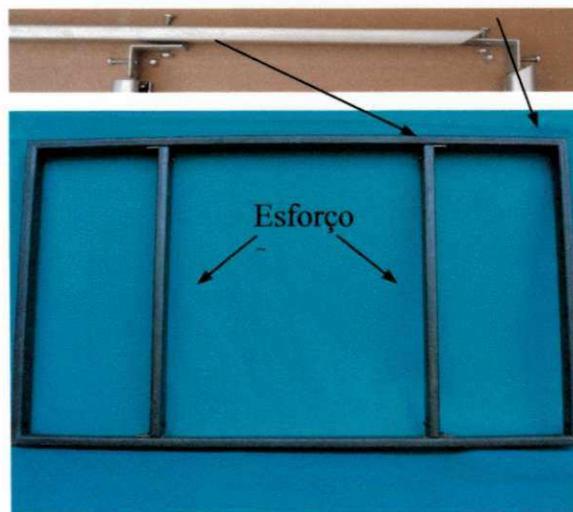


Figura 3.8- Sub-módulo construído com viga “U” enrijecida e detalhes de acoplamento.

Pode-se ver na Figura 3.8 um sub-módulo estruturado de maneira a formar um retângulo central medindo 650x550mm e dois laterais com dimensões de 280x 650mm. Esse

sub-módulo acoplado à outros cinco iguais e unidos por 20 vigas com 440mm de comprimento, formam um módulo com três regiões, sendo que a central contém duas esteiras que se movimentam em sentidos contrários.

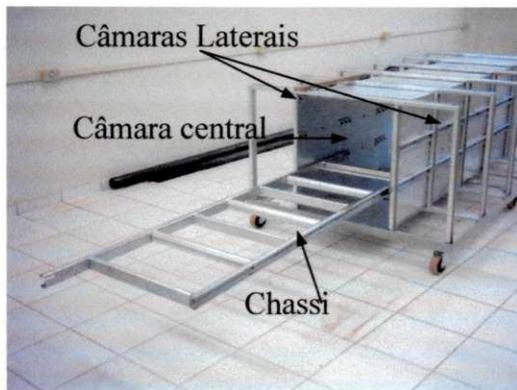
As vigas de ligação são fixadas aos sub-módulos por elementos como os que são vistos na Figura 3.9. Esses elementos além da função de fixação, também servem como apoio para deslizamento do chassi de cada esteira transportadora de casulos. Essas esteiras transportam o produto e nelas se processa a secagem, devido a passagem do ar quente através delas, vindo da fonte de calor. A câmara central é isolada mecânica e termicamente das câmaras laterais.



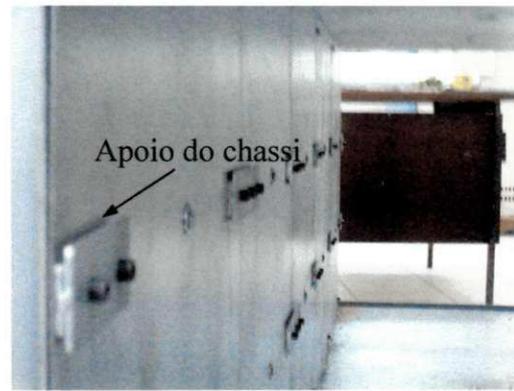
Figura 3.9 - Elementos de fixação/apoio do chassi.

As regiões (câmaras laterais) destinam-se ao abrigo dos dutos de entrada e saída do fluxo de ar quente vindo do trocador de calor. Nessas câmaras estão também os sistemas de acionamento das esteiras e sistemas lógico de controle de cada módulo. Na Figura 3.10 tem-se uma visão de um módulo do secador, onde pode-se distinguir as três câmaras.

Vê-se na Figura 3.11 o conjunto dos três módulos do secador sobrepostos no estágio para a colocação das portas, sistema de acionamento, controles e dutos de ar. Na Figura 3.12 tem-se uma visão da parte superior do secador.



(a)



(b)

Figura 3.10 - a) Módulo inferior do secador; b) Interior da câmara central; vista do apoio do chassi.



Figura 3.11 - Estrutura do secador com os três módulos sobrepostos.



Figura 3.12- Vista superior do módulo do secador.

As setas das Figuras 3.13 a-b indicam as localizações das entradas e saídas de ar quente nas laterais do secador.



(a)



(b)

Figura 3.13 - Vistas do secador: a) lateral esquerda; b) lateral direita.

Nos revestimentos internos e externos do secador, foram usadas chapas finas de aço, preta, nº 18 GS, com espessura de 1,2 mm. As fixações das chapas internas laterais, foram feitas aproveitando os mesmos parafusos, que fixam os guias do chassi (Figura 3.10b). Esses guias foram fixados com parafusos de 6 mm, com cabeça cilíndrica e sextavado interno (parafuso Hallen). As partes superiores internas foram fixadas com parafusos auto-atarraxante. As chapas de revestimento externo foram fixadas também com parafusos auto-atarraxantes

O revestimento das câmeras centrais de secagem e toda estrutura sujeita ao calor, foram pintadas com tinta resistente à temperatura, podendo suportar até 600 °C. A tinta “alta temperatura” oferece a vantagem de não necessitar pintura de base.

As partes externas, foram pintadas com tinta epóxi, em camada grossa, com a finalidade de dar maior proteção e melhor acabamento.

Tabela 3.2 - Relação de peças do secador

Discriminação	Quantidade peças	Peso/Peça (kg)	Peso total (kg)
Lateral interna	10	3,2	32
Teto/piso	10	2,7	27
Apoio/Guia Final	8	0,125	1
Apoio/Guia Interno	16	0,2	3,2
Viga de Acoplamento	20	0,6	12
Chassi*	2	13	26
Rolo Trator (1)	2	4,3	8,6
Rolo Apoio	0	0	0
Rolo Apoio Final (2)	2	3,5	7
Sub-módulo	6	8,2	49,2
Porta Frente/Trás	4	3,46	13,84
Isolante Térmico	5,8	3	17,4
Lateral externa	2	16,92	33,84
Sub-total	-	-	231,08
Tampo superior/inferior externos	2	28,8	57,6
Total	-	-	288,68

*Chassi menos (1) e (2)

Na Tabela 3.2 encontra-se a discriminação das peças que compõem cada módulo com os respectivos pesos unitário e total. Devido ao pequeno tamanho da estrutura, verificou-se

não ser necessário cálculo estrutural. Apesar disso, uma avaliação dos esforços nas colunas assinaladas na Figura 3.8, foi realizada para tal, usando o programa computacional MDSolids (Craig, 2003), chegando-se a conclusão que os esforços suportados por essas colunas são muito inferiores ao que elas poderiam suportar. Vale salientar que essa avaliação não levou em conta a colocação das laterais internas e externas que contribuirão significativamente, aumentando ainda mais a resistência mecânica aos esforços.

c) Chassi da Esteira

O chassi (Figura 3.14) feito com a mesma viga usada na estrutura, suporta dois rolos de aço com diâmetros de 75mm, sendo um trator e o outro de apoio final. Entre o rolo trator e o de apoio final existem três rolos de apoio intermediário com diâmetros de 50mm. Sobre esses rolos desloca-se a esteira que transporta o produto. Todos os rolos são suportados no chassi por cubos de bicicleta, que oferecem as vantagens de não necessitarem mancais, suportarem bem as cargas e serem ajustáveis (Figura 3.15a-b). Os rolos colocados em um chassi móvel, oferece a vantagem de, em caso de manutenção, ser retirado todo o conjunto com facilidade, para trabalhos em qualquer rolo ou na própria esteira.

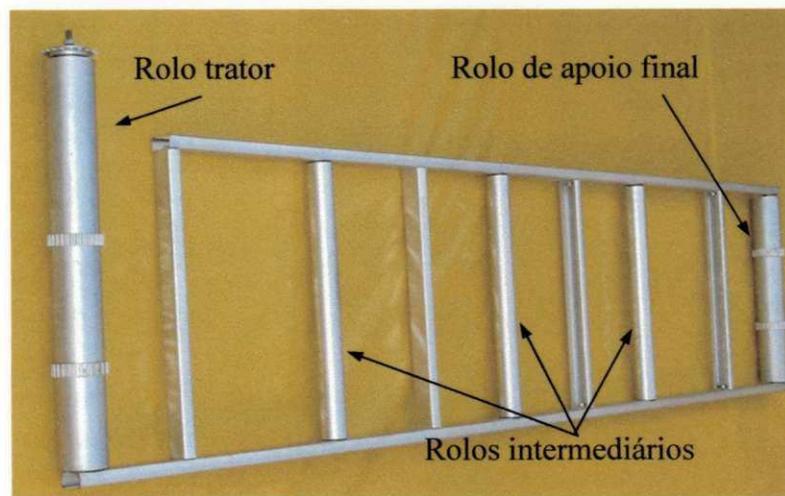
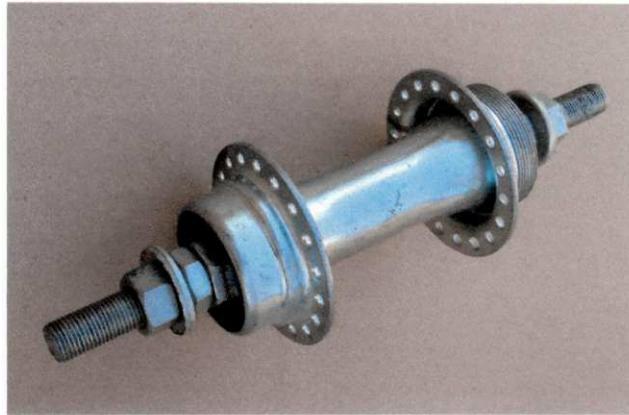
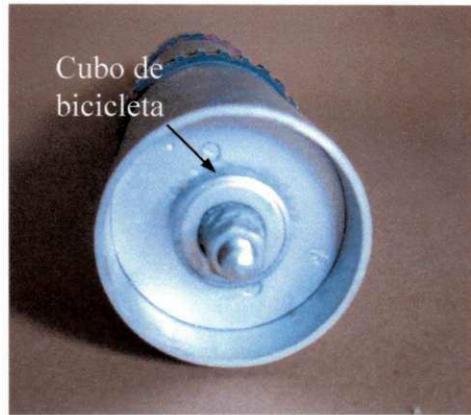


Figura 3.14 - Chassi móvel completo com todos os rolos.



(a)



(b)

Figura 3.15 - a) Cubo traseiro de bicicleta; b) rolo trator 75mm com cubo inserido.

Nas Figuras 3.16 a-b, podem ser vistos em (a), o cubo dianteiro de bicicleta inserido no tubo de 50 mm que forma o rolo intermediário; em (b), vista angular desse mesmo rolo.

Da mesma maneira que os rolos tratores, os rolos intermediários são constituídos por tubos de aço com cubos de bicicletas dianteiros inseridos neles. Devido a maior solicitação de força, usou-se para os rolos tratores, tubo de 75mm e cubo traseiro de bicicleta. Para os rolos intermediários, que são menos solicitados, usou-se tubo de 50mm e cubo dianteiro de bicicleta. Nas Figuras 3.17 e 3.18, pode-se ver o cubo dianteiro semi-inserido no tubo de 50mm e acoplamento do rolo no chassi da esteira.



(a)



(b)

Figura 3.16 - Rolo intermediário 50mm. a) Vista frontal; b) Vista em ângulo.



Figura 3.17 - Cubo dianteiro de bicicleta semi-inserido no tubo de 50 mm.



Figura 3.18 - Detalhe de sustentação no chassi do rolo de 50mm com cubo.

d) Esteira Transportadora

A esteira propriamente dita, é uma malha de aço inox ou de ferro carbono galvanizado. As esteiras foram selecionadas levando-se em conta as seguintes características: tamanho da malha, temperatura de trabalho, tipo de material à ser transportado, entre outros. Das características citadas, o tamanho da malha é fundamental, visto que o produto a ser processado, casulos, não exige esteira com força tensiva grande devido a sua leveza. Quanto à malha, essa deve ser de aproximadamente 15mm, que é ideal para casulos. É grande porém para outros produtos biológicos, como pode ser visto na Figura 3.19, que evidencia a relação de tamanho entre o casulo, milho, feijão e lentilha.

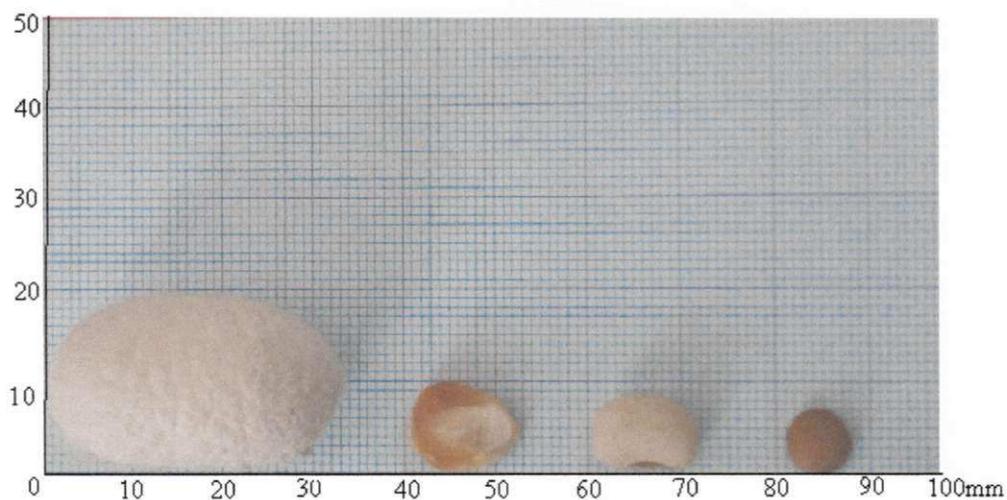


Figura 3.19 - Relação de tamanho entre o casulo, milho, feijão e lentilha.

Foi realizada uma pesquisa no sentido de determinar o tipo de esteira que melhor se adapta a esse projeto. Chegou-se ao fabricante Rocha Telas Industriais, que oferece dez tipos de esteiras transportadoras. Dentre esses tipos, três apresentam características que preenchem os requisitos exigidos para o tipo de secador em desenvolvimento e podem ser vistas nas Figuras 3.20 a-c

O primeiro caso apresentado na Figura 3.20a, esteira convencional, trata-se de uma esteira que satisfaz quanto aos quesitos: custo, tipo de serviço e pequena distância entre fios, porém não se adequa devido ao problema construtivo, que faz a esteira se deslocar lateralmente, exigindo um acabamento mecânico com correntes laterais, que não é o caso desse projeto. O segundo caso, esteira convencional seccional, apresenta as mesmas características da anterior, porém com correção de desvio. O terceiro caso, esteira balanceada, tem características que melhor se adaptam a esse trabalho: eliminação de tendência de deslizamento sobre os rolos terminais, curso reto, esforços balanceados, redução do alongamento longitudinal e contração transversal. Suporta temperatura elevadas até 800 °C. Devido as razões citadas, optou-se por escolher esse tipo de esteira.

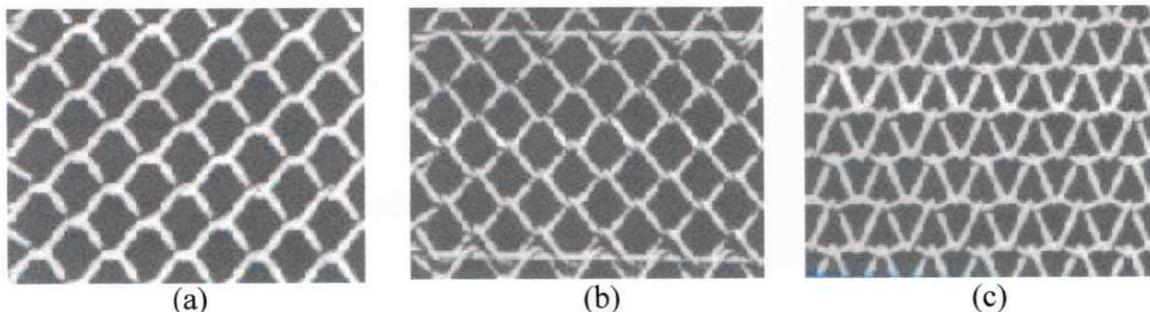


Figura 3.20 - a) Esteira convencional. b) Convencional seccional. c) Esteira balanceada.

e) Sistema motriz das esteiras

Fazer uma esteira movimentar-se não é tão simples como pode aparentar; torna-se cada vez mais complexo quando a velocidade linear da esteira é muito reduzida como nesse projeto, cuja velocidade adotada é de $1,33 \times 10^{-3}$ m/s, baseado no trabalho de Lima (1995). Nesse trabalho, o grau de complexidade é ainda maior, pois consiste em movimentar seis esteiras em sincronismo. O uso de motores comuns, envolve motores de baixa rotação, em conseqüência, maior número de pólos.

Esses motores são pouco usuais devido ao seu elevado preço. Mesmo usando um desses motores, seria necessário um complexo sistema mecânico para redução da velocidade, sendo inviável técnica e financeiramente, para o nível desse trabalho.

Existe a possibilidade de se fazer modificações em motor de indução trifásico e fazê-lo trabalhar como monofásico. A velocidade com controle eletrônico pode ser realizada, mas não deixa de existir a necessidade do uso de redutores mecânicos de velocidade. Outra alternativa seria o uso de motor de corrente contínua convencional que oferece a vantagem de ter sua velocidade controlada de 0 até alguns milhares de rotações. Essa possibilidade é descartada por ser um motor que usa escovas na comutação; esses motores são em geral projetados para trabalhos com períodos de curta duração, não sendo adequado para trabalhos contínuos.

Por último, é apresentado na Figura 3.21, o acionamento idealizado e construído pelo autor desse trabalho, que usa um solenóide para puxar a esteira em intervalos de tempo rigorosamente iguais; a cada 3 segundos é fornecido um pulso ao solenóide, provocando um deslocamento de 4 mm, que corresponde ao movimento exigido para a esteira. No caso específico desse trabalho, são necessários 6 conjuntos acionadores, sendo todos comandados por um único circuito eletrônico, que garante um perfeito sincronismo entre as esteiras. Esse sistema não usa redutores mecânicos de velocidade.

Na Figura 3.21 tem-se uma visão do conjunto de peças que compõe o sistema mecânico de acionamento das esteiras. Nela é visto o conjunto mecânico montado e sobreposto à esse, o compartimento que abriga o circuito eletrônico de potência.

O circuito que comanda o acionamento da esteira é percebido na Figura 3.23, onde é usado o C.I. 555 responsável pelo envio de pulso para ativar o transistor de efeito de campo (FET) IRF640, cujo aspecto físico é mostrado na Figura 3.24.

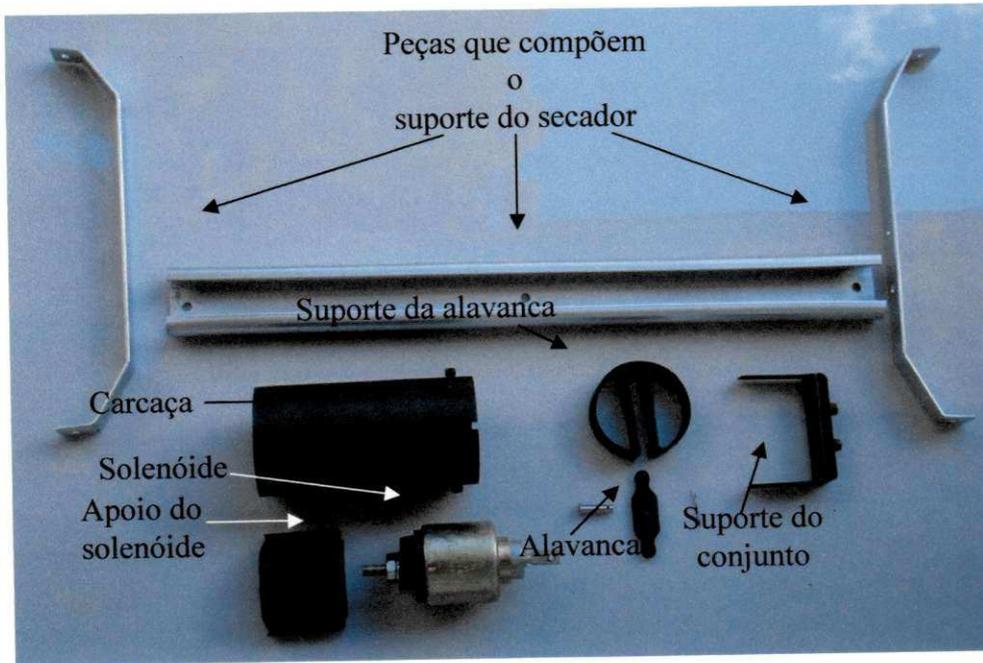


Figura 3.21 - Peças que compõem o sistema de acionamento da esteira.

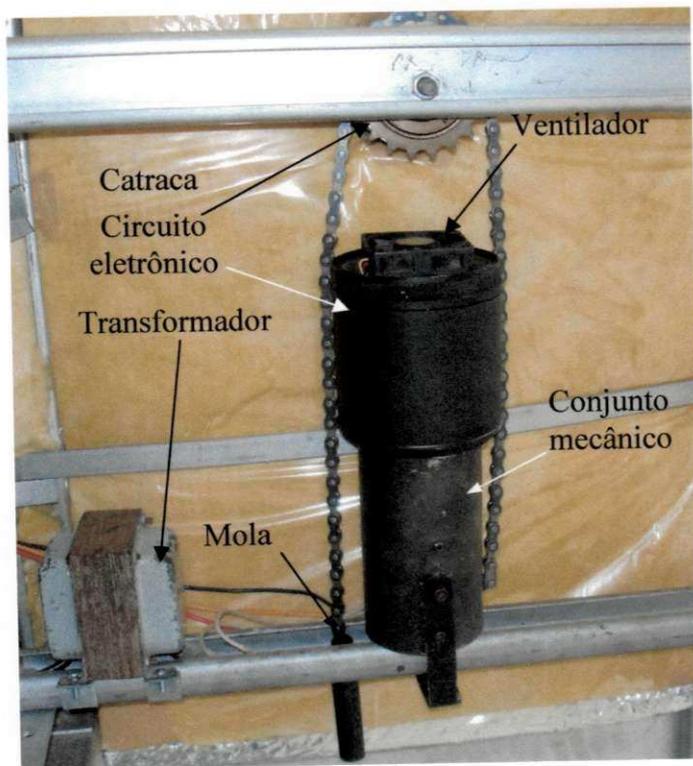


Figura 3.22 - Conjunto de acionamento, mola, catraca, circuito e solenóide.

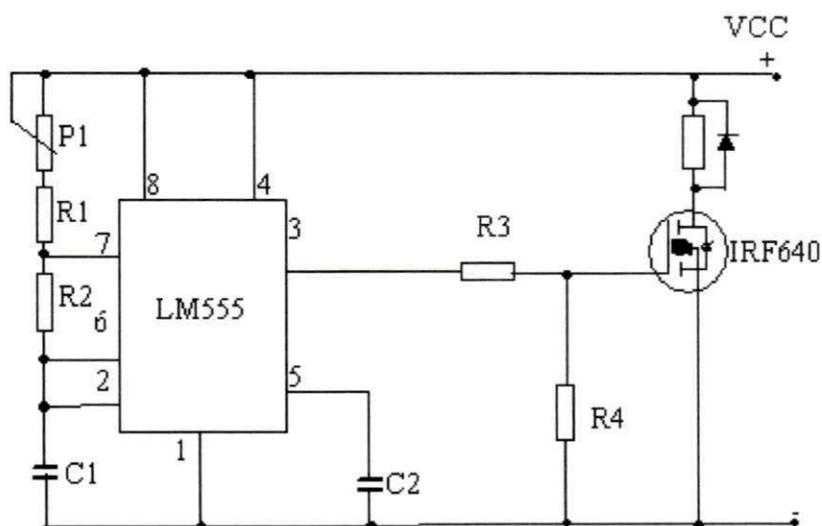


Figura 3.23 - Circuito do acionador da esteira.

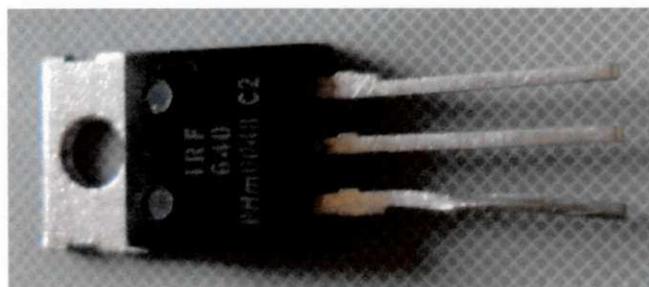


Figura 3.24 - Aspecto físico do Transistor de Efeito de Campo (FET).

f) Aquecedores de ar

Apesar do uso de aquecedores de ar do tipo elétrico resistivo não serem operacionalmente econômico, se comparados aos aquecedores à gás, seu investimento inicial é bastante baixo. A fim de minimizar os custos operacionais dos aquecedores de ar, usam-se técnicas no acionamento elétrico, que minimizam-se os custos de energia elétrica.

Para aplicação nessa pesquisa, inicialmente construiu-se um banco de resistências blindadas conforme pode-se ver na Figura 3.25. Essas resistências oferecem a vantagem de proteger os usuários, dos equipamentos que as contém, contra choque elétrico. Uma resistência blindada de má qualidade pode oferecer grande risco, uma vez que outros cuidados são negligenciados, tais como: não polarização do equipamento e/ou falta de aterramento A

resistência para estufa por ter o elemento resistivo aparente, oferece maior risco de acidente elétrico, porém, se houver cuidados quanto a polarização, isolamento do ambiente onde elas estão e aterramento do equipamento, gera-se condições para evitar acidentes.



Figura 3.25 - Aquecedor de ar com resistências blindadas.

A necessidade da troca do sistema de deslocamento de ar (por razões de projeto), de ventiladores radiais por axiais, e visando maior aproveitamento energético, tornou-se essencial a mudança do tipo de resistências. As resistências vistas na Figura 3.26 são próprias para estufa. Esse tipo oferece a vantagem de ter o elemento resistivo aparente, proporcionando uma imediata transferência de calor para o fluxo de ar que a contorna. A resistência para estufa se torna economicamente vantajosa, pois o preço é sensivelmente menor que a blindada.



Figura 3.26 - Resistência blindada de 1000W, ao lado de resistências tipo estufa de 1000W e 600W.

Para comprovar a melhora no aproveitamento energético, foi realizado experimentos de desempenho térmico das duas resistências. Um ventilador radial, um multímetro, duas resistências e um anemômetro compõem o aparato usado e que é visto nas Figuras 3.27 a-b. Com esse aparato foram determinados tensão, resistência, corrente elétrica, temperatura e velocidade do ar.

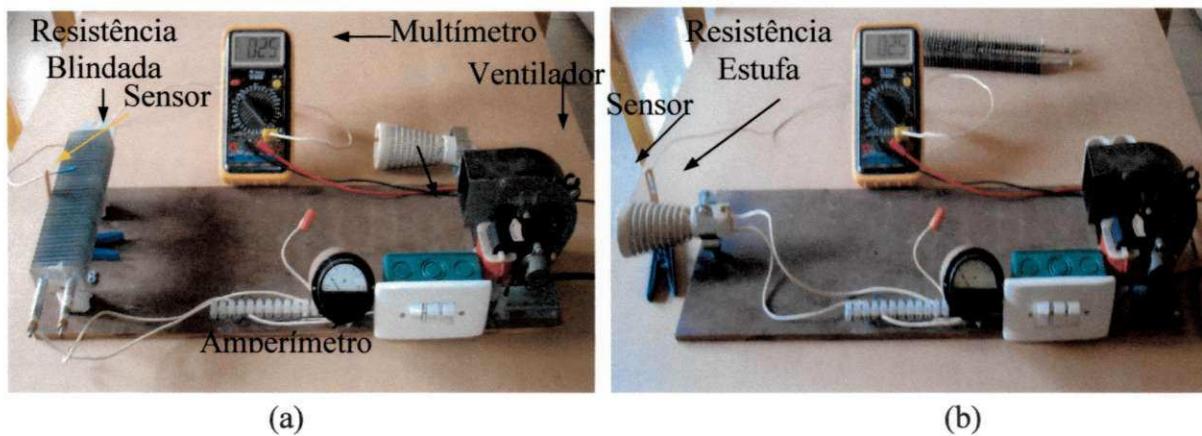


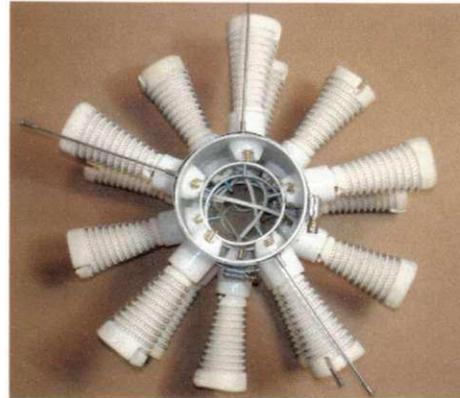
Figura 3.27 - Aparato para teste. a) Resistência blindada. b) Resistência estufa

Os experimentos consistiram em determinar a transferência de calor ocorrida da resistência para o termopar integrante do multímetro Minipa Modelo ET-2040A, colocado à 30mm acima da mesma. Nos experimentos realizados, em ambos os casos as resistências foram energizadas por 10s.

Selecionado o tipo de resistência elétrica a ser usada e com a finalidade de melhorar o aproveitamento energético das resistências, foi idealizado o sistema que pode ser visto na Figura 3.28a-b, onde as resistências estão colocadas radialmente no duto, para que seja aproveitado o fluxo de ar ao máximo. Por ocasião do teste com um compressor sendo usado para soprar o ar, e algumas resistências energizadas, notou-se regiões do elemento resistivo com incandescência, demonstrando não haver troca de calor nesses pontos. As setas da Figura 3.29, apontam para essas regiões incandescentes.



(a)



(b)

Figura 3.28 - a) Suporte das resistências, vista lateral. b) vista frontal.

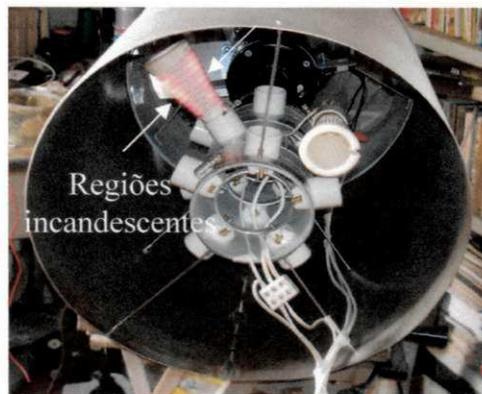


Figura 3.29 - Resistência com regiões incandescentes.

O sistema de aquecimento das câmaras do secador é constituído por conjuntos de resistências, sendo o primeiro conjunto composto por quatro módulos, o segundo e o terceiro por três. Cada módulo contém cinco resistências em disposição radial, com capacidade de dissipar 3000W (Figuras 3.30).

O esquema elétrico apresentado na Figura 3.30 representa todos os conjuntos de resistências que compõem os aquecedores de ar; onde R_1 , R_2 , R_3 e R_4 são quatro conjuntos compostos por 5 resistências de 600 W cada, perfazendo um total de 12,0 kW para o primeiro aquecedor. A maior potência no primeiro aquecedor, justifica-se por ser o módulo do secador que necessita maior nível de temperatura, isto é, 105°C. Os conjuntos formados por R_5 , R_6 , R_7 e R_8 , R_9 , R_{10} são formados por 5 resistências também de 600W totalizando 9kW cada. A potência total dos aquecedores é 30kW que necessita uma corrente de 136,36A, sob uma tensão de 220V. Nesse nível de corrente não é prudente ligar toda carga.

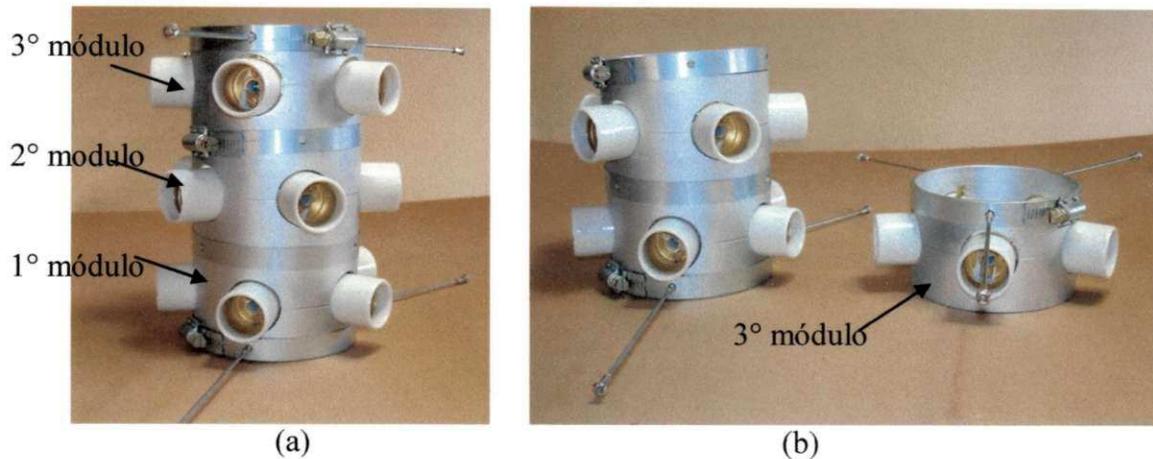


Figura 3.30 - a) Conjunto de módulos montado; b) conjunto desmontado.

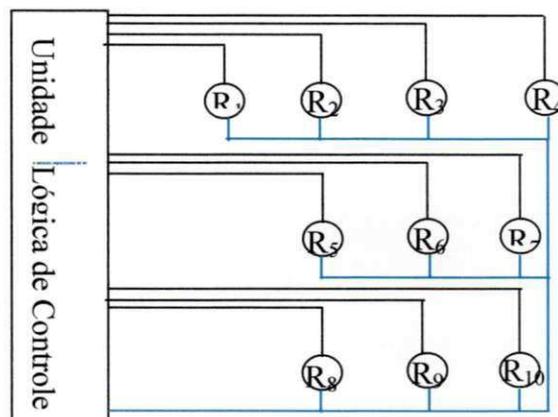


Figura 3.31 - Esquema elétrico dos aquecedores de ar.

Para isso, o circuito lógico de controle faz a energização seqüencial dos conjuntos de resistências, que são ligadas por salva, isto é, liga-se um conjunto por um breve intervalo de tempo e desliga-se por igual período, o que torna suave a variação da potência.

Esse sistema é comandado por um circuito eletrônico, que tem como função principal seqüenciar a energização das resistências nos conjuntos de aquecimento. Funcionando com um terço da potência total disponível no aquecedor de ar, esse sistema armazena calor em cada resistência. Esse calor residual é mantido até que cada elemento resistivo seja novamente energizado. O sistema seqüencial também proporciona maior vida útil às resistências. O elemento resistivo quando trabalha com ligação imutável, torna-se incandescente. Decorrido algum tempo aumenta a incandescência e o fio resistivo fica cada

vez mais brilhante. Nesse estágio, ele fica frágil, tornando-se sensível a choques térmico e mecânico, podendo fundir-se a qualquer instante (Figura 3.32).

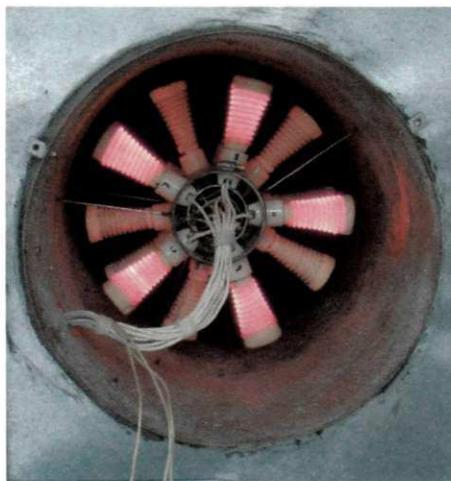


Figura 3.32 - Resistências incandescentes com o fio resistivo tendendo à brilhante.

g) Sistemas de controle elétrico-eletrônico das resistências

Seqüenciar a energização parece ser uma tarefa simples, porém quando chega-se a aplicação prática, torna-se mais complexa. O comando eletrônico, referido no item f, tem como peça principal um CI (circuito integrado) ou (chip), visto em sua forma física na Figura 3.33. Esse CI é o NE 555 ou simplesmente 555, como é conhecido universalmente no mundo da eletrônica. Produzido no início da década dos anos 70, a popularidade desse circuito é tanta que a Samsung da Coreia produz mais de 1 bilhão de unidades por ano (Wikipédia, 2003).

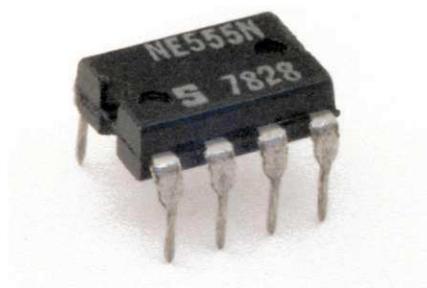


Figura 3.33 - Aspecto físico do NE555.

A grande aplicação desse componente é como temporizador, por isso é muito comum referir-se a ele como o temporizador 555. Opera em três maneiras diferentes: monoestável,

astável⁵ e biestável. Nesse trabalho é utilizado o modo astável, (oscilador) que fornece um trem de pulsos na saída. Sem aprofundar-se em detalhes interno do 555, é necessário saber o princípio de funcionamento desse chip. Esse C.I. funciona com base em um circuito RC colocado na parte externa do mesmo.

Na Figura 3.34, pode-se ver um circuito esquemático que simula parte da operação realizada através do 555. Quando a chave está na posição 1, o capacitor C carrega-se; mudando-a para a posição 2, o capacitor descarrega-se por intermédio de R. Essa é uma maneira mecânica de carregar e descarregar um capacitor.

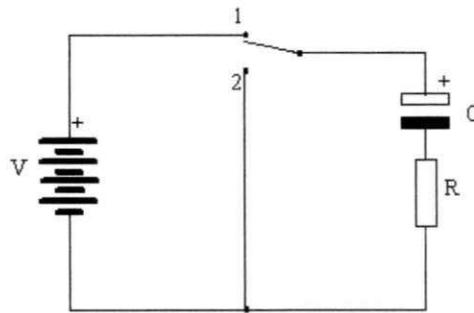


Figura 3.34 - Simulação de carga e descarga de um capacitor.

O chaveamento (carregar e descarregar o capacitor) é realizado eletronicamente no interior do 555, sendo externamente responsável por esse ciclo de carga e descarga, o circuito RC, exemplificado na Figura 3.35. O capacitor carrega-se até que a tensão sobre ele atinja $2/3$ de V_{cc} e descarrega-se até $1/3$ de V_{cc} (Figura 3,36).

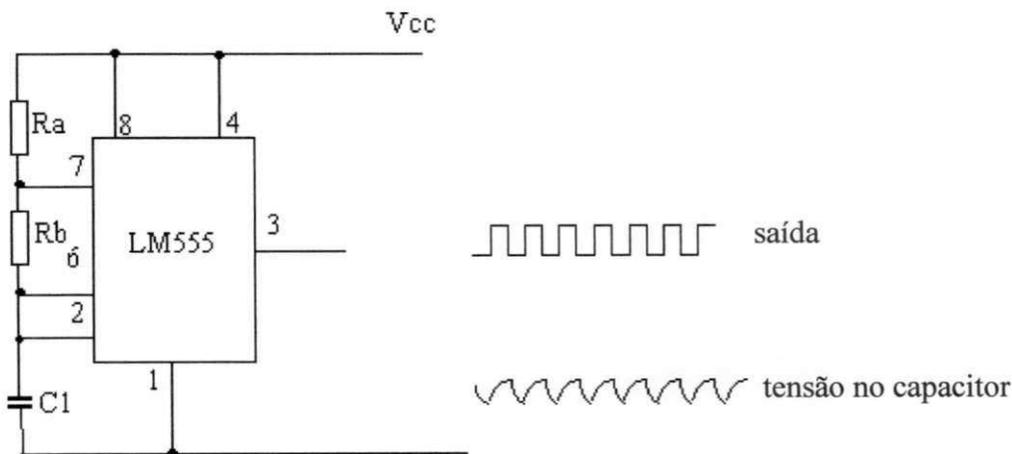


Figura 3.35 - Esquema do C.I. 555 em operação astável.

⁵ Um multivibrador astável é um circuito eletrônico que tem dois estados, mas nenhum dos dois é estável (Wikipédia 2003).

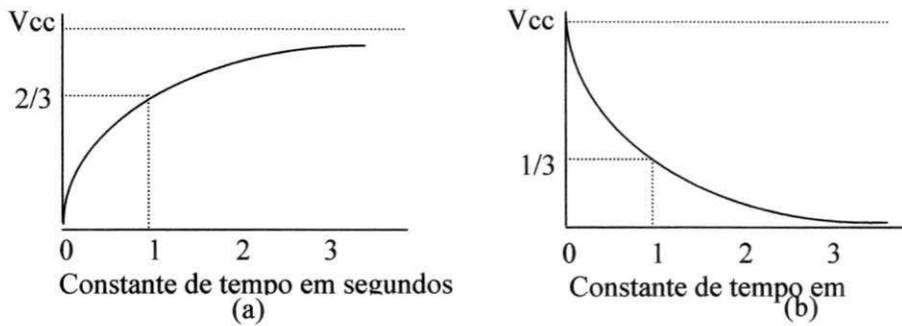


Figura 3.36 - a) Forma de onda da carga; b) forma de onda da descarga.

O ciclo de carga, ou nível alto, é calculado por intermédio da Equação (3.12), onde a carga é realizada por meio de $R_a + R_b$; enquanto o ciclo de descarga calcula-se com auxílio da Equação (3.13), sendo esse realizado através do resistor R_b . As formas de onda na saída e sobre o capacitor, podem ser observadas na Figura 3.36. Havendo necessidade de aumentar a frequência de trabalho, diminui-se o valor do capacitor e/ou valor de R . Na Tabela 3.3 encontram-se discriminadas as unidades usadas nos cálculos da temporização.

As equações referenciada no parágrafo acima são:

$$t_1 = 0,693(R_a + R_b)C \quad \text{tempo de carga} \quad (3.12)$$

$$t_2 = 0,693R_b C \quad \text{tempo de descarga} \quad (3.13)$$

$$\tau = t_1 + t_2 \quad \text{período de temporização} \quad (3.14)$$

$$\hat{f} = \frac{1}{\tau} = \frac{1,44}{(R_a + 2R_b)C} \quad \text{frequência de saída} \quad (3.15)$$

As formas de onda dos ciclos de carga e descarga em detalhe podem ser vistas na Figura 3.36.

Tabela 3.3 - Unidades usadas no temporizador 555

Resistência	Capacitância	Período	Frequência
Ω	F	s	Hz
$M\Omega$	μF	s	Hz
$k\Omega$	μF	ms	kHz

Dando continuidade a essa análise dos circuitos de comando, têm-se na seqüência, de importância, o circuito integrado CD4017BCN, componente que completa o sistema de automação em baixa potência. O C.I. CD4017BCN é um chip de vasta aplicação no mundo da automação. O seqüenciador simulador de semáforo é exemplo de uma aplicação trivial; o diagrama desse exemplo pode ser visto na Figura 3.37. Nessa aplicação, foi usado como gerador de pulsos o circuito integrado HEF4093BP - Quad 2-Input NAND Schmitt-Trigger, ao invés do NE555.

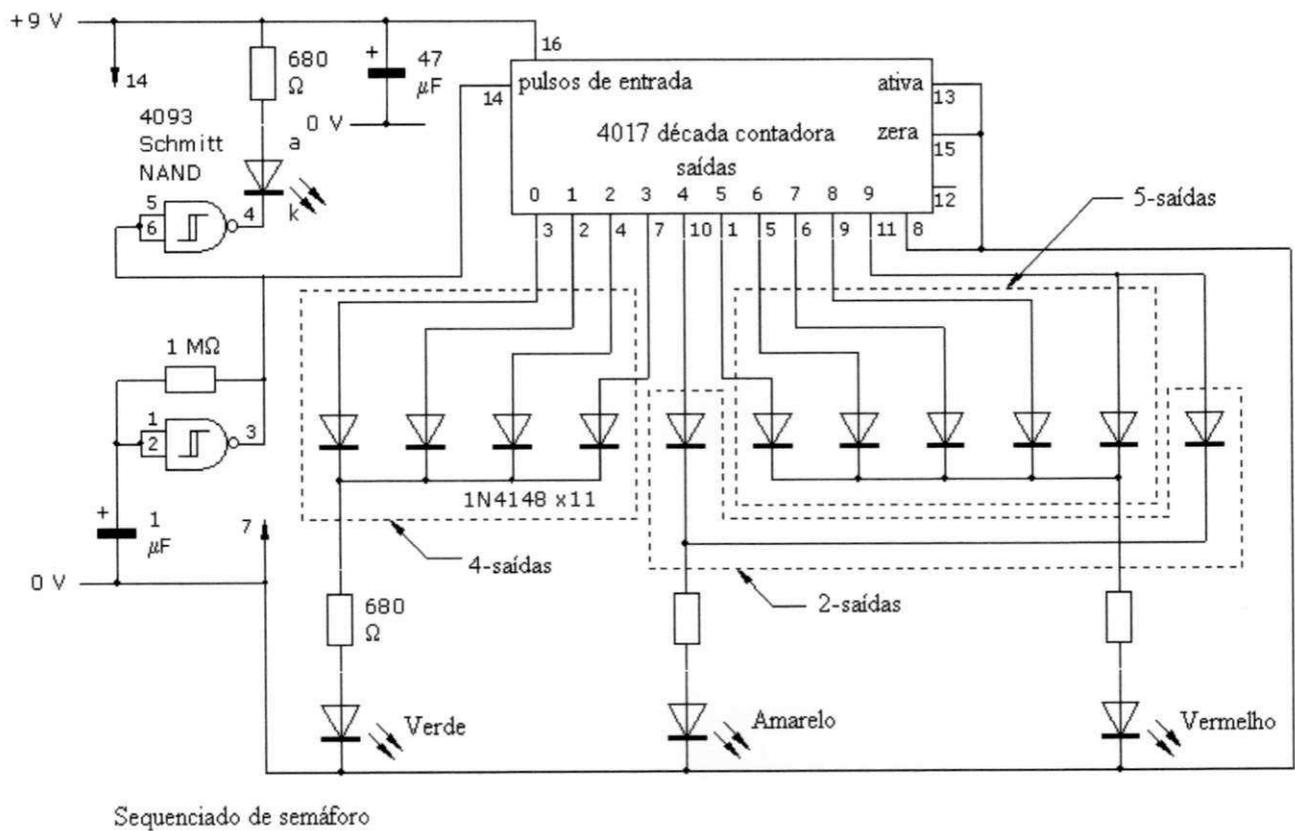


Figura 3.37 - Controle de um semáforo.

Fonte - www.doctrionics.co.uk/4017.htm#sequencing

<i>sequence step</i>	<i>red</i>	<i>amber</i>	<i>green</i>
0	0	0	1
1	0	0	1
2	0	0	1
3	0	0	1
4	0	1	0
5	1	0	0
6	1	0	0
7	1	0	0
8	1	0	0
9	1	1	0

Figura 3.38 - Resultado da saída no circuito da Figura 3.36.

Fonte: www.doctrionics.co.uk/4017.htm#sequencing

Na Figura 3.38 vê-se a programação da seqüência de comutação e o resultado nas saídas do circuito.

Nesse trabalho, o chip CD4017BCN recebe o sinal do NE555 em forma de pulsos no pino 14, que então é distribuído em suas 10 saídas, conservando a mesma forma do sinal de entrada, como pode ser observado na Figura 3.39. O aspecto físico desse componente pode ser visto na Figura 3.40

A seqüência natural das saídas desse integrado é a ordem crescente delas de 0 a 9, isto é, quando a saída 0 está em nível alto, as demais saídas estão em nível baixo. Na seqüência, a saída 1 vai ao nível alto e todas as demais permanecem em nível baixo, sucessivamente. No caso dessa pesquisa, o seqüenciamento normal se aplicado nos módulos para controle do aquecimento, provoca a energização de apenas uma resistência de cada vez, isso corresponde a aplicação de 1/10 da potência instalada.

Verificando que seria muito baixa a aplicação acima citada, optou-se por trabalhar com duas resistências em paralelo. Como o módulo de aquecimento é composto por cinco

resistências, afim de facilitar as ligações e reduzir a quantidade de cabos, optou-se por trabalhar com as resistências ligadas em pares. Posteriormente usou-se diodos no circuito de controle para interligar as saídas do integrado 4017. O resultado foi a energização de cinco resistências, perfazendo um total de 1/3 da potência instalada, isto é, 2970W. Esse procedimento teve como base o plano de energização visto na Figura 3.40. Nessa figura pode-se observar os diodos que direcionam os sinais e fazem as resistências serem ativadas simultaneamente. Na Tabela 3.4, além de se ver a ordem de ativação das resistências, também é possível saber quantas estão energizadas em cada ciclo, informação essa obtida com a contagem nas linhas correspondente à cada saída. Os últimos componentes que controlam a fase de baixa tensão e corrente é o transistor BC548, acoplado ao C.I. MOC3020 que tem a função de acoplar por meio ótico e isolar eletricamente a baixa da alta tensão. O aspecto físico desses componentes, podem ser vistos na Figura 3.42.

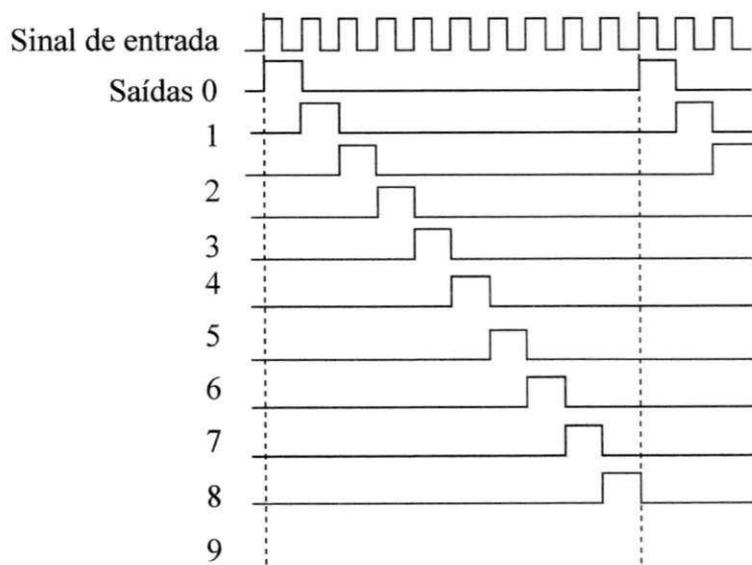


Figura 3.39 - Formas de onda dos sinais de entrada e saídas.

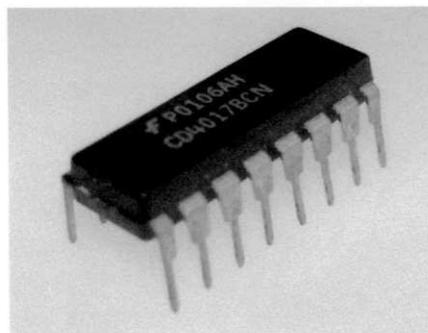


Figura 3.40 - Circuito Integrado CD4017BCN

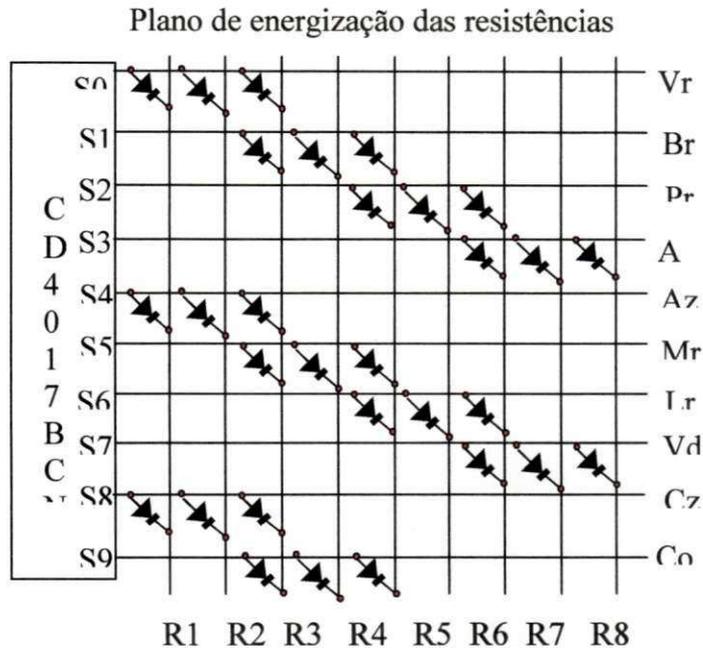
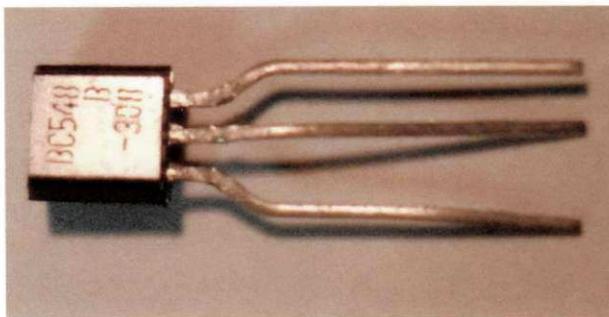


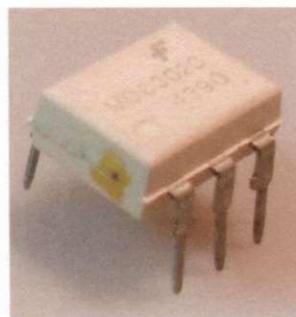
Figura 3.41 - Plano de identificação dos diodos que direcionam os sinais de saída.

Tabela 3.4 - Saída versus resistências

Saídas	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9
0	1	2	2	0	0	0	0	0	0
1	0	0	2	1	2	0	0	0	0
2	0	0	0	0	2	2	1	0	0
3	0	0	0	0	0	0	1	2	2
4	1	2	2	0	0	0	0	0	0
5	0	0	2	1	2	0	0	0	0
6	0	0	0	0	2	2	1	0	0
7	0	0	0	0	0	0	1	2	2
8	1	2	2	0	0	0	0	0	0
9	0	0	2	1	2	0	0	0	0



(a)



(b)

Figura 3.42 - a) Transistor bipolar b) Acoplador óptico.

No lado da alta tensão, acoplado a ele está o último componente eletrônico, o triac BT137-600E, capaz de controlar tensões até 600 volts e correntes até 8 amperes (Figura 3.43).

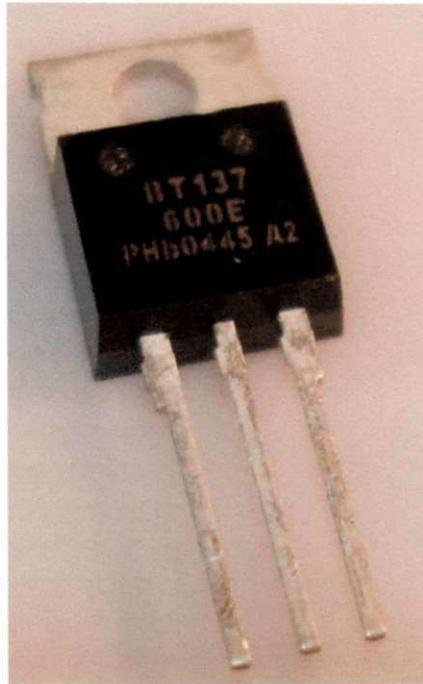


Figura 3.43 - Aspecto físico do Triac de potência BT137600E.

No diagrama do circuito, Figura 3.44, são vistos os diodos responsáveis pela interligação e seqüenciamento do conjunto das cinco resistências que compõe um módulo.

Para comprovar se o circuito está funcionando corretamente em sua fase final, isto é, capaz de alimentar as resistências tanto em seqüência quanto ao número, montou-se um circuito de lâmpadas que representam os conjuntos de resistências. Esse circuito, visto na Figura 3.45, é constituído por nove lâmpadas representando os três módulos resistivos. As lâmpadas coloridas têm a função de representar as resistências quando estão associadas ou isoladas. Duas cores foram usadas na codificação; azul, representando resistência isolada e amarela, resistências associadas. No seqüenciamento, se uma lâmpada azul acende junto com duas amarelas, isso é a imagem do que acontece com as cinco resistências, quando essas são ligadas ao seqüenciador. Essa montagem vista na Figura 3.45 está no segundo passo seqüencial. A razão dessa montagem deve-se ao fato de não se ver quando as resistências estão ligadas, porque elas não ficam incandescentes.

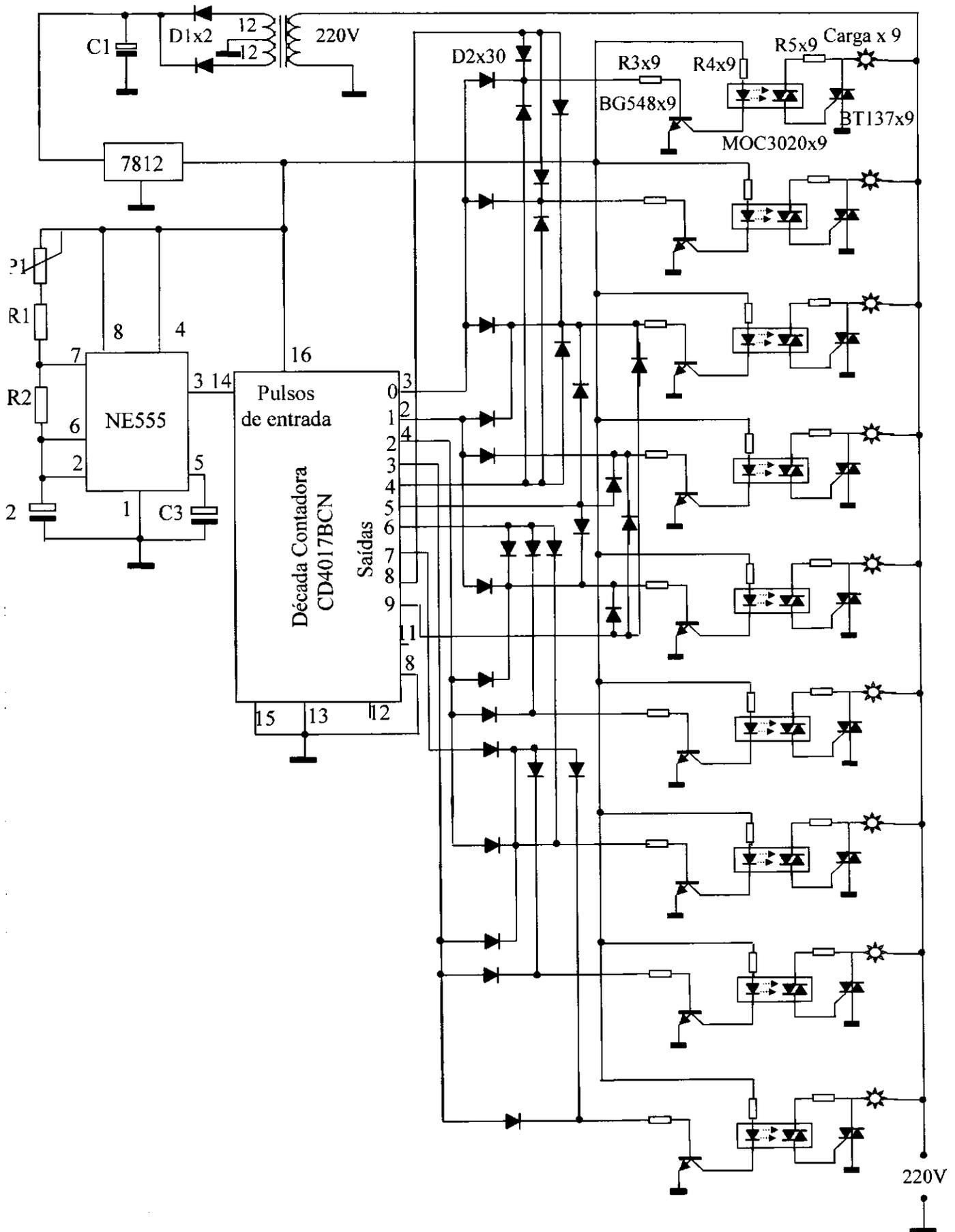


Figura 3.44 - Desenho esquemático do circuito de controle desenvolvido pelo autor dessa pesquisa.



Figura 3.45 - Circuito de lâmpadas no segundo passo seqüencial.

Nas Figuras 3.46 e 3.47, tem-se uma amostra em placa experimental de todos os circuitos que controlam a segunda câmara do secador, com exceção do circuito de controle do acionamento da primeira esteira.



Figura 3.46 - Circuito lógico de controle em placa experimental em funcionamento.

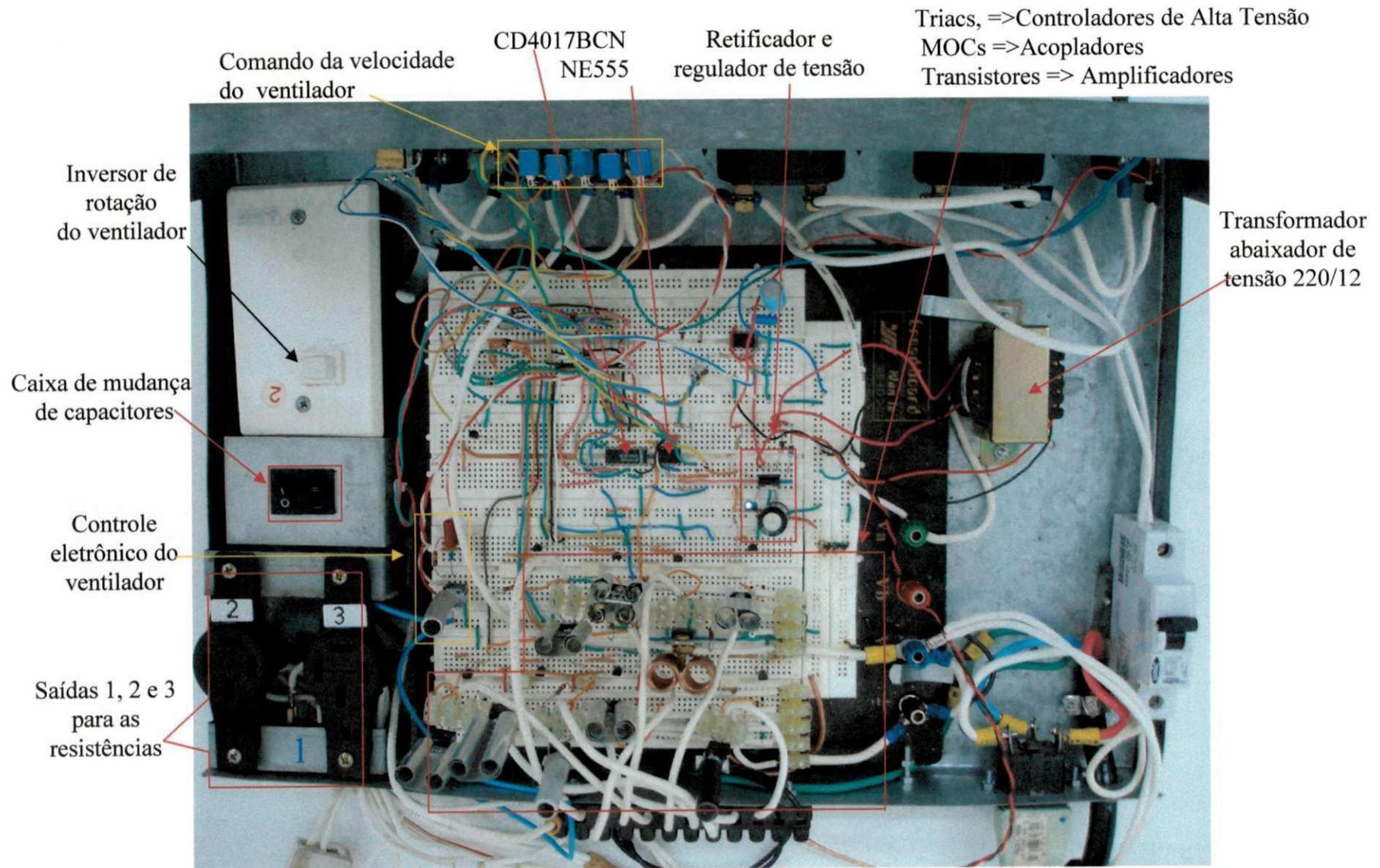


Figura 3.47 - Circuito lógico de controle em placa experimental.

h) Isolação térmica

Nos dias de hoje, e principalmente no futuro, economizar energia sob qualquer forma é e será um fator decisivo em qualquer equipamento ou empreendimento que se pretenda montar. Pensando nisso, houve a preocupação de economizar energia desde o início desse projeto. Os secadores exigem o uso de grande parcela de energia, mesmo usando racionalmente e, se não levar em consideração as fugas de calor, todo esforço na racionalização terá sido inútil. Caso não exista isolamento térmico as perdas são enormes. Nesse projeto, pensou-se em vários materiais para isolar as partes submetidas à altas temperaturas. Selecionou-se dois produtos industriais: espuma de poliuretano e lã de vidro (Figura 3.48). O primeiro foi descartado devido ao limite superior de resistência à temperatura (+116°C) está próximo ao limite de temperatura do trabalho (+105°C), no primeiro módulo do secador. Observando outras características técnicas que alguns fabricantes fornecem, encontra-se a afirmação que a espuma de poliuretano apresenta instabilidade térmica aos 80°C. O segundo produto, lã de vidro, é reconhecido em todo mundo como sendo um dos melhores isolantes térmicos, desempenho esse devido a imobilização do ar em suas inúmeras tramas, dificultando o processo de troca de calor entre a área isolada e o ambiente onde o equipamento estiver sendo usado.



Figura 3.48 - Pannel de lã de vidro PSI-60.

A lã de vidro apresenta coeficiente de condutividade térmica extremamente baixo e quando combinado com a espessura, obtém-se ótimas resistências térmicas. Depois da análise acima descrita, concluiu-se pela escolha da lã de vidro em forma de painéis com as seguintes características: Pannel PSI-60; temperatura de trabalho 150°C; coeficiente de condutividade térmica $4,186 \times 10^{-2} \text{W/mK}$; espessura do pannel 50mm; perda de calor através do isolante $101,18 \text{ W/m}^2$; temperatura externa da superfície isolada 29°C. Caso a superfície não fosse

isolada a perda seria $2\,326\text{ W/m}^2$. Esses dados foram fornecidos pelo fabricante (SAINT-GOBAIN VIDROS S/A) através de seus catálogos

i) Sistema de insuflação e exaustão de ar

Compressores são estruturas mecânicas industriais, destinadas essencialmente a elevar a energia utilizável dos fluidos elásticos pelo aumento de sua pressão (Costa,1988). Classificados de acordo com a natureza do movimento dessas máquinas, elas podem ser alternativas e rotativas. As rotativas classificam-se em radiais ou centrífugas e axiais. As axiais, podem ser ventiladores helicoidais, tubo-axial. Nas Figuras 3.49-3.51, podem ser vistos os tipos de ventiladores citados.

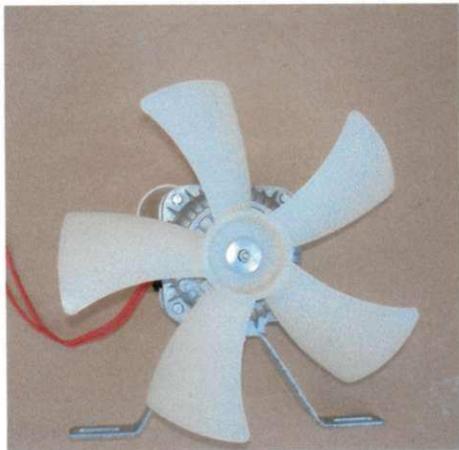


Figura 3.49 - Ventilador helicoidal.



Figura 3.50 - Ventilador tubo axial.



Figura 3.51 - Ventilador radial

Aplicar um ventilador axial ou radial depende do gradiente de pressão a ser vencido, da maneira como o fluxo de ar vai ser canalizado até a câmara de secagem.

Os ventiladores radiais têm maior capacidade de vencer as diferenças de pressão do que os axiais. Os ventiladores radiais, com um único estágio de compressão, produzem diferenças de pressão superior a 2,451 kPa , podendo chegar a 34,323 kPa.

Os ventiladores tubo-axiais, geram diferenças de pressão bem inferiores às geradas pelos turbo-compressores, sendo os primeiros simples e de fácil aquisição. O ventilador tubo-axial escolhido foi o A 400, capaz de prover uma diferença de pressão compatível com a exigida pelo secador.

Alguns experimentos foram realizados com a finalidade de determinar o sistema de insuflação de ar que mais se aproximasse da vazão exigida, e que fosse atingida a velocidade de pelo menos 1m/s na área de secagem. Na Tabela 3.5, pode-se ver os resultados obtidos. Não sendo possível encontrar nenhuma alternativa nesses resultados, tornou-se necessário pesquisar na área comercial, chegando-se ao ventilador ARGE, (Figura 3.50), cujas características principais encontram-se na Tabela 3.6, satisfazendo as condições necessárias ao secador.

O uso do A 400 que fornece vazão superior a exigida pelo secador é justificável, pois o mesmo terá comando para variação da velocidade do ar. A previsão é usar os ventiladores para inflar de ar às câmaras de secagem, porém, se necessário, serão utilizados outros ventiladores do tipo A 400 ou mesmo A 300, na função de exaustores nas saídas das câmaras. Esses ventiladores funcionam também como exaustores, dependendo da mudança do sentido de rotação.

O ventilador A400 foi aplicado com sucesso, correspondendo as expectativas. Superou o deslocamento da massa de ar necessário e respondeu as variações de rotação imposta pelo controle. Foi testada a inversão do fluxo de ar para resfriamento da câmara; esse experimento mostrou-se eficiente.

Tabela 3.5 - Características técnicas dos ventiladores testados

Características	Unidades	Ventiladores		
		Helicoidal	Radial	Radial
Diâmetro	m	0,3	-	-
Área	m ²	0,09	0,0024	0,022
Potência do motor	hp	1/5	1/6	1/8
Rotação	rpm	1480	-	1100
Vazão	m ³ /s	0,36	0,024	0,29
Tensão	Volts	220	220	220
Pressão				

Tabela 3.6 - Características técnicas do ventilador comercial ARGE

Características	Unidades	Ventiladores	
		A-300	A-400
Diâmetro	m	0,3	0,4
Área	m ²	0,071	0,125
Potência do motor	hp	1/6	1/5
Rotação	rpm	1700	1500
Vazão	m ³ /s	20	70
Tensão	Volts	220	220
Pressão	Pa	78,45	98,066

j) Conjunto de insuflação e aquecimento montados no secador

Esse conjunto compõe-se de um ventilador acoplado ao duto cilíndrico, medindo 400mm de diâmetro e 500mm de comprimento. Nesse duto, estão alojadas as resistências dissipadoras de calor, conforme Figura 3.52 a-b. Esse duto, é ligado a outro contíguo com seção prismática variável, medindo 550x500mm, sendo reduzido progressiva e suavemente ao longo do comprimento de 1800mm, até atingir a segunda entrada, onde existe uma curvatura da parede lateral direita, cuja finalidade é reduzir a turbulência, suavizando a entrada do ar quente. Nesse final o duto tem uma seção quadrada de 300x300mm. Na Figura 3.53 a-b a inclinação lateral força o ar quente tomar o sentido da primeira entrada, e o excedente prossegue com maior pressão e velocidade. Esse procedimento faz o ar entrar na câmara em condição de equilíbrio nas duas entradas. Para maiores esclarecimentos as Figuras 3.54 a-b e 3.55 a-b tornam patente o exposto.

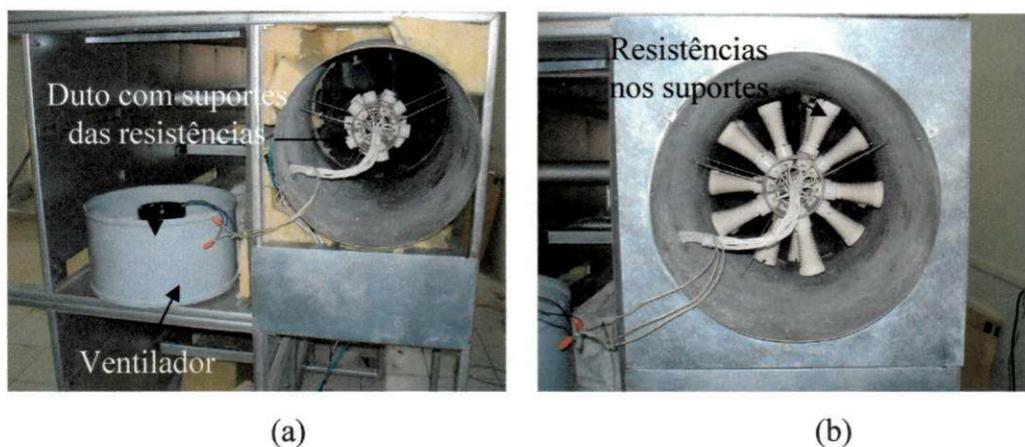


Figura 3.52 - a) Ventilador e duto. b) Duto com resistências pronto para receber o ventilador.

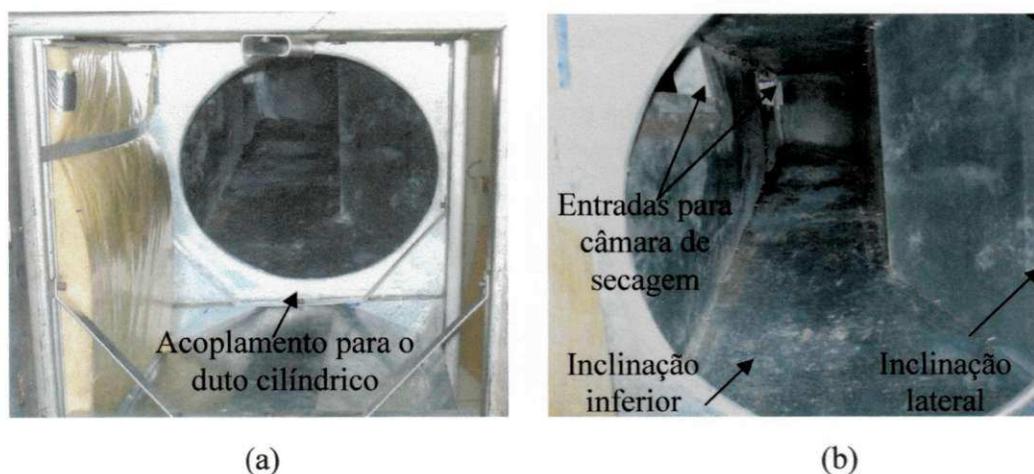


Figura 3.53 - a) Acoplamento do duto cilíndrico com o prismático. b) Duto prismático onde pode se ver as inclinações e as entradas de ar quente para câmara de secagem.



Figura 3.54 - a) Vista superior do duto prismático. b) Vista anterior da curvatura final.

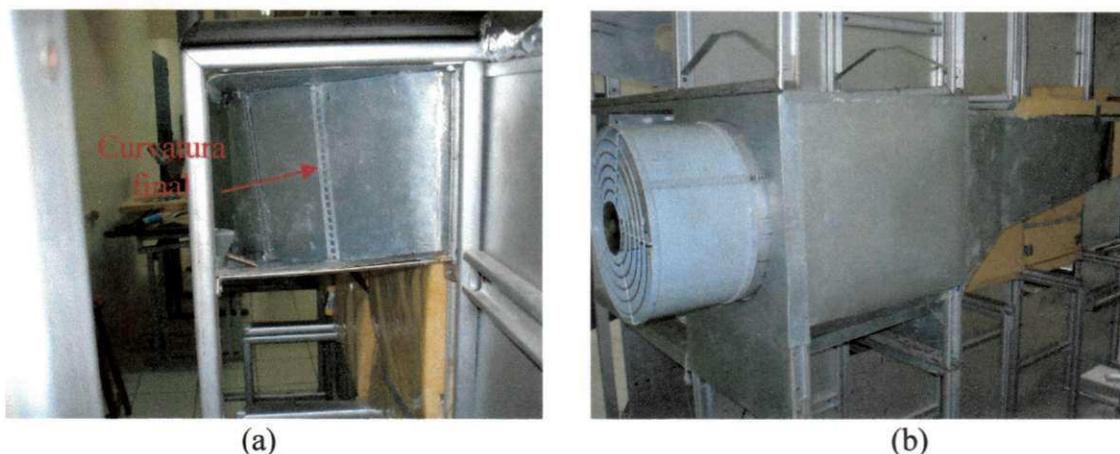


Figura 3.55 - a) Vista posterior da curvatura final. b) Vista geral do conjunto de insuflação e aquecimento.

3.2.2 Procedimento experimental

A fim de coletar os dados experimentais da câmara de secagem do secador, usou-se quatro termopares distribuídos ao longo da câmara posicionados na metade da altura da mesma (Figuras 3.56, 3.57 e 3.58). Esses termopares são ligados a uma chave comutadora de 8 canais. Apenas quatro desses canais são usados. Esses por sua vez distribuem os sinais dos termopares para o termômetro digital marca AROTEC com resolução de 1°C. Na Figura 3.59, pode-se ver o conjunto termômetro/chave, sendo também visíveis dois multímetros em escala de voltímetros, um monitorando a rede elétrica e o outro o motor do ventilador.

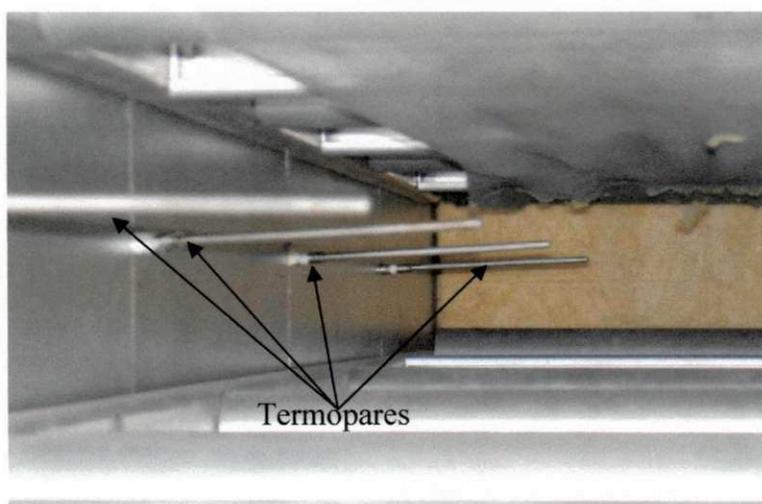


Figura 3.56 - Termopares no interior da câmara de secagem, entre as duas esteiras.

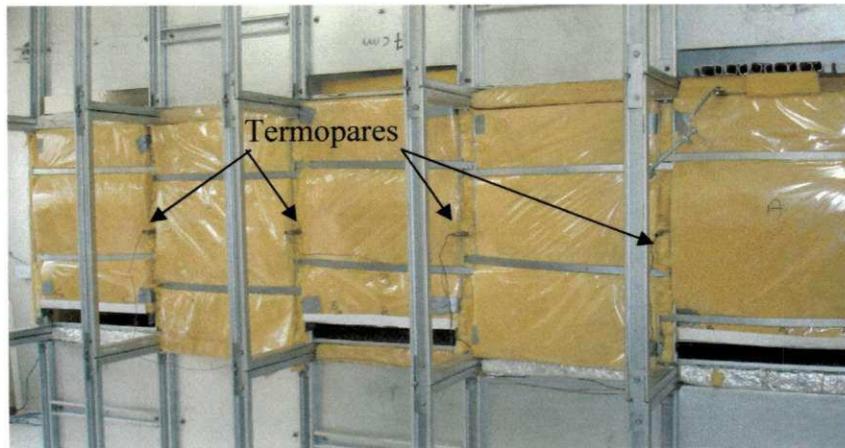


Figura 3.57 -Termopares vistos no exterior da câmara de secagem.

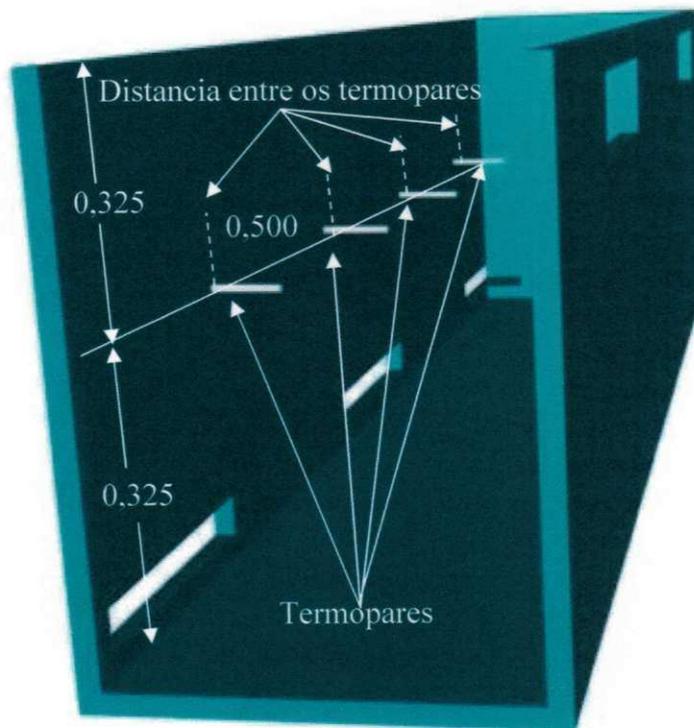


Figura 3.58- Localizações esquemática dos termopares no interior da câmara (cota em metros).



Figura 3.59 - Monitores de tensão da rede, termômetro/chave e monitor de tensão do ventilador.

Agregado ao circuito de controle existe um painel. Na parte frontal desse existe um voltímetro marca RENZ, exatidão 5% no final da escala e um amperímetro também marca RENZ, exatidão 5% no final da escala, que monitoram a tensão da rede e a corrente elétrica consumida pelo banco de resistência. Nesse painel, ficam visíveis quatro interruptores liga-desliga, sendo o primeiro destinado ao desligamento geral do circuito de controle; o segundo liga o ventilador, o terceiro liga a carga de resistência, enquanto que o quarto liga o acionador da esteira. Na parte superior desse painel, cinco interruptores são responsáveis pelo controle da rotação do ventilador (Figura 3.61).

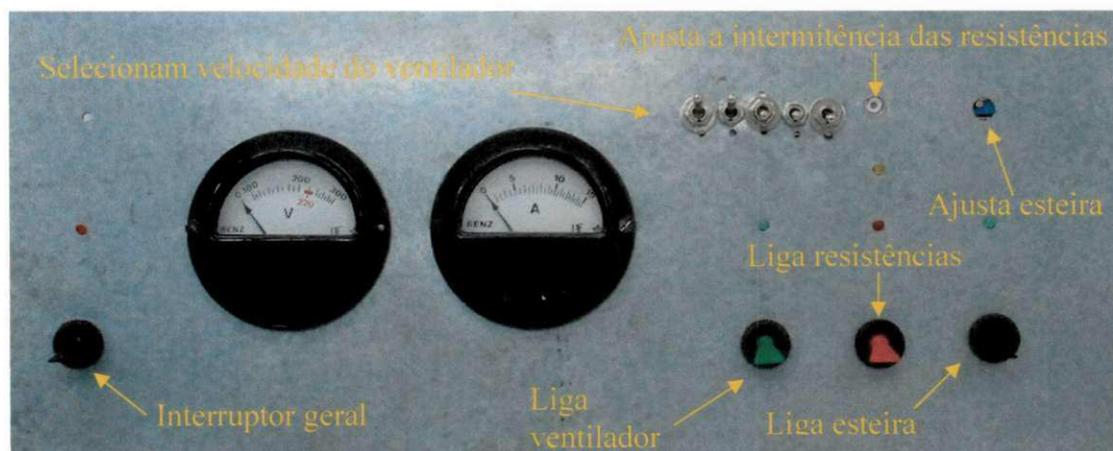


Figura 3.60 - Painel de controle.

Um tacômetro ótico digital, INSTRUTEMP, com resolução 1rpm e exatidão de 0,05%, serviu para determinação da rotação do ventilador. Detalhes de operação e aspecto desse instrumento, podem ser visto na Figura 3.61.



Figura 3.61 - Tacômetro ótico digital.

Foram realizados experimentos para determinação da velocidade do ar através do secador, com o aquecedor elétrico desligado. Dados de velocidade e temperatura do ar na entrada do ventilador (Figura 3.62) e ao longo do seu raio, bem como nas saídas do secador (Figura 3.63) e ao longo dos mesmos foram obtidos.

Foi escolhido um mesmo horário em cada dia para realizar os testes com o secador. Inicialmente, liga-se o termômetro digital, espera-se até que sejam observadas temperaturas iguais no interior da câmara e coincidente com a temperatura fornecida por um termohigrômetro, colocado na parte exterior do secador. Atingido esse equilíbrio, liga-se o ventilador, no caso a primeira velocidade.

Para os ensaios de aquecimento do ar, decorridos alguns minutos após o equilíbrio, liga-se as resistências elétricas. Em intervalo de 3 minutos, observa-se a leitura das temperaturas detectadas nos quatro sensores, até que as mesmas se igualem; nesse estágio é atingido o

regime permanente. Nesse ponto, depois de anotado os dados, o secador é desligado. No dia seguinte, a mesma hora, novo experimento com a segunda rotação é realizado e assim por diante. A aquisição dos dados referentes a velocidade do fluido, temperatura ambiente e umidade relativa são feitas por um termo-anemômetro de fio quente (precisão $\pm 0,03\text{m/s}$, resolução $\pm 0,1\%$) e um termo-higrômetro (precisão $\pm 0,1\%$, resolução $\pm 0,01\%$), instrumentos integrantes do kit de medição multifuncional AMI 300 da INSTRUTEMP, conforme Figura 3.62.

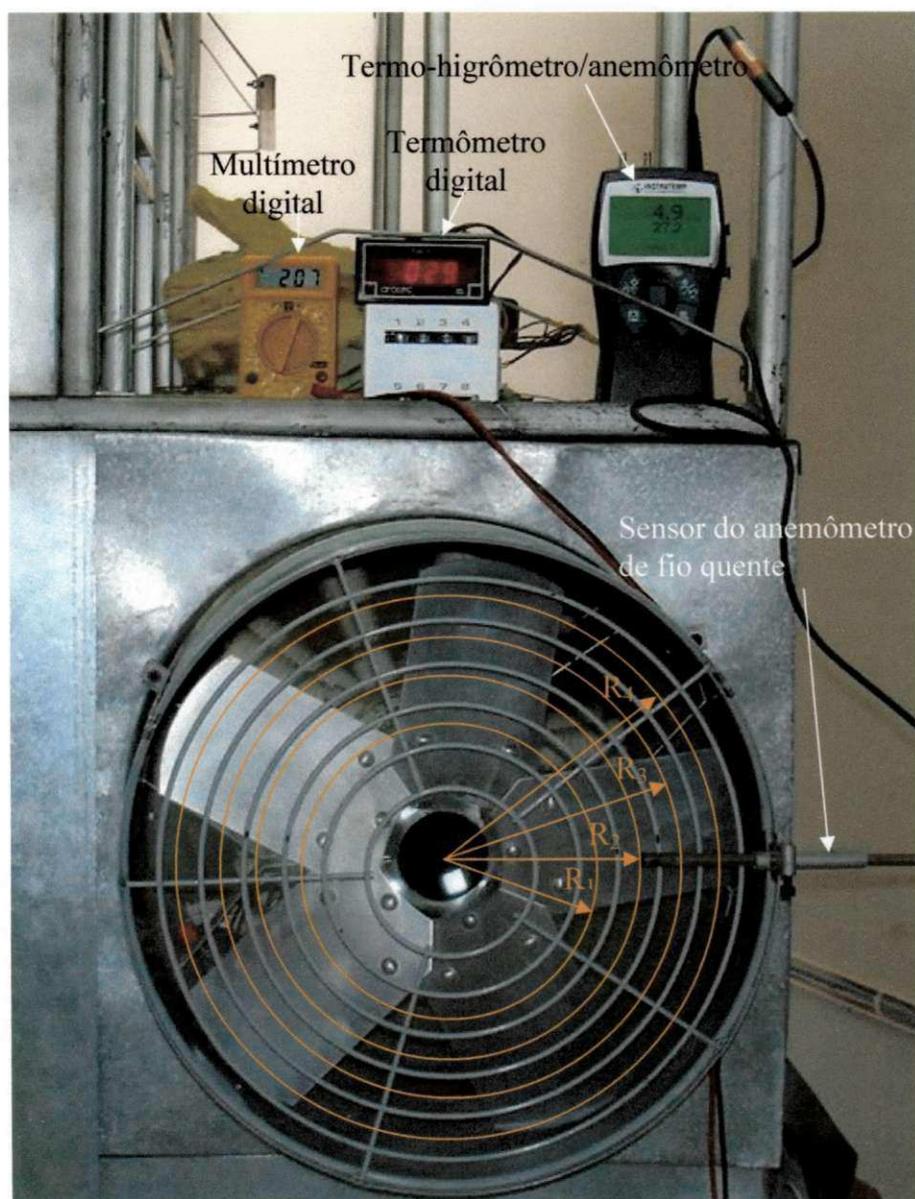


Figura 3.62 - Instrumentos e pontos de medição do fluxo de ar na entrada do secador.



Figura 3.63 - Medição do fluxo de ar na 1ª saída da câmara.

Após obtenção da temperatura do ar em todos os experimentos, sua densidade e seu calor específico foram determinados, considerando-o como gás perfeito e usando as Equações (3.9 a-e).

A velocidade média do ar foi determinada, a partir dos dados experimentais como segue:

a) Na entrada do ventilador:

desde que

$$\bar{w}A = \int w dA \quad (3.9)$$

tem-se que:

$$\bar{w}\pi\hat{R}^2 = \int_0^{\hat{R}} w2\pi r dr \quad (3.10a)$$

então,

$$\bar{w} = \frac{2}{\hat{R}^2} \int_0^{\hat{R}} r w dr \quad (3.10b)$$

onde \hat{R} é o raio do ventilador, obtido da Tabela B1.9 do Anexo B

Na forma discreta, pode-se escrever a Equação (3.10b) como segue:

$$\bar{w} = \frac{2}{\hat{R}^2} \sum_{i=1}^4 r_i w_i \Delta r_i \quad (3.11)$$

onde r_i e Δr_i são mostrados na Figura 3.64 e dados na Tabela B1.9, do Anexo B.



Figura 3.64 - Valores de r_i Δr_i no ventilador.

b) Na saída do secador

Partindo-se da Equação (3.9), pode-se escrever, para cada saída:

$$\bar{w} = \frac{1}{L} \int_0^L w dx \quad (3.12)$$

Na forma discretizada, tem-se que:

$$\bar{w} = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^4 w_i \Delta x_i \quad (3.12a)$$

onde Δx_i é mostrado na Figura 3.65 e dado na Tabela B1.9 do Anexo B.

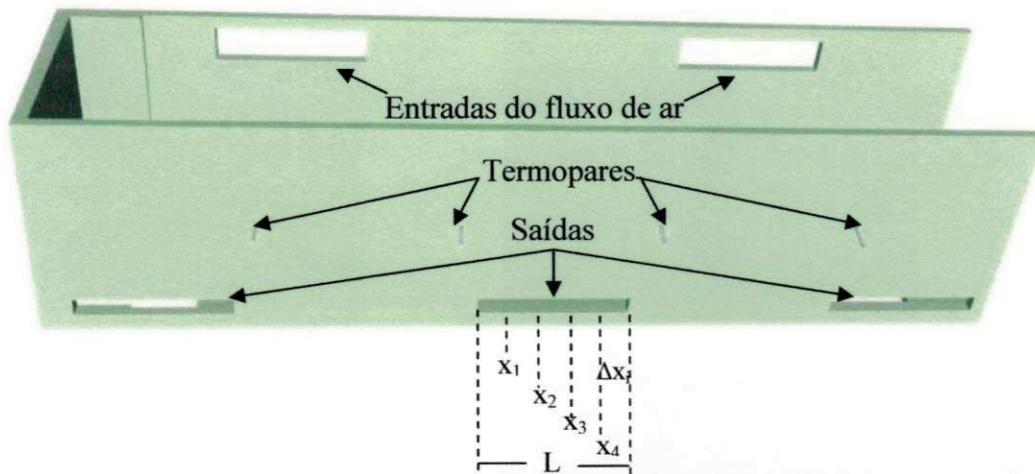


Figura 3.65 - Representação da câmara de secagem com suas entradas e saídas.

A partir da velocidade média na saída do secador e da densidade do ar, obteve-se o fluxo de massa de ar, como segue:

$$\dot{m} = \sum_{i=1}^3 \rho_i \bar{w}_i A_i \quad (3.14)$$

Considerando a incerteza dos dados da velocidade na entrada, devido ao nível de turbulência existente nos experimentos e aplicando a lei de conservação das massas, isto é:

$$\sum \dot{m}_e = \sum \dot{m}_s \quad (3.15)$$

obteve-se o fluxo da massa de ar na entrada do ventilador.

A potência elétrica dissipada pelas resistências, é dada como segue:

$$\dot{W}_{aq} = V_{aq} \cdot I_{aq} \quad (3.16)$$

onde o índice aq refere-se ao aquecedor elétrico.

A quantidade de calor efetivamente recebida pelo ar, proveniente do aquecedor elétrico, é dada a partir da 1ª lei da termodinâmica, como segue:

$$\dot{Q} = \dot{m}c_p\Delta T \quad (3.17)$$

onde $\Delta T = \bar{T}_{\text{sec ador}} - T_{\text{amb}}$, sendo $\bar{T}_{\text{sec ador}}$, a média das temperaturas lidas pelos termopares no interior do secador.

A eficiência térmica do sistema de aquecimento é dada por:

$$\eta = \frac{\dot{Q}}{\dot{W}_{\text{aq}}} \quad (3.18)$$

A fim de verificar o efeito da localização das resistências elétricas no aquecedor na eficiência térmica do sistema, foram realizados experimentos com o conjunto de resistências em três configurações, tal qual ilustrado na Figura 3.66. Em todas as configurações, a potência elétrica dissipada permanece igual.

Intermitente (caso1)			Constante (caso2)			Constante (caso3)		
0/1	0/1	0/1	0	0	0	1	0	0
0/1	0/1	0/1	0	1	1	1	0	0
0/1	0/1	0/1	0	1	0	1	0	0
0/1	0/1	0/1	0	1	1	1	0	0
0/1	0/1	0/1	0	0	0	1	0	0

Legenda: 0/1 desligado/ligado de forma intermitente
1 ligado; 0 desligado

Figura 3.66- Ordem de acionamento das resistências nos três casos.

Devido ao fato que: quando o aquecedor é ligado, a tensão elétrica diminui e com ela a rotação do motor e como o instrumento de medição da velocidade não deve ser usado em temperatura mais elevadas, foi necessário medir as velocidades do ar, com o aquecedor

desligado. Foram determinadas as velocidades médias e essas por sua vez relacionadas com a rotação do ventilador, através de uma equação linear. A partir dessa equação, foi determinada a velocidade média do fluido em qualquer rotação do ventilador.

A equação tem a forma:

$$\bar{w} = A_1 n + A_2 \quad (3.19)$$

A partir dessa equação, foi feita uma regressão linear, usando o programa *Statistica*[®], via método Quasi-Newton, com critério de convergência 0,001.

3.2.3 Princípio de funcionamento, controle e segurança do secador

Conforme já mencionado antes, o secador em desenvolvimento compõe-se de três câmaras A, B e C. Aqui descreve-se o funcionamento da câmara A, que se repetirá em B e C, apenas diferenciando pelos níveis de temperatura.

O duto que contém as resistências elétricas, gera um certo nível de calor provocado pela dissipação da potência elétrica. Na entrada desse duto, um ventilador tubo-axial fornece energia cinética ao ar; esse passa através do banco de resistências, adquirindo parte do calor dissipado. O ar aquecido prossegue pelo duto existente na câmara direita, do módulo A, penetra na parte superior da câmara de secagem A, por duas aberturas ali existentes, atravessa a primeira esteira, que transporta os casulos, daí atravessa a segunda esteira, saindo do secador por três aberturas laterais, cuja soma das áreas é igual a soma das duas áreas de entrada. Essas áreas estão localizadas de maneira a proporcionar uma distribuição aproximadamente uniforme ao longo da área das esteiras. Na Figura 3.1 e 3.12, essa abertura de entrada e saída do ar estão assinaladas por setas. No período em que o ar quente atravessa a massa de casulos nas esteiras, aquece essa, provocando liberação da umidade da mesma.

No interior de cada câmara de secagem, tem-se os sensores destinados ao controle do aquecimento do ar. O ar que sai das câmaras poderá ser reutilizado, isto é, o que sai da câmara A entra na B e o que sai da câmara B entra na C. Isso será possível, se a energia calorífica do ar contida em cada saída for superior aquela que é usada na câmara seguinte.

Sempre visando a segurança dos operadores e pesquisadores, os cuidados quanto a isolamento elétrica foram levados em consideração, no que diz respeito à qualidade dos cabos e fios elétricos a serem usados. Nas partes sujeitas à altas temperaturas, foram usados cabinhos com isolamento capaz de suportar temperaturas até 200°C. Mesmo assim, foram feitos testes, submetendo os cabinhos à 250°C. Como resultado, aquele cabo isolado com fibra de vidro teve suas características alteradas, apresentando uma coloração enegrecida. Os cabinhos isolados com borracha de silicone, aparentemente não sofreram alterações em suas características, pois a coloração permaneceu original (Figura 3.67).



Figura 3.67 - Cabinhos submetidos aos testes de temperatura.

As duas solicitações das características dos cabinhos, nos testes acima, superaram em muito as condições reais de trabalho no secador. Os cabinhos quando situam-se próximo das resistências elétricas são colocados de maneira tal, que mesmo sem serem isolados, não oferece risco de contato acidental, sejam entre eles ou com usuários. Quando esses cabinhos estão juntos, ficam protegidos por um eletroduto de fibra de vidro. As condições impostas nos testes com os cabinhos, diferem em muito das condições reais. Durante o teste, os cabinhos estavam próximos das resistências e sem nenhuma ventilação. Nas condições reais eles ficam mais distantes e as temperaturas não atingem níveis maiores que 150°C, devido ao resfriamento pela passagem do ar vindo do ventilador. Outra condição, menos agressiva aos cabinhos, é a redução do efeito da radiação térmica, que é bem inferior no caso real. Além desses, outros cuidados, como revestimento interno dos dutos com fibra de vidro e fixação desses dutos com peças de porcelana, evitando-se o contato ferro com ferro, foram tomados.

CAPITULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Validação

Para validar a modelagem matemática, são comparados resultados numéricos do teor de água médio do casulo do bicho-da-seda, com dados experimentais obtidos na literatura para secagem realizada em secadores com fluxos cruzados tipo esteira obtidos por (Lima, 1995).

Os resultados referidos foram obtidos por meio do programa computacional “Mathematica” escrito em volumes finitos que pode ser visto na página 140 do anexo A. Na página 147 desse anexo pode-se observar os resultados fornecidos pelo programa onde: $Y(m)$ = a espessura da camada; $M(kg/kg)$ = Teor de umidade; $\theta(^{\circ}C)$ Temperatura do casulo; $x(kg/kg)$ Razão de umidade do ar; $T(^{\circ}C)$ Temperatura do ar de secagem; $P_{vs}(Pa)$ Pressão de vapor saturado; $UR(\%)$ Umidade relativa.

Na Figura 4.1 observa-se essa comparação durante o processo de secagem em $y \approx 0,0m$, que refere-se a posição superior da camada. Verifica-se que uma boa aproximação foi obtida. Após análise da Figura 4.1, verifica-se que praticamente toda água do casulo é retirada na primeira câmara de secagem ($0 \leq t \leq 7200s$).

As discrepâncias observadas nas curvas referentes aos secadores de Canguaretama-RN e Maringá-PR, deve-se aos níveis de temperatura desses secadores. O primeiro trabalha com temperatura igual a 95°C e o segundo com 90°C

Nas Figuras 4.2 e 4.3, percebe-se as variações das temperaturas do ar e do casulo ao longo dos processos de secagem em cada zona do secador em duas posições y. Verifica-se que a temperatura do ar de secagem praticamente é constante ao longo de y em, aproximadamente, 7200s e tem forte efeito na temperatura do produto, muito maior que no teor de água. O aumento da temperatura do produto (Figura 4.3) faz com que a taxa de secagem também aumente, devido a grande quantidade de água existente no produto no início do processo. O casulo atinge a temperatura do ar em aproximadamente 7200s devido a sua alta capacidade calorífica. Com o intuito de não causar danos ao casulo, reduz-se a temperatura do ar em 14,28% na segunda zona do secador. Pode ser verificado ainda, que devido ao fato da temperatura do produto aumentar na primeira zona de secagem, a difusão da água se dá no período da taxa de secagem decrescente.

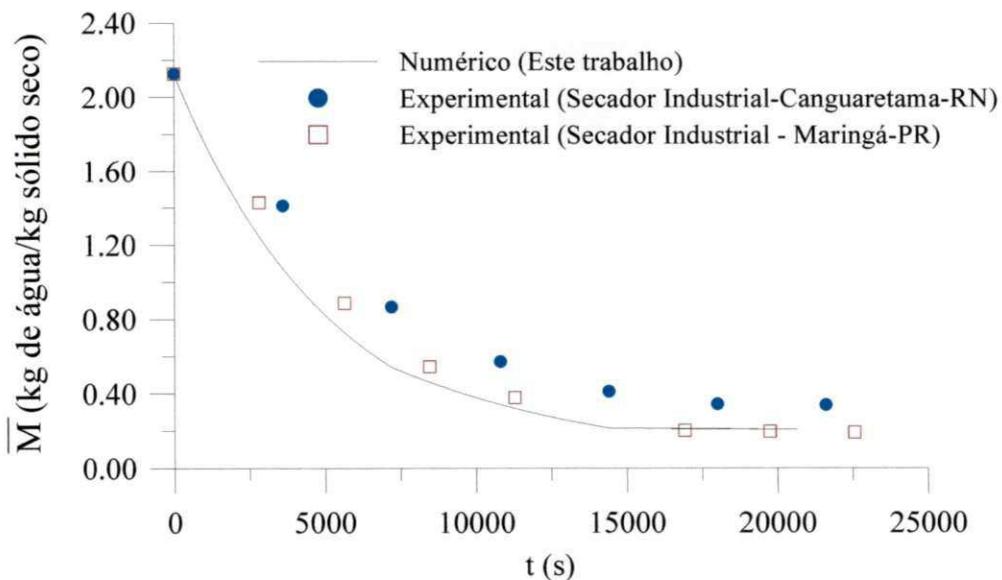


Figura 4.1 - Comparação entre os valores numérico e experimental do teor de água médio durante a secagem de casulos para $H = 0.02m$.

Altas temperaturas por tempos prolongados e altos gradientes térmicos ao longo do leito, não são recomendados devido ao fato deles produzirem secagem não uniforme, tais como: variação de cor e deformação do fio da seda tornando quebradiço durante o processo de fiação nas máquinas fiandeiras.

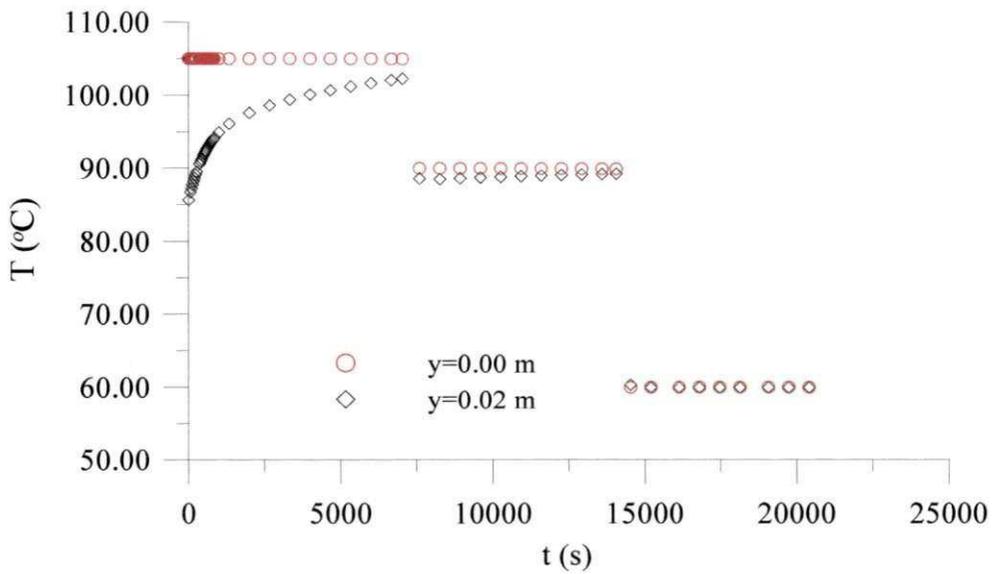


Figura 4.2 - Temperatura do ar dentro do leito durante o processo de secagem do casulo.

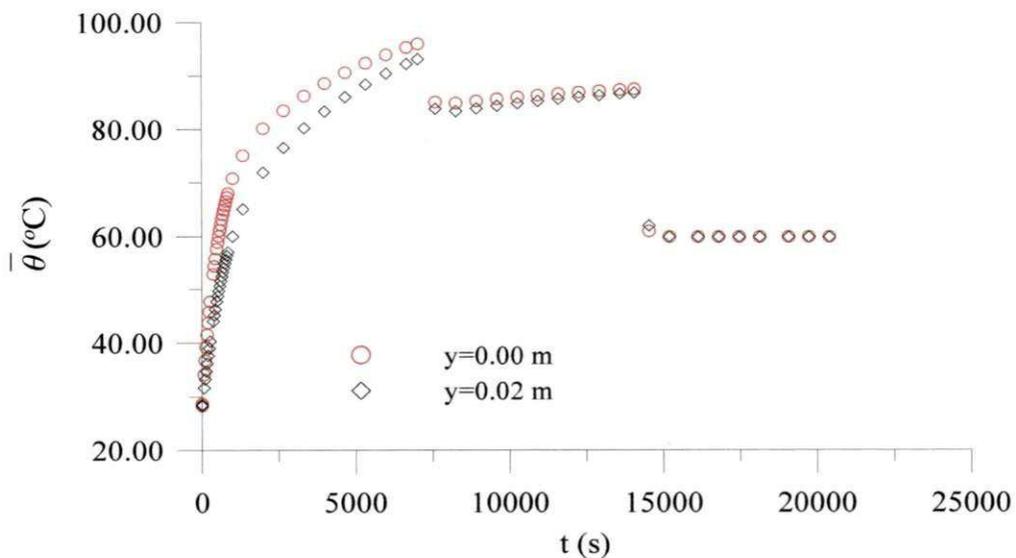


Figura 4.3 - Temperatura do casulo dentro do leito durante o processo de secagem

De acordo com Lima e Mata (1996), a velocidade do ar não afeta a remoção de umidade do casulo. Porém, a temperatura do casulo é fortemente afetada durante todo o processo de secagem. Os aumentos da taxa do fluxo de ar causaram efeitos consideráveis na taxa de aquecimento do produto. O processo de secagem é, portanto, controlado por difusão interna.

Na Figura 4.4, observa-se a variação da umidade absoluta do ar, com relação ao tempo dentro do leito ao longo do secador, em duas posições y . Pode-se observar que a posição $y = 0,0\text{m}$, refere-se a parte superior da camada de casulos, onde a umidade absoluta é constante com relação a posição e ao tempo. Já em $y = 0,02\text{m}$, a umidade absoluta do ar varia com relação ao tempo, e pode-se observar que no início do processo essa umidade absoluta é alta, diminuindo ao longo do tempo devido à diminuição da taxa de evaporação de água do produto.

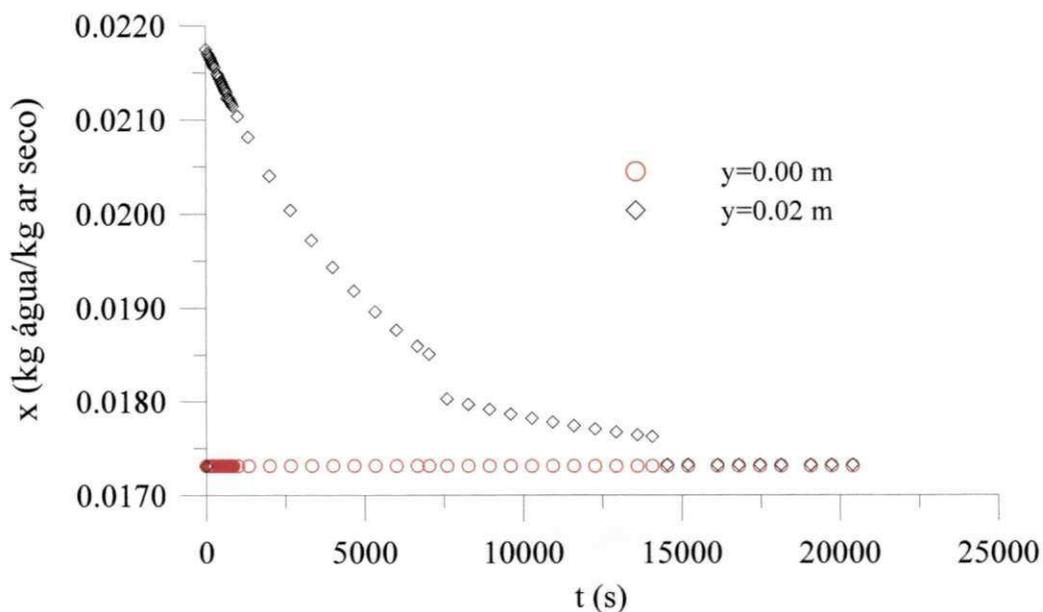


Figura 4.4 - Umidade absoluta do ar dentro do leito ao longo do processo de secagem.

Na Figura 4.5, nota-se a umidade relativa do ar dentro do leito ao longo do processo de secagem. Percebe-se que a umidade relativa do ar em, aproximadamente 7200s, é praticamente a mesma ao longo da camada de casulos. A umidade relativa do ar dentro do leito, decresce na primeira zona do secador durante o processo de secagem, aumentando com o passar do tempo nas outras zonas do secador, devido à redução da temperatura do ar de secagem.

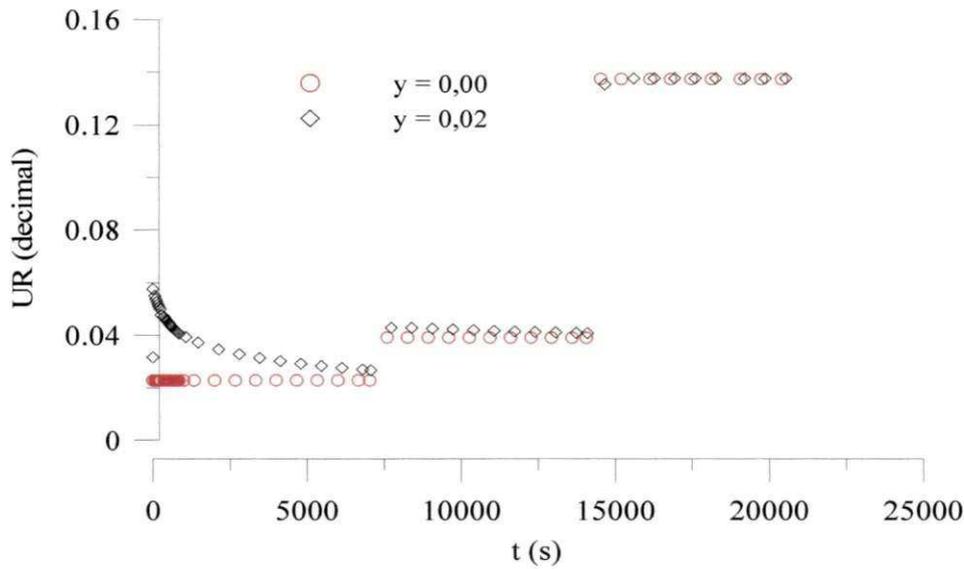


Figura 4.5 - Umidade relativa do ar dentro do leito ao longo do processo de secagem.

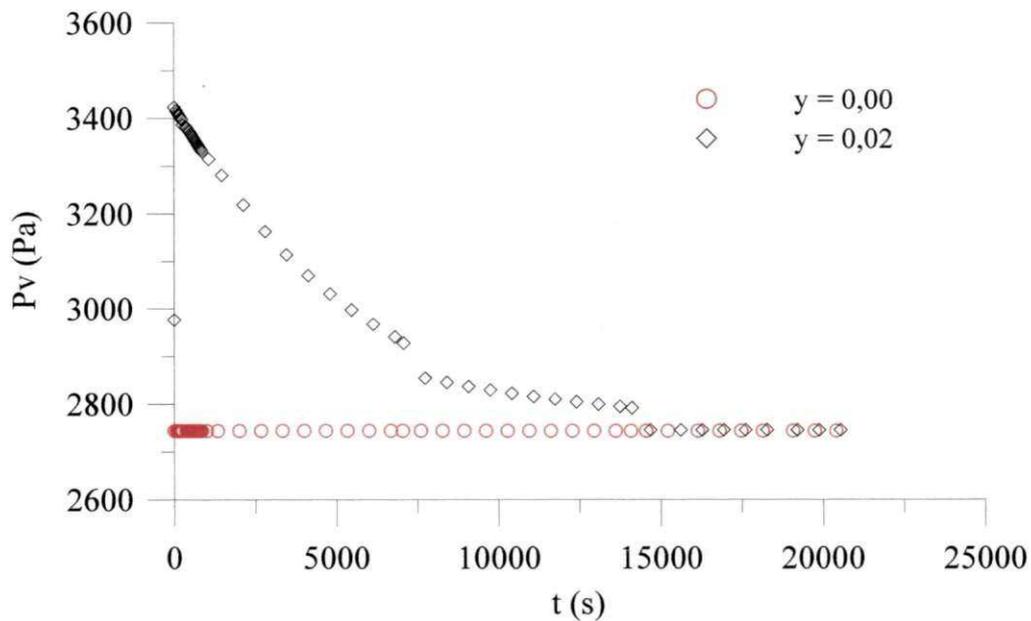


Figura 4.6 - Pressão de vapor dentro do leito ao longo do processo de secagem.

Na Figura 4.6 observa-se a pressão de vapor no interior do secador. A pressão é praticamente constante na posição $y = 0,00$ m, porém na posição $y = 0,02$ m; nota-se que no início do processo a pressão de vapor é alta, diminuindo ao longo do tempo devido à diminuição na taxa de evaporação de H_2O . Observa-se também que a Figura 4.6 é semelhante à Figura 4.4 da umidade absoluta do ar. Essa semelhança é caracterizada por ambas as propriedades dependerem da temperatura.

Finalizando, secar é um processo de alto consumo de energia. Recentemente, houve um desenvolvimento significativo para reduzir o consumo de energia em secadores. Esse desenvolvimento tem se dado em duas direções: melhorias dos processos de secagem atual para consumir menos energia, e melhorias dos sistemas de recuperação de calor. Nesse sentido, para camada fina de casulos e baixa umidade relativa do ar na saída do secador, o ar pode ser reaproveitado e usado para secar outros produtos, economizando energia.

4.2 Resultados Experimentais

4.2.1 Teste de desempenho do secador

4.2.1.1 Teste para escolha do aquecedor

Como mencionado no Capítulo 3, foram realizados experimentos de desempenho energético com dois tipos de resistências elétricas: blindada e não blindada (tipo estufa), e em dois modos de transferência de calor: convecção natural e forçada.

No caso da resistência blindada, (Tabela 4.1), não foi notada nenhuma transferência de calor para o termopar, durante os 10 segundos ativos; posteriormente, a temperatura aumentou até 50°C, em seguida decresceu para os 27°C iniciais. Essa variação ocorreu durante 93 segundos.

A resistência não blindada, tipo estufa, comportou-se como esperado, atingindo 123°C no intervalo dos 10 segundos ativos; quando desativada, atingiu 154°C, retornando a temperatura ambiente em 964,2 segundos. Nos experimentos com convecção forçada, mais uma variável foi introduzida, a velocidade do ar, (w_a). O comportamento da resistência blindada foi bastante diferente, pois não foi observada nenhuma variação da temperatura sobre o sensor. Por mais uma vez, a resistência tipo estufa teve um melhor desempenho; subiu à 30°C e aí manteve-se, voltando aos 27°C em 44 segundos (Tabela 4.2).

Tabela 4.1 Experimento com convecção natural.

	Potência elétrica (W)	Resistência elétrica (Ω)	Corrente elétrica (A)	Tensão elétrica (V)	T_{0s} ($^{\circ}\text{C}$)	T_{10s} ($^{\circ}\text{C}$)	T_{\max} ($^{\circ}\text{C}$)	t_{retorno} (s)
Resistência Blindada 1000	1000	46	4,68	220	27	27	50	93
Resistência Estufa 1000	770	58	3,50	220	27	123	154	964,2

Tabela 4.2 Experimento com convecção forçada

	Potência elétrica (W)	Resistência elétrica (Ω)	Corrente elétrica (A)	Tensão elétrica (V)	w_a (m/s)	T_{0s} ($^{\circ}\text{C}$)	T_{10s} ($^{\circ}\text{C}$)	T_{\max} ($^{\circ}\text{C}$)	t_{retorno} (s)
Resistência Blindada 1000	1000	46	4,68	220	3,5	27	27	27*	-
Resistência Estufa 1000	770	58	3,50	220	3,5	27	30	30	44

*Não se percebeu nenhuma variação da temperatura

Para segurar as resistências selecionadas, dois tipos de suportes foram construídos. O primeiro, visto na Figura 3.28 a-b e o segundo, na Figura 4.8 a-b. No segundo suporte, diferente do primeiro, as resistências estão paralelas à direção do fluxo de ar; essa posição tem a finalidade de reduzir ou eliminar as regiões incandescentes. Nesse novo modelo, verifica-se que as regiões incandescentes foram eliminadas, como observa-se na Figura 4.7. Somente um ponto de incandescência foi observado no interior do cone, porém facilmente corrigível com a mudança no sentido da resistência. Nesse último arranjo, tudo funcionou muito bem. A velocidade do ar passando sobre as resistências foi 4,5m/s. Na determinação da velocidade, usou-se o anemômetro digital marca Wilh.Lambrecht GmbH, precisão $\pm 3\%$, resolução 0,1m/s. O modelo em uso é constituído por setores de tubos, com 5 furos na área lateral de cada setor, por onde tem-se acesso aos suportes das resistências. Esses são fixados em um anel de ferro no interior de cada setor (Figura 3.29). O novo modelo de suporte, de forma mais simplificada é construído com barra de ferro, de 3/4 x 1/8," dobrada, formando um hexágono que suporta uma resistência em cada lado, constituindo um módulo cuja soma total das potências, nele contidas é 3 600 W. Esses módulos podem ser facilmente acoplados entre si, como pode ser visto na Figura 4.8a, onde dois módulos estão acoplados com capacidade para dissipar 7 200 W.

As vantagens do novo modelo são: facilidade de construção, maior potência por módulo, melhor contato das resistências com fluxo de ar, proporcionando uma maior transferência de calor. No entanto, experimentos devem ser conduzidos para analisar o aquecedor de forma mais precisa.



Figura 4.7 - Resistência paralela à direção do fluxo de ar sem incandescência.



(a)



(b)

Figura 4.8 - a) Novo modelo de suporte onde as resistências estão radialmente e paralelas ao fluxo. b) Suporte com as resistências no duto.

Pode-se observar na Figura 4.10, o conjunto ventilador tubo-axial acoplado ao duto que contém o conjunto de resistências elétricas no novo suporte. Observa-se na Figura 4.9 o mesmo conjunto em vista anterior.



Figura 4.9 - Pontos de incandescência nos centros dos cones.



Figura 4.10 - Conjunto tubo-axial e duto.

4.2.1.2 Testes para determinação da vazão de ar

Na câmara de secagem em estudo, há duas entradas de ar quente com área total equivalente às três saídas de ar. A Figura 4.11, ilustra a variação da velocidade do ar, ao longo de cada uma das saídas, medidas no ponto médio e da esquerda para direita (Figura 3.65). Vê-se na Figura 4.12, que as velocidades do ar nas saídas são aproximadamente uniformes. A saída 1 contribui com 34,5% do fluxo total de ar, enquanto as saídas dois e três contribuem com 33,5% e 32%, respectivamente.

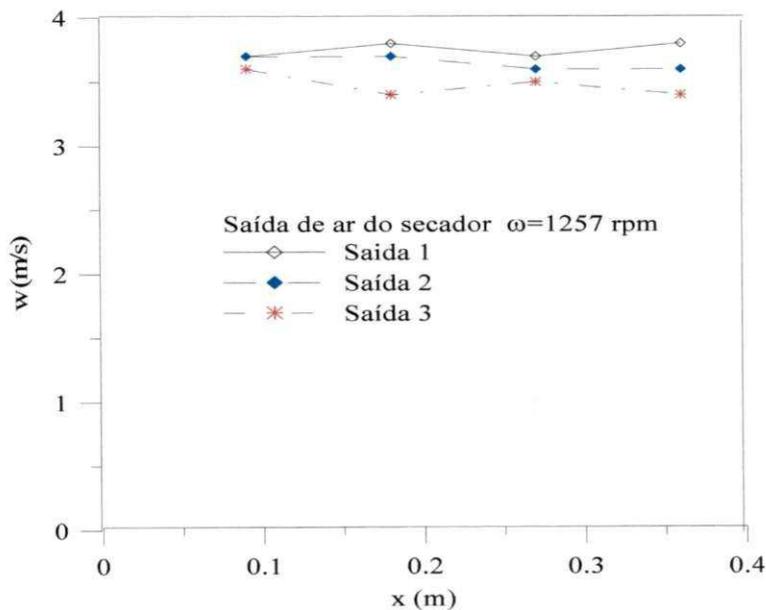


Figura 4.11 - Avaliação da velocidade da massa de ar nas três saídas para $n = 1257$.

As saídas são equidistantes, colocadas na parte inferior e ao longo do comprimento da câmara. Esse posicionamento estratégico, tem como finalidade manter um fluxo com melhor distribuição de massa no interior da câmara, contribuindo para uma secagem uniforme.

Na Figura 4.11, analisou-se o comportamento do ar nas saídas do secador à uma rotação de 1257rpm. Enquanto que na Figura 4.12 é feita a mesma análise para uma rotação de 510rpm. Como na análise anterior, as velocidades nas saídas apresentam uma boa homogeneidade.

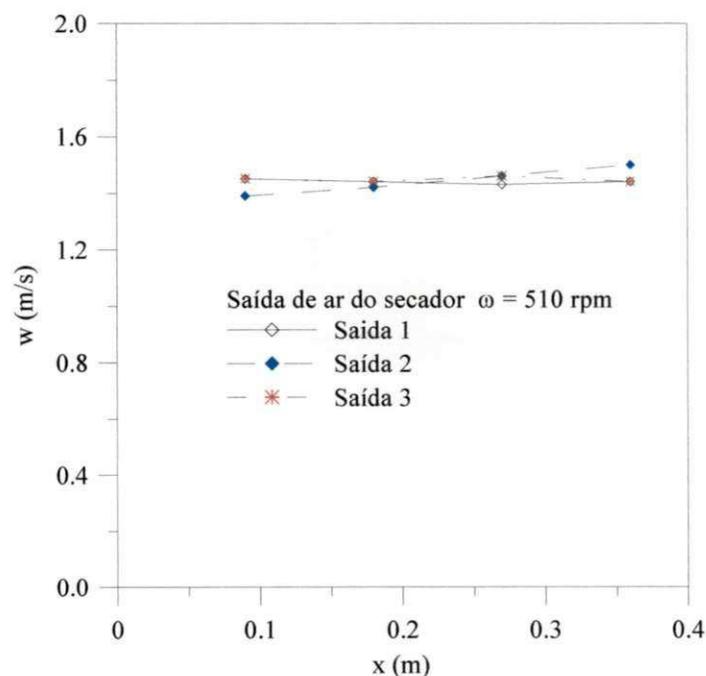


Figura 4.12 - Avaliação da velocidade da massa de ar nas três saídas para $n = 510$ rpm.

Na Figura 4.13, pode-se ver os níveis de velocidade do ar na entrada do ventilador ao longo do raio. Devido ao nível da turbulência nessa região, esses resultados não são totalmente confiáveis. Apesar desse inconveniente, o comportamento dessa variável já era esperado, isto é, velocidades baixas na região central, crescendo em direção à parede do ventilador. É importante frisar que o diâmetro do ventilador é de 0,400mm.

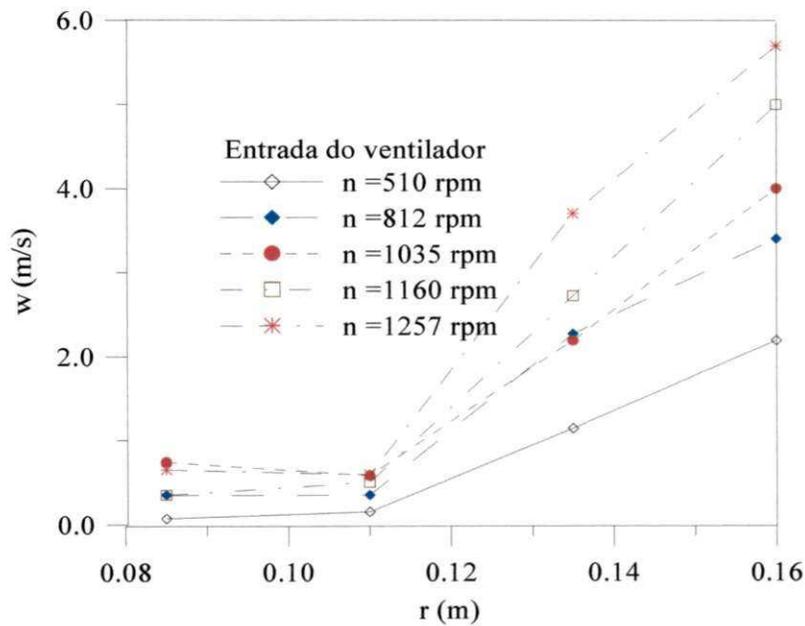


Figura 4.13 - Velocidade do ar na entrada do ventilador.

A Figura 4.14, apresenta uma comparação entre os resultados preditos pela Equação 3.19 e os experimentais de velocidade média do ar na saída do secador. Como pode-se ver, um excelente ajuste foi obtido. O coeficiente de determinação e variação obtidos foram $R^2 = 0,9833$ e $S^2 = 96,693 \%$, respectivamente, ratificando o uso desta equação ajustada para estimar a velocidade média do ar em outras rotações do ventilador.

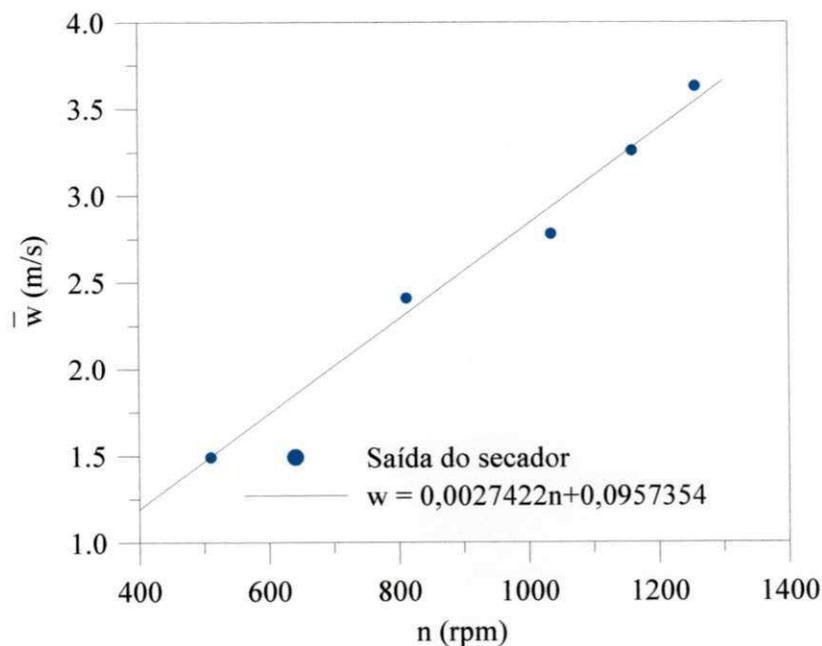


Figura 4.14 - Velocidade média do ar na saída do secador em função da rotação do ventilador.

Cada esteira mede 2,2x0,5m, correspondendo a uma área total 1.1m². Deduzindo-se o valor das áreas ocupadas pelo chassi, cilindros tratores e de apoio, tem-se uma área efetiva das esteiras por onde o ar passa igual a 1 m²; portanto, a velocidade do ar atravessando as esteiras variou de 1.5 a 3,8 m/s.

Na Figura 4.15, pode-se ver os valores da rotação do ventilador em função da tensão elétrica aplicada ao mesmo. Após análise dessa figura, observa-se uma queda na rotação do ventilador, quando a carga é ligada, proveniente de uma queda de quatro volts na tensão da rede e, conseqüentemente, sobre o motor do ventilador. Para V >160 volts, nota-se um leve aumento na rotação do ventilador. Isso ocorre devido a massa de ar tornar-se mais rarefeita quando mais aquecida. Conseqüentemente, fica mais leve, oferecendo menor resistência ao deslocamento, exigindo menor potência do ventilador, resultando no aumento na velocidade da massa de ar. Nas maiores velocidades da massa de ar, verificou-se uma maior turbulência na saída do ventilador, (entrada do duto), inclusive gerando zonas de reversão de fluxo nas proximidades da parede.

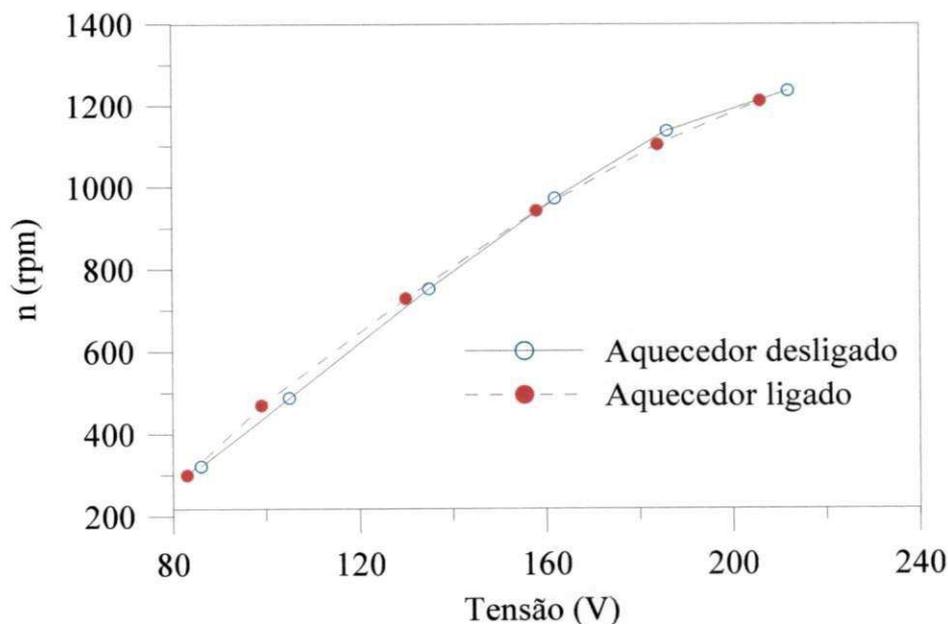


Figura 4.15 - Rotação do ventilador quando o aquecedor está ligado ou desligado

4.2.1.3 Testes para avaliação da performance do sistema de aquecimento

A Figura 4.16, ilustra a variação da temperatura média do ar no interior do secador ao longo do tempo, para várias rotações do ventilador. Não é novidade que existe uma velocidade ideal do fluido que passa por um corpo quente, onde ele adquire maior quantidade de calor. Nesse a temperatura da câmara cresce mais rapidamente nas rotações mais baixas do ventilador. Isso acontece porque, nessas condições, a velocidade do fluido é mais baixa, contribuindo para que o tempo de permanência dele, na região da fonte de calor, seja maior, resultando uma maior transferência de calor para o mesmo, obedecendo a primeira lei da termodinâmica. Isto é válido porque a fonte de calor tem uma potência dissipada fixa e o fluxo de massa de ar que atravessa é decrescente com a redução da rotação do ventilador. Além disso, para o ventilador, isso é benéfico do ponto de vista energético, haja vista que em rotações mais baixas, o consumo de energia do ventilador é menor.

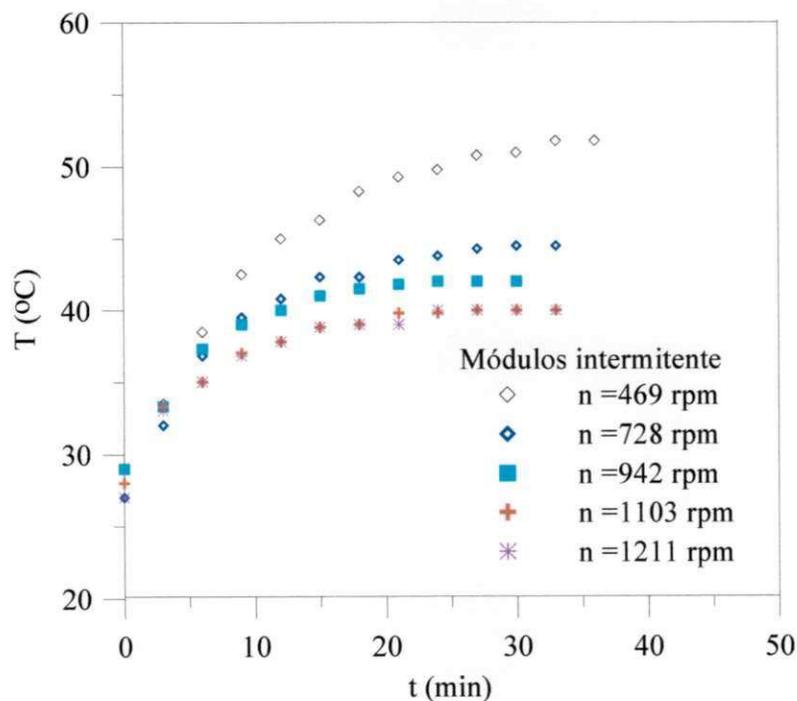


Figura 4.16 - Avaliação do desempenho do aquecedor com alimentação intermitente ao longo do tempo.

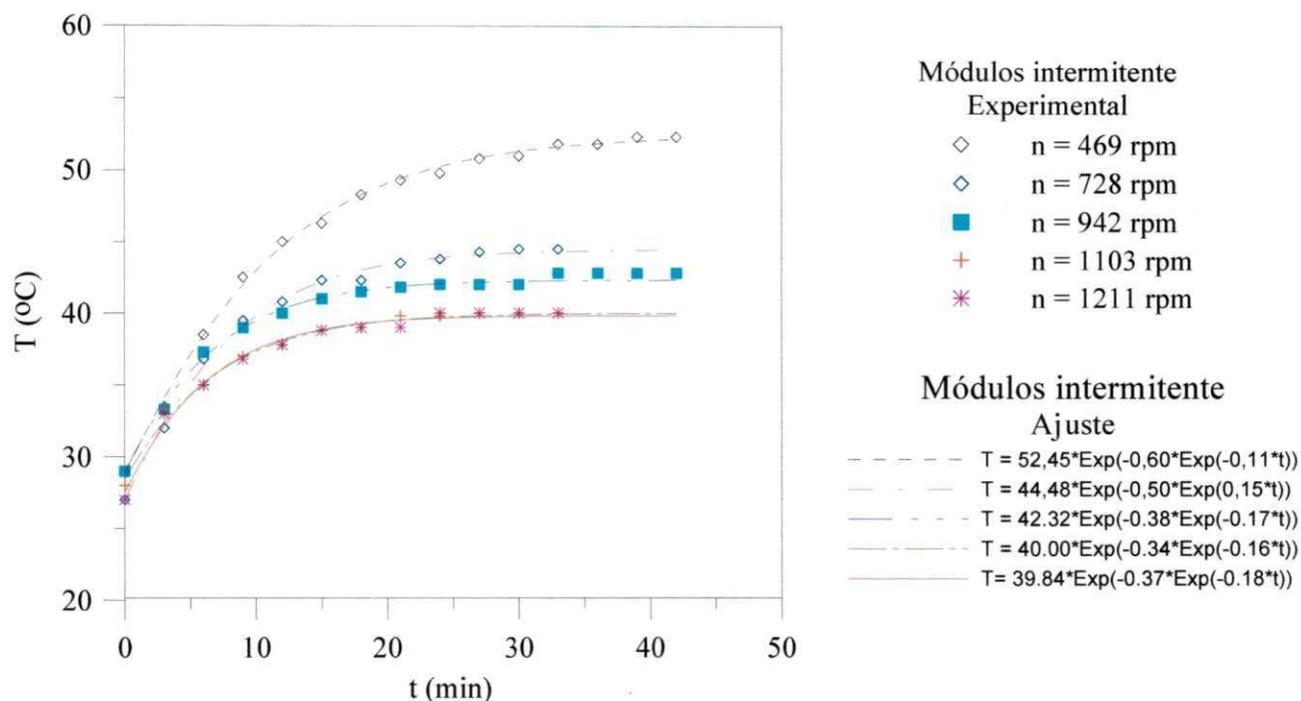


Figura 4.17 – Curvas de ajuste do desempenho do aquecedor com alimentação intermitente ao longo do tempo

Tabela 4.3 Parâmetros da Equação de ajuste das curvas da Figura 4.17.

Módulos em regime intermitente

$$T = A \cdot \text{Exp}(B \cdot \text{Exp}(C \cdot t))$$

n(rpm)	Parâmetros			Coeficientes de determinação R^2	Variâncias σ^2
	A	B	C		
469	52,45	-0,60	-0,11	0,9981	0,1164
728	44,48	-0,50	-0,15	0,9964	0,1355
942	42,32	-0,38	-0,17	0,9961	0,0846
1103	40,00	-0,34	-0,16	0,9917	0,1356
1211	39,84	-0,37	-0,18	0,9888	0,2090

O modelo representado pela equação $T = A \cdot \text{Exp}(B \cdot \text{Exp}(C \cdot t))$, cujos parâmetros, coeficientes de determinação e variâncias relacionados na Tabela 4.3, demonstra que os resultados dos ajustes foram satisfatórios, levando-se em conta os valores dos coeficientes de determinação e variâncias. Esses valores e os gráficos da Figura 4.17, demonstram que os pontos obtidos pela equação, praticamente coincidem com os pontos gerados pelos dados experimentais.

Na Figura 4.18 estão representados os resultados da temperatura média do ar no interior do secador. Oriundos de dois experimentos realizados, um composto de três módulos, com energização intermitente e outro com dois módulos, ambos alimentados por energia constante, sendo esse último, misto, com três resistências ligadas no segundo módulo e duas no terceiro. O módulo operando nessa última condição é denominado caso 2. Observando o gráfico, nota-se que o aquecimento do ar é mais rápido no caso intermitente. Existe uma elevação na temperatura de 7,15% no caso intermitente em relação ao caso 2.

Nos dois casos há um consumo de 13,5A, porém, no caso 2 como esse consumo é constante, existe uma maior solicitação dos componentes elétricos e eletrônicos. Verificou-se que no caso 2, houve um aquecimento nos cabos e no disjuntor, sendo necessário um reforço, o que não acontece no caso intermitente.

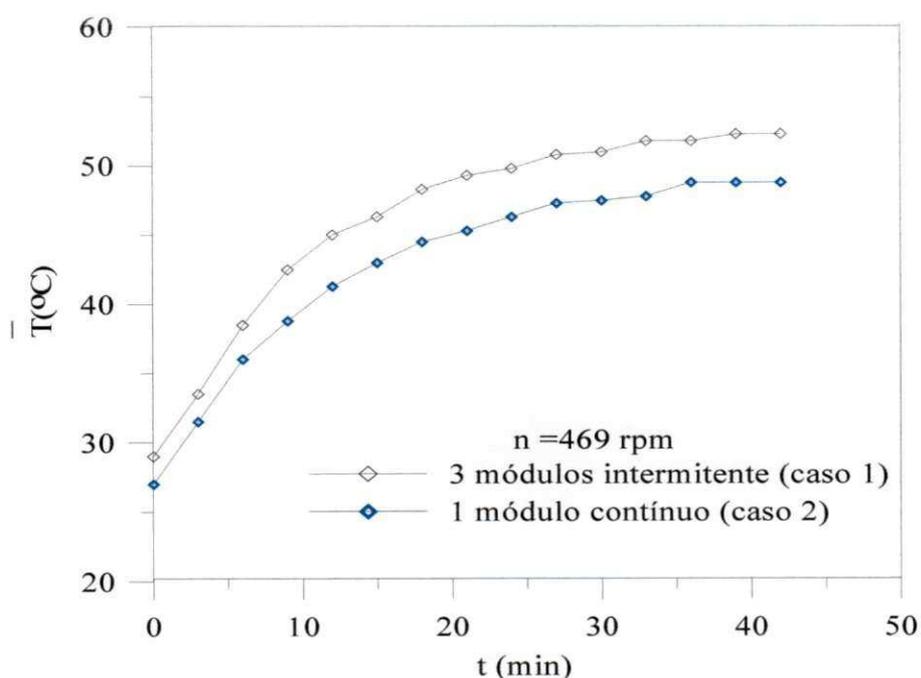


Figura 4.18 - Comparação do desempenho do aquecedor com alimentação intermitente e constante.

A Figura 4.19 mostra uma comparação da quantidade de calor recebida pelo ar, proveniente do aquecedor elétrico, em função da rotação do ventilador, quando esse último está operando em três situações distintas, a saber: 15 resistências ligadas de modo intermitente (caso1); 5 resistências ligadas continuamente, sendo 3 ligadas no 2º módulo e 2 no terceiro (caso 2) e 5 resistências ligadas continuamente, sendo as 5 no 1º módulo (caso 3). Verificou-

se que, apesar de nas três situações a potência dissipada ser de 2970W, o sistema trabalhando intermitentemente é mais eficiente, ratificando a importante contribuição desse trabalho à área de conservação de energia.

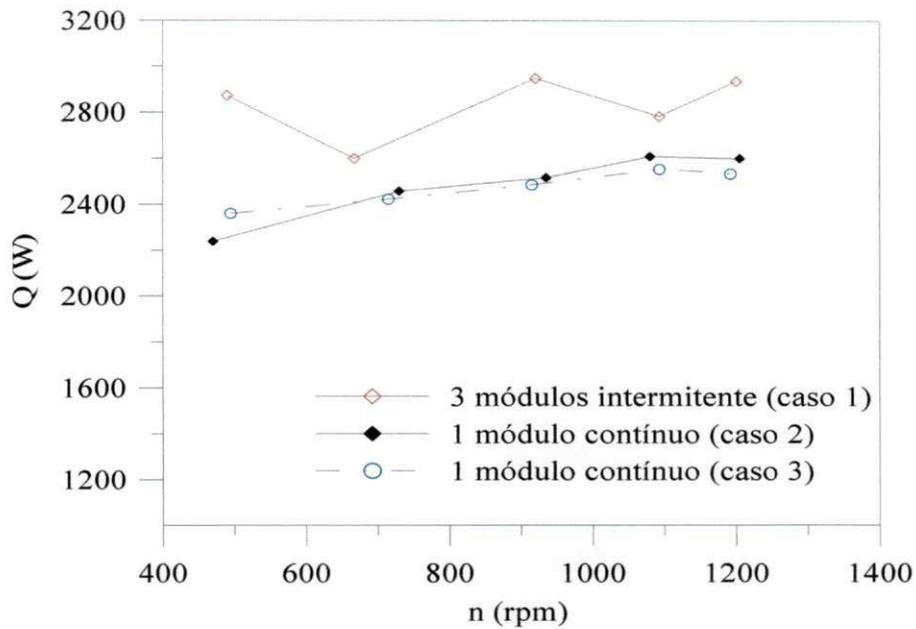


Figura 4.19 - Comparação da energia aproveitada com alimentação intermitente e constante.

Observa-se na Figura 4.20, a eficiência energética do aquecedor elétrico em função da velocidade média do ar, na entrada do ventilador, para os três casos estudados.

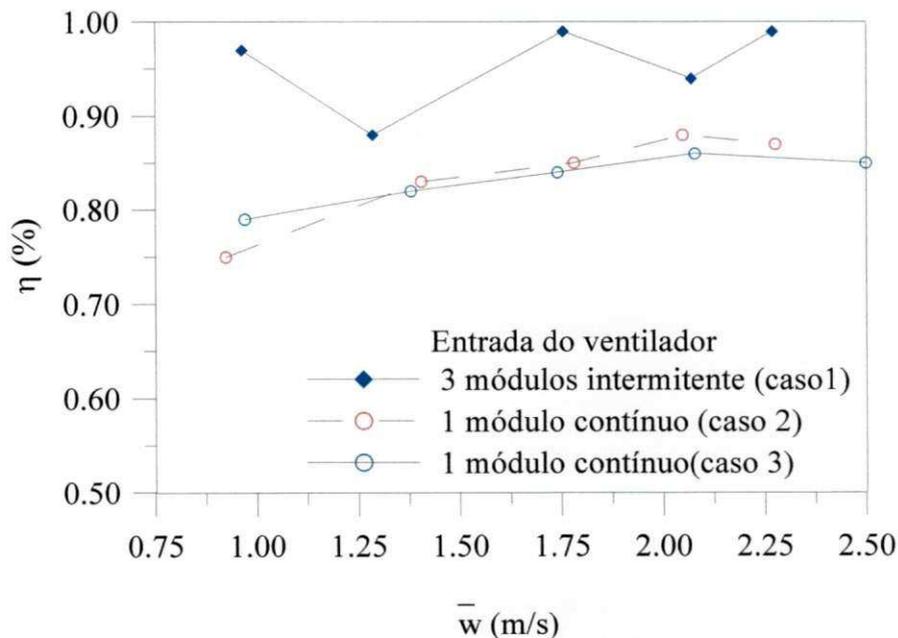


Figura 4.20 – Eficiência energética do aquecedor em função da velocidade média do ar na entrada do ventilador.

Nota-se um ligeiro crescimento do rendimento, com o aumento da velocidade em todos os casos e que no caso intermitente (caso 1), o aquecedor mantém-se em condição privilegiada com relação aos outros dois casos. Há um aumento do rendimento de 11,58% em relação ao caso 2 e 12,63% em relação ao caso 3. Verifica-se que o aquecedor operando com a alimentação elétrica de forma intermitente, sempre apresentou vantagens em qualquer dos experimentos realizados.

4.2.2 Aspectos técnico e econômico do secador desenvolvido

4.2.2.1 Secagem uniforme

Da maneira como está construído o secador, cada câmara recebe ar quente das entradas superiores, atravessa a esteira e sai na parte inferior da câmara, com umidade mais elevada e temperatura mais baixa. O processo de secagem é assegurado, uma vez que o fluxo de ar quente é uniforme ao longo da câmara de secagem. A mistura de ar quente nas três câmaras é quase inexistente, uma vez que essas são isoladas uma da outra com chapa de ferro além da camada de isolante térmico. As passagens do ar quente de uma para a outra câmara, só existe quando as portas de alimentação e descarga do produto em processo estão abertas. Nesse instante, a própria camada de produto que passa pela porta de alimentação ou descarga, serve como barreira para o fluxo de ar quente. Cessada a carga e/ou descarga, as portas fecham-se, não permitindo que o ar quente circule por esse caminho. Com esse mecanismo, assegura-se a manutenção da temperatura, independente em cada câmara. A camada fina de produto é garantida por um mecanismo nivelador, reduzindo os gradientes de temperatura e do teor de umidade da mesma, obtendo-se produtos de qualidade uniforme.

4.2.2.2 Baixa vibração durante o transporte de produtos

A esteira transportadora, tracionada por um sistema mecânico, controlado eletronicamente por pulsos elétricos definidos, em intervalos rigorosamente iguais, dentro de uma faixa de frequência de 0,5Hz à 2,0Hz torna possível manter a baixa velocidade exigida por qualquer produto em um secador de fluxos cruzados. Ao longo do deslocamento da esteira, o deslizamento é suave e praticamente livre de vibrações. O sistema mecânico de tração usado nesse projeto, garante uma maior vida útil ao conjunto esteira e elementos

tratores. O espaçamento entre os rolos de apoio e a fina camada de produto, contribuem para a manutenção da tensão mecânica da esteira, garantindo uma boa nivelção e estiramento da mesma. A tensão final da esteira é obtida por um sistema mecânico de ajuste, que desloca o rolo de apoio no sentido longitudinal da mesma. Com esse ajuste, é praticamente inexistente o afundamento entre os rolos.

4.2.2.3 Custo inicial de investimento e de manutenção

No mercado internacional encontram-se secadores com investimentos iniciais que variam entre US\$ 100 000,00 a US\$ 600 000,00. O investimento no secador proposto está em torno de US\$ 10 000,00, que quando comparado com o secador de US\$ 600 000,00 pode ser considerado de baixo custo inicial, visto que o valor do secador proposto corresponde a 1,66% de US\$ 600 000,00. Quanto à capacidade produtiva, o secador em estudo tem possibilidade de processamento igual a 0,0046 kg/s contra 0,052 kg/s do secador comercial. O rendimento máximo de processamento do primeiro corresponde a 8,85% do segundo. Nota-se uma ligeira melhora no desempenho do secador em estudo.

O custo de manutenção desse equipamento é bastante reduzido, considerando que: na parte mecânica, os rolamentos contidos nos rolos ficam protegidos contra poeira; se necessário lubrificação, essa ocorrerá após longo período de uso. Na parte elétrica, esse custo é ainda menor, pois as resistências, sendo energizadas com intermitência, a vida útil delas é muito grande, podendo-se considerar vida infinita. No que se refere ao sistema de controle, esse pode apresentar menor manutenção do que os citados anteriormente.

4.2.2.4 Espaço físico

O secador proposto tem dimensões de 1,20 x 2,10 x 2,50m. Considerando a sobreposição das câmaras e a base, faz com que esse equipamento tenha uma altura total de 2,26m. A área ocupada pelo secador é de 3,0m². Se esse equipamento fosse desenvolvido totalmente no sentido longitudinal, ocuparia uma área de 9,0m². O projeto em estudo ocupa uma área igual a 1/3 da área, quando desenvolvido horizontalmente. Em termos longitudinal, o secador teria um comprimento de 7,5m ao invés dos 2,5m desse projeto.

4.2.2.5 Manutenção, operação e transporte

Com perfis de dimensão máxima de 1,20m na estrutura, totalmente aparafusados, essa montagem permite facilidade na manutenção e transporte. As paredes laterais são feitas em chapas finas de aço, medindo 65x50x0,12cm. A parte superior e inferior, são confeccionadas com os mesmos tipos de chapa, medindo 55x50x0,12cm. Esse sistema permite a desmontagem e montagem com grande facilidade. No caso de alguma modificação, ou seja, adição de novos complementos, torna-se útil esse sistema com parafusos. Se for necessário transportar, a estrutura poderá ser fracionada em três blocos com desmontagem parcial ou, em uma maior quantidade de peças se a desmontagem for total, garantindo versatilidade ao secador.

4.2.2.6 Isolação térmica

. De acordo com o que foi visto no Capítulo 3, a isolação térmica aplicada comportou-se dentro do previsto, não sendo notada nenhuma alteração na temperatura no ambiente externo ao secador, proveniente da câmara de secagem através da camada isolante.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES E SUGESTÕES

5.1 Conclusões

A partir dos resultados obtidos com essa pesquisa, pode-se observar:

- Quanto aos resultados simulados:
 - Os maiores gradientes de temperatura do ar de secagem, dentro do leito, ocorrem nos primeiros instantes do processo de secagem do casulo.
 - O casulo atinge a temperatura do leito logo na primeira câmara, isto é, em aproximadamente 7 200s. O processo de secagem completa-se na segunda câmara, podendo a terceira ser usada somente para reduzir os efeitos térmicos adquiridos nas câmaras anteriores.

- Quanto aos resultados experimentais:
 - A colocação de duas entradas de ar quente, com área total equivalente às três saídas de ar ao longo de cada câmara, contribui para que as velocidades do ar nas saídas sejam idênticas, contribuindo para uma secagem uniforme
 - A espessura da camada do produto é garantida por um mecanismo nivelador, reduzindo os gradientes de temperatura e o teor de água da mesma, podendo-se obter produtos de qualidade uniformes.
 - A construção do secador, usando módulos independentes, favorece a operação de secagem quando houver necessidade de usar uma unidade independente. A manutenção e o transporte ficam mais fáceis, pois além do sistema modulado, esses são totalmente aparafusados.
 - Com a facilidade de troca da malha da esteira, a variação da velocidade e a variação da temperatura de aquecimento, esse secador torna-se versátil, capaz de secar vários tipos de produtos biológicos.
 - A velocidade média do ar na entrada do ventilador varia 1,44 a 3,39m/s, enquanto a rotação do ventilador varia de 490 até 1200rpm.
 - A equação linear proposta para o ajuste da velocidade média em função da rotação do ventilador foi adequada apresentando um coeficiente de determinação 0,9833 e variância de 96,69%.
 - O consumo de energia elétrica no processo de aquecimento do secador é muito alto, 8910 W, tornando-se economicamente inviável o processo de secagem, embora tecnicamente seja totalmente viável.
 - A temperatura média do ar no interior do secador, cresce mais rapidamente quando é usada a alimentação das resistências em regime intermitente, variando de 29 a 52,3°C no período de 42 minutos.

- A quantidade de calor oriunda do aquecedor é maior no regime intermitente. Esse calor atinge níveis mais baixos, quando a alimentação das resistências é feita de modo constante. Essa grandeza varia de 2872,31 a 2934,50W nas rotações de 490 a 1200rpm para o caso intermitente.
- A eficiência energética do aquecedor elétrico, levando-se em consideração a velocidade do ar, é maior quando as resistências estão energizadas em regime intermitente. Essa eficiência atingiu valores de 0,97 a 0,99% para uma variação da velocidade do ar no intervalo de 0,96 a 2,27m/s. O mesmo não acontece com a energização em regime constante; no caso 2, apresentou valores variando de 0,75 a 0,87% e 0,92 a 2,27m/s. No caso 3 há uma variação de 0,79 a 0,85% e 0,97 a 2,50m/s nas mesmas condições.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

- Melhorar o sistema eletrônico de controle tornando o secador totalmente automático.
- Testar o uso de outras fontes de energia para o aquecimento do ar, no secador, ao invés de energia elétrica.
- Estudar o reaproveitamento do ar oriundo de uma câmara para preaquecer o ar na câmara de secagem seguinte.
- Aperfeiçoar o sistema motriz das esteiras, tornando o mesmo livre de ruídos que existe no atual projeto.
- Realizar experimentos de secagem, no secador desenvolvido, com diferentes produtos biológicos.
- Realizar um estudo energético e exergético no secador proposto, visando sua otimização.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AFONSO JÚNIOR P. C.; CORRÊA, P. C. Cinética da contração volumétrica dos grãos de duas cultivares de milho-pipoca durante o processo de secagem. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v.2, n.1, p.61-65, 2000.

ALVARENGA, L. C.; FORTES, M.; PINHEIRO FILHO, J. B.; HARA, T. Transporte de umidade no interior de grãos de feijão preto sob condições de secagem. **Revista Brasileira de Armazenamento**, v.5, n.1, p.5-18, jun. 1980.

ARCHILA, A. M.; BONAZZI, C.; MEOT, J. M.; TRYSTRAN, G. Modeling and control of a mixed-flow rice dryer with emphasis on break age quality. **Journal of Food Engineering**, v. 49, n. 4, p. 303-309, 2001.

ASSIS, A. J.; LIRA, T. S.; MURTA, V. V. e BARROZO, M. A. S. Concurrent drying of soybean seeds: the effect of the radial air profile. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, v.22, n. 2, p. 311-318, abr./jun. 2005

BAKKER-ARKEMA, F. W.; LEREW, L. E.; DE BOER, S. F.; ROTH, M. G. **Grain drier simulation**. Research Report, n. 224, 1974. p.2-23.

BAKKER-ARKEMA, F. W.; MAIER, D. E.; SCHISLER, I. P. Drying rates and dryer capacities of different seed grains. **Drying Technology**. v. 5, n. 4, p. 527-540, 1987.

BAKKER-ARKEMA, F.W.; ROSENAU, J.R.; CLIFORD, W.H. The effect of grain surface area on the heat and mass transfer rates in fixed and moving beds of biological products, **Transactions of the ASAE**. v. 14, n. 5, p.864-867, 1971.

BANSAL, N. K.; GARG, H. P. Solar crop drying **Advances in drying**. New York: Hemisphere Publishing Corporation, v. 4, chapter 6, p.293-294, 1987.

BARONI, A. F.; HUBINGER, M. D. Drying of onion: effects of pre-treatment on moisture transport. In: INTER-AMERICAN DRYING CONFERENCE (IADC) 1, 1997 Itu. **Proceedings...** 1997 v. B, p.419-426.

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

BASUNIA, M. A.; ABE, T. Thin-layer solar drying characteristics of rough rice under natural convection. **Journal of Food Engineering**, v. 47, p.295-301, 2001.

BEKE, J.; VAS, A. Testing the drying process of shelled corn on aspects of nutritional quality and thermal efficiency. **Drying Technology**, Special Issue, v. 5, p.007-1027, 1994.

BIANCHI, C. D. **Fibras têxteis**. Rio de Janeiro: Ao livro Técnico, 1945. p.175-196.

BICHO-DA-SEDA, tecendo fios de dólares. **Revista Globo Rural Especial: Como Criar**. n. 101, p.53-63, mar. 1994.

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

BROOKER, D. B.; BAKKER-ARKEMA, F. W.; HALL, C. W. **Drying cereal grains**. Connecticut: AVI Publishing Company, Inc., 1974, 265 p.

- BUTKOV, E. **Física matemática**. Rio de Janeiro: Editora Guanabara S.A., 1988. 725 p.
- CAMPBELL, G. M.; MUJUMDAR, A. S. Discrete modeling and suggested measurement of heat transfer in gas-solids flows. **Drying Technology**, v.21, n. 6, p. 979-994, 2003.
- CARMO, J .E. F; LIMA, A. G. B. Drying of lentil including shrinkage: a numerical simulation **Drying Technology**, v. 23, n. 9-11, p.1977-1992, 2005.
- CARMO, J. E. F. **Difusão em sólidos esferoidais oblato: modelagem e simulação**. 2000. 76f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal da Paraíba, 2000.
- CAO, C. W; YANG, D. Y; LIU, X. D; LIU, Q. Research on modeling and simulation of mixed flow grain dryer. In: INTERNATIONAL DRYING SYMPOSIUM (IDS'2004), 14, 2004 , São Paulo: **Proceedings...**2004, v. A p.565-572.
- CAVALCANTI MATA, M. E. R. M.; MENEGALLI, F. C. Influence of the initial moisture contents and air velocity in the drying rate in thin layers of bean grains. In: INTER-AMERICAN DRYING CONFERENCE (IADC) 1, 1997, Itu. **Proceedings...**1997 v.B, p. 569-577.
- CORBMAN, B. P. **Textiles: fiber to fabric**. 5.ed. New York: McGraw-Hill Book Company, 1975. p 317-332.
- COSTA, E. C. **Compressores**. 1ª ed. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda, 1988 170p.
- COSTA, S. M.; MURATA, V. V.; BARROZO, M. A. S. Drying of soybean seeds in countercurrent and concurrent moving. In: INTER-AMERICAN DRYING CONFERENCE (IADC) 1, 1997 Itu. **Proceedings...** 1997. v. B, p. 561-568,
- COUTINHO FILHO, F. **A Sericicultura: técnica da cultura da amoreira e da criação do bicho-da-seda**. Brasília: DAMPE, 1973. p.69-73.

CRAIG JR, R. R. **Mecânica dos materiais** 2ªed Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 2003. 552 p.

DERDOUR L.; DESMORIEUX H. A model for internal moisture diffusivity during the regular regime comparison with experimental data obtained on plaster and spirulina. In: INTERNATIONAL DRYING SYMPOSIUM (IDS'2004), 14, 2004, São Paulo: **Proceedings...** 2004 v. A p. 718-725.

ELTIGANI, A. Y.; BAKKER-ARKEMA, F. W. Automatic control of commercial crossflow grain dryers. **Drying Technology**, v. 5, n. 4, p.561-575, 1987.

ERHARDT, T. **Curso técnico têxtil: fibras vegetais, polímeros naturais, fibras de animais**. São Paulo: Pedagógica e Universitária Ltda., 1976. v. 2, p.76-87.

EZEIKE, G. O. I.; OTTEN, L. Theoretical analysis of the tempering phase of a cyclic drying process. **Transactions of the ASAE**, v. 24, p.1590-1594, 1981.

FARIAS, S. N. **Secagem de sólidos esferoidais usando o método de Galerkin**. 2002. 60 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande.

FARIAS, R. P. **Simulação da secagem de produtos biológicos em secadores de fluxos cruzados**. 2003, 84 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande.

FARIAS, R.P; DEIVTON, C. S; HOLANDA, P.R.H; LIMA, A. G. B. A Secagem de grãos em secador de esteira e fluxos cruzados:uma solução numérica usando o método dos volumes finitos. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**. Campina Grande, PB, v. 6, n.1, p. 1-16, jan./jul. 2004.

FASINA, O. O.; SOKHANSANJ, S.; TYLER, R. T. Optimizing the drying and cooling of alfalfa pellets. In: INTER-AMERICAN DRYING CONFERENCE (IADC), 1, 1997. Itu. **Proceedings...** 1997 v. B, p. 530-537.

FIAÇÃO de seda Bratac S.A. **Instruções sobre funcionamento do secador de casulos.** São Paulo. 1986. 11p.

FIOREZE, R.; ROSSI, S. J.; KLUPPEL, R. P. Simulação de secagem de camadas espessas de raspas de mandioca. **Revista Brasileira de Armazenamento**, v.9 e 10, n.1 e 2, p.19-22, jun/dez. 1984/1985.

FONSECA, A. DA S.; FONSECA, T. C. **Cultura da amoreira e criação do bicho-da-seda: sericicultura.** 2.ed. São Paulo: Nobel, 1988. 246p.

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 5; p.119-154.

FRANCA, A. S.; FORTES, M.; HAGHIGHI, K. Numerical simulation of intermittent and continuous deep-bed drying of biological materials, **Drying Technology**, v.12, n.7, p.1537-1560, 1994.

FREIRE, E. S.; CHAU, K. V. Simulation of the drying process of fermented cacao beans. In: INTER-AMERICAN DRYING CONFERENCE (IADC) 1, 1997 Itu. **Proceedings...** 1997 v. B, p.356-363.

GARNER, W. **Textile laboratory manual: additional methods.** New Jersey: Textile Book Service, 1949. v.6, p.1-16.

GINER, S. A; ESTREBOU, C. A. Visual software (fluX) for simulation of cross flow dryer performance and effect on quality. Examples for wheat. In: INTERNATIONAL DRYING SYMPOSIUM (IDS'2004), 14, 2004 , São Paulo: **Proceedings...** v. A, p. 605-612.

GINER, S. A.; MASCHERONI, R. H.; NELLIST, M. E. Cross-flow drying of wheat: a simulation program with a diffusion-based deep-bed model and a kinetic equation for viability loss estimation. **Drying Technology**, v. 14, n. 10, p.2255-2292, 1996.

HALL, C. W. **Drying and storage of agricultural crops**. Connecticut: AVI publishing company, Inc. 1980. 381 p.

HANADA, Y.; WATANABE, J. K. **Manual de criação do bicho-da-seda**. Curitiba: COCAMAR, 1986. 224p.

HARPER, H. **Introduction to textile chemistry**. London: Macmillan and. Co., Limited.1921. p.69-77.

HESS, K. P. **Textile fibers and their use**. Chicago: J.B. Lippincott Company, 1941. p.231-260.

HOLANDA, P. R. H; MATA, S. F; LIMA, A, G, B. Propriedades físicas e secagem de casulos do bicho-da-seda em leito fixo:uma investigação teórica e experimental. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**. Campina Grande, PB, v. 6, n. 2, p. 101-114 jul./dez 2004.

HOLLEN, N.; SADDLER, J; LANGFORD, A. L. **Textiles**, 5.ed. New York: Macmillan Publishing Co., Inc., 1979. p.5-16.

IBRAHIM, M. H.; DAUD, W. R. W.; TALIB, M. Z. M. Drying characteristics of oil palm kernels. **Drying Technology**, v.15, n. 3-4, p.1103-1117, 1997.

INCROPERA, F. P.;DE WITT, D. P. **Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa**. 5ªed. Rio de Janeiro: Editora LTC S.A., 2003. 698p.

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

JUMAH, R. Y.; MUJUMDAR, A S.; RAGHAVAN, G. S. V. A mathematical model for constant and intermittent batch drying of grains in a novel rotating jet spouted bed. **Drying Technology**, v.14, n.3-4, p.765-802, 1996.

KAMEOKA, T.; HOSOKAWA, A.; MORISHINA, H. Simulation of heat and mass transfer during through-drying process of rough rice. **Drying of solids**. Recent International Developments. New York: John Wiley & Sons, 1986, p. 271-278.

KEEY, R.B. **Drying of loose and particulate materials**. New York: Hemisphere Publishing Corporation, 1992. 502 p.

KOSOSKI, A. R. Dois métodos comparando a obtenção do equilíbrio higroscópico dos grãos. **Revista Brasileira de Armazenamento**, n.2, p.31-43, dez, 1977.

LI, YE-BO, C.; CHENG-WEN, L., DENG Y. Simulation of recirculating circular grain dryer with tempering stage. **Drying Technology**, v. 15, n. 1, p.201-214, 1997.

LIM, L. C; TASIRIN, S.M; DAUD, W. R Derivation of new drying model from theoretical diffusion controlled drying period. In: INTERNATIONAL DRYING SYMPOSIUM (IDS'2004), 14, 2004, São Paulo: **Proceedings...** 2004 v. A p. 430-435.

LIMA, A. G. B. **Estudo da secagem e dimensionamento de secador de casulos do bicho-da-seda**. 1995. 190. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande..

LIMA, A. G. B.; MATA, S. F. Densidade e porosidade de casulos do bicho-da-seda *Bombyx mori L.* nas condições iniciais de secagem. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE SISTEMAS PARTICULADOS, 24, 1996. Uberlândia MG. **Resumo...** Uberlândia 1996.

LIMA, A. G. B; MATA, S. L F. Princípios gerais sobre sericicultura: aspectos científicos do casulo e fio-de-seda produzidos pelo *Bombyx mori L.* **Revista Engenharia**, n.13, p.25-30, dez., 1995.

LIMA, A. G. B; NEBRA, S. A.; MATA, S. F. S Equação de secagem em camada fina para casulos do bicho-da-seda (*Bombyx mori L.*). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 27, 1998, Poços de Caldas, MG. **Anais....** Poços de Caldas: SBEA, 1998. v.4, p.1-3

LIMA, A.G.B. **Fenômeno de difusão em sólidos esferoidais prolatos. Estudo de caso: secagem de bananas.** 1999. 256 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica Departamento de Engenharia Mecânica , UNICAMP, Campinas.

LIU, J. Y.; SIMPSON, W. T. Solutions of diffusion equation with constant diffusion and surface emission coefficients. In: INTER-AMERICAN DRYING CONFERENCE (IADC), 1, 1997, Itu. **Proceedings...1997** v. A, p.73-80.

LIU, Q.; BAKKER-ARKEMA, F. W. Stochastic modelling of grain drying: part 2. Model development. **Journal of Agricultural Engineering Research** . v.66, n. 4 p.275-280, 1997.

LUIKOV, A. V.; MIKHAILOV, Y. A. **Theory of energy and mass transfer.** Oxford: Pergamon Press Ltd., 1965. 392 p.

MALISKA, C. R. **Transferência de calor e mecânica dos fluidos computacional.** Rio de Janeiro: LTC- Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1995, 424 p.

MARIZ, T. F. **Secagem da casca de caroço de algodão em leito fixo.** 1986. 139f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande. Campina Grande.

MARSH, J. T. **Textile science: an introductory manual.** London: Chapman & Hall Ltd., 1948. p.15-33.

MARTINEZ, C.; VIZCARRA, M. G.; RUIZ, R. S. On the simulation of batch fluidized bed dryers. In: INTER-AMERICAN DRYING CONFERENCE (IADC), 1, 1997, Itu. **Proceedings...1997** v. B, p. 364-371.

MARTINEZ-VERA, C.; VIZCARRA-MENDONZA, M.; GALÁN-DOMINGO, O.; RUIZ-MARTINEZ, R. Experimental validation of a mathematical model for the batch drying of corn grains. **Drying Technology**, v.13, n.1-2, p.333-350, 1995.

MARTINS, J. H. **Simulação de secagem de milho em camada estacionária**. 1982. 104 f. Dissertação Mestrado em Engenharia Agrícola Departamento de Engenharia Agrícola Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

MAUERSBERGER, H. R. **Textile fibers: their physical, microscopical and chemical properties**. 5.ed. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1947. p.679-737.

MISRA, M. K.; BROOKER, D. B. Thin-layer drying and rewetting equation for shelled yellow corn. **Transactions of the ASAE**, p.1254-1260, 1980.

MOLNÁR, I.; BABOS, L.; GUBICZA, A.; LUKACSOVICS, F. Investigation into the killing of cocoons by radioactive methods. **Magyar Textil e Tech.**, v.14, n.5, p.196-199, 1962.

MOTTA-LIMA, O. C.; PINTO J.C.; MASSARANI, G. Parameter estimation in cross-flow sliding bed drying. In: INTERNATIONAL DRYING SYMPOSIUM, (IDS'96), 10, 1996 Krakow, **Proceedings...**1996. v.A, p.283-290.

NASCIMENTO, J. J. S. **Fenômenos de difusão transiente em sólidos paralelepípedos. Estudo de caso: secagem de matérias cerâmicos**. 2002. 205 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica), Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa.

FORTES, M.; MOREIRA, S. M. C.; PINHEIRO, F. J. B.; NEVES, M. J. B. Simulação físico-matemática do processo de seca-aeração. **Revista Brasileira de Armazenamento**, v. 8, n. 1 e 2, p.3-10, jun/dez. 1983.

NGANHOU, J.; LECOMTE, D.; DUMARGUE, P. Heat and mass transfer through a thick bed of cocoa beans under stationary and transient inlet conditions. In: INTERNATIONAL DRYING SYMPOSIUM (IDS'92) 8, 1992, Montreal: **Proceedings..**1992. v. B, p.1515-1523.

NOVAES, T .L. C. C. **Simulação numérica da secagem de casulo do bicho-da-seda em secador de leito fixo**. 2005 65 f. Trabalho de Conclusão de Curso (TCC em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande.

OLIVEIRA J. R. de. **Desenvolvimento de um sistema de secagem para grão, em camada fina e espessa: comparação entre modelos matemáticos de simulação para grãos de feijão-macáçar.** 2006 Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande.

OLIVEIRA, V. A. B. **Difusão em sólidos esferoidais prolatos: uma solução analítica.** 2001. 87f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande.

OLNEY, L. A. **Tecnologia química de fibras textiles** 9.ed. Florida: El Ateneo, 1947. 31 p.

PARK, K. J.; GODOI, L. F. G.; ALONSO, L. F. T.; CORRÊA JR., W. A. Drying behavior parameters in a continuous vertical annular static mixer dryer. In: INTER-AMERICAN DRYING CONFERENCE (IADC), 1, 1997, Itu. **Proceedings... 1997 v. A**, p.204-209.

PARK, K. J.; BROD, F. P. R. Comparative study of grated coconut (cocos nucifera) drying using vertical and horizontal dryers. In: INTER-AMERICAN DRYING CONFERENCE, 1, (IADC), 1997, Itu. **Proceedings... 1997 v. B**, p. 469-475.

PARTI, M. Evaluation of selected mathematical models for grain drying. In: INTERNATIONAL DRYING SYMPOSIUM (IDS'90/CHISA'90), 7, 1990, Praha: **Proceedings...1990. v.3**, p.53-162.

PARTI, M. Selection of mathematical models for drying grain in thin-layers. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v.54, p.339-352, 1993.

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

PAKOWSKI, Z.; BARTEZAK, Z.; STRUMILLO, C, STENSTROM, S., , "Evaluation of Equations Approximating Thermodynamic and Transport Properties of Water, Steam and Air for Use in CAD of Drying Processes". **Drying Technology**, V. 9, n.3, p.753-773, 1991.

PIMENTEL, R.; SARTORI, D.T. M. **Drying of grass seeds in cross-flow band dryer.** INTERNATIONAL DRYING SYMPOSIUM, (IDS'98), 11, 1998, **Proceedings** Halkidiki, **Anais** 1998. v.B. p.1350-1357.

PORTO, P. S. S.; LISBOA, A. C. L. Modelling the drying of a parallelepipedic oil shale particle. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, v. 22, n. 2, p. 233-238, abr./jun. 2005

PRADO, E. P. **Secagem de cacau, em camadas finas, a sessenta e oitenta graus celsius e variação da porosidade durante o processo.** 1978. 31f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola), Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. Viçosa.

QI, J.S.; KRISHNAN, C. Mathematical modeling of continuous cross-flow diffusion-controlled dryers. **Chemical Engineering Science**, 1996 Great Britain, 1996 vol. 51 pp.4769-4780.

QUINTANA-HERNANDEZ, P.; RODRIGUES-RAMIREZ, J.; MENDES-LAGUNAS, L.; CORNEJO-SERRANO, L. Humidity diffusion within sugarcane fibers. In: INTER-AMERICAN DRYING CONFERENCE (IADC) 1, 1997, Itu. **Proceedings...** 1997. v. B, p. 538-542.

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

RODRIGUEZ R. ET AL. Kinetic and quality study of Mushroom drying under microwave and vacuum. **Drying Technology**, v.23, n. 9-11, p. 2197-2213, 2005.

ROSSI, S.J. **Psicrometria.** 1ª ed. João Pessoa: Editado pela Fundação de Apoio à Pesquisa e à Extensão (FUNAPE), 1987. 60p.

RUMSEY, T. R. e ROVEDO C. O. Two-dimensional simulation model for dynamic cross-flow rice drying. **Chemical Engineering and Processing**, Davis, v. 40, p. 355-362, 2001.

SABADINI, E.; CARVALHO, JR. B. C.; SOBRAL, P. J. A.; HUBINGER, M. D. Mass transfer and diffusion coefficient determination in salted and dried meat pieces. In: INTER-AMERICAN DRYING CONFERENCE (IADC), 1, 1997, Itu. **Proceedings...** 1997. v. B, p.441-447.

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

SARKER, N. N.; KUNZE, O. R.; STROUBOLIS, T. Finite element simulation of rough rice drying. **Drying Technology**, v.12, n. 4, p.761-775, 1994.

SCHLUTERMAN, G. J. Air and rice property profiles within a commercial cross-flow rice dryer. **Applied Engineering in Agriculture**, v. 20, n 4, p. 487-494, 2004.

SHIRUO, C. **Studies on drying of silkworm cocoons**. Drying of solids. Recent International Developments. New York: John Wiley & Sons,. 1986, v. 2, p.240-244.

SHI-RUO, C.; JIN-YONG, C.; MUJUMDAR, A. S. A preliminary study of steam drying of silkworm cocoons. **Drying Technology**, v.10, n.1, p.251-260, 1992.

SILVA, O. **Manual prático e técnico de agricultura**. 2. ed. São Paulo: Instituto Campineiro de Ensino Agrícola, 1982. 239p.

SOKHANSANJ, S. Improved heat and mass transfer models to predict grain quality. **Drying Technology**. v. 5, n. 4, p.511-525, 1987.

SOKHANSANJ, S. Grain drying simulation with respect to energy conservation and grain quality **Advances in drying**. New York: Hemisphere Publishing Corporation. 1984. v..3, chapter 4, p.121-179.

SOPONRONNARIT, S.; PRACHAYAWARAKORN, S.; SRIPAWATAKUL, O. Development of cross-flow fluidized bed paddy dryer. **Drying Technology**, v.14, n.10, p. 2397-2410, 1996.

SOUSA, D. F. S.; VIEIRA, R. C.; PASSOS, M. L., BISCAIA, E. C. Robust simulation of counter-flow moving bed dryers. In: INTERNATIONAL DRYING SYMPOSIUM (IDS'2004) 14 2004, **Proceedings...**2004, v. A, p.414 -421.

STAKIC, M. Model-based analysis of convective grain drying processes. **Drying Technology**, v. 23, n. 9-11, p. 1895-1980, 2005.

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

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

TAGAWA, A.; KITAMURA, Y.; MURATA, S. Thin layer drying characteristics of adzuki beans. **Transactions of the ASAE**, v. 39, n. 2, p.605-609, 1996.

TAKAHASHI, J. N. Agroindústria sericícola. In: ENCONTRO NACIONAL DE SERICICULTURA, 6, 1987, Natal: **Anais...** 1987. p.57-60.

THANGAVEL, K.; PALANISWAMY, P. T.; GOTHANDAPANI, L. Studies on stifling and drying of cocoons for longer storage. In: INTERNATIONAL DRYING SYMPOSIUM (IDS'96), 10, 1996, Krakow. **Proceedings...** 1996 v. B p.1487-1490.

TOLABA, M. P.; AGUERRE, R. J.; SUAREZ, C. Drying of corn with tempering: simulation and experimental verification. In: INTER-AMERICAN DRYING CONFERENCE (IADC), 1, 1997, Itu. **Proceedings...** 1997. v. B, p.516-523.

TSUKADA, MASUHIRO. Thermal decomposition behavior of sericin cocoon. **Journal of Applied Polymer Science**. v. 22, n. 2, p.543-554, Feb., 1978.

UCHINO, T. **Novas alternativas para a seda no século 21**. Bastos, SP: 2000. 6 p. (BRATAC. Boletim Técnico, 3).

VASCONCELOS, L. G. S.; ALSINA, O. L. S. Drying simulation of "carioca" beans in cross-flow. In: INTERNATIONAL DRYING SYMPOSIUM (IDS'92), 8, 1992, Montreal **Proceedings...** 1992, v. B, p. 1501-1507.

WALKER, L. P.; BAKKER-ARKEMA, F. W. Energy efficiency in concurrent flow rice drying, **Transactions of the ASAE**. v.24, p.1352-1356, 1981.

WRIGHT, E. J. WEBB, M.C. e HIGHLEY, E. **Possible use of cross-flow dryers for heat disinfestations of grain.** In: AUSTRALIAN POSTHARVEST TECHNICAL CONFERENCE, 2003. CSIRO Stored Grain Research Laboratory, Canberra.

WOOLMAN, M. S.; MCGOWAN, E. B.. A handbook for the student and the consumer. 3ed. **Textiles**: New York: Macmillan Company, 1943. p.157-178.

YANG, W.; SIEBENMORGEN, T. J. Cross-Flow drying of rough rice as mapped on its glass transition state diagram. In: INTERNATIONAL DRYING SYMPOSIUM, (IDS'2000), 12, 2000, Noordwijkerhout. **Proceedings...**, 2000, CD ROM.

ZACTITI, E. M.; FINZER, J. R. D.; LIMAVERDE, J. R.; BANZATTO, L. L. Comparação entre sistemas de secagem de café. **Science and Engineering Journal**, v. 13, n 1, p. 19-23, 2004

ZHANG, Q., LITCHFIELD, J. B., An optimization of intermittent corn drying in a laboratory scale thin layer dryer. **Drying Technology**, v.9, n. 2, p. 383-395, 1991.

ZOGZAS, N. P.; MAROULIS, Z. B. Effective moisture diffusivity estimation from drying data: a comparison between various methods of analysis. **Drying Technology**, v. 14, n. 7 e 8, p.1543-1573, 1996.

ANEXOS

ANEXO A

Código computacional em linguagem do Mathematica[®] para simular a secagem de casulos em secador de fluxos cruzados

Remove["Global*"]

(*PROGRAMA ESCRITO EM VOLUMES FINITOS*)

```
npv = 20;
npx = 1;
H = 0.02;
L = 28.2;
a = 271.71;
y = Array[0 &, {npv}];
i = 1;
auxR = 22105649.25;
auxA = -27405.53;
auxB = 97.5413;
auxC = -0.146244;
auxD = 0.12558*10(-3);
auxE = -0.48502*10(-7);
auxF = 4.34903;
auxG = 0.39381*10(-2);
Patm = 101325;
MMa = 28.96;
Runiv = 8314.34;
auxroa = Patm*MMa/Runiv;
(*dados de entrada do material*)
Mpo = 2.125;
Tpo = 28.3;
rop = 158.64;
up = 0.00667;
eps = 0.147;
Mp = Array[Mpo &, {npv}];
Tp = Array[Tpo &, {npv}];
Mpold = Array[0 &, {npv}];
Tpold = Array[0 &, {npv}];
(*      *)
Tao1 = 105;
xao1 = 0.01731081;
wao1 = 0.3;
kao1 = 0.030058;
miao1 = 21.47253*10(-6);
(*      *)
Tao2 = 90;
xao2 = 0.01731081;
wao2 = 0.3;
kao2 = 0.029578;
miao2 = 20.81303*10(-6);
(*      *)
Tao3 = 60;
xao3 = 0.01731081;
wao3 = 0.3;
kao3 = 0.027541;
```

```

miao3 = 19.46733*10^(-6);
(*      *)
wa = waol;
dy = H/(npy - 1);
Do[
  y[[j]] = (j - 1)*dy;
  , {j, 1, npy}];
dt = dy/wa;
dz = up*(npy - 1)*dt;

Pvs = Array[0 &, {npy}];
Ur = Array[0 &, {npy}];
apmp = Array[0 &, {npy}];
apomp = Array[0 &, {npy}];
scmp = Array[0 &, {npy}];
aptp = Array[0 &, {npy}];
apotp = Array[0 &, {npy}];
sctp = Array[0 &, {npy}];
apta = Array[0 &, {npy}];
apota = Array[0 &, {npy}];
asta = Array[0 &, {npy}];
scta = Array[0 &, {npy}];
apxa = Array[0 &, {npy}];
apoxa = Array[0 &, {npy}];
asxa = Array[0 &, {npy}];
scxa = Array[0 &, {npy}];

xa = Array[xao1 &, {npy}];
Ta = Array[Tao1 &, {npy}];
xaold = Array[0 &, {npy}];
Taold = Array[0 &, {npy}];
graf = Array[0 &, {npy}];

graf[[1]] = {0, Mp[[1]], Tp[[1]], xa[[1]], Ta[[1]]};
imax = 60001;
z = 0;
ii = 0;

While[z <= L && ii <= imax,

  z = z + dz;
  t = z/up;
  ii = ii + 1;
  Do[
    Mpold[[j]] = Mp[[j]];
    Taold[[j]] = Ta[[j]];
    Tpold[[j]] = Tp[[j]];
    xaold[[j]] = xa[[j]];
    , {j, 1, npy}];
  If[z <= L/3,

```

```

Ta[[1]] = Tao1 ;
xa[[1]] = xao1;
wa = wao1;
ka = kao1;
mia = miao1;
roa = auxroa/(Tao1 + 273.15);
qa = roa*wa;
If[qa < 0.68,
  hc = 99.6*qa^0.49;
  ,
  hc = 101.4*qa^0.59;
];
If[L/3 < z <= 2*L/3,
  Ta[[1]] = Tao2 ;
  xa[[1]] = xao2;
  wa = wao2;
  ka = kao2;
  mia = miao2;
  roa = auxroa/(Tao2 + 273.15);
  qa = roa*wa;
  If[qa < 0.68,
    hc = 99.6*qa^0.49;
    ,
    hc = 101.4*qa^0.59;
  ];
If[z > 2*L/3,
  Ta[[1]] = Tao3 ;
  xa[[1]] = xao3;
  wa = wao3;
  ka = kao3;
  mia = miao3;
  roa = auxroa/(Tao3 + 273.15);
  qa = roa*wa;
  If[qa < 0.68,
    hc = 99.6*qa^0.49;
    ,
    hc = 101.4*qa^0.59;
  ];
Do[
ca = (1.00926 - 4.04033*10^(-5)*Ta[[j]] + 6.17596*10^(-7)*Ta[[j]]^2 -
4.09723*10^(-10)*Ta[[j]]^3)*10^3;
cv = (1.8830 - 0.16737*10^(-3)*(Ta[[j]] + 273.15) +
0.84386*10^(-6)*(Ta[[j]] + 273.15)^2 -
0.26966*10^(-9)*(Ta[[j]] + 273.15)^3)*10^3;
cw = (2.82232 + 1.18277*10^(-2)*(Ta[[j]] + 273.15) -
3.5047*10^(-5)*(Ta[[j]] + 273.15)^2 +
3.6010*10^(-8)*(Ta[[j]] + 273.15)^3)*10^3;
cp = 3.6*10^3;
roa = auxroa/(Ta[[j]] + 273.15);
hfg = 2502.2*10^3;

```

```

If[t <= 7200,
  dmdt = -0.0242056*Exp[-0.011390883*t/60]/60; , ];

If[7200 < t <= 14400,
  dmdt = -0.0105303*Exp[-0.007708698*t/60]/60; , ];
If[t > 14400,

  dmdt = -0.0000803232*Exp[-0.000344329*t/60]/60; , ];

apomp[[j]] = dz/((npy - 1)*dt);
scmp[[j]] = dmdt*dz;
apmp[[j]] = apomp[[j]];
apotp[[j]] = dz/((npy - 1)*dt);

sctp[[j]] = (
  a*hc*Ta[[j]] + (hfg + cv*Ta[[j]])*rop*dmdt)/(rop*cp +
  rop*cw*Mp[[j])*dz;
aptp[[j]] =
  apotp[[j]] + ( a*hc + cv*rop*dmdt)/(rop*cp + rop*cw*Mp[[j - 1]])*dz;
asta[[j]] = wa/eps;
apota[[j]] = dy/dt;
apta[[j]] =
  apota[[j]] + asta[[j]] + a*hc*dy/(eps*(roa*ca + roa*xa[[j]]*cv));
scta[[j]] = a*hc*dy/(eps*(roa*ca + roa*xa[[j - 1]]*cv))*Tp[[j - 1]];
asxa[[j]] = roa*wa/eps;
apoxa[[j]] = roa*dy/dt;
apxa[[j]] = asxa[[j]] + apoxa[[j]];
sexxa[[j]] = -rop*dmdt*dy/eps;
Mp[[j]] = (apomp[[j]]*Mpold[[j]] + scmp[[j]])/apmp[[j]];
Tp[[j]] = (apotp[[j]]*Tpold[[j]] + sctp[[j]])/aptp[[j]];
Ta[[j]] = (asta[[j]]*Ta[[j - 1]] + apota[[j]]*Taold[[j]] + scta[[j]])/
  apta[[j]];
xa[[j]] = (asxa[[j]]*xa[[j - 1]] + apoxa[[j]]*xaold[[j]] + sexxa[[j]])/
  apxa[[j]];

Pvs[[j]] =
  auxR*Exp[(auxA + auxB*(Ta[[j]] + 273.16) + auxC*(Ta[[j]] + 273.16)^2 +
  auxD*(Ta[[j]] + 273.16)^3 +
  auxE*(Ta[[j]] + 273.16)^4)/(auxF*(Ta[[j]] + 273.16) -
  auxG*(Ta[[j]] + 273.16)^2)];
Ur[[j]] = xa[[j]]*Patm/((xa[[j]] + 0.622)*Pvs[[j]]);

If[Ur[[j]] > 1,
  iterlin = 0;
  iterlinmax = 100000;
  Uraux = Ur[[j]];
  xalin = xa[[j]];
  dxalin = 10^(-8);

```

```

Mplin = Mp[[j]];
Talin = Ta[[j]];
While[Uraux > 1 && iterlin < iterlinmax,
  iterlin = iterlin + 1;

  ca = 1.00926 - 4.04033*10^(-5)*Talin + 6.17596*10^(-7)*Talin^2 -
    4.09723*10^(-10)*Talin^3;

  cv = 1.8830 - 0.16737*10^(-3)*(Talin + 273.15) +
    0.84386*10^(-6)*(Talin + 273.15)^2 -
    0.26966*10^(-9)*(Talin + 273.15)^3;

  cw = 2.82232 + 1.18277*10^(-2)*(Talin + 273.15) -
    3.5047*10^(-5)*(Talin + 273.15)^2 +
    3.6010*10^(-8)*(Talin + 273.15)^3;
  cp = 3.6*10^3;
  roa = auxroa/(Talin + 273.15);
  hfg = 2502.2*10^3;

  If[t <= 7200,
    dmdt = -0.0242056*Exp[-0.011390883*t/60]/60; , ];

  If[7200 < t <= 14400,
    dmdt = -0.0105303*Exp[-0.007708698*t/60]/60; , ];
  If[t > 14400,
    dmdt = -0.0000803232*Exp[-0.000344329*t/60]/60; , ];

  apotp[[j]] = dz/((npy - 1)*dt);

  sctp[[j]] = (
    a*hc*Talin + (hfg + cv*Talin)*rop*dmdt)/(rop*cp +
    rop*cw*Mplin)*dz;

  aptp[[j]] =
    apotp[[j]] + ( a*hc + cv*rop*dmdt)/(rop*cp + rop*cw*Mp[[j - 1]])*
    dz;

  Tplin = (apotp[[j]]*Tpold[[j]] + sctp[[j]])/aptp[[j]];
  Mplin = Mp[[j]] + (roa*wa*dz/(rop*up*dy))*(xa[[j]] - xalin);

  Talin = (roa*wa*dz/up*(ca + cv*xa[[j]])*Ta[[j]] +
    rop*dy*(cp + cw*Mp[[j]])*Tp[[j]] -
    rop*dy*(cp + cw*Mplin)*Tp[[j]] -
    roa*wa*(dz/up)*hfg*(xalin - xa[[j]])/(roa*wa*
    dz/up*(ca + cv*xalin));

  Pvsaux =
    auxR*Exp[(auxA + auxB*(Talin + 273.16) + auxC*(Talin + 273.16)^2 +
    auxD*(Talin + 273.16)^3 +

```

```

        auxE*(Talin + 273.16)^4)/(auxF*(Talin + 273.16) -
        auxG*(Talin + 273.16)^2)];
Uraux = xalin*Patm/((xalin + 0.622)*Pvsaux);
(*
    Print[Talin, " ", Uraux, " ", iterlin, " ", j, " ",
        ii];
    *)
xalin = xalin - dxalin;

];
Ur[[j]] = Uraux;
Ta[[j]] = Talin;
xa[[j]] = xalin;
Mp[[j]] = Mplin;
Tp[[j]] = Tplin;
Pvs[[j]] = Pvsaux;
]; (*Fim do If*)

, {j, 2, npy}];
ca1 = (1.00926 - 4.04033*10^(-5)*Ta[[1]] + 6.17596*10^(-7)*Ta[[1]]^2 -
    4.09723*10^(-10)*Ta[[1]]^3)*10^3;
cv1 = (1.8830 - 0.16737*10^(-3)*(Ta[[1]] + 273.15) +
    0.84386*10^(-6)*(Ta[[1]] + 273.15)^2 -
    0.26966*10^(-9)*(Ta[[1]] + 273.15)^3)*10^3;
cw1 = (2.82232 + 1.18277*10^(-2)*(Ta[[1]] + 273.15) -
    3.5047*10^(-5)*(Ta[[1]] + 273.15)^2 +
    3.6010*10^(-8)*(Ta[[1]] + 273.15)^3)*10^3;
roa1 = auxroa/(Ta[[1]] + 273.15);
cp1 = 3.6*10^3;
hfg1 = 2502.2*10^3;

If[t <= 7200,
    dmdt1 = -0.0242056*Exp[-0.011390883*t/60]/60; , ];
If[7200 < t <= 14400,
    dmdt1 = -0.0105303*Exp[-0.007708698*t/60]/60; , ];
If[t > 14400,
    dmdt1 = -0.0000803232*Exp[-0.000344329*t/60]/60; , ];

apomp[[1]] =
    dz/((npy - 1)*dt);(*o dt na direção z diferente do dt da direção y*);
scmp[[1]] = dmdt1*dz;
apmp[[1]] = apomp[[1]];
Mp[[1]] = (apomp[[1]]*Mpold[[1]] + scmp[[1]])/apmp[[1]];
apotp[[1]] = dz/((npy - 1)*dt);
sctp[[1]] = (
    a*hc*Ta[[1]] + (hfg1 + cv1*Ta[[1]])*rop*dmdt1)/(rop*cp1 +
    rop*cw1*Mp[[1]])*dz;
aptp[[1]] =
    apotp[[1]] + (a*hc + cv1*rop*dmdt1)/(rop*cp1 + rop*cw1*Mp[[1]])*dz;

```

```

Tp[[1]]=(apotp[[1]]*Tpoldd[[1]] + sctp[[1]])/aptp[[1]];
Pvs[[1]] =
auxR*Exp[auxA + auxB*(Ta[[1]] + 273.16) + auxC*(Ta[[1]] + 273.16)^2 +
      auxD*(Ta[[1]] + 273.16)^3 +
      auxE*(Ta[[1]] + 273.16)^4]/auxF*(Ta[[1]] + 273.16) -
auxG*(Ta[[1]] + 273.16^2)];
Ur[[1]] = xa[[1]]*Patm/((xa[[1]] + 0.622)*Pvs[[1]]);
If[ii == 1 || ii == 10 || ii == 20 || ii == 40 || ii == 60 || ii == 80 ||
ii == 100 || ii == 200 || ii == 500 || ii == 1000 || ii == 1500 ||
ii == 2000 || ii == 2500 || ii == 3000 || ii == 3500 || ii == 4000 ||
ii == 4500 || ii == 5000 || ii == 6000 || ii == 7000 || ii == 8000 ||
ii == 9000 || ii == 10000 || ii == 12000 || ii == 14000 ||
ii == 16000 || ii == 18000 || ii == 20000 || ii == 25000 ||
ii == 30000 || ii == 35000 || ii == 40000 || ii == 50000 ||
ii == 60000 || ii == 80000 || ii == 100000 || ii == 120000 ||
ii == 140000 || ii == 160000 || ii == 180000 || ii == 200000 ||
ii == 210000 || ii == 220000 || ii == 230000 || ii == 240000 ||
ii == 250000 || ii == 260000 || ii == 270000 || ii == 280000 ||
ii == 290000 || ii == 300000 || ii == 350000 || ii == 400000 ||
ii == 450000 || ii == 500000 || ii == 550000 || ii == 600000 ||
ii == 650000 || ii == 700000 || ii == 750000 || ii == 800000 ||
ii == 850000 || ii == 900000 || ii == 950000 || ii == 1000000 ||
ii == 1100000 || ii == 1200000 || ii == 1300000 || ii == 1400000 ||
ii == 1500000 || ii == 1600000 || ii == 1700000 || ii == 1800000 ||
ii == 1900000 || ii == 2000000 || ii == 2100000 || ii == 2200000,
Print[" "];
Print["      ", "t=", t, "s      ", "z=", z,
      "m"];
Print[" "];
Print["y(m)", MatrixForm[y], " ", "M(kg/kg)", MatrixForm[Mp], " ",
      "\[Theta](oC)", MatrixForm[Tp], " ", "x(kg/kg)", MatrixForm[xa],
      " ", "T(oC)", MatrixForm[Ta], " ", "Pvs(Pa)", MatrixForm[Pvs], " ",
      "UR", MatrixForm[Ur] ];
, ];
];

```

Resultados fornecidos pelo programa

t=0.0666667s

z=0.000444667m

	0				105		120824.		0.0227075	
	0.00105263	2.12497	28.3315	0.0173108	101.662		107504.		0.0258217	
	0.00210526	2.12497	28.3315	0.0177035	98.8789		97351.		0.0288042	
	0.00315789	2.12497	28.3315	0.0178629	96.5579		89502.9		0.0316042	
	0.00421053	2.12497	28.3315	0.0180019	94.6221		83365.7		0.0341875	
	0.00526316	2.12497	28.3315	0.0181231	93.0075		78518.4		0.0365355	
	0.00631579	2.12497	28.3315	0.0182288	91.6608		74656.9		0.0386428	
	0.00736842	2.12497	28.3315	0.0183209	90.5376		71558.5		0.040514	
	0.00842105	2.12497	28.3315	0.0184012	89.6007		69056.8		0.0421604	
	0.00947368	2.12497	28.3315	0.0184712	88.8193		67026.4		0.0435981	
y(m)	0.0105263	M(kg/kg)	2.12497	28.3315	x(kg/kg)	T(°C)	65371.2	Pvs(Pa)	UR	0.0448454
	0.0115789	2.12497	28.3315	0.0185323	88.1675		64016.8		0.0459219	
	0.0126316	2.12497	28.3315	0.0185855	87.6238		62905.1		0.0468468	
	0.0136842	2.12497	28.3315	0.0186319	87.1704		61990.1		0.0476384	
	0.0147368	2.12497	28.3315	0.0186724	86.7921		61235.5		0.0483139	
	0.0157895	2.12497	28.3315	0.0187076	86.4766		60611.9		0.0488889	
	0.0168421	2.12497	28.3315	0.0187384	86.2134		60095.8		0.0493772	
	0.0178947	2.12497	28.3315	0.0187652	85.9939		59668.1		0.0497913	
	0.0189474	2.12497	28.3315	0.0187886	85.8107		59313.3		0.0501419	
	0.02	2.12497	28.3315	0.0188089	85.658		59018.7		0.0504384	
				0.0188267	85.5305					

Resultados fornecidos pelo programa

t=4000.s

z=26.68m

0	0.994404	55.0496	0.0173108	60	19917.8	0.137747
0.00105263	0.994404	54.8152	0.0174099	59.7692	19705.9	0.140003
0.00210526	0.994404	54.5804	0.017509	59.5384	19496.1	0.142293
0.00315789	0.994404	54.346	0.017608	59.3076	19288.1	0.144618
0.00421053	0.994404	54.1116	0.0177069	59.0768	19082.	0.146978
0.00526316	0.994404	53.8773	0.0178058	58.8461	18877.9	0.149374
0.00631579	0.994404	53.643	0.0179045	58.6154	18675.6	0.151807
0.00736842	0.994404	53.4087	0.0180032	58.3847	18475.2	0.154276
0.00842105	0.994404	53.1744	0.0181019	58.154	18276.6	0.156782
0.00947368	0.994404	52.9402	0.0182005	57.9233	18079.9	0.159326
0.0105263	0.994404	52.706	0.018299	57.6927	17885.	0.161909
0.0115789	0.994404	52.4719	0.0183974	57.4621	17691.9	0.164531
0.0126316	0.994404	52.2378	0.0184958	57.2315	17500.7	0.167193
0.0136842	0.994404	52.0037	0.0185941	57.0009	17311.2	0.169895
0.0147368	0.994404	51.7697	0.0186923	56.7704	17123.5	0.172639
0.0157895	0.994404	51.5357	0.0187905	56.5399	16937.5	0.175424
0.0168421	0.994404	51.3017	0.0188886	56.3094	16753.4	0.178251
0.0178947	0.994404	51.0678	0.0189866	56.0789	16570.9	0.181121
0.0189474	0.994404	50.834	0.0190846	55.8485	16390.2	0.184035
0.02	0.994404	50.6002	0.0191825	55.6181	16211.2	0.186993

ANEXO B

Dados experimentais obtidos com o funcionamento do aquecedor operando de forma intermitente e constante

Tabela B1.1 - Dados experimentais obtidos em regime transiente com os três módulos do aquecedor alimentados em intermitência (caso 1) $n = 490\text{rpm}$.

n (rpm)	Tensão (V)	Corrente (A)
490	220	13,5

t (min)	Câmara					Ambiente externo	
	T (°C)				\bar{T} (°C)	UR _a %	T _a (°C)
	T1	T2	T3	T4			
0	29	29	29	29	29,0	78	26,1
3	34	35	32	33	33,5	76,9	26,6
6	40	40	36	38	38,5	76,8	26,7
9	44	44	40	42	42,5	76,5	26,9
12	46	46	43	45	45,0	74,9	27,2
15	48	47	44	46	46,3	75,3	27,3
18	50	49	46	48	48,3	75,3	27,3
21	51	50	47	49	49,3	74,9	27,3
24	51	50	48	50	49,8	74,6	27,4
27	52	51	49	51	50,8	74,3	27,4
30	52	51	49	51	51,0	72,7	27,7
33	53	52	50	52	51,8	73,6	27,6
36	53	52	50	52	51,8	74,4	27,5
39	53	52	51	53	52,3	74,2	27,4
42	53	52	51	53	52,3	74,2	27,3

T1 – Temperatura do termopar 1

\bar{T} - Temperatura média

Tabela B1.2 - Dados experimentais obtidos em regime transiente com os três módulos do aquecedor alimentados em intermitência (caso 1) $n = 667\text{rpm}$.

n (rpm)	Tensão (V)	Corrente (A)
667	221	13,5

t (min)	Câmara					Ambiente externo	
	T (°C)				\bar{T} (°C)	UR _a %	T _a (°C)
	T1	T2	T3	T4			
0	27	27	27	27	27,0	81,1	26,1
3	31	34	31	32	32,0	80,1	26,3
6	36	39	35	37	36,8	79,1	26,7
9	39	41	38	40	39,5	77,7	27
12	40	42	40	41	40,8	77,5	27,1
15	42	43	41	43	42,3	77,1	27,2
18	42	44	42	44	43,0	77,3	27,2
21	43	44	43	44	43,5	76,1	27,3
24	44	44	43	44	43,8	75,8	27,2
27	44	44	44	45	44,3	75,3	27,4
30	44	45	44	45	44,5	74,6	27,3
33	44	45	44	45	44,5	74,6	27,6

T1 – Temperatura do termopar 1

\bar{T} - Temperatura média

Tabela B1.3 - Dados experimentais obtidos em regime transiente com os três módulos do aquecedor alimentados em intermitência (caso 1) $n = 920$ rpm.

n (rpm)	Tensão (V)	Corrente (A)
920	218	13,5

t (min)	Câmara					Ambiente externo	
	T (°C)				\bar{T} (°C)	UR _a %	T _a (°C)
	T 1	T 2	T 3	T 4			
0	29	29	29	29	29,0	78,4	27,0
3	33	35	32	33	33,3	78,0	27,3
6	37	39	36	37	37,3	76,0	27,5
9	39	40	38	39	39,0	75,7	27,8
12	40	41	39	40	40,0	75,2	27,7
15	41	42	40	41	41,0	75,1	27,7
18	41	42	41	42	41,5	74,6	27,7
21	42	42	41	42	41,8	73,7	27,5
24	42	42	42	42	42,0	73,7	27,9
27	42	42	42	42	42,0	73,2	27,9
30	42	42	42	42	42,0	73,1	27,9
33	43	43	42	43	42,8	73,2	27,9
36	43	43	42	43	42,8	73,0	27,9
39	43	43	42	43	42,8	72,4	28,0
42	43	43	42	43	42,8	72,1	28,0

T1 – Temperatura do termopar 1

\bar{T} - Temperatura média

Tabela B1.4 - Dados experimentais obtidos em regime transiente com os três módulos do aquecedor alimentados em intermitência (caso 1) n = 1093rpm.

n (rpm)	Tensão (V)	Corrente (A)
1093	220	13,5

t (min)	Câmara					Ambiente externo	
	T (°C)				\bar{T} (°C)	UR _a %	T _a (°C)
	T1	T 2	T 3	T 4			
0	28	28	28	28	28,0	77,1	26,8
3	33	35	32	33	33,3	77,1	26,8
6	35	36	34	35	35,0	75,3	27,2
9	37	38	36	37	37,0	74,2	27,5
12	38	38	37	38	37,8	73,3	27,7
15	39	39	38	39	38,8	70,4	28,0
18	39	39	39	39	39,0	70,0	28,2
21	40	40	39	40	39,8	69,4	28,3
24	40	40	39	40	39,8	68,7	28,4
27	40	40	40	40	40,0	68,8	28,4
30	40	40	40	40	40,0	68,8	28,6
33	40	40	40	40	40,0	67,8	28,7

T1 – Temperatura do termopar 1

\bar{T} - Temperatura média

Tabela B1.5 - Dados experimentais obtidos em regime transiente com os três módulos do aquecedor alimentados em intermitência (caso1) $n = 1200\text{rpm}$.

n (rpm)	Tensão (V)	Corrente (A)
1200	219	13,5

t (min)	Câmara				Ambiente externo		
	T (°C)				\bar{T} (°C)	UR _a %	T _a (°C)
	T1	T2	T3	T4			
0	27	27	27	27	27,0	81,0	27,3
3	33	34	32	33	33,0	80,0	27,6
6	35	36	34	35	35,0	78,4	27,9
9	37	37	36	37	36,8	76,2	28,4
12	38	38	37	38	37,8	76,2	28,6
15	39	39	38	39	38,8	76,6	28,8
18	39	39	39	39	39,0	75,1	28,9
21	39	39	39	39	39,0	74,7	29,1
24	40	40	40	40	40,0	74,2	29,2
27	40	40	40	40	40,0	74,0	29,3
30	40	40	40	40	40,0	73,9	29,3
33	40	40	40	40	40,0	74,3	29,1

T1 – Temperatura do termopar 1

\bar{T} - Temperatura média

Tabela B1.6 - Dados experimentais obtidos em regime permanente com os módulos do aquecedor em alimentação constante (caso2)

Experimentos	E 1	E 2	E 3	E 4	E 5
n (rpm)	495	715	915	1093	1192
Tensão (V)	220	220	219	219	220
Corrente (A)	13,5	13,5	13,5	13,5	13,5

t (min)	Câmara					Ambiente externo									
	\bar{T} (°C)					$UR_a\%$					T_a (°C)				
	E1	E 2	E 3	E 4	E5	E 1	E 2	E 3	E 4	E 5	E 1	E 2	E 3	E 4	E 5
0	26,6	26,7	26,1	27,4	27,6	82,1	81,1	85,6	81,6	80,2	26,6	26,7	26,1	27,4	27,6
3	32,0	30,0	29,0	29,0	30,0	81,7	80,5	85,6	81,1	79,7	26,7	26,8	26,1	27,6	27,9
6	36,0	33,0	32,0	33,0	33,0	80,5	79,3	84,5	79,1	77,9	26,7	27,1	26,3	28,1	28,2
9	39,0	36,0	34,0	35,0	35,0	79,9	78,5	83,5	78,0	77,1	26,9	27,3	26,3	28,4	28,5
12	41,0	37,0	35,0	36,0	36,0	79,4	77,4	80,5	77,0	76,3	27,2	27,6	27,4	28,7	28,8
15	43,0	39,0	37,0	37,0	37,0	79,1	76,5	79,3	76,4	73,3	27,2	27,9	27,6	28,8	29,0
18	44,0	40,0	37,0	38,0	38,0	78,7	75,8	79,6	75,5	74,4	27,4	28,0	27,7	29,1	29,2
21	45,0	41,0	38,0	39,0	38,0	78,5	75,5	79,9	75,0	74,1	27,4	28,1	27,6	29,3	29,3
24	46,0	41,0	39,0	39,0	38,0	78,3	74,8	76,8	74,4	74,0	27,6	28,4	28,3	29,4	29,4
27	46,0	42,0	40,0	39,0	39,0	78,2	74,5	76,7	74,2	73,3	27,6	28,4	28,4	29,5	29,5
30	47,0	42,0	40,0	40,0	39,0	78,2	74,3	73,2	73,7	73,1	27,7	28,5	28,6	29,5	29,6
33	47,0	42,0	40,0	40,0	39,0	78,0	74,1	79,6	73,2	73,0	27,7	28,5	28,7	29,5	29,8
36	47,0	43,0	40,0	40,0	39,0	77,8	73,7	75,5	73,3	70,9	27,7	28,5	28,8	29,5	29,8
39	48,0	43,0	40,0	40,0	39,0	77,5	73,7	75,0	72,7	72,5	27,8	28,6	28,9	29,6	29,9
42	48,0	43,0	41,0	40,0	40,0	77,2	73,6	75,0	72,6	72,4	27,9	28,7	29,0	29,6	30,0

E1 – Experimento 1

\bar{T} - Temperatura média dentro do secador

Tabela B1.7 - Dados experimentais obtidos em regime permanente com os módulos do aquecedor em alimentação constante (caso3)

Experimento	n (rpm)	Tensão da Rede (V)	Tensão com carga (V)	Corrente (A)	Câmara					Ambiente externo	
					T(°C)				\bar{T} (°C)	UR _a %	T _a (°C)
					T1	T2	T3	T4			
1	495	220	220	13,5	48	49	47	49	48,25	77,2	27,9
2	715	224	220	13,5	43	44	43	44	43,50	73,6	28,7
3	915	219	215	13,5	41	41	41	41	41,00	75,0	29,0
4	1093	223	219	13,5	40	40	40	40	40,00	72,6	29,6
5	1192	223	218	13,5	40	40	39	39	39,50	72,4	30,0

T1 – Temperatura do termopar 1

\bar{T} - Temperatura média

Tabela B1.8 - Dados experimentais obtidos com o monitoramento das tensões da rede elétrica e do motor com carga térmica ligada/desligada.

Aquecedor desligado			Aquecedor ligado		
Tensão da Rede (E_R) (V)	Tensão do Ventilador (E_v) (V)	Rotação do Ventilador (n) (rpm)	Tensão da Rede (E_R) (V)	Tensão do Ventilador (E_v) (V)	Rotação do Ventilador (n) (rpm)
222	59	508	219	52	458
222	94	766	219	87	712
222	128	976	219	123	929
222	170	1128	219	165	1092
222	212	1230	219	207	1200

Tabela B1.9 - Dados experimentais das velocidades e temperaturas obtidos em regime permanente na entrada e saídas do fluxo de ar $n = 510\text{rpm}$

n (rpm)	Tensão (V)	Corrente (A)	UR_a (%)	Temperatura do ar na câmara ($^{\circ}\text{C}$)				Ambiente externo											
				T1	T2	T3	T4	Entrada			Saída 1			Saída 2			Saída 3		
				r_i (m)	w (m/s)	T_a ($^{\circ}\text{C}$)	x_i (m)	w (m/s)	T_a ($^{\circ}\text{C}$)	x_i (m)	w (m/s)	T_a ($^{\circ}\text{C}$)	x_i (m)	w (m/s)	T_a ($^{\circ}\text{C}$)				
510	222	13,5	83.4	27	27	27	27	0,850	0,07	25,10	0,09	1,96	25,25	0,09	1,39	25,30	0,09	1,45	25,35
								0,110	0,15	25,25	0,18	1,44	25,35	0,18	1,42	25,35	0,18	1,44	25,25
								0,135	1,14	25,15	0,27	1,43	25,35	0,27	1,46	25,40	0,27	1,46	25,35
								0,160	2,19	25,00	0,36	1,44	25,35	0,36	1,50	25,45	0,36	1,44	25,30

Tabela B1.10 - Dados experimentais das velocidades e temperaturas obtidos em regime permanente na entrada e saídas do fluxo de ar $n = 812\text{rpm}$

n (rpm)	Tensão (V)	Corrente (A)	UR_a (%)	Temperatura do ar na câmara ($^{\circ}\text{C}$)				Ambiente externo											
				T1	T2	T3	T4	Entrada			Saída 1			Saída 2			Saída 3		
				r_i (m)	w (m/s)	T_a ($^{\circ}\text{C}$)	x_i (m)	w (m/s)	T_a ($^{\circ}\text{C}$)	x_i (m)	w (m/s)	T_a ($^{\circ}\text{C}$)	x_i (m)	w (m/s)	T_a ($^{\circ}\text{C}$)				
812	230	13,5	82,1	28	28	28	28	0,850	0,35	25,35	0,09	3,22	25,45	0,09	2,04	25,45	0,09	2,28	25,50
								0,110	0,35	25,40	0,18	2,48	25,55	0,18	2,28	25,45	0,18	2,28	25,40
								0,135	2,27	25,35	0,27	2,44	25,65	0,27	2,39	25,40	0,27	2,14	25,30
								0,160	3,40	25,25	0,36	2,42	25,80	0,36	2,38	25,25	0,36	2,12	25,30

Tabela B1.11 - Dados experimentais das velocidades e temperaturas obtidos em regime permanente na entrada e saídas do fluxo de ar $n = 1035\text{rpm}$

n (rpm)	Tensão (V)	Corrente (A)	UR _a (%)	Temperatura do ar na câmara (°C)				Ambiente externo											
				T1	T2	T3	T4	Entrada			Saída 1			Saída 2			Saída 3		
								r _i (m)	w (m/s)	T _a (°C)	x _i (m)	w (m/s)	T _a (°C)	x _i (m)	w (m/s)	T _a (°C)	x _i (m)	w (m/s)	T _a (°C)
1035	226	13,5	82,7	28	28	28	28	0,850	0,74	25,55	0,09	2,99	25,50	0,09	2,78	25,30	0,09	2,85	25,70
								0,110	0,58	25,65	0,18	2,82	25,65	0,18	2,77	25,55	0,18	2,66	25,45
								0,135	2,19	25,60	0,27	2,82	25,60	0,27	2,85	25,60	0,27	2,54	25,60
								0,160	4,00	25,50	0,36	2,82	25,70	0,36	2,89	25,80	0,36	2,57	25,55

Tabela B1.12 - Dados experimentais das velocidades e temperaturas obtidos em regime permanente na entrada e saídas do fluxo de ar $n = 1160\text{rpm}$

n (rpm)	Tensão (V)	Corrente (A)	UR _a (%)	Temperatura do ar na câmara (°C)				Ambiente externo											
				T1	T2	T3	T4	Entrada			Saída 1			Saída 2			Saída 3		
								r _i (m)	w (m/s)	T _a (°C)	x _i (m)	w (m/s)	T _a (°C)	x _i (m)	w (m/s)	T _a (°C)	x _i (m)	w (m/s)	T _a (°C)
1160	222	13,5	77,2	29	29	29	29	0,850	0,35	26,15	0,09	4,40	26,20	0,09	3,00	26,40	0,09	3,30	26,20
								0,110	0,50	26,25	0,18	3,30	26,20	0,18	2,90	26,40	0,18	3,20	26,15
								0,135	2,72	26,20	0,27	3,30	26,20	0,27	3,40	26,25	0,27	3,10	26,10
								0,160	5,00	26,00	0,36	3,00	26,45	0,36	3,30	26,25	0,36	2,94	26,05

Tabela B1.13 - Dados experimentais das velocidades e temperaturas obtidos em regime permanente na entrada e saídas do fluxo de ar $n = 1257\text{rpm}$

n (rpm)	Tensão (V)	Corrente (A)	UR_a (%)	Temperatura do ar na câmara ($^{\circ}\text{C}$)				Ambiente externo											
				T1	T2	T3	T4	Entrada			Saída 1			Saída 2			Saída 3		
								r_i (m)	w (m/s)	T_a ($^{\circ}\text{C}$)	x_i (m)	w (m/s)	T_a ($^{\circ}\text{C}$)	x_i (m)	w (m/s)	T_a ($^{\circ}\text{C}$)	x_i (m)	w (m/s)	T_a ($^{\circ}\text{C}$)
1257	222	13,5	77,2	29	29	29	29	0,850	0,65	26,25	0,09	3,70	26,45	0,09	3,70	26,35	0,09	3,60	26,30
								0,110	0,59	26,50	0,18	3,80	26,45	0,18	3,70	26,45	0,18	3,40	26,20
								0,135	3,70	26,45	0,27	3,70	26,35	0,27	3,60	26,40	0,27	3,50	26,30
								0,160	5,70	26,35	0,36	3,80	26,45	0,36	3,60	26,40	0,36	3,40	26,40