



Faculdade de Engenharia do *Campus* de Guaratinguetá

Guaratinguetá – SP

2009

ANTONIO EDUARDO DE FARIA

SISTEMA PNEUMÁTICO DE SECAGEM DE GRÃOS COM
GERENCIAMENTO TERMODINÂMICO DO PROCESSO

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia do *Campus* de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica na área de Transmissão e Conversão de Energia.

Orientador: Prof. Dr. Luiz Roberto Carrocci

Guaratinguetá

2009

F224s Faria, Antonio Eduardo de
Sistema pneumático de secagem de grãos com gerenciamento termodinâmico do processo. / Antonio Eduardo de Faria - Guaratinguetá : [s.n.], 2009.
124f. : il.
Bibliografia: f. 105-106

Tese (doutorado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2009.
Orientador: Prof. Dr. Luiz Roberto Carrocci

1. Cereais - Secagem I. Título

CDU 66.047

ANTONIO EDUARDO DE FARIA

**ESTA TESE FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
“DOUTOR EM ENGENHARIA MECÂNICA”**

**PROGRAMA: ENGENHARIA MECÂNICA
ÁREA: TRANSMISSÃO E CONVERSÃO DE ENERGIA**

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO



Prof. Dr. Marcelo dos Santos Pereira
Coordenador

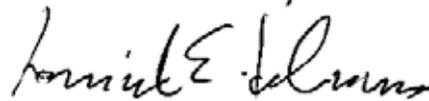
BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. LUIZ ROBERTO CARROCCI
Orientador / UNESP-FEG



Prof. Dr. INACIO BIANCHI
UNESP-FEG



Prof. Dr. SAMUEL EUZÉDICE DE LUCENA
UNESP-FEG



Prof. Dr. CARLOS YUJIRO SHIGUE
EEL-USP



Prof. Dr. JOSÉ RUI CAMARGO
UNITAU

DADOS CURRICULARES

ANTONIO EDUARDO DE FARIA

NASCIMENTO	12. 10. 1966 – SÃO PAULO / SP
FILIAÇÃO	Antonio Custódio Carrijo de Faria Cléia Pinto de Faria
1986 / 1991	Curso de Graduação em Engenharia Mecânica Faculdade de Engenharia de Campinas – UNICAMP
1992/1997	Curso de Pós-Graduação em Transmissão e Conversão de Energia, nível de Mestrado, na Faculdade de Engenharia do <i>Campus</i> de Guaratinguetá da UNESP.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, pela minha vida, minha inteligência, minha família e meus amigos.

Ao meu orientador, *Prof. Dr. Luiz Roberto Carrocci*, que jamais deixou de me incentivar. Sem a sua orientação, dedicação e auxílio, o estudo aqui apresentado seria muito mais difícil.

Aos meus pais, *Antonio e Cléia*, que, apesar das dificuldades enfrentadas, sempre incentivaram meus estudos.

Aos funcionários do *Campus* de Guaratinguetá, pela dedicação, presteza e principalmente pela vontade de ajudar.

“Um grama de exemplo vale mais que
uma tonelada de palavras”

Sr. Luís do Trenzinho

FARIA, A. E. **SISTEMA PNEUMÁTICO DE SECAGEM DE GRÃOS COM GERENCIAMENTO TERMODINÂMICO DO PROCESSO**. 2009. 124 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá.

RESUMO

Neste trabalho de pesquisa foi realizada uma análise do comportamento de grãos de arroz submetidos à passagem de fluxos de ar com variadas condições termodinâmicas (temperatura, umidade relativa / absoluta, entalpia). Esta análise foi feita utilizando-se um recipiente com capacidade para confinar 5 litros de grãos, sendo o ar forçado a escoar pela ação da sucção de uma bomba de vácuo, promovendo assim pressões relativas menores que a atmosférica no ar de secagem, proporcionando uma migração mais facilitada das moléculas de água. Como resultado deste experimento foi obtido um consumo de energia em torno de 30 % dos sistemas convencionais de secagem à lenha com tempos de processamento de 2 horas, menores que os convencionais que consomem até 6 horas. Também foi possível determinar a distância ótima de escoamento do ar de secagem pelos grãos, em torno de 16 cm, pela análise da distribuição de pressões e temperaturas medidas através do secador protótipo. Devido ao fato do processo de secagem ser extremamente dinâmico devido as variações das características do ar ambiente (temperatura, umidade, entalpia, massa específica, etc), dos grãos provenientes do campo (arroz, feijão, milho, etc) e do combustível (lenha, casca de arroz, gás natural, etc) a ser utilizado como fonte térmica, torna-se necessária a implementação de um sistema de controle capaz de promover um gerenciamento termodinâmico do processo, ou seja, monitorar as taxas de transferência de calor e água entre os grãos e o ar de secagem em tempo real, promovendo ajustes na temperatura e intensidade do fluxo de ar de secagem, assim como a velocidade de homogeneização dos grãos dentro do leito.

PALAVRAS-CHAVE: Secagem, Cereais, Gerenciamento Termodinâmico.

FARIA, A. E. **PNEUMATIC GRAIN DRYING SYSTEM with PROCESS THERMODYNAMIC MANAGEMENT.** 2009. 124 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do *Campus* de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá.

ABSTRACT

In this research work an analysis of the behavior of grains of rice of the field was accomplished submitted to the passage of flows of air with several thermodynamic conditions (temperature, relative humidity / absolute, entalpia). This analysis was made being used a recipient with capacity to confine 5 liters of grains, being the forced air to drain like this for the action of the suction of a vacuum pump, promoting smaller relative pressures than the atmospheric in the drying air, promoting a facilitated migration of the molecules of water. As a result of this experiment was obtained a consumption of energy around 30% of the conventional firewood systems with times of processing of 2 hours, smaller that the conventional ones that consume 6 hours. It was also possible to determine the larger distance of drainage of the drying air for the grains around 16 cm, through the analysis of the distribution of pressures and temperatures measured through the volume. Due to the fact of the drying process to be extremely dynamic due to the variations of the characteristics of the environmental air (temperature, humidity, entalpia, specific mass, etc), grains coming of the field (rice, bean, corn, etc) and of the fuel (firewood, peel of rice, natural gas, etc) to be used as thermal source, it becomes necessary the implementation of a control system capable of promoting an thermodynamic management of the process, in other words, to follow the rates of transfer of heat and water between the grains and the drying air in real time, promoting adjustment in the temperature and intensity of the flow of drying air, as well as the speed to homogenize the grains inside of the bed.

KEYWORDS: Drying, Grains, Thermodynamics Management

LISTA DE FIGURAS

Fig. 1 – Camada de grãos de arroz exposta ao sol no terreiro.....	25
Fig. 2 – Sistema de secagem de grãos com aquecimento solar indireto.....	26
Fig. 3 – Sistema de secagem de grãos com fornalha a lenha e ventilador radial.....	26
Fig. 4 – Sistema de secagem onde o ar de secagem é insuflado no centro da coluna cilíndrica.....	27
Fig. 5 – Sistema de secagem com coluna cilíndrica.....	28
Fig. 6 – Sistema de secagem com câmara de repouso para os grãos.....	28
Fig. 7 – Sistema de secagem de grande porte (10. 000 kg /h) com vários estágios de temperatura.....	29
Fig. 8 – Leito de secagem cilíndrico base cônica.....	30
Fig. 9 – Leito de secagem cúbico de base piramidal.....	30
Fig. 10 – Teste de secagem para leito de jorro [Lima, 1997]	31
Fig. 11 – Sistema de secagem com leito deslizante, fluxos cruzados e recirculação pneumática.....	32
Fig. 13 – Gráfico ilustrativo da tabela 10.....	33
Fig. 14 – Diagrama esquemático dos Leitos de Jorro e Deslizante.....	34
Fig. 15 – Croqui do sistema experimental de investigação da cinética da secagem [Mujundar, 1995]	35
Fig. 21 – Transferência de Massa (água) x Velocidade do ar para vários leitos de secagem [Mujundar, 1995].....	36
Fig. 22 – Gráfico Transferência de Calor x Velocidade do ar para vários leitos de secagem [Mujundar, 1995].....	36
Fig. 23 – Fotos de leito fluidizado e leito fixo	37
Fig. 24 – Volume contendo ar seco misturado com vapor d’ água sob determinada pressão e temperatura. [Shapiro, 1998]	38
Fig. 25 – Temperatura x volume específico ar úmido [Shapiro, 1998].	39
Fig. 26 – Esquema de silo com a frente de secagem em progressão [Weber, 2005]..	42
Fig. 27 – Resfriamento de ar úmido a pressão constante [Shapiro, 1998].....	42

Fig. 28 – Diagrama $T \times v$ - temperatura / volume específico [Shapiro, 1998].....	43
Fig 31. Carta psicrométrica ilustrando o processo de secagem adiabático na primeira etapa do processo.....	46
Fig. 32 Ponto (A) – Cálculo das propriedades psicr. do ar ambiente úmido sob $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ e $T^* = 15 \text{ }^\circ\text{C}$	46
Fig. 33 Ponto (B) – Cálculo das propriedades psicr. ar ambiente aquecido sob $T = 35 \text{ }^\circ\text{C}$ e $T^* = 20 \text{ }^\circ\text{C}$	47
Fig. 34 Ponto (C) – Cálculo das propriedades psicr. ar pós secagem úmido $T = 21,5 \text{ }^\circ\text{C}$ e $T^* = 20 \text{ }^\circ\text{C}$	47
Fig. 35 - Pressão Atmosférica [mmHg] x Altitude [m]	48
Fig. 36 - Massa específica [kg/m ³] x Altitude [m] para Ar 25 [o C]	49
Fig. 37 - Representação geométrica para níveis de potencial esféricos e equação correspondente.....	53
Fig. 38 –Diferentes regimes de escoamento na camada limite sobre uma placa plana [Fox, 1997]	53
Fig. 39 - Fluxo de água salgada através de placa plana - formação das camada limite laminar [Fox, 1997]	54
Fig. 40 – Camada Limite Térmica e Hidrodinâmica formando-se sobre a superfície de um grão.....	55
Fig. 42 - Curva característica de taxa de umidade dos grãos (M) x tempo (θ) [PABIS, 1997]	63
Fig. 43 – Secção transversal de grão de arroz, com 12% de umidade base seca, ampliada 30 vezes	64
Fig. 44 – Ilustração para secagem de grãos sob várias condições de ambiente, etapa do processo e altitude.....	65
Fig. 45 – Ilustração para uma amostra de ar em alta temperatura e com uma molécula de água.....	65
Fig. 46 – Ilustração para uma amostra de ar em baixa temperatura e com quatro moléculas de água.....	66

Fig. 47 – Ilustração para uma amostra de ar de baixa massa específica escoando sobre a superfície do grão	66
Fig. 48 – Ilustração para amostra de ar escoando sobre o grão e retirando moléculas de água da estrutura interna.....	67
Fig. 49 - Valores de Entalpia (Ht) e Umidade Relativa (Φ) do ar de secagem dia de sol e de chuva para Guaratinguetá Altitude: 572 m P_{atm} : 712 [mmHg]	67
Fig. 50 - Variação da temperatura e umidade relativa do ar ambiente ao longo de 24 horas [Weber, 2005]	68
Fig. 51- Volume de controle de formato cúbico cheio de grãos sendo transpassado pelo ar de secagem.....	69
Fig. 52 - Exemplo de Diagrama do Fluxo de Informação de Modelo Matemático	73
Fig. 53 – Localização do secador protótipo de 5 litros entre as passagens de ar do sistema de 150 litros	75
Fig. 54 – Montagem do volume para secagem de 5 litros de grãos I	75
Fig. 55 – Montagem do volume para secagem de 5 litros de grãos II.....	76
Fig. 56 – Termômetros inseridos no volume de 5 litros de grãos.....	77
Fig. 57 - Vista interior do volume de 5 litros mostrando a chapa perfurada.....	77
Fig. 58 – Esquema do volume de 5 litros mostrando a bomba de vácuo responsável pela sucção do ar.....	78
Fig. 59 – Gasômetro para medição de volume de	78
Fig. 60 - Desenho 3 D protótipo com capacidade para processar 150 litros de grão..	79
Fig. 61 - Protótipo com capacidade para processar 150 litros de grão.	79
Fig. 62 - Fluxograma do secador protótipo para secagem de 5 litros de grãos.....	80
Fig. 63 - Manômetros em U.....	81
Fig. 64 - Termômetros.....	81
Fig. 65 - Formulário de anotação dos dados dos testes com grãos dentro do secador protótipo de 5 litros.....	82
Fig. 66 - Coleta de amostra de grãos no secador protótipo de 5 litros.....	82
Fig. 67 - Formulário de anotação dos dados de medição da massa de amostras de grãos em balança analítica	83

Fig. 87 - Fluxograma do Sistema de Gerenciamento Termodinâmico (S. G. T.).....	85
Fig. 89 - Estrutura básica do banco de dados.....	86
Fig. 90 - Diagrama de blocos do S. G. T.	87
Fig. 91 – Secador protótipo para caracterização dos grãos.....	90
Fig. 96 – Termômetros.....	91
Fig. 97 - Umidade relativa ambiente	92
Fig. 98 - Umidade relativa do ponto 7.....	92
Fig. 99 - Coleta de amostra de grãos	92
Fig. 100 – Estufa temperatura máxima de 150 °C.....	92
Fig. 101 – Balança analítica precisão +- 0, 01 g.....	92
Fig. 103 - Secador protótipo de 5 litros de grãos com pontos de coleta de amostras, medidas (P, T) e gráfico.....	93
Fig.105- Gráfico comparativo consumo de energia térmica mecânica - teste tipo 3...94	
Fig. 106- Distribuição de pressões e temperaturas do teste tipo 3.....	95
Fig. 107- Curvas de umidade dos grãos – Teste tipo 3	95
Fig.109 - Gráfico comparativo consumo energia térmica mecânica - teste tipo 4	96
Fig. 110 - Distribuição de pressões e temperaturas do teste tipo 4.....	97
Fig. 111 - Curvas de umidade dos grãos – Teste tipo 4	97
Fig. 113- Gráfico comparativo consumo de energia térmica/mecânica teste tipo 5 ...	98
Fig. 114- Distribuição de pressões e temperaturas do teste tipo 5.....	99
Fig. 115- Curvas de umidade dos grãos – Teste tipo 5.....	99

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Planilha de resultados do teste tipo 3.....	94
Tabela 2- Planilha de resultados do teste tipo 4	96
Tabela 3 - Planilha de resultados do teste tipo 5.....	98
Tabela 4 - Balanço geral dos testes.....	100
Tabela 5 - Sistemas de Secagem disponíveis nacional e internacionalmente.....	120
Tabela 6 - Propriedades Físicas dos Grãos.....	121
Tabela 7 - Poder Calorífico inferior de vários combustíveis	122
Tabela 8 - PCI da madeira	122
Tabela 9 - Secadores disponíveis comercialmente.....	115
Tabela 10 - Composição do ar seco atmosférico	37
Tabela 11 - Evolução do Sistema de Secagem Proposto.....	110

LISTA DE SÍMBOLOS

LETRAS LATINAS

a_p	Área da superfície da partícula por unidade de volume	$[m^2 / m^3]$
c_a	Calor específico do ar	$[J / kg.K]$
c_v	Calor específico do vapor	$[J / kg.K]$
c_w	Calor específico da água	$[J / kg.K]$
$C_{kg..lenha}$	Custo da secagem utilizando-se lenha com 40 % de umidade	$[R\$/kg]$
D_{wv}	Difusividade do vapor de água na camada limite	$[m^2 / h]$
D_o	Coefficiente de difusão na temperatura de 273 K	$[m^2 / s]$
E	Energia específica de ativação	$[kJ/kg]$
E_{kg}	Energia térmica e elétrica	$[kJ/kg]$
E_{kg}	Energia total consumida para secagem de 1 quilo de grãos	$[MJ/kg]$
G_a	Fluxo mássico do ar de secagem	$[kg/s]$
h	Coefficiente de transferência de calor convectivo	$[W / m^2.K]$
h_v	Coefficiente de transferência de calor volumétrico	$[kW / m^3.K]$
H_t	Entalpia do ar úmido	$[kJ / kg]$
$\frac{\partial H_t}{\partial \theta}^{Ótimo}$	Taxa de transferência ótima de calor do ar para os grãos	$[kw]$
K_{wL}	Condutividade vapor de água camada limite hidrodinâmica	$[W / m.K]$
K_{ws}	Coefficiente de condutividade térmica do vapor d`água em S	$[W / m.K]$
\bullet m_a	Fluxo de massa de ar por unidade de área	$[kg / m^2.s]$

M	Conteúdo de umidade do corpo sólido base úmida	[%]
\dot{m}_{secagem}	Fluxo mássico do ar de secagem	[kg/s]
$\frac{\partial M}{\partial \theta}^{\text{Ótimo}}$	Taxa de transferência ótima de água dos grãos para ar	[g /s]
\dot{m}_{sec}	Fluxo mássico de ar de secagem	$[\frac{\text{kg ar}}{\text{min}}]$
\dot{m}_{cir}	Fluxo mássico de ar para circulação dos grãos dentro do leito	$[\frac{\text{kg ar}}{\text{min}}]$
\dot{m}_{AR}	Fluxo mássico de ar	$[\frac{\text{kg ar}}{\text{min}}]$
P_v	Pressão do vapor na camada limite	[Pa]
P_{VS}	Pressão de formação de vapor na superfície grão	[Pa]
P_{va}	Pressão de formação de vapor no ar de secagem	[Pa]
P_{vent}	Potência elétrica do ventilador	[kw]
P_w	Pressão parcial do vapor de água no ar úmido	[Pa]
P_{ws}	Pressão da água pura saturada	[Pa]
P_{ws}^*	Pressão água pura saturada temperatura de bulbo úmido	[Pa]
\dot{q}_s	Fluxo de calor em S / tempo / área	[kW/m ²]
\dot{Q}_{calor}	Potência térmica para aquecimento do ar de secagem	[kW]
Q_{ar}	Fluxo volumétrico de ar	$[\frac{\text{m}^3 \text{ ar}}{\text{min}}]$
R	Constante universal dos gases	[kJ/kg.K]
R_v	Constante particular de gases para vapor de água	[kJ/kmol.K]
S	massa total (água + massa seca)	[kg]

S_d	massa seca	[kg]
T_v	Temperatura do vapor d'água	[K]
T_G	Temperatura média dos grãos	[K]
t	Temperatura do corpo sólido	[°C]
t_a	Temperatura do ar de secagem	[°C]
T	Temperatura bulbo seco	[°C]
T^*	Temperatura do bulbo úmido	[°C]
T_o	Temperatura do ar de secagem aquecido	[°C]
T_D	Temperatura do ponto de saturação	[°C]
V_{ke}	Volume equivalente de um grão	[m ³]
$V_{circulação}$	Velocidade de circulação dos grãos dentro do leito	[m/s]
V_{Sec}	Válvula de controle do fluxo mássico de ar de secagem	
V_{For}	Válvula de controle do fluxo mássico de ar de combustão da fornalha	
$V_{Gás}$	Válvula de controle do gerador de ar quente a gás	
$V_{cir I}$	Válvula de controle do fluxo mássico adicional de ar	
$V_{cir II}$	Válvula de controle do fluxo de grãos	
\dot{W}_L	Fluxo de água (vapor) na camada limite hidrodinâmica	[g H ₂ O/s.m ²]
W	Umidade absoluta ar	[$\frac{g H_2O}{kg ar sec o}$]
\dot{w}_s	Fluxo de água em S / tempo / área	[kW / m ²]
$W_{grão}$	Massa de água contida nos grãos	[kg]

W_s	Taxa de umidade do ar úmido na saturação	$\left[\frac{\text{kg H}_2\text{O}}{\text{kg Ar seco}} \right]$
W_s^*	Taxa de umidade do ar úmido saturado bulbo úmido	$\left[\frac{\text{kg H}_2\text{O}}{\text{kg Ar seco}} \right]$
W	Umidade absoluta ar	$\left[\frac{\text{kg H}_2\text{O}}{\text{kg ar seco}} \right]$
$\$_{\text{kg}}$	Custo de secagem de 1 quilo de grãos	[R\$/kg]
% G.I.	Percentual de grãos inteiros pós secagem	[%]
% Bio	Percentual de potencial biológico (nutritivo e germinativo)	[%]

LETRAS GREGAS

$\nabla\Phi_w$	Gradiente do potencial de transferência de água	
∇t	Gradiente de temperatura	
∇C_{wv}	Gradiente da concentração do vapor de água na camada limite	[kg/m ³]
$\Delta\theta_{12}$	Tempo estimado para os grãos atingirem umidade de 12 % b.u.	[min]
$\Delta\theta_{\text{kg}}$	Tempo de secagem de 1 quilo de grãos	[s/kg]
Φ_v	Potencial de transferência de vapor	
ϕ	Umidade relativa ar de Secagem	[%]
ϕ_{amb}	Umidade relativa do ar ambiente	[%]
ϕ_F	Umidade relativa do ar após passar pelos grãos	[%]
θ	Tempo transcorrido no processo de secagem	[s]
ν	Viscosidade cinemática	[m ² /s]

μ	Grau de saturação	[%]
ϵ	Porosidade do leito de grãos	[%]
ρ	Massa específica dos grãos	[kg/m ³]
ρ_a	Massa específica do Ar	[kg/m ³]
ρ_{ad}	Massa específica do ar seco	[kg/m ³]
ρ_v	Massa específica do vapor de água	[kg/m ³]

SUMÁRIO

Resumo

Abstract

Lista de Figuras

Lista de Tabelas

Lista de Símbolos

1. INTRODUÇÃO.....	22
1.1. MOTIVAÇÃO.....	22
1.2. OBJETIVO.....	23
1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO	24
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	25
2.1. EVOLUÇÃO DOS SISTEMAS DE SECAGEM.....	25
2.1.1. Solar – Terreiro.....	25
2.1.2. Solar – Sistema Mecânico de Secagem	26
2.1.3. Combustão Biomassa – Sistema Mecânico de Secagem.....	26
2.1.4. Combustão Gás – Secador Móvel de Pequeno Porte.....	27
2.1.5. Combustão de Biomassa – Secador Fixo de Pequeno Porte.....	27
2.1.6. Combustão de Biomassa – Secador Fixo de Médio Porte	28
2.1.7. Combustão de Biomassa – Secador Fixo de Grande Porte.....	29
2.2. LEITO DE JORRO COM DUTO CENTRAL.....	30
2.3. LEITO DESLIZANTE COM FLUXOS CRUZADOS.....	32
2.4. SISTEMA EXPERIMENTAL DE INVESTIGAÇÃO DA SECAGEM.....	34
2.5. COEFICIENTES DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR E MASSA.....	35
2.6. PRINCÍPIOS DA PSICROMETRIA.....	37
2.6.1. Ar úmido	38
2.6.2. Umidade Específica	40
2.6.3. Umidade Relativa.....	40

2. 6. 4. Ponto de Orvalho	41
2. 6. 5. Entalpia de Mistura	44
2. 6. 6. Carta Psicrométrica	45
2. 6. 7. Cálculos Psicrométricos	47
2. 7. TEORIA DA SECAGEM DE GRÃOS	52
2. 7. 1. Camada Limite L	53
2. 7. 2. Transferência de Calor na Camada Limite Térmica	56
2. 7. 3. Transferência de Massa (Água) na Camada Limite Hidrodinâmica	58
2. 7. 4. Análise do Interior do Corpo Sólido S	61
2. 7. 4. 1. Transferência de Calor	61
2. 7. 4. 2. Transferência de Massa (Água)	61
2. 7. 5. Análise Descritiva da Secagem de Corpos Sólidos Individuais	62
2. 8. ILUSTRAÇÃO DA SECAGEM	65
3. METODOLOGIA	69
3.1. MODELO MATEMÁTICO DA SECAGEM	69
3.1.1. Volume de Controle Elementar no Leito Fixo de Secagem	69
3.1.2. Modelo Bakker-Arkema [Pabis, 1997]	71
3.1.3. Modelo Spencer [Pabis, 1997]	71
3.2. SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL	73
3.3. MATERIAL UTILIZADO	74
3.4. EQUIPAMENTOS	74
3. 4. 1. Secador protótipo para secagem de 5 litros de grãos	74
3. 4. 2. Sistema pneumático para secagem de 150 litros de grãos	79

3. 5. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	80
3. 5. 1. Secador protótipo para secagem de 5 litros de grãos	80
3. 6. SISTEMA DE GERENCIAMENTO TERMODINÂMICO.....	84
3. 6. 1. Fluxograma do S. G. T.	85
3. 6. 2. Banco de dados	86
3. 6. 3. Diagrama de blocos	87
3. 6. 4. Sistema de secagem para caracterização dos grãos	89
3. 7. MEDIDAS	90
3. 7. 1. Medição de variáveis relativas ao ar	90
3. 7. 1. 1. Fluxo Volumétrico.....	90
3. 7. 1. 2. Fluxo Mássico de Ar.....	91
3. 7. 1. 3. Pressões relativas.....	91
3. 7. 1. 4. Temperaturas.....	91
3. 7. 1. 5. Umidade relativa	91
3. 7. 2. Medição de variáveis relativas aos grãos	92
3. 7. 2. 1. Umidade (base úmida).....	92
4. RESULTADOS	93
4. 1. APRESENTAÇÃO.....	93
4. 1. 1. Teste tipo 3	94
4. 1. 2. Teste tipo 4	96
4. 1. 3. Teste tipo 5	98
4. 2. DISCUSSÃO.....	102

5. CONCLUSÃO	103
6. TRABALHOS FUTUROS / CONTRIBUIÇÃO	104
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	105
APÊNDICE A - Fatores que Influenciam a Qualidade dos Grãos.....	107
APÊNDICE B – Evolução do Sistema de Secagem Proposto	109
APÊNDICE C – Testes Experimentais Transporte Pneumático.....	111
APÊNDICE D – Velocidade Terminal	114
APÊNDICE E – Sistemas de Secagem Disponíveis Comercialmente.....	115
ANEXO A – Propriedades Físicas dos Grãos.....	121
ANEXO B – Valores Médios de Poder Calorífico Inferior (PCI).....	122

1. INTRODUÇÃO

1.1. MOTIVAÇÃO

A motivação principal para este trabalho de pesquisa foi desenvolver um sistema de secagem de grãos (arroz, feijão, etc) mais eficiente, ou seja, que tenha um consumo menor de tempo e energia para desidratar os grãos provenientes da colheita no campo, mantendo um bom índice de qualidade final em relação aos secadores atuais, os quais tem preço inacessível e não atingem boa qualidade dos grãos secos. No caso do arroz, significaria obter 65 % de grãos inteiros proporcionando um acréscimo de aproximadamente 20 % no valor recebido pelos produtores.

Através da revisão bibliográfica encontra-se várias formas de abordagem do problema “Secagem de Grãos”, sendo na sua grande maioria modelagens matemáticas através de equações diferenciais para prever de que modo os grãos perdem umidade mediante o escoamento do ar de secagem. Este tipo de abordagem utiliza propriedades físicas do grão (calor específico, massa específica), do ar (umidade relativa, absoluta) e características do escoamento do ar sobre a superfície do grão em análise. É importante salientar que este trabalho trata da secagem dos grãos promovida pela passagem de ar aquecido através deles; sendo assim, o ar é o “veículo” que transporta a energia térmica (calor) e a água envolvidos na secagem. Neste trabalho será feita a hipótese principal que os parâmetros primários a serem monitorados no processo de secagem são:

- $\frac{\partial H_t}{\partial \theta}$ Taxa de transferência de calor do ar para os grãos.
- $\frac{\partial M}{\partial \theta}$ Taxa de transferência de água dos grãos para o ar.
- θ Tempo transcorrido no processo

Admitem-se que estas taxas de transferência sejam funções das propriedades físicas dos grãos (condutividade, esfericidade, etc) e dos seguintes parâmetros secundários relacionados ao ar de secagem:

- H_{t_0} Entalpia do ar de secagem antes de escoar pelos grãos
- \dot{m}_{sec} Fluxo mássico do ar de secagem

1.2. OBJETIVO

O objetivo principal é determinar os valores ótimos dos parâmetros secundários que promovam a otimização das taxas de transferência, ou seja, que possibilitem menor consumo de tempo e energia, com maior qualidade para os grãos em termos de percentual de grãos inteiros e potencial nutritivo e germinativo.

O Sistema Pneumático de Secagem de Grãos será gerido pelo Sistema de Gerenciamento Termodinâmico (S.G.T.), o qual será composto por sensores, válvulas de controle e um banco de dados que armazenará os valores dos parâmetros $\frac{\partial H_t}{\partial \theta}$, $\frac{\partial M}{\partial \theta}$, H_{t_0} e \dot{m}_{sec} em tempo real.

O banco de dados será realimentado por índices de qualidade dos grãos obtidos para cada batelada processada, podendo assim relacionar os resultados obtidos (índice de qualidade, tempo e energia consumidos) com os parâmetros primários e secundários utilizados durante o processo de secagem.

Os objetivos esperados do Sistema Pneumático de Secagem de Grãos com Gerenciamento Termodinâmico do Processo são:

- a) Elevar o nível dos grãos em termos de qualidade e valor de mercado em 30 %.
- b) Reduzir o consumo específico de energia de 2,4 para 0, 5 MJ/kg.
- c) Viabilizar o Sistema de Gerenciamento Termodinâmico (S. G. T.).
- d) Realizar a carga, secagem, mistura, limpeza e descarga com fluxo de ar.
- e) Eliminar contaminação dos grãos através de resíduos provenientes da combustão incompleta do combustível (biomassa e gás) utilizando trocador de calor.
- f) Minimizar custo de manufatura, instalação e dar mobilidade ao equipamento.
- g) Expelir ar úmido e contaminado por aerodispersóides fora do ambiente.

1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO

Revisão Bibliográfica: Revisão da literatura tendo como foco as principais contribuições dos trabalhos realizados na área de secagem, teoria básica de secagem, sistemas de secagem e modelos matemáticos existentes.

Metodologia : Estruturação do Sistema Pneumático de Secagem de Grãos tendo em mente a modelagem e implementação do Sistema de Gerenciamento Termodinâmico (S. G. T.), materiais e equipamentos utilizados, procedimentos experimentais e medidas obtidas. Não foi realizada abordagem teórica profunda da secagem por ser um caminho muito complexo para atingir os objetivos.

Análise dos Resultados: Análise dos resultados obtidos para o secador protótipo de 5 litros de grãos com monitoramento dos valores de pressão e temperatura. Análise dos sistemas de secagem para 150 litros.

Conclusões e Sugestões: Avaliação comparativa do desempenho do sistema de secagem proposto em relação aos sistemas atuais, levando em conta consumo de tempo, energia e custo do quilo de grão processado. Faremos sugestões para trabalhos futuros.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. EVOLUÇÃO DOS SISTEMAS DE SECAGEM

2.1.1. Solar – Terreiro

O sistema de secagem de grãos expostos ao sol no terreiro é o mais antigo e também o que alcança a maior qualidade, tendo em vista que as taxas de transferência de calor e água estão mais próximas da natureza dos grãos, impondo uma velocidade de secagem bem menor que os sistemas mecânicos. Normalmente, nas propriedades pequenas, a secagem do grão trilhado se faz em terreiros. A secagem não deve ser rápida, pois poderá acarretar prejuízo à qualidade, trincando os grãos. O arroz é remexido continuamente para se evitar fermentações prejudiciais e para se obter um bom produto. Quando os grãos, ao fim, atingirem 13 a 14 % de umidade, a secagem está terminada, e eles devem ser recolhidos. Um rodo de madeira, ou instrumento equivalente, serve para mexer o arroz no terreiro. O profissional do campo sabe quando o arroz está no "ponto" de ser recolhido. Com os pés, atrita as amostras, que recolhe, de encontro ao chão.

Se a casca desprender-se com facilidade é sinal de que está no ponto, caso contrário é sinal de que ainda está úmido [Weber, 2005].

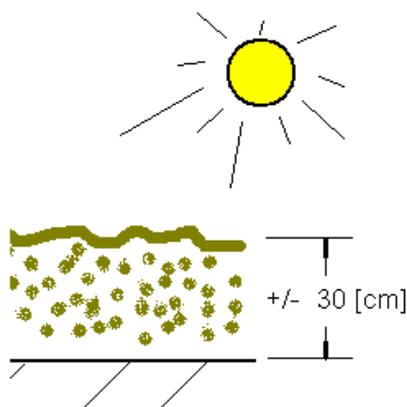


Fig. 1 – Camada de grãos de arroz exposta ao sol no terreiro

2. 1. 2. Solar – Sistema Mecânico de Secagem

Devido a necessidade de aumentar a capacidade de secagem, deu-se início ao desenvolvimento de sistemas mecânicos de secagem, utilizando ventilação forçada e coletores de energia solar, com objetivo de acelerar o processo. Estes sistemas - fig. 2 são indicados para pequenas produções (≈ 10.000 kg por safra). [Weber, 2005]

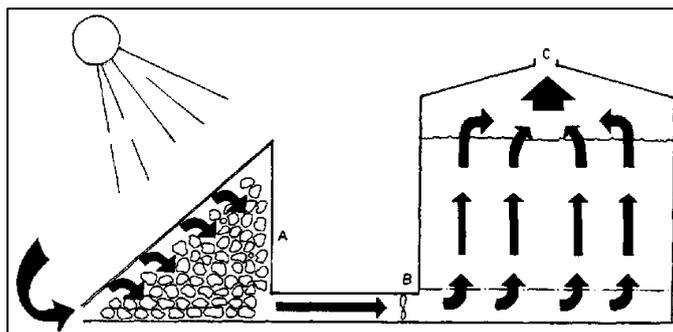


Fig. 2 – Sistema de secagem de grãos com aquecimento solar indireto

2. 1. 3. Combustão Biomassa – Sistema Mecânico de Secagem

A medida que foram aumentando os volumes de produção de grãos foram se desenvolvendo sistemas mecânicos com fontes de energia térmica provenientes da queima de biomassa (lenha, resíduos da colheita, etc) como mostrado na fig. 3. A principal vantagem deste sistema é o baixo custo do equipamento para uma capacidade de 30 sacos de 60 kg, tendo como desvantagem a dificuldade de homogeneização da massa de grãos [Carvalho, 1994].

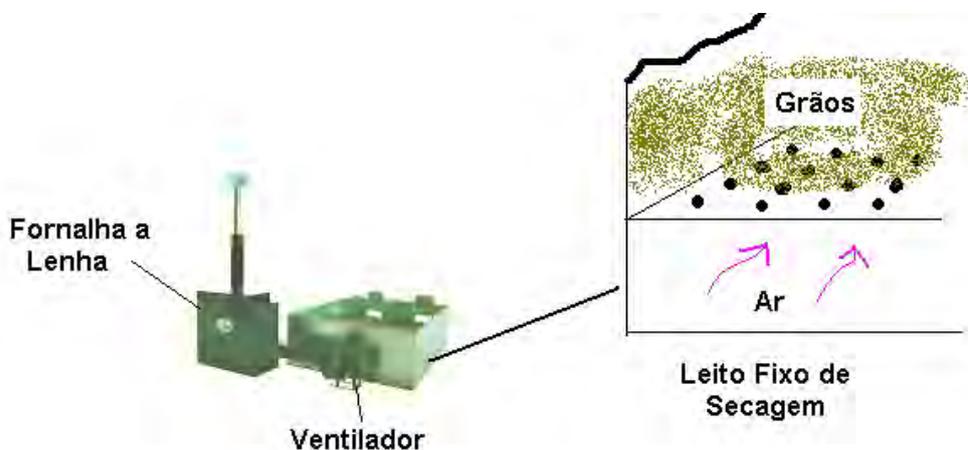


Fig. 3 – Sistema de secagem de grãos com fornalha a lenha e ventilador radial

2. 1. 4. Combustão Gás – Secador Móvel de Pequeno Porte

Seguindo esta evolução dos sistemas mecânicos de secagem iniciou-se a utilização de gás, principalmente o natural – CH_4 e o butano – C_4H_{10} (gás de cozinha) e formas mais eficientes de deslocamento dos grãos através de roscas helicoidais, além da mobilidade do equipamento (fig. 4) [Lima, 1997].

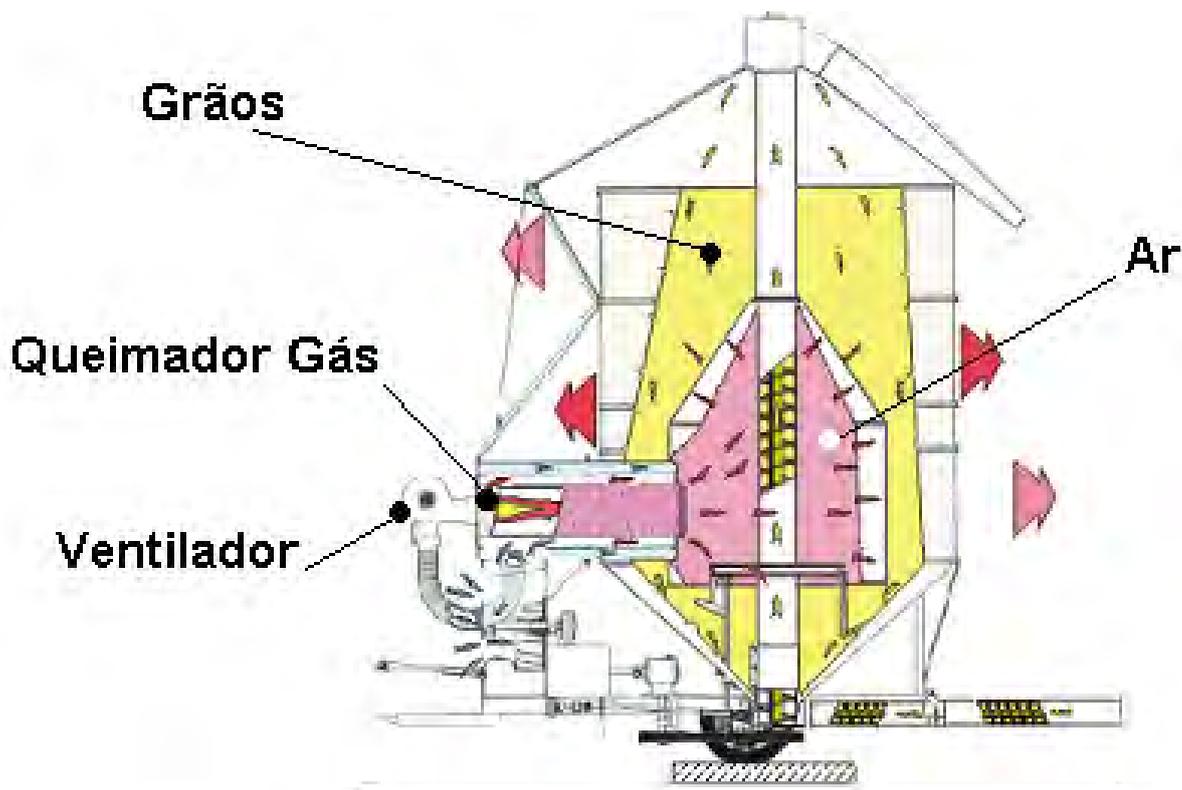


Fig. 4 – Sistema de secagem onde o ar de secagem é insuflado no centro da coluna cilíndrica

2. 1. 5. Combustão de Biomassa – Secador Fixo de Pequeno Porte

Sistema de secagem onde a movimentação dos grãos se dá por correias transportadoras, o ar de secagem é insuflado no centro da coluna cilíndrica, cruzando o fluxo descendente dos grãos (capacidade de +- 500 kg/h) como mostra a fig. 5 [Weber, 2005].

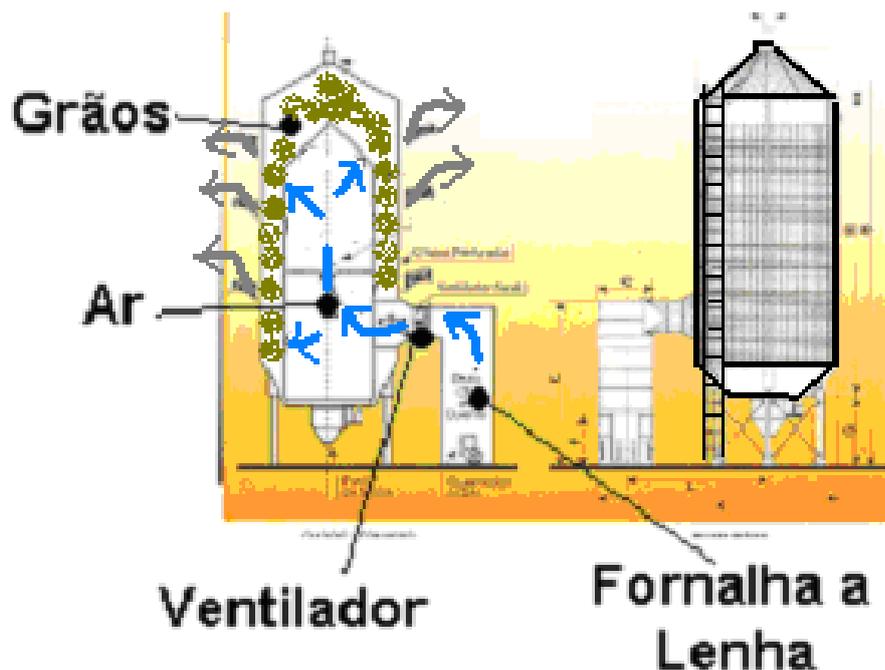


Fig. 5 – Sistema de secagem com coluna cilíndrica

2. 1. 6. Combustão de Biomassa – Secador Fixo de Médio Porte

Outro modelo de secador com maior capacidade (≈ 1000 kg / h) e câmara de repouso para os grãos, ou seja, há um tempo maior para aguardar a uniformização dos gradientes de temperatura e umidade, aumentado assim a qualidade dos grãos, como mostra a fig. 6 [Weber, 2005].

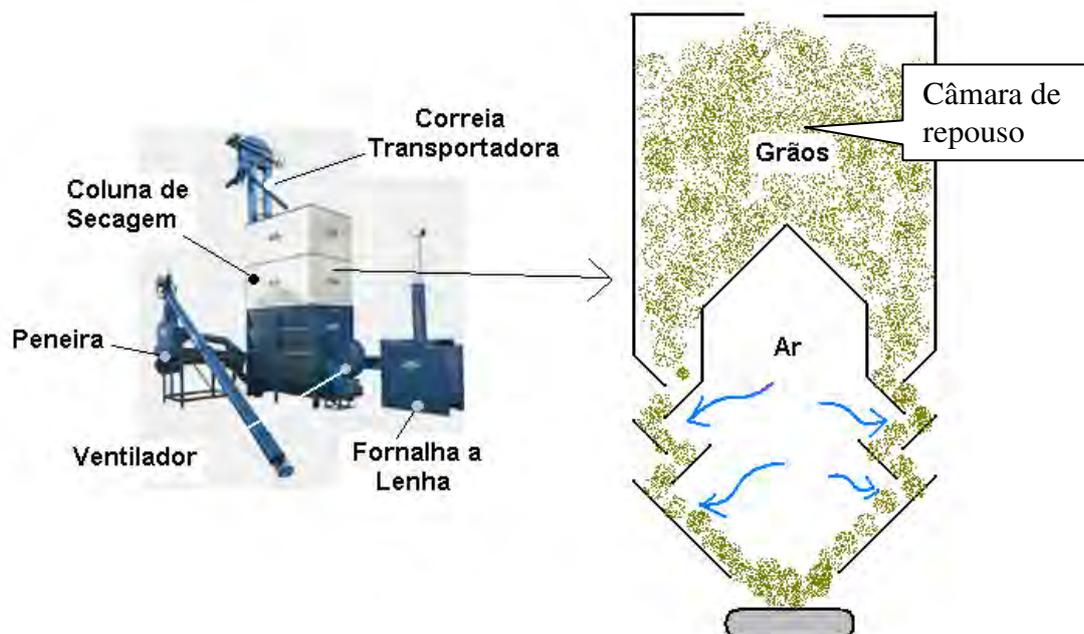


Fig. 6 – Sistema de secagem com câmara de repouso para os grãos

2. 1. 7. Combustão de Biomassa – Secador Fixo de Grande Porte

Os sistema de grande porte (10. 000 kg/ h) têm vários estágios com diferentes temperaturas, proporcionando um processo de secagem mais uniforme para os grãos. Ocorrem no entanto grandes perdas de energia térmica por convecção pelas paredes externas. O sistema pode ser observado na fig. 7 [Weber, 2005].

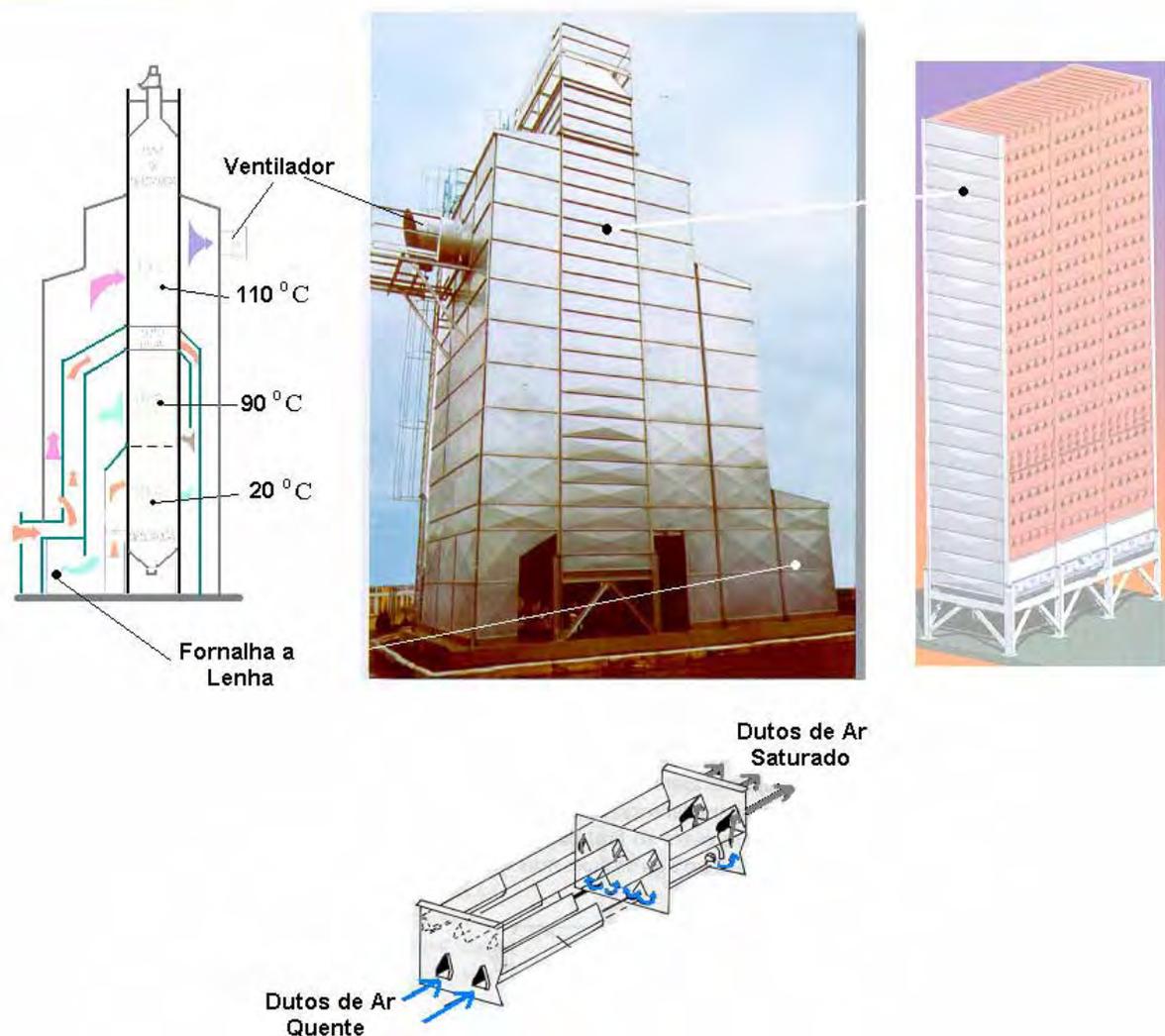


Fig. 7 – Sistema de secagem de grande porte (10. 000 kg /h) com vários estágios de temperatura.

2. 2. LEITO DE JORRO COM DUTO CENTRAL

O leito de Jorro com Duto Central [Mujundar, 1999], é formado por um vaso cilíndrico de base cônica com duto no centro (Fig. 8). No caso do sistema de secagem proposto, adotaremos vaso cúbico de base piramidal com duto central - Fig. 9.

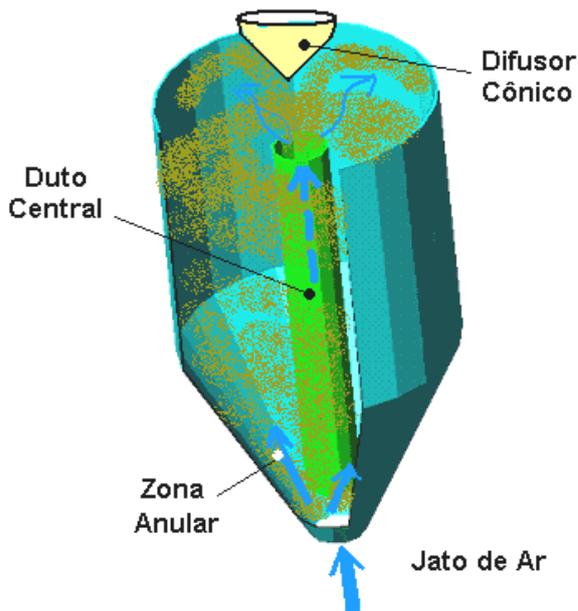


Fig. 8 – Leito de secagem cilíndrico base cônica

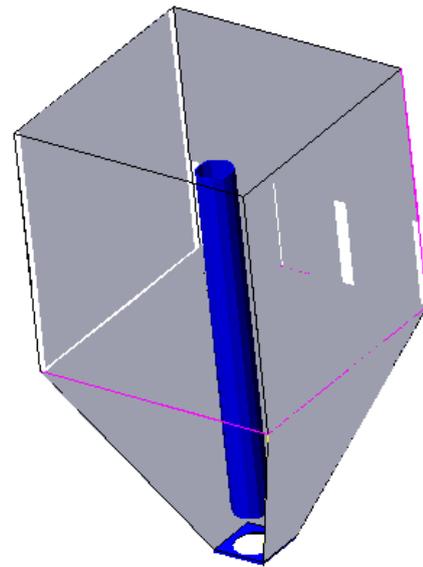


Fig. 9 – Leito de secagem cúbico de base piramidal

É possível identificar duas regiões distintas no leito de jorro com duto central:

- **Duto Central** – A fluidodinâmica do leito de jorro com duto central está associada ao direcionamento do fluxo de ar para o interior do tubo. Com pequenas vazões de ar, o fluido apenas percola as partículas. Com o aumento do fluxo de ar, inicia-se a formação da cavidade abaixo do tubo interno devido à ação do jato de ar. Esta cavidade vai se alongando, dando origem ao jorro interno, até o ponto em que se atinge a parte inferior do duto central. O ponto de queda de pressão máxima está na base do duto central. A partir deste ponto, o ar passa a empurrar os grãos que estão no interior do duto e o jorro aflora no topo. Incrementos de vazão apenas provocam pequenas diminuições da queda de pressão.
- **Zona Anular**- Região de porosidade menor em relação ao restante da massa de grãos ao redor do duto central. Isto se deve à ação dos fluxos laterais de ar provenientes do

jato central. A maior fração da transferência de calor e massa (água) está nesta região, provocando a saturação do ar de secagem.

A secagem de grãos em leito de jorro foi proposta inicialmente por Mathur e Gishler (1955) [Lima, 1997]. Estes autores observaram que através deste aparato era possível utilizar temperaturas mais elevadas do ar de secagem sem danificar os grãos. Após estudos realizados por Khoe e Brakel (1983) [Lima, 1997], para secagem de arroz em casca, chegaram-se às seguintes conclusões:

- A transferência de calor ocorre principalmente junto à entrada do ar na base do leito e dentro do duto central.
- Uma considerável fração da transferência de massa (água) ocorre na região anular, onde acontece a migração da umidade do centro para a superfície do grão.

Pode-se observar no gráfico da Fig.10 o teste realizado com arroz do campo [Lima, 1997], a secagem em leito de jorro com duto central, com os seguintes parâmetros:

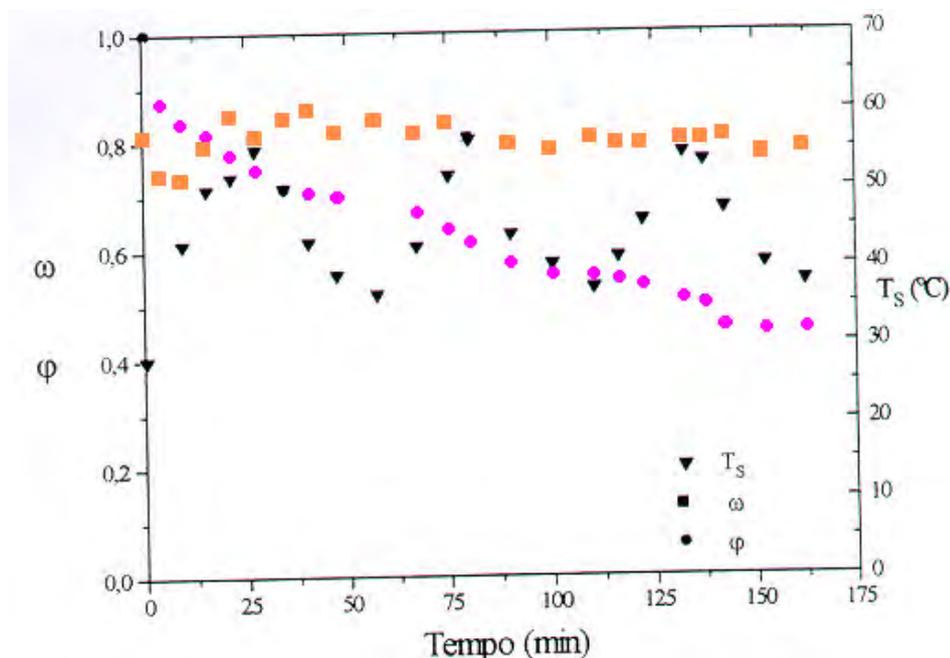


Fig. 10 – Teste de secagem para leito de jorro [Lima, 1997]

- $T_{AR} = 90 \text{ } ^\circ\text{C}$

- $M_o = 25 \text{ } \%$ (umidade b.s.)

A oscilação de temperatura dos grãos se deve ao resfriamento por ar ambiente de 30 em 30 minutos. O tempo necessário para secagem até umidade de armazenamento ($\varphi \approx 0,5$) foi de aproximadamente 150 minutos (2, 5 horas), o que é menor que os secadores de pequeno porte que consomem aproximadamente 6 horas.

2.3. LEITO DESLIZANTE COM FLUXOS CRUZADOS

O trabalho de pesquisa realizado [Callado, 1993] sobre um sistema de secagem de grãos com leito de fluxo cruzado, ou seja, o fluxo de ar de secagem cruza o fluxo de grãos ortogonalmente, com o deslocamento da massa de grãos do nível inferior para o nível superior realizado através de transporte pneumático, se aproxima muito da proposta do leito de secagem deste trabalho de pesquisa, a menos de algumas diferenças que se pode ver adiante. Serão adotados os resultados dos experimentos deste sistema mostrado na Fig.11 como referência.

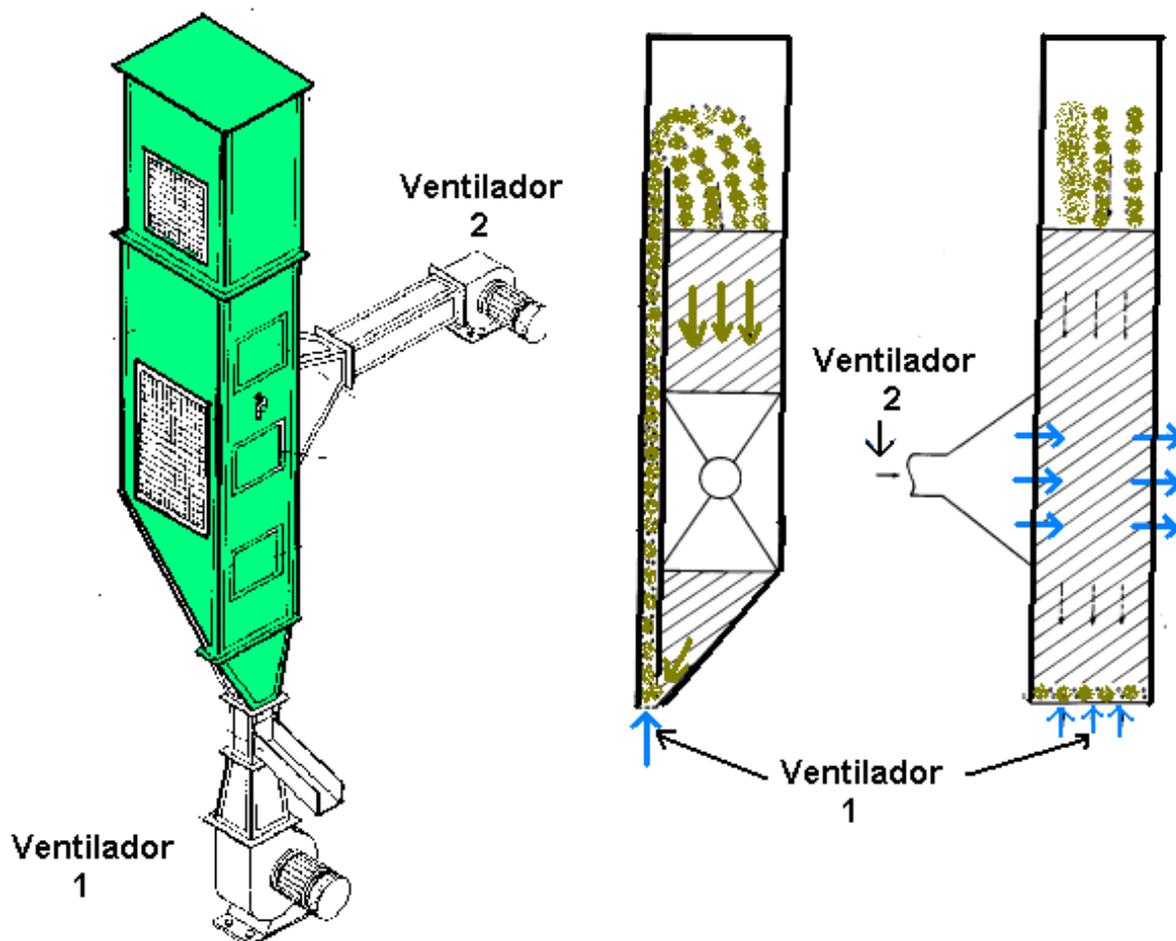


Fig. 11 – Sistema de secagem com leito deslizante, fluxos cruzados e recirculação pneumática

As vantagens do secador de leito deslizante com fluxos cruzados e recirculação pneumática em relação ao secador de leito de jorro com duto central são mostradas na tabela 10 e fig. 13, para redução de umidade do milho de 18 para 12, 5 % (base úmida).

Tabela 10 – Comparação Leito de Jorro x Leito Deslizante. [Callado, 1993]

	A	B	C	D
	Capacidade de Processamento (kg/h)	Potência Nominal dos Ventiladores (cv)	Energia Térmica Consumida (kcal / kg)	Temperatura Final do Grão (°C)
Leito de Jorro	22	3	151,7	56
Leito Deslizante	67	3	94,8	50

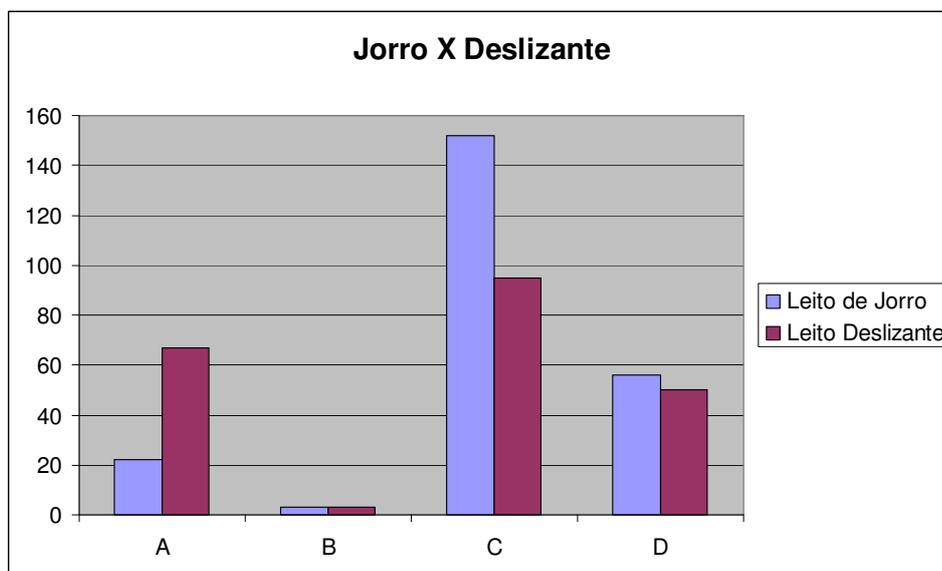


Fig. 13 – Gráfico ilustrativo da tabela 10

O experimento e seus parâmetros que geraram os dados da tabela 10 podem ser observados esquematicamente na Fig.14.

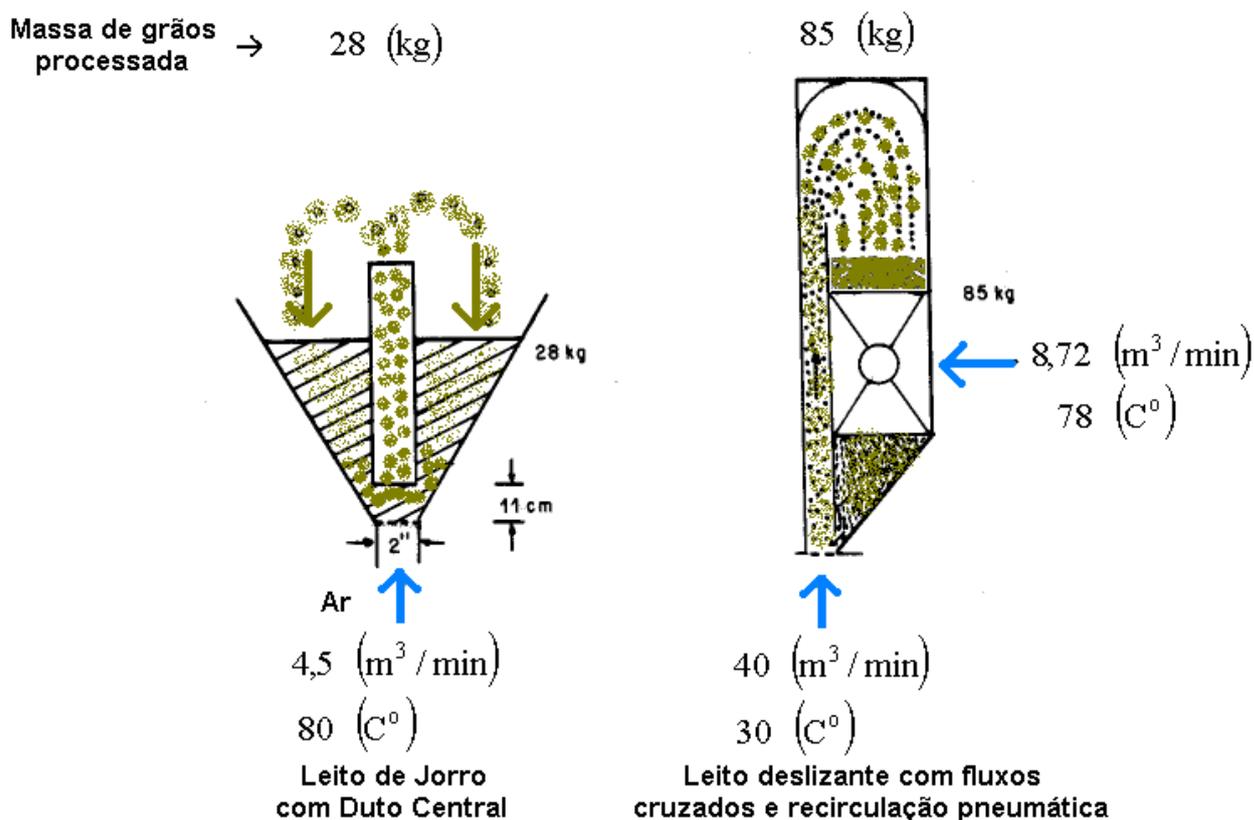


Fig. 14 – Diagrama esquemático dos Leitos de Jorro e Deslizante

É importante salientar que o leito deslizante emprega dois ventiladores enquanto o leito de jorro utiliza apenas um.

2.4. SISTEMA EXPERIMENTAL DE INVESTIGAÇÃO DA SECAGEM

O estudo da cinética da secagem [Mujundar, 1995] determina os coeficientes de transferência de calor e massa (água) entre o ar de secagem e os grãos úmidos, os quais indicam a quantidade de calor e massa transferidos. Também os coeficientes de difusão e condutividade térmica e mássica são parâmetros de fundamental interesse. Estes coeficientes ajudam a compreender o mecanismo da secagem, quanto de calor e massa são transferidos e com que velocidade, mediante diferentes características do ar de secagem e dos grãos em estudo. Equipamento para medições experimentais em secagem por convecção é mostrado na fig. 15.

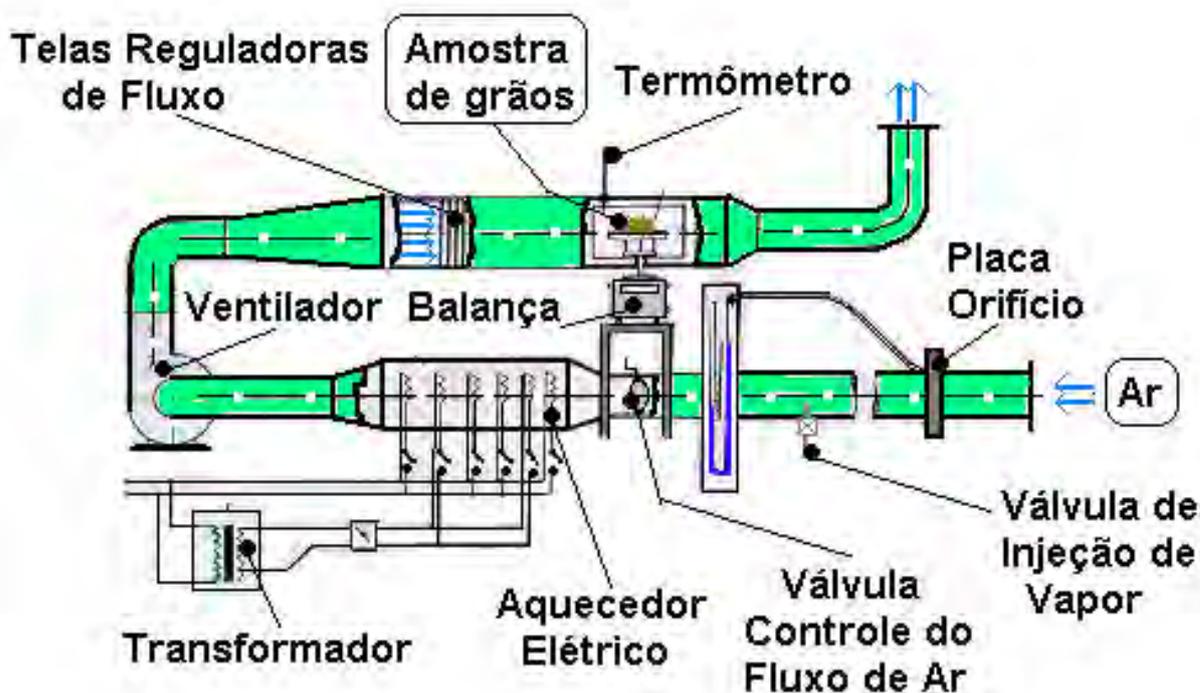


Fig. 15 – Croqui do sistema experimental de investigação da cinética da secagem [Mujundar, 1995]

Este equipamento é de fato um duto de ar climatizado e controlado. O material úmido sobre a balança no espaço de medição sofre a ação de fluxo de ar aquecido. A temperatura e a umidade do ar de secagem são medidos por termômetros de bulbo úmido e seco, antes de entrar no duto. O fluxo mássico de ar pode ser medido pela diferença de pressão medida por manômetro U de coluna, o qual está conectado à placa orifício devidamente calibrada. Antes de iniciar as medições, o ventilador é ligado e ajusta-se o fluxo de ar de secagem, através da válvula de controle. A temperatura é controlada pelo aquecedor elétrico e a umidade, por válvula de vapor. A massa da amostra variando com o tempo é medida e registrada continuamente.

2.5. COEFICIENTES DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR E MASSA

Os coeficientes de transferência de calor e massa (água) para leito fixo que será utilizado no secador protótipo 5 litros, e leito fluidizado que possui o maior grau de homogeneização e passagem de ar de secagem podem ser observados nos gráficos – fig. 21 e 22.

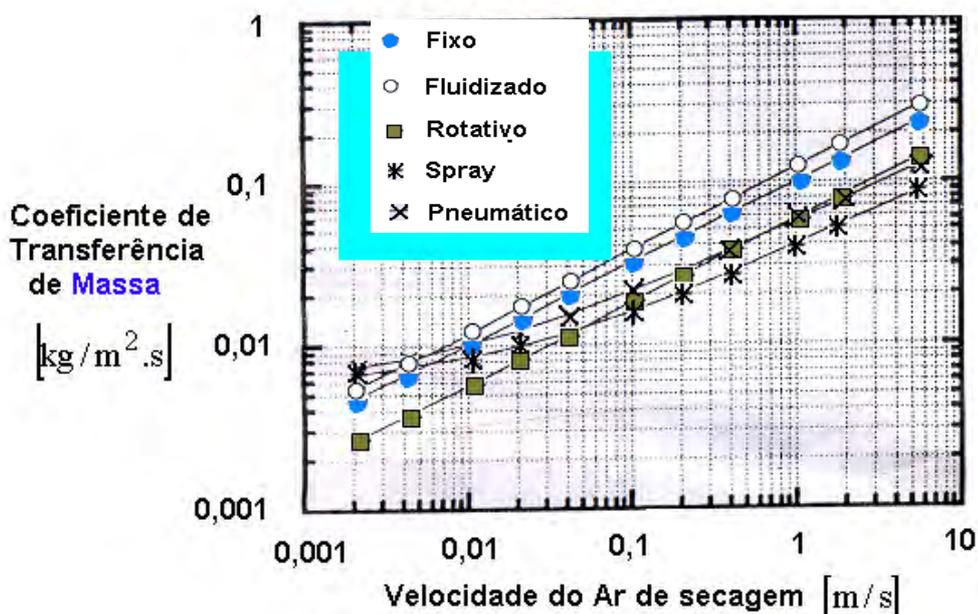


Fig. 21 – Transferência de Massa (água) x Velocidade do ar para vários leitos de secagem [Mujundar, 1995]

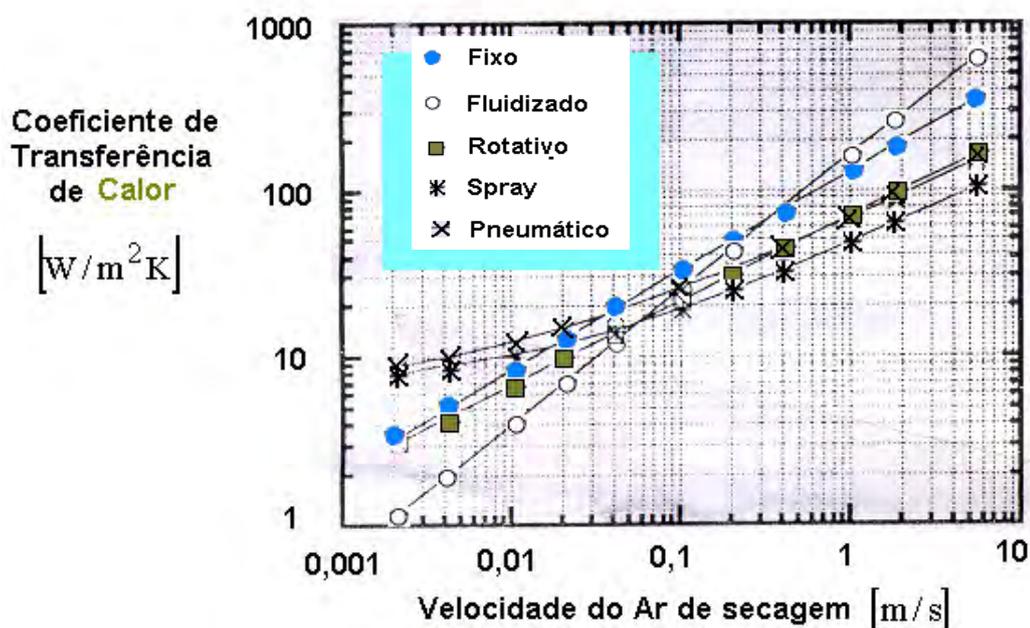


Fig. 22 – Gráfico Transferência de Calor x Velocidade do ar para vários leitos de secagem [Mujundar, 1995]

Estes gráficos [Mujundar, 1995] foram calculados (obtidos) para as seguintes condições

Diâmetro médio das partículas	10 [mm]
Temperatura do Ar	80 °C
Umidade Absoluta do Ar	10 [g/kg] base seca

A vantagem do leito fixo em relação ao fluidizado – fig. 23 é ter um consumo menor de ar de secagem (+- 50 %) e forma construtiva mais simplificada, tendo o coeficiente de transferência de massa, o qual expressa a capacidade de secagem, somente um pouco menor em relação ao leito fluidizado.

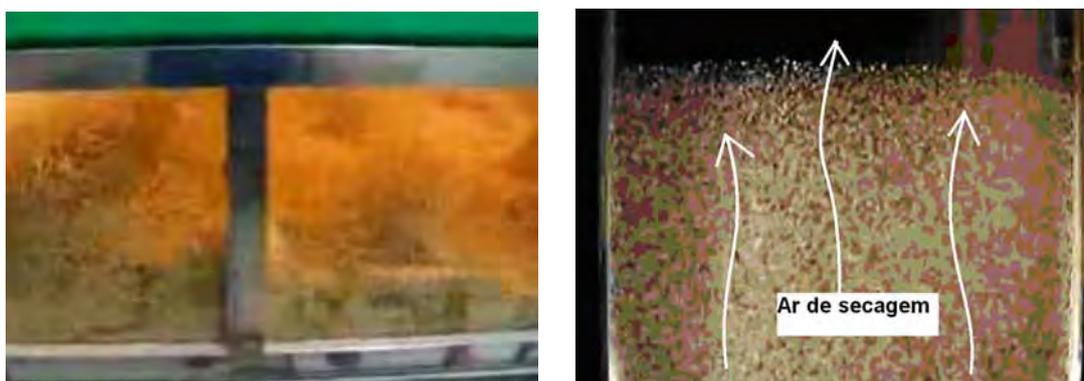


Fig. 23 – Fotos de leito fluidizado e leito fixo

2.6. PRINCÍPIOS DA PSICROMETRIA

O estudo de sistemas envolvendo ar seco e água (vapor ou condensada) é conhecido como psicrometria [Shapiro, 1998], neste tópico serão apresentadas algumas definições importantes e princípios utilizados neste tipo de sistema. A mistura dos gases que constituem o ar atmosférico, com exceção do vapor de água, é chamada de ar seco. A composição do ar seco pode ser observada na tabela 10 .

Composição do Ar Seco	
Componente	%
Nitrogênio	78,084
Oxigênio	20,948
Argônio	0,934
Dióxido de Carbono	0,0314
Neônio	0,001818
Hélio	0,000524
Metano	0,00015
Dióxido de Enxofre	0,0001
Hidrogênio	0,00005
Kryptônio,Xenônio,Ozônio	0,0002

Tab. 10 - Composição do ar seco atmosférico. [Shapiro, 1998].

2.6.1. Ar úmido

O termo ar úmido se refere à mistura de ar seco e vapor de água, no qual o ar seco é considerado como se fosse um componente puro. Como pode ser verificado pela consulta a dados de propriedades apropriadas, a mistura e cada componente da mistura se comportam como gases ideais nos estados aqui considerados. Na Fig. 24 tem-se um sistema fechado que consiste em ar úmido ocupando um volume V a pressão de mistura p e a temperatura de mistura T .

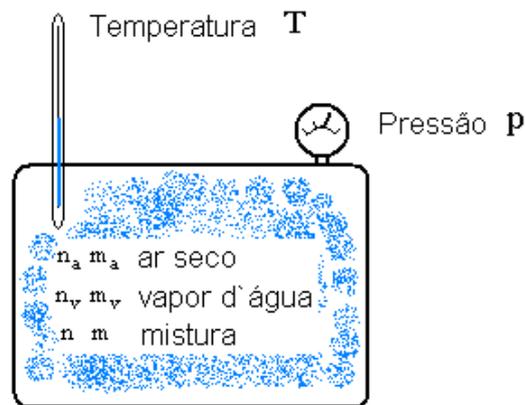


Fig. 24 – Volume contendo ar seco misturado com vapor d' água sob determinada pressão e temperatura.

[Shapiro, 1998]

Considera-se que a mistura obedece à equação de estado de gás ideal.

$$p = \frac{n\bar{R}T}{V} = \frac{m(\bar{R}/M)T}{V} \quad (1)$$

Para cada componente da mistura considera-se um comportamento como se este estivesse sozinho no volume V à temperatura de mistura T enquanto exerce uma parcela da pressão. A pressão da mistura é a soma das pressões parciais do ar seco e do vapor d'água. Utilizando a equação de estado de gás ideal, a pressão parcial p_a e p_v são respectivamente:

$$p_a = \frac{n_a\bar{R}T}{V} = \frac{m_a(\bar{R}/M_a)T}{V} \quad (2)$$

$$p_v = \frac{n_v\bar{R}T}{V} = \frac{m_v(\bar{R}/M_v)T}{V} \quad (3)$$

p_a Pressão parcial do ar seco

P_v Pressão parcial do vapor super aquecido

A quantidade de água é geralmente muito inferior à quantidade de ar seco. Conseqüentemente, os valores de n_v , m_v e P_v são inferiores aos valores correspondentes de n_a , m_a e P_a . Um estado típico de vapor d'água em ar úmido é mostrado – fig. 25.

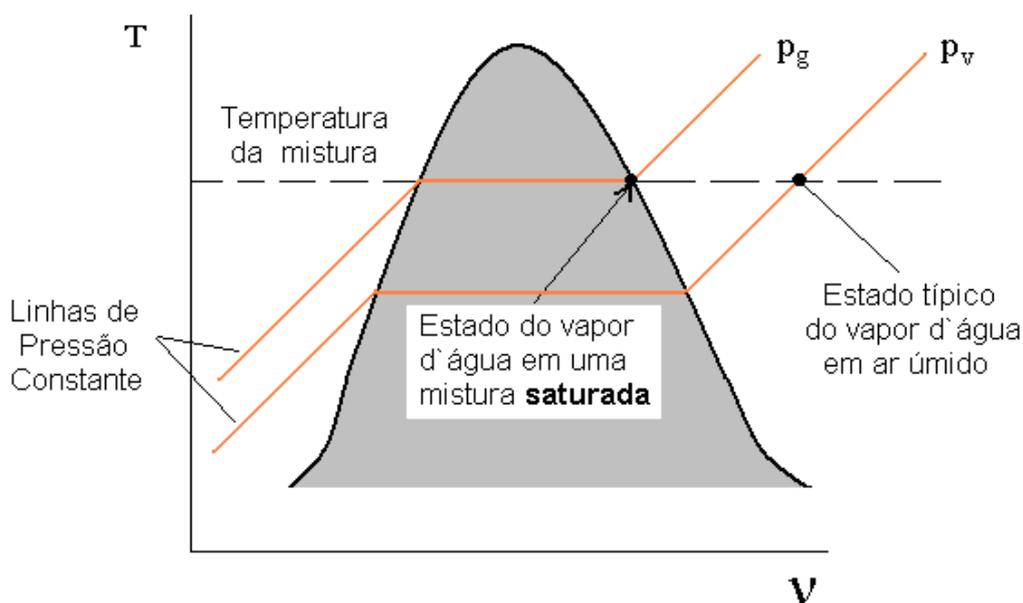


Fig. 25 – Temperatura x volume específico ar úmido [Shapiro, 1998].

Neste estado determinado pela pressão parcial P_v e pela temperatura de mistura T , o vapor é super aquecido. Quando a pressão parcial do vapor d'água corresponde à pressão de saturação da água na temperatura da mistura (p_g), diz-se que a mistura é saturada.

Ar saturado é uma mistura de ar seco e vapor d'água saturado. A quantidade de vapor d'água no ar úmido varia de zero (ar seco) para um máximo para mistura saturada dependendo da pressão e temperatura reinantes. Quanto menor a pressão pode-se ter ar úmido não saturado a temperaturas maiores.

2.6.2. Umidade Específica

A composição de uma dada amostra de ar úmido pode ser descrita de diversas maneiras. A mistura pode ser descrita em termos dos moles de ar seco e de vapor d'água presente ou em termos das respectivas frações molares.

Como alternativa podem ser especificadas as massas de ar seco e de vapor d'água ou as respectivas frações mássicas. A composição também pode ser indicada através da umidade específica, W , definida como a razão entre a massa de vapor d'água e a massa de ar seco:

$$W = \frac{m_v}{m_a} \quad (4)$$

A umidade específica [Shapiro, 1998] pode ser expressa em termos das pressões parciais e pesos moleculares, substituindo as equações 2 e 3 na equação 4 para obter:

$$W = \frac{m_v}{m_a} = \frac{M_v p_v V / \bar{R}T}{M_a p_a V / \bar{R}T} = \frac{M_v p_v}{M_a p_a} \quad (5)$$

Introduzindo $p_a = p - p_v$ e notando que a razão do peso molecular da água para ar seco é aproximadamente:

$$\frac{M_v}{M_a} = 0,622 \quad (6)$$

tem-se:

$$W = 0,622 \frac{p_v}{p - p_v} \quad (7)$$

2.6.3. Umidade Relativa

A composição do ar úmido pode também ser descrita em termos da Umidade Relativa, ϕ , definida como a razão entre a fração molar do vapor d'água y_v em uma dada amostra de ar úmido e a fração molar $y_{v,sat}$ em uma amostra de ar úmido saturada à mesma pressão e temperatura da mistura:

$$\phi = \frac{y_v}{y_{v,sat}} \Big|_{T, p} \quad (8)$$

Uma vez que $p_v = y_v P$ e $p_g = y_{v,sat} P$, a equação 8 pode ser descrita da seguinte forma:

$$\phi = \frac{p_v}{p_g} \Big|_{T, p} \quad (9)$$

As pressões nestas expressões para umidade relativa são mostradas fig.- 25.

A umidade específica e a umidade relativa podem ser medidas em laboratório através de um higrômetro, no qual uma amostra de ar úmido é exposta a reagentes apropriados até que a umidade presente seja absorvida, e através da pesagem destes reagentes determina-se a quantidade de umidade presente no ar analisado. Um acompanhamento contínuo da umidade relativa pode ser realizado através de transdutores, os quais consistem de sensores resistivos ou capacitivos cujas características elétricas se alteram com a umidade relativa.

2.6.4. Ponto de Orvalho

Um aspecto significativo do comportamento do ar úmido é que pode ocorrer condensação parcial do vapor d'água quando a temperatura é reduzida. Este tipo de fenômeno é comumente encontrado durante a condensação de vapor nas vidraças das janelas no inverno ou em dutos por onde passa água fria.

No caso da secagem de grãos ocorre condensação do ar de secagem nas camadas superiores dos silos que tem fluxo de ar ambiente sendo injetado na sua base perfurada - fig. 26.

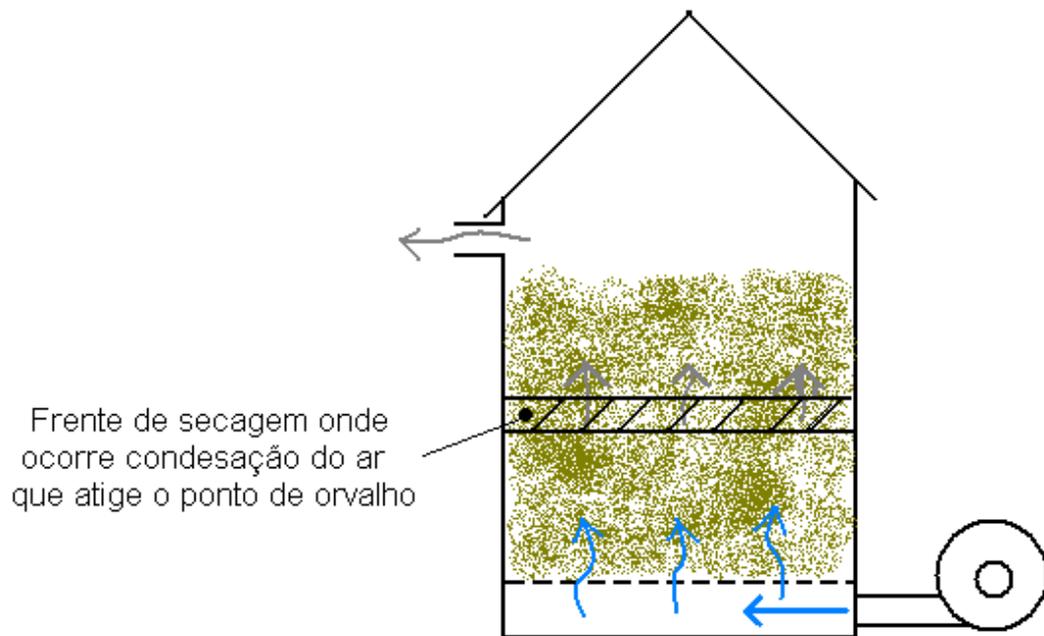


Fig. 26 – Esquema de silo com a frente de secagem em progressão [Weber, 2005]

Para o estudo deste fenômeno, considere um sistema fechado composto de uma amostra de ar úmido que é resfriado à pressão constante como mostrado – fig. 27.

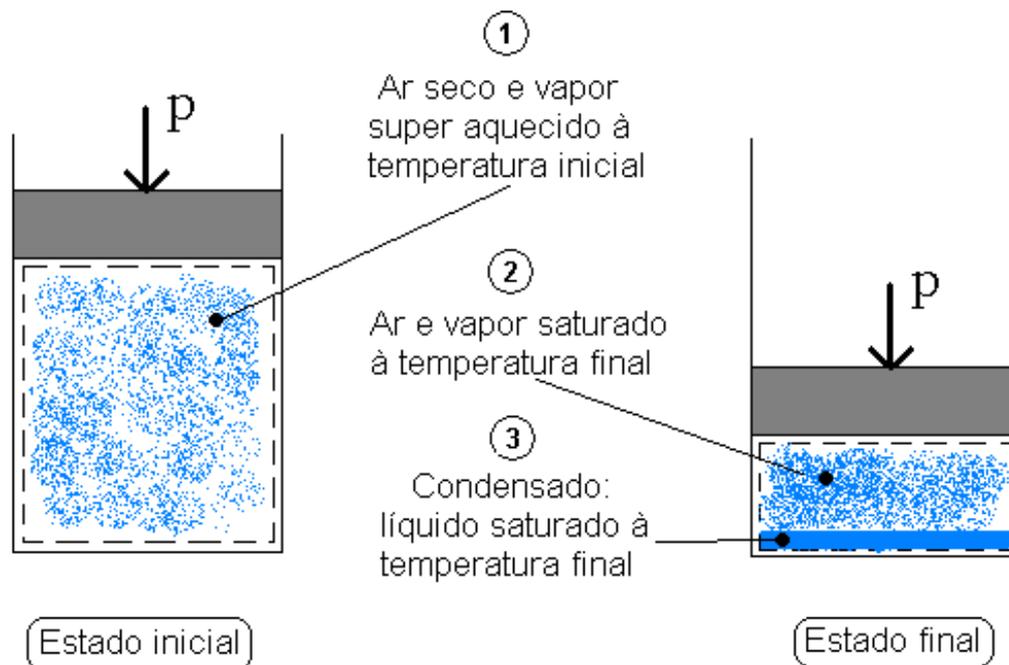


Fig. 27 – Resfriamento de ar úmido a pressão constante [Shapiro, 1998].

Pode-se observar a posição dos estados do vapor d'água no diagrama $T \times v$ (temperatura \times volume específico - Fig. 28) :

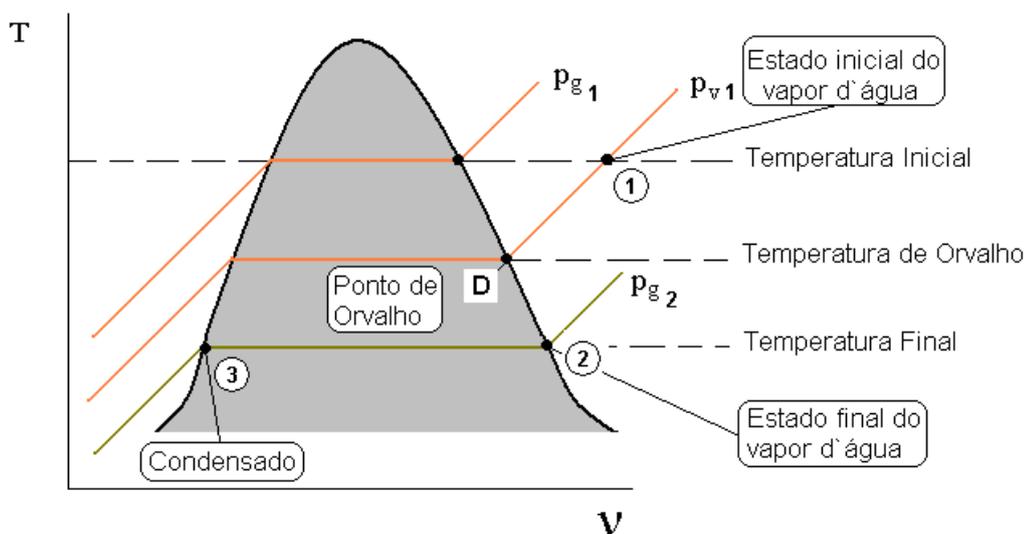


Fig. 28 – Diagrama $T \times V$ - temperatura / volume específico [Shapiro, 1998].

Inicialmente o vapor d'água se encontra super aquecido no estado ①; nesta etapa inicial do processo de resfriamento tanto a pressão do sistema como a composição da mistura permanecem constantes. Conseqüentemente, uma vez que $p_v = y_v P$, a pressão parcial do vapor d'água permaneceria constante e o vapor d'água seria resfriado a p_v constante a partir do estado ① até o estado D, chamado de Ponto de Orvalho. A temperatura de saturação correspondente a p_v é chamada de temperatura do ponto de orvalho.

Na etapa seguinte do processo de resfriamento o sistema seria resfriado a temperaturas abaixo do ponto de orvalho e alguma parcela do vapor d'água inicialmente presente condensaria. No estado final o sistema seria composto de uma fase gasosa de ar seco e vapor d'água em equilíbrio com a água na fase líquida.

O vapor que permanece pode ser considerado saturado na temperatura final, representado como o estado 2 na Fig.28, com a pressão parcial igual à pressão de saturação P_{g2} correspondente a esta temperatura. O condensado estaria como líquido saturado na temperatura final (estado 3 Fig.28). É importante notar que a pressão parcial do vapor d'água no estado final (P_{g2}) é inferior ao valor inicial P_{v1} . A pressão parcial diminui já que a fração molar de vapor d'água presente no estado final é inferior ao valor inicial, uma vez que ocorre condensação.

2.6.5. Entalpia de Mistura

Os valores de Entalpia (H), Energia Interna (U) e Entropia (S) para o ar úmido podem ser determinados pela soma da contribuição de cada componente nas condições nas quais o componente existe na mistura. A Entalpia de uma dada amostra de ar é [Shapiro, 1998]:

$$H = H_a + H_v = m_a h_a + m_v h_v \quad (10)$$

H_a Entalpia do ar seco

H_v Entalpia do vapor d'água super aquecido

Dividindo a equação (10) por m_a e introduzindo a umidade específica W , obtém-se a entalpia de mistura por unidade de massa de ar seco:

$$\frac{H}{m_a} = h_a + \frac{m_v}{m_a} h_v = h_a + W h_v \quad (11)$$

h_a Entalpia específica do ar seco

h_v Entalpia específica do vapor d'água super aquecido

As entalpias de ar seco e de vapor de água que aparecem na equação (11) são avaliadas à temperatura de mistura. Uma abordagem semelhante a esta para entalpia pode ser utilizada para avaliação da energia interna do ar úmido. Uma consulta a tabelas de vapor ou a um diagrama de Mollier para água mostra que a entalpia do vapor d'água super aquecido a baixas pressões se aproxima significativamente do valor de entalpia do vapor saturado correspondente à temperatura fornecida. Então o valor da Entalpia específica do vapor d'água super aquecido h_v pode ser tomado como o valor da entalpia específica do vapor d'água saturado h_g à temperatura da mistura. Isto é :

$$h_v \approx h_g(T)$$

Dados de entalpia para vapor d'água considerado como gás ideal não são utilizados para h_v , uma vez que o valor de referência de entalpia das tabelas de gás ideal é diferente daquele das tabelas de vapor. Esta diferença de valores de referência pode levar a erros quando do estudo de sistemas que contém tanto vapor d'água quanto fases líquida ou sólida da água.

A entalpia do ar seco h_a pode ser obtida da tabela de gás ideal apropriada, uma vez que o ar se mantém em uma fase gasosa para todos os estados considerados neste trabalho e pode ser apropriadamente modelado como gás ideal.

2.6.6. Carta Psicrométrica

As propriedades da mistura de ar e vapor d'água que constitui a atmosfera podem ser convenientemente apresentadas em forma gráfica, no que se denomina carta psicrométrica (Fig. 31). Toda carta psicrométrica, de modo geral, é um gráfico que tem por ordenada a umidade específica e a pressão de vapor, e como abscissa a temperatura de bulbo seco.

O volume específico da mistura, a temperatura de bulbo molhado, a umidade relativa e a entalpia da mistura aparecem como outros parâmetros. É importante notar que uma carta psicrométrica é traçada para uma dada pressão barométrica, que geralmente é tomada como 1 atm. Pode-se ter uma visão de um processo de secagem adiabático, o qual é composto por:

- (A)  (B) : Aquecimento do Ar
 (B)  (C) : Umidificação do Ar (Secagem dos Grãos)

observando-se a carta psicrométrica - fig. 31.

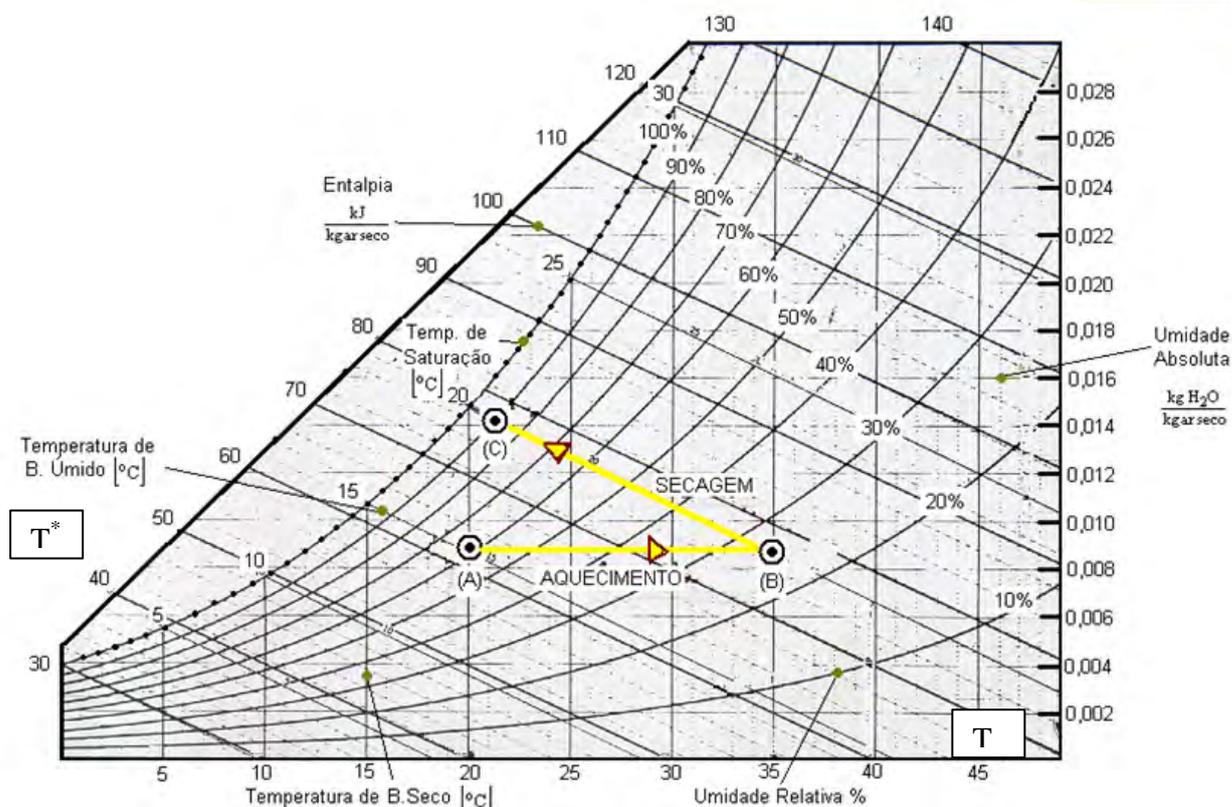


Fig 31. Carta psicrométrica ilustrando o processo de secagem adiabático na primeira etapa do processo

O mesmo processo ilustrado acima pode ser calculado com auxílio de programas computacionais como o CATT (“Computer Aided Thermodynamic Tables”), assumindo os mesmos valores de temperatura de bulbo úmido e seco, sob a mesma pressão de 1 atm - fig. 32, 33 e 34.

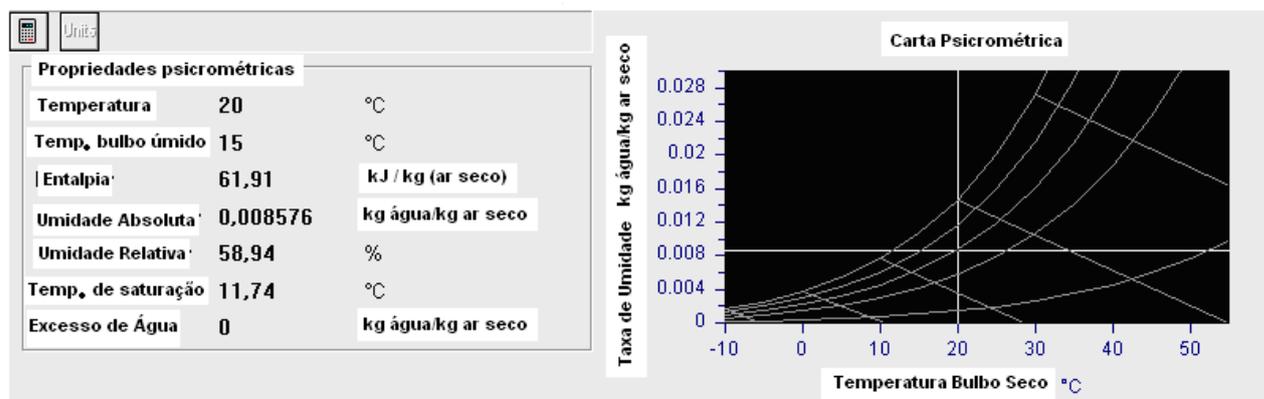


Fig. 32 Ponto (A) – Cálculo das propriedades psicr. do ar ambiente úmido sob $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $T^* = 15\text{ }^{\circ}\text{C}$

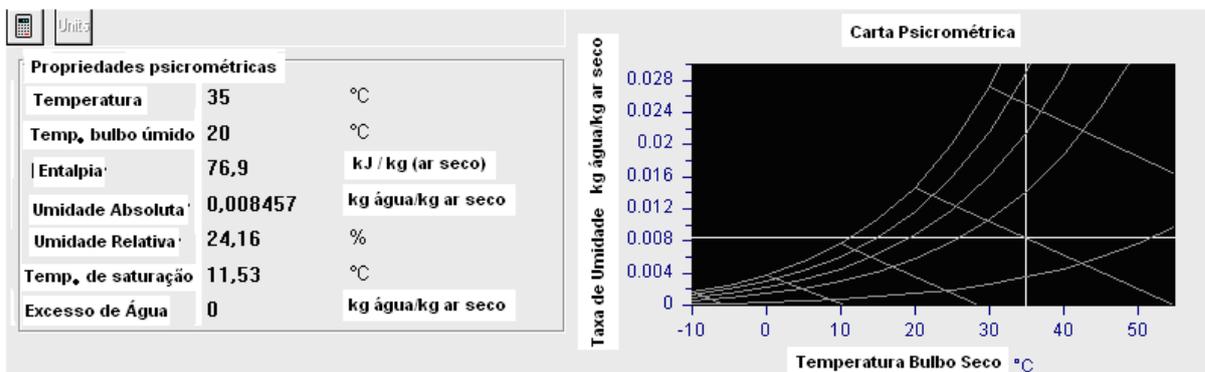


Fig. 33 Ponto (B) – Cálculo das propriedades psicr. ar ambiente aquecido sob $T = 35\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $T^* = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$

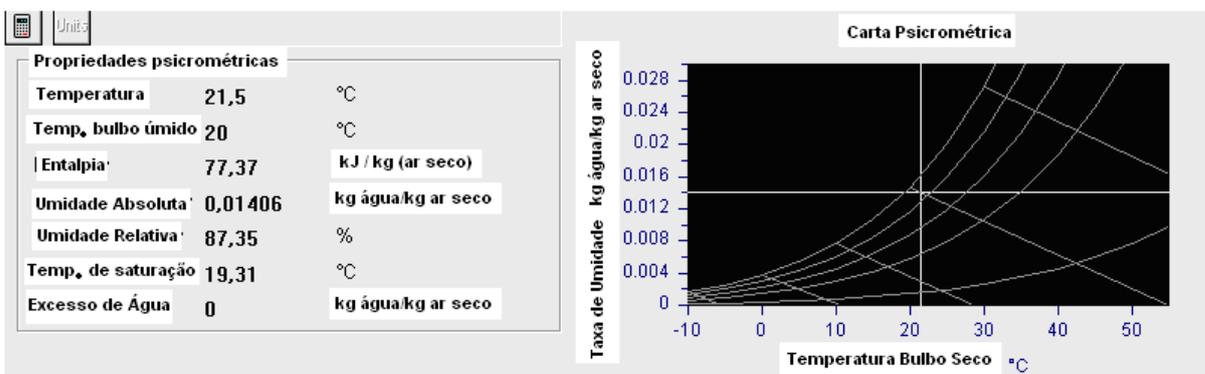


Fig. 34 Ponto (C) – Cálculo das propriedades psicr. ar pós secagem úmido $T = 21,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $T^* = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$

T - Temperatura de bulbo seco T^* - Temperatura de bulbo úmido

2.6.7. Cálculos Psicrométricos

Para realização de cálculos psicrométricos é necessário levar em consideração que a pressão atmosférica varia significativamente com a altitude, segundo a equação 12, como ilustrado -fig. 35 [Tubitak, 1994].

$$P_{\text{atm}} = 1,01325 \cdot ((1 - 0,0065 \cdot (\text{Altitude} / 288,15))^{5,25588}) \quad (12)$$

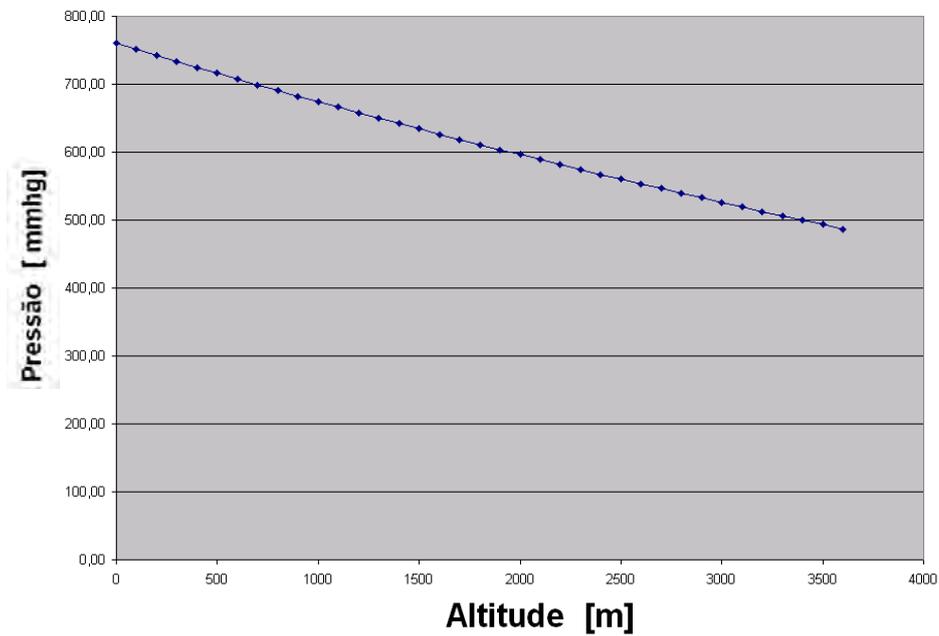


Fig. 35 - Pressão Atmosférica [mmHg] x Altitude [m]

Por sua vez a massa específica do ar (ρ) é dada pela relação geral dos gases perfeitos equação 13:

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{P_{\text{atm}}}{R \cdot T} \quad (13)$$

Assumindo a temperatura de 25 °C pode-se observar a variação da massa específica com a altitude através do gráfico - fig. 36 [Tubitak, 1994].

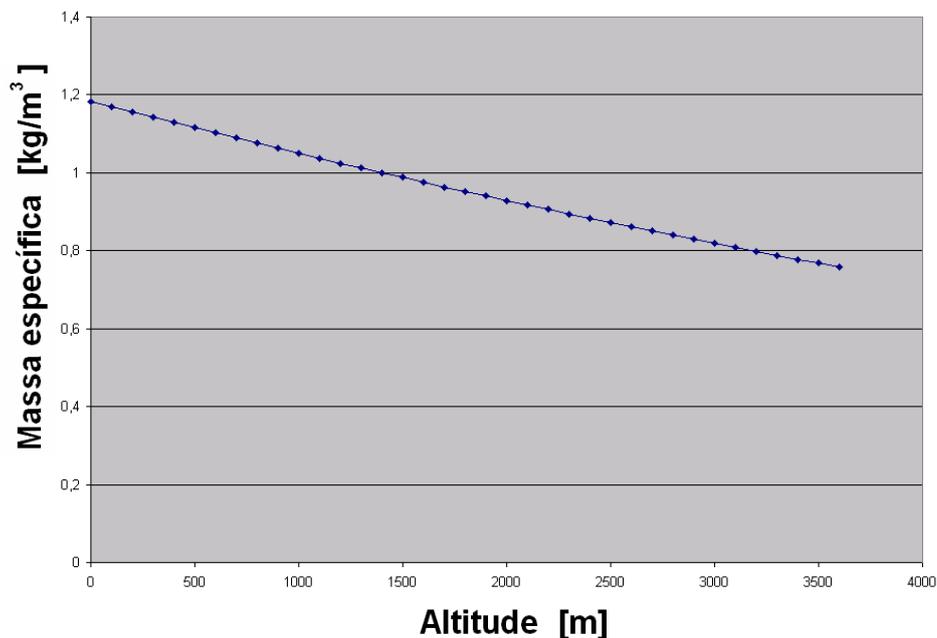


Fig. 36 - Massa específica [kg/m³] x Altitude [m] para Ar 25 [o C]

Através do roteiro de cálculos psicrométricos a seguir, torna-se viável a determinação das variáveis determinadas com auxílio da carta psicrométrica, porém com a possibilidade de variar a pressão atmosférica [Tubitak, 1994]. A rotina *PSICRO*, que será vista adiante, é composta pelas equações a seguir.

- **Pressão de Saturação do Vapor de Água**

$$\alpha = A.T^2 + B.T + C + D.T^{-1} \quad T \text{ [K]}$$

$$49 \leq T < 100 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$A = +0,1246732157 \cdot 10^{-4} \quad C = +0,2702388315 \cdot 10^{+2}$$

$$B = -0,1915465806 \cdot 10^{-1} \quad D = -0,6340941639 \cdot 10^{+4}$$

$$P_{ws} = 1000 \cdot \exp(\alpha) \quad \text{[Pa]} \quad (14)$$

- **Pressão da água pura saturada na temperatura de bulbo úmido**

$$\alpha = A.T^{*2} + B.T^* + C + D.T^{*-1} \quad A = +0,1246732157 \cdot 10^{-4}$$

$$49 \leq T^* < 100 \quad [^{\circ}\text{C}]$$

$$T^* \quad [^{\circ}\text{K}]$$

$$B = -0,1915465806 \cdot 10^{-1}$$

$$C = +0,2702388315 \cdot 10^{+2}$$

$$D = -0,6340941639 \cdot 10^{+4}$$

$$P_{ws}^* = 1000 \cdot \exp(\alpha) \quad [\text{Pa}] \quad (15)$$

- **Taxa de umidade do ar na saturação e temperatura de bulbo úmido**

$$W_s^* = 0,62198 \cdot \frac{P_{ws}^*}{P - P_{ws}^*} \quad [\text{kg H}_2\text{O /kg ar úmido}] \quad (16)$$

- **Taxa de umidade do ar úmido**

$$W = \frac{(2501 - 2,381 \cdot T^*) \cdot W_s^* - (T - T^*)}{2501 + 1,805 \cdot T - 4,186 \cdot T^*} \quad [\text{kg H}_2\text{O/kg Ar úmido}] \quad (17)$$

$$T, T^* \quad [^{\circ}\text{C}]$$

- **Taxa de umidade do ar úmido na saturação**

$$W_s = 0,62198 \cdot \frac{P_{ws}}{P - P_{ws}} \quad [\text{kg H}_2\text{O /kg Ar úmido}] \quad (18)$$

- **Pressão parcial do vapor de água no ar úmido**

$$P_w = \frac{P \cdot W}{W + 0,62198} \quad [\text{Pa}] \quad (19)$$

$$P, P_w \quad [\text{Pa}]$$

- **Temperatura do ponto de saturação**

$$\begin{aligned} \beta = \ln(P_w) & & E = +0,1209512517 \cdot 10^{-4} \\ T_D \text{ [K]} & & F = -0,3545542105 \\ P_W \text{ [Pa]} & & G = +0,5020858479 \cdot 10 \\ & & H = -0,2050301050 \cdot 10^2 \\ & & K = +0,2718585432 \cdot 10^3 \end{aligned}$$

$$T_D = E \cdot \beta^4 + F \cdot \beta^3 + G \cdot \beta^2 + H \cdot \beta + K \quad \text{[K]} \quad (20)$$

- **Entalpia do ar úmido**

$$H_t = T + W \cdot (2501 + 1,805 \cdot T) \quad \text{[kJ/kg Ar úmido]} \quad (21)$$

- **Umidade relativa**

$$\phi = \frac{P_w}{P_{ws}} \quad \text{[%]} \quad (22)$$

- **Grau de saturação**

$$\mu = \frac{W}{W_s} \quad \text{[%]} \quad (23)$$

- **Volume específico**

$$v_e = \frac{0,2871 \cdot (T + 273,15) \cdot (1 + 1,6078 \cdot W)}{P} \quad \text{[m}^3\text{/kg]} \quad (24)$$

2.7. TEORIA DA SECAGEM DE GRÃOS

A Teoria de Secagem de Grãos [PABIS, 1997] é aplicada à secagem de um grão, podendo ser aplicada para uma camada fina ou volume de grãos também. O objetivo desta teoria é criar explicações científicas para o processo de secagem de grãos. De fato, cada teoria de secagem de grãos particular cria uma ponte entre a ciência e o conhecimento prático, e indica as condições para que os avanços tecnológicos possam ser feitos. Iniciaremos o estudo dos fenômenos de transferência de calor e massa (água) da secagem convectiva adotada, ou seja, esta é realizada pelo fluxo de ar externo à superfície do grão. Tomando um grão individualmente, ou dentro de um volume, podemos citar o conjunto de sete axiomas:

1. Existe um conjunto B de corpos sólidos (Grãos) S tal que $S \in B$, e cada S contém certa quantidade de calor e umidade em qualquer ponto do sólido.
2. Existe um gás G (Ar de Secagem) que carrega calor e pode absorver vapor d'água.
3. Há um conjunto $\Omega = \{S, G\}$ tal que forma em torno de $S \in \Omega$ a camada limite L
4. Dentro de cada $S \in \Omega$ e dentro da camada limite L , calor e água podem se movimentar somente por causa de gradientes potenciais de calor e água.
5. Dentro de cada $S \in \Omega$, a água pode se movimentar como líquido, gás (vapor de água) ou ambos.
6. Dentro da camada limite L , a água pode movimentar somente como gás.
7. O fluxo de calor e massa dentro de $S \in \Omega$, e dentro de L , causado por gradientes potenciais de transferência, pode ser expresso pela mesma estrutura formal (equação 25) ou na representação geométrica com níveis de potencial esféricos:

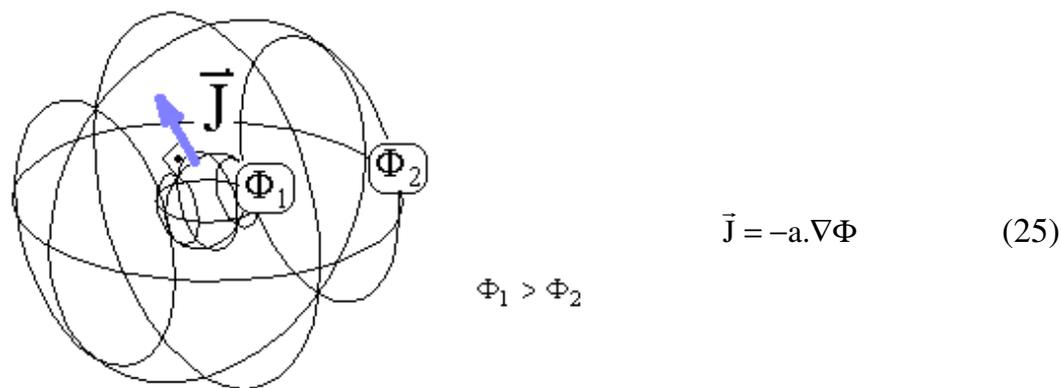


Fig. 37 - Representação geométrica para níveis de potencial esféricos e equação correspondente

2.7.1. Camada Limite L

Analisando o escoamento de ar sobre uma placa plana como exemplo [Fox, 1997], tem-se a formação da camada limite hidrodinâmica a partir da borda pela ação do atrito da superfície da placa com as moléculas que compõem o ar. Portanto, ela se forma pela atuação das forças viscosas. Inicialmente o desenvolvimento da camada limite é laminar, porém a alguma distância crítica da borda de ataque, dependendo do campo de escoamento e das propriedades do fluido, pequenas perturbações no escoamento podem ser amplificadas, ocorrendo um processo de transição até que o escoamento se torne turbulento – fig. 38 e 39. O escoamento turbulento é caracterizado por um movimento aleatório de partículas fluidas.

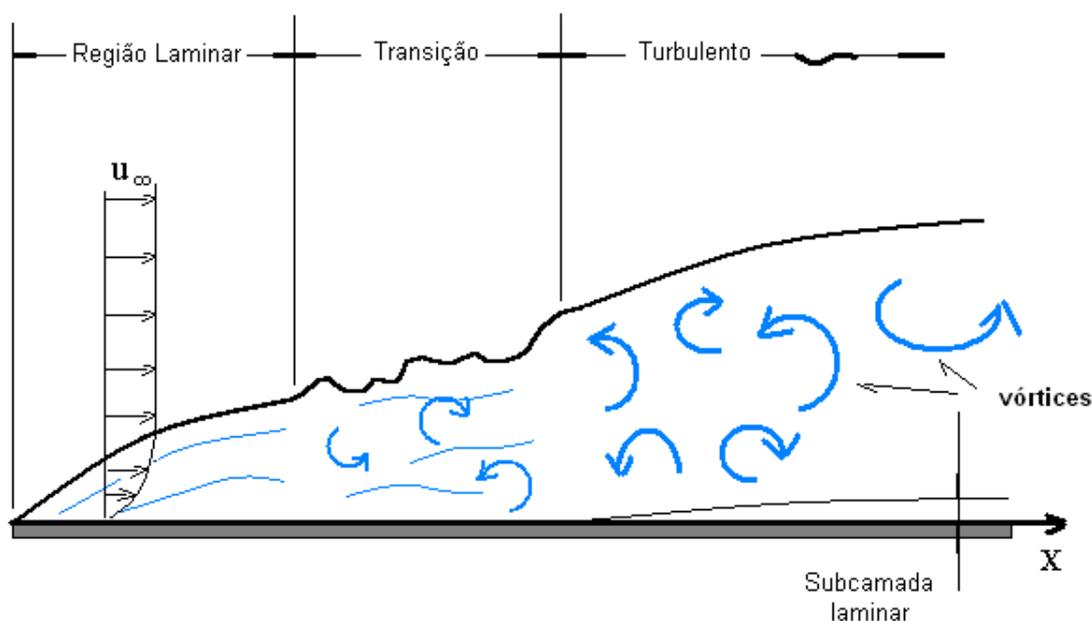


Fig. 38 –Diferentes regimes de escoamento na camada limite sobre uma placa plana [Fox, 1997]

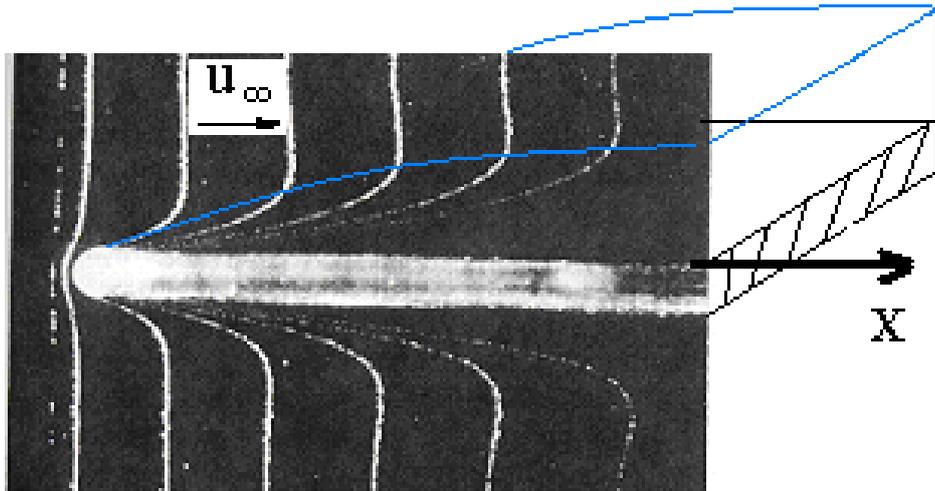


Fig. 39 - Fluxo de água salgada através de placa plana - formação das camada limite laminar [Fox, 1997]

A transição de regime laminar para turbulento para placa plana ocorre quando:

$$Re_x = \frac{u_\infty \cdot x}{\nu} = \frac{\rho \cdot u_\infty \cdot x}{\mu} > 5 \cdot 10^5 \quad (26)$$

u_∞ Velocidade do fluido não perturbado

x Distância a partir da borda de ataque

ν Viscosidade cinemática

μ Viscosidade dinâmica

ρ Massa específica

Re_x Número de Reynolds, é adimensional e estabelece uma relação entre as forças de inércia e viscosas do fluido, ou seja, quando Re_x está acima de $5 \cdot 10^5$ as forças de inércia prevalecem sobre as viscosas e ocorre a formação de vórtices característicos do escoamento turbulento.

Da mesma forma que a camada limite hidrodinâmica se forma pela atuação das forças viscosas (atrito com a superfície da placa e entre camadas de fluido), pode-se definir uma camada limite térmica como a região onde gradientes de temperatura estão presentes no escoamento, os quais são resultado de um processo de transferência de calor entre o fluido e a parede - fig. 40 [Holman, 1995].

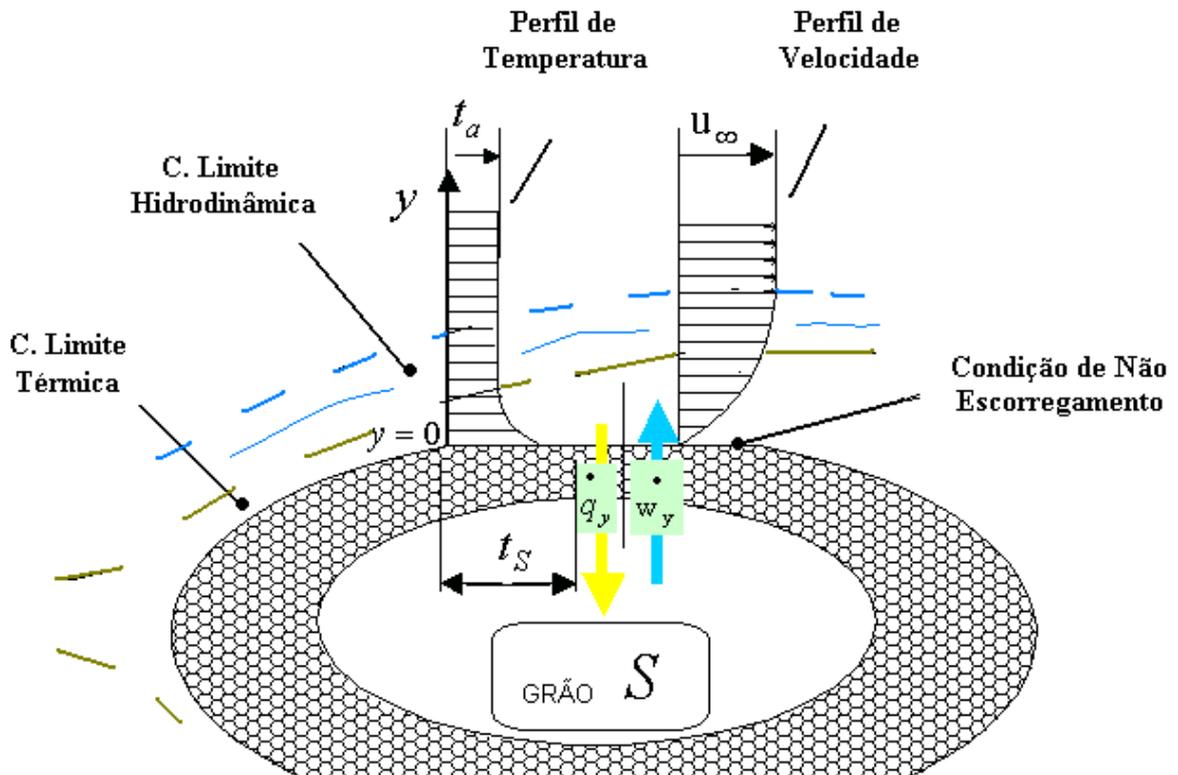


Fig. 40 – Camada Limite Térmica e Hidrodinâmica formando-se sobre a superfície de um grão

Como exemplo, tem-se que o relacionamento entre a camada limite hidrodinâmica e térmica, para superfície plana totalmente aquecida, é dado como :

$$\frac{\delta_t}{\delta_v} = \frac{1}{1,026} \text{Pr}^{-1/3} \quad (27)$$

$$\delta_v = x \cdot \frac{4,64}{\text{Re}_x^{1/2}} \quad (28)$$

$$\text{Pr} = \frac{C_p \cdot \mu}{k} \quad (29)$$

δ_t	Espessura da camada limite térmica
δ_v	Espessura da camada limite hidrodinâmica
Pr	Número de Prandtl
C_p	Calor específico a pressão constante do vapor d'água
μ	Viscosidade
k	Condutividade do vapor d'água

2.7.2. Transferência de Calor na Camada Limite Térmica

O fluxo de calor dentro da camada limite térmica é regido pela equação 30, que segue a lei de Fourier de condução de calor:

$$\dot{q}_L = -K_L \nabla t \quad (30)$$

\dot{q}_L	Fluxo calor dentro camada limite térmica	$[W/m^2]$
K_L	Condutividade térmica na camada limite térmica	$[w / m.K]$
∇t	Gradiente da temperatura	

A transferência de calor na camada limite térmica como foi definido acima não é uma equação conveniente para aplicações práticas. Usando o conceito de camada limite e o fato do fluxo de calor ser perpendicular à superfície do corpo sólido (grão), temos equação 31:

$$\nabla t = \frac{\partial t}{\partial n} = \frac{t_a - t_s}{\delta_t} \quad (31)$$

n	Direção perpendicular à superfície do corpo sólido
t_a	Temperatura do ar de secagem
t_s	Temperatura do corpo sólido

Portanto:

$$\dot{q} = \frac{k_L}{\delta_t} (t_a - t_s) \quad (32)$$

Substituindo $\frac{k_L}{\delta_t}$ pelo coeficiente de transferência de calor convectivo h temos a transferência de calor na camada limite térmica (Eq. 33):

$$\dot{q} = h(t_a - t_s) \quad (33)$$

Normalmente este coeficiente é determinado experimentalmente, devido à grande complexidade matemática para se obtê-lo de forma analítica e à grande complexidade física dos problemas de transferência de calor. Alguns pesquisadores tem dado formulações simplificadas desenvolvidas para leitos porosos de grãos [Löf e Havley, 1948]:

$$h_v \cong 0,655 \left(\frac{\dot{m}_a}{d_e} \right)^{0,7} \quad (34)$$

$$d_e = \sqrt[3]{\frac{6 \cdot V_{ke}}{\pi}} \quad (35)$$

h_v	Coeficiente de transferência de calor volumétrico	$[\text{kW}/\text{m}^3 \cdot \text{K}]$
\dot{m}_a	Fluxo de massa de ar por unidade de área	$[\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}]$
V_{ke}	Volume equivalente de um grão	$[\text{m}^3]$

2. 7. 3. Transferência de Massa (Água) na Camada Limite Hidrodinâmica

A transferência de massa, no caso água em estado vapor, pela camada limite hidrodinâmica é regida pela equação 36 que é similar à equação de transferência do calor – equação 30.

$$\dot{W}_L = -K_{wL} \nabla \Phi_v \quad (36)$$

\dot{W}_L	Fluxo de água (vapor) na camada limite hidrodinâmica	[gr vapor/s.m ²]
K_{wL}	Condutividade vapor de água camada limite hidrodinâmica	[w / m.°K]
Φ_v	Potencial de transferência de vapor	

A lei de Fick para difusão de moléculas é válida dentro de sólidos e também para camada limite:

$$\dot{W}_L = -D_{wv} \nabla C_{wv} \quad (37)$$

D_{wv}	Difusividade do vapor de água na camada limite.	[m ² / h]
∇C_{wv}	Gradiente da concentração do vapor de água na camada limite	[kg / m ³]

Como é usual utilizar-se a umidade específica do ar (Base Seca = grama de água / kg de ar seco), temos:

$$C_{wv} = \rho_{ad} \cdot W \quad (38)$$

ρ_{ad}	Massa específica do ar seco	[kg/m ³]
W	Umidade absoluta ar	$\left[\frac{\text{gr H}_2\text{O}}{\text{kg ar seco}} \right]$

Temos que o produto $\rho_{ad} \cdot W$ representa a concentração de vapor de água no ar ρ_v . Então:

$$C_{wv} = \rho_v \quad (39)$$

Substituindo na equação 37 temos:

$$\dot{W} = -D_{wv} \nabla \rho_v \quad (40)$$

Assumindo que o vapor de água se comporta como um gás ideal, então:

$$P_v = \rho_v R_v T_v \quad (41)$$

P_v	Pressão do vapor na camada limite	[pa]
ρ_v	Massa específica do vapor de água	[kg/m ³]
R_v	Constante particular de gases para vapor de água	[kJ/kmol. ⁰ K]
T_v	Temperatura do vapor d'água	[⁰ K]

Pode-se expressar R_v em termos da constante universal dos gases R_0 e o peso molecular do vapor de água M_v como:

$$R_v = \frac{R_0}{M_v} \quad (42)$$

Combinando 41 e 42 temos que :

$$\rho_v = \frac{P_v M_v}{R_0 T_v} \quad (43)$$

Consequentemente, para a direção normal à superfície:

$$\nabla C_{wv} = \nabla \rho_v = \frac{M_v}{R_0 T_v} \frac{\partial P_v}{\partial n} \quad (44)$$

e, substituindo 44 na 37 [Pabis, 1997]:

$$\dot{W} = -D_{wv} \frac{M_v}{R_0 T_v} \frac{\partial P_v}{\partial n} \quad (45)$$

A direção normal está na direção da espessura da camada limite δ_v , conseqüentemente:

$$\dot{W} = -D_{wv} \frac{M_v}{R_0 T_v} \frac{\partial P_v}{\partial \delta_v} \quad (46)$$

Quando expresso na forma de diferenças finitas, a transferência de água na camada limite pode ser escrita como [PABIS, 1997]:

$$\dot{W} = -D_{wv} \frac{M_v}{R_0 T_v} \frac{P_{vs} - P_{va}}{\delta_v} \quad (47)$$

O fluxo de água é um vetor perpendicular à superfície do grão. Seu sentido depende dos valores de P_{vs} e P_{va} e sua magnitude depende das cinco variáveis:

$$D_{wv}, T_v, P_{vs}, P_{va}, \delta_v$$

D_{wv}	Difusividade do vapor de água na camada limite.	$[m^2 / h]$
P_{vs}	Pressão de formação de vapor na superfície grão	$[Pa]$
P_{va}	Pressão de formação de vapor no ar de secagem	$[Pa]$

Pode-se deduzir que o fluxo de água na camada limite é tanto maior quanto menor for a espessura da camada limite hidrodinâmica (δ_v), além da seguinte relação dos diferenciais de pressão entre a superfície e o ar de secagem:

$P_{vs} > P_{va}$ - Grão sofre perda de água, ou seja, secagem.

$P_{vs} < P_{va}$ - Grão sofre ganho de água, ou seja, umidificação.

2. 7. 4. Análise do Interior do Corpo Sólido S

2. 7. 4. 1. Transferência de Calor

A transferência de calor no interior de corpos sólidos homogêneos é regida pela lei de Fourier para condução de calor (Eq. 48):

$$\dot{q}_s = -K_s \nabla t \quad (48)$$

\dot{q}_s Fluxo de calor em S / tempo / área [kW/m²]

K_s Coeficiente de condutividade térmica em S [w / m.°K]

∇t Gradiente de temperatura

2. 7. 4. 2. Transferência de Massa (Água)

A transferência de massa, no caso água, no interior de corpos sólidos homogêneos é regida pela lei de Fick para difusão de moléculas :

$$\dot{w}_s = -K_{ws} \nabla \Phi_w \quad (53)$$

\dot{w}_s Fluxo de água em S / tempo / área [kW/m²]

K_{ws} Coeficiente de condutividade térmica do vapor d`água em S [w / m.°K]

$\nabla \Phi_w$ Gradiente do potencial de transferência de água

ou, desenvolvendo o gradiente $\nabla \Phi_w$ nos três eixos cartesianos e usando

$$K_{ws} = D_w \cdot c_m \cdot \rho_{sd} :$$

$$\dot{w}_x = -\rho_{sd} D_w \left(\frac{\partial M}{\partial x} + h_t \frac{\partial t}{\partial x} \right) \quad (54)$$

$$\dot{w}_y = -\rho_{sd} D_w \left(\frac{\partial M}{\partial y} + h_t \frac{\partial t}{\partial y} \right) \quad (55)$$

$$\dot{w}_z = -\rho_{sd} D_w \left(\frac{\partial M}{\partial z} + h_t \frac{\partial t}{\partial z} \right) \quad (56)$$

$$\dot{w} = \dot{w}_x + \dot{w}_y + \dot{w}_z \quad (57)$$

O coeficiente de difusão de água [Henderson e Pabis, 1961], está relacionado com a temperatura média de secagem dos grãos como:

$$D_w = D_o \cdot \exp\left(-\frac{E}{RT_G}\right) \quad (58)$$

T_G	Temperatura média dos grãos	[K]
D_o	Coeficiente de difusão na temperatura de 273 K	[m ² /s]
E	Energia de ativação	[kJ/kg]
R	Constante dos gases para vapor de água	[kJ/kg.K]

2. 7. 5. Análise Descritiva da Secagem de Corpos Sólidos Individuais

Há duas formas básicas de cálculo do percentual de umidade de grãos úmidos:

a) Percentual base úmida

$$M = 100 \cdot \frac{W_{\text{grão}}}{S} (\%) \quad (59)$$

b) Percentual base seca

$$M = 100 \cdot \frac{W_{\text{grão}}}{S_d} (\%) \quad (60)$$

S massa total (água + massa seca)

S_d massa seca

$W_{\text{grão}}$ água contida nos grãos

Se forem considerados grãos úmidos, tal que a água livre apareça na sua superfície, e estes grãos forem secos com ar a condições psicrométricas constantes (entalpia e umidade absoluta constantes), pode-se observar as duas etapas principais e distintas no processo de secagem ilustradas - fig. 42 [Pabis, 1997].

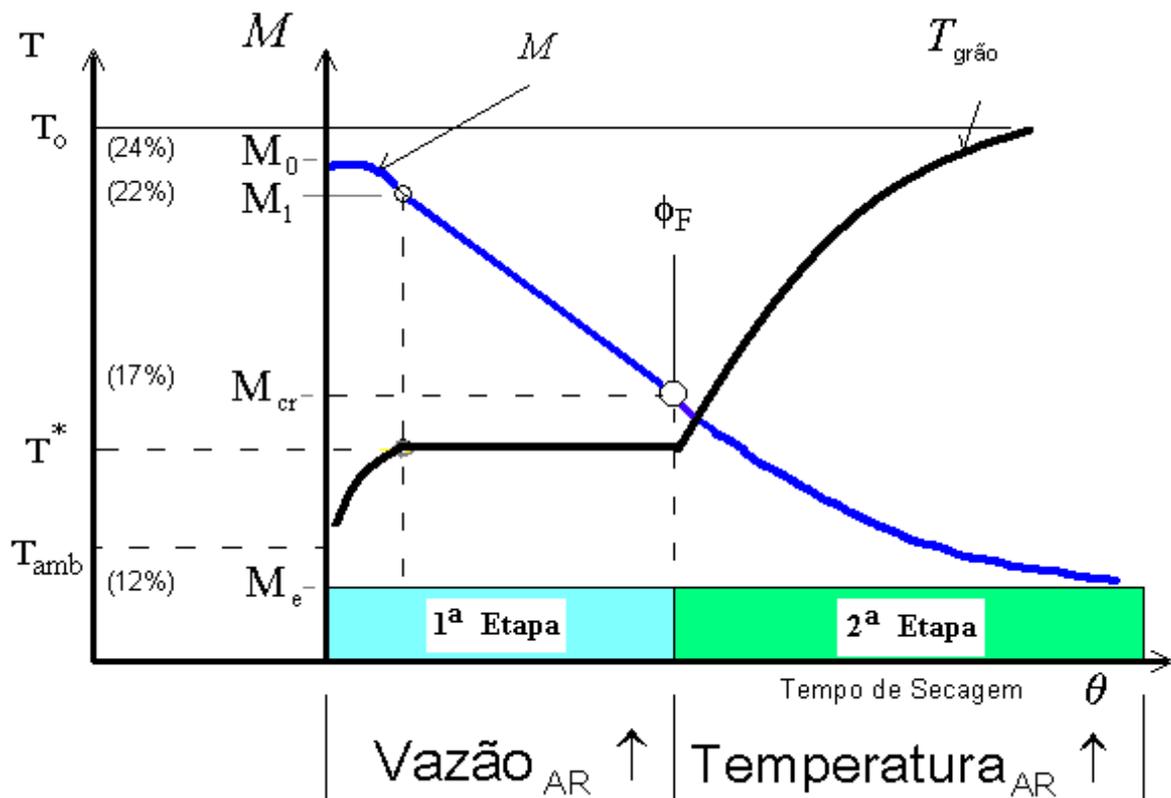


Fig. 42 - Curva característica de taxa de umidade dos grãos (M) x tempo (θ) [PABIS, 1997]

Podemos fazer a seguinte análise, sob o ponto de vista físico da secagem, para os intervalos de umidade descritos na curva do gráfico – fig. 42 :

M_0 (24%) > M > M_1 (22%) - É realizado aquecimento dos grãos que iniciaram o processo de secagem, tendo assim uma baixa taxa de secagem.

M_1 (22%) > M > M_{cr} (17%) - Ocorre a retirada das moléculas de água em condição de maior liberdade dentro do grão, que não se encontram fortemente ligadas à estrutura interna do grão. Prevalece a evaporação sendo necessária maior vazão de ar de secagem

M_{cr} (17%) > M > M_e (12%) - As moléculas de água mais fortemente ligadas à estrutura interna, em posições hidrofílicas das macromoléculas de carboidratos, são removidas. Prevalece a difusão sendo necessária maior temperatura do ar de secagem.

M_e (12%) > M > 0 (%) - São retiradas as moléculas de água unidas às macromoléculas por ligações iônicas (quimisorção). Trata-se de uma ligação muito forte em que a água age como um "ligand", ou seja, um grupo formado por um íon ou molécula ligada ao átomo central de um grupo de coordenação, e não como solvente.



Fig. 43 – Secção transversal de grão de arroz, com 12% de umidade base seca, ampliada 30 vezes

2.8. ILUSTRAÇÃO DA SECAGEM

Para facilitar o entendimento de como o clima (Sol ou Chuva), a altitude do local (Praia ou Montanha) e a etapa do processo de secagem (1ª ou 2ª Etapa) influenciam na secagem dos grãos foram construídas a ilustração - fig. 44.

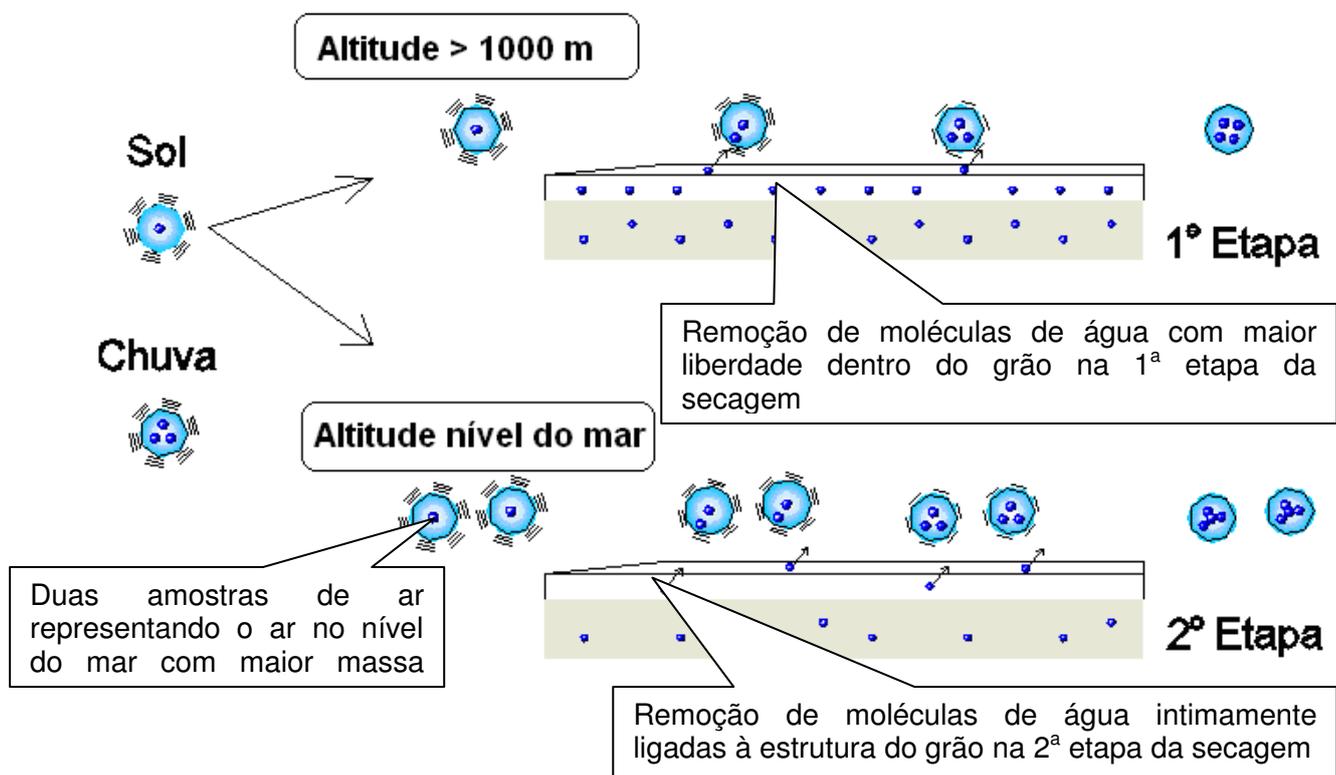


Fig. 44 – Ilustração para secagem de grãos sob várias condições de ambiente, etapa do processo e altitude

A Fig. 45 é uma ilustração para uma amostra de ar com alta temperatura e uma molécula de água, caracterizando um dia de sol, antes de escoar pelos grãos úmidos.

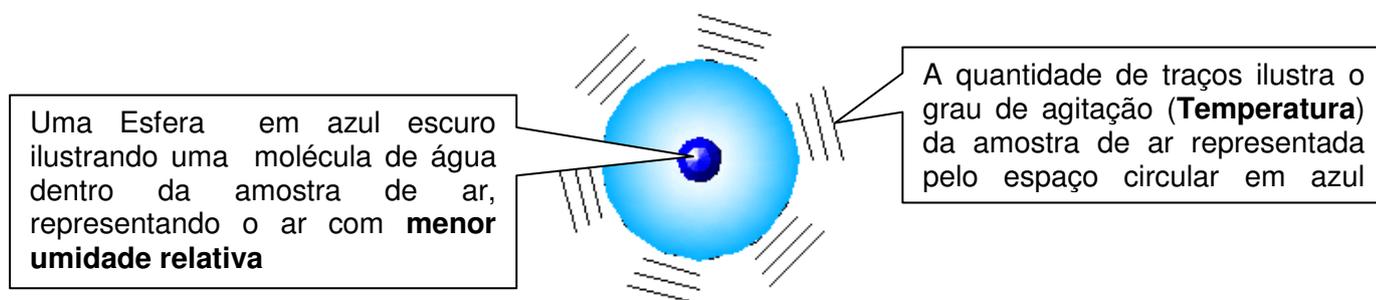


Fig. 45 – Ilustração para uma amostra de ar em alta temperatura e com uma molécula de água

A fig. 46 é uma ilustração para uma amostra de ar com baixa temperatura e quatro moléculas de água, tendo já escoado pelos grãos e realizado a secagem.

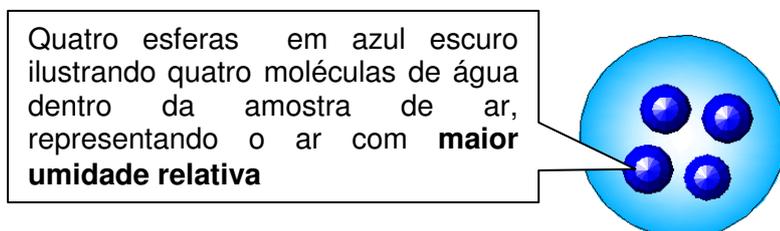


Fig. 46 – Ilustração para uma amostra de ar em baixa temperatura e com quatro moléculas de água

Na figura 47 tem-se ilustração para uma amostra de ar de baixa massa específica, proveniente da montanha (altitude elevada) em dia de sol, escoando sobre a superfície do grão e retirando moléculas de água de sua superfície, ilustrando a 1ª etapa do processo de secagem.

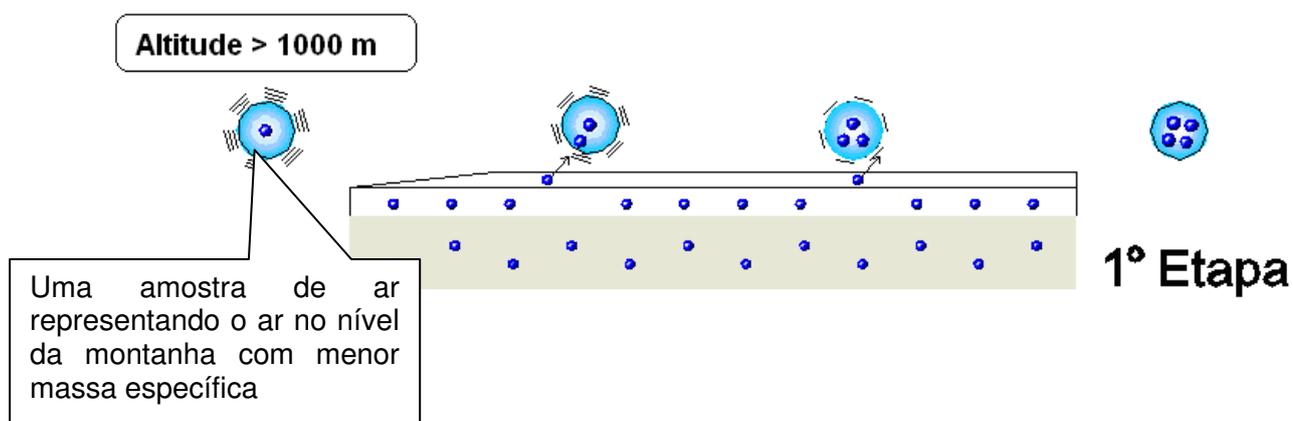


Fig. 47 – Ilustração para uma amostra de ar de baixa massa específica escoando sobre a superfície do grão

Na figura 48 tem-se a ilustração para uma amostra de ar, proveniente da praia (altitude nível do mar) em dia de sol, escoando sobre a superfície do grão e retirando moléculas de água de sua estrutura interna, ilustrando a 2ª etapa do processo de secagem.

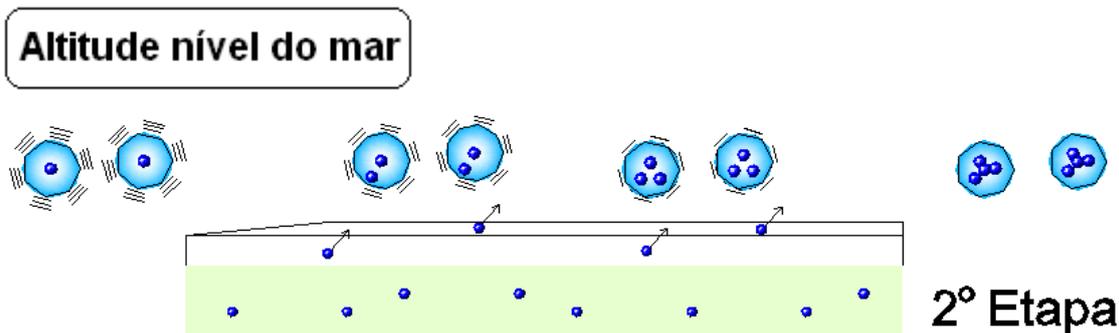


Fig. 48 – Ilustração para amostra de ar escoando sobre o grão e retirando moléculas de água da estrutura interna

A Fig. 49 mostra uma comparação dos valores de entalpia e umidade relativa do ar de secagem, submetidos à elevação de temperatura de 25 para 70 °C, entre secagem em dia de sol e chuva em local de mesma altitude e pressão atmosférica, mostrando que o valor de temperatura somente não representa a energia térmica contida no ar, a qual participará realmente do processo de secagem.

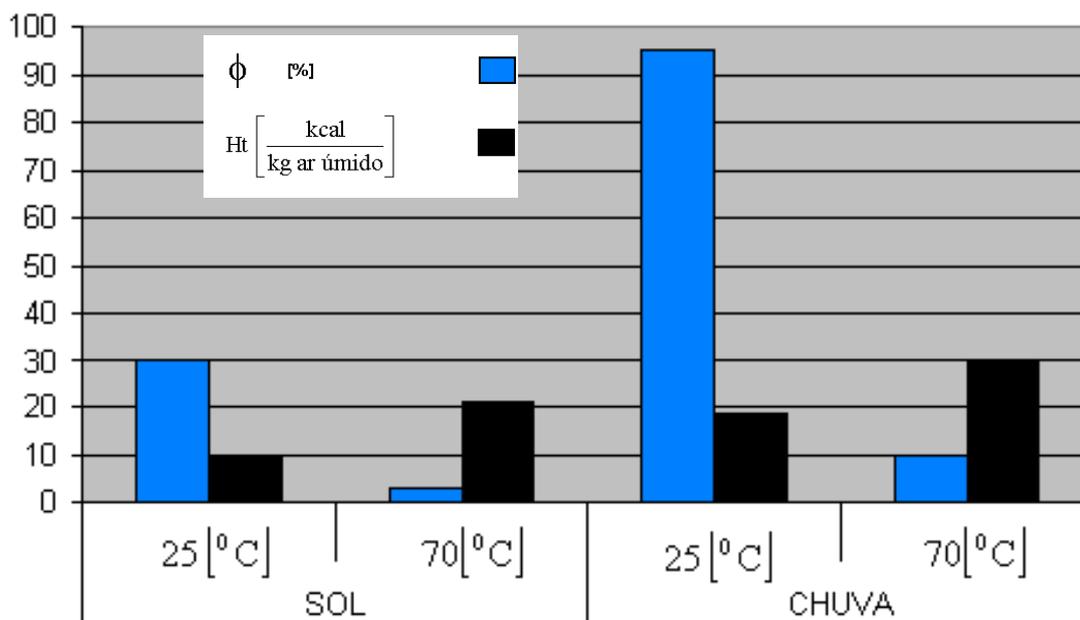


Fig. 49 - Valores de Entalpia (Ht) e Umidade Relativa (Φ) do ar de secagem dia de sol e de chuva para Guaratinguetá Altitude: 572 m P_{atm} : 712 [mmHg]

No gráfico da figura 50 [Weber, 2005] pode-se ter uma visão da variação da temperatura e umidade relativa do ar ambiente ao longo de 24 horas, justificando a real necessidade da consideração das condições termodinâmicas do ar ambiente durante o processo de secagem.

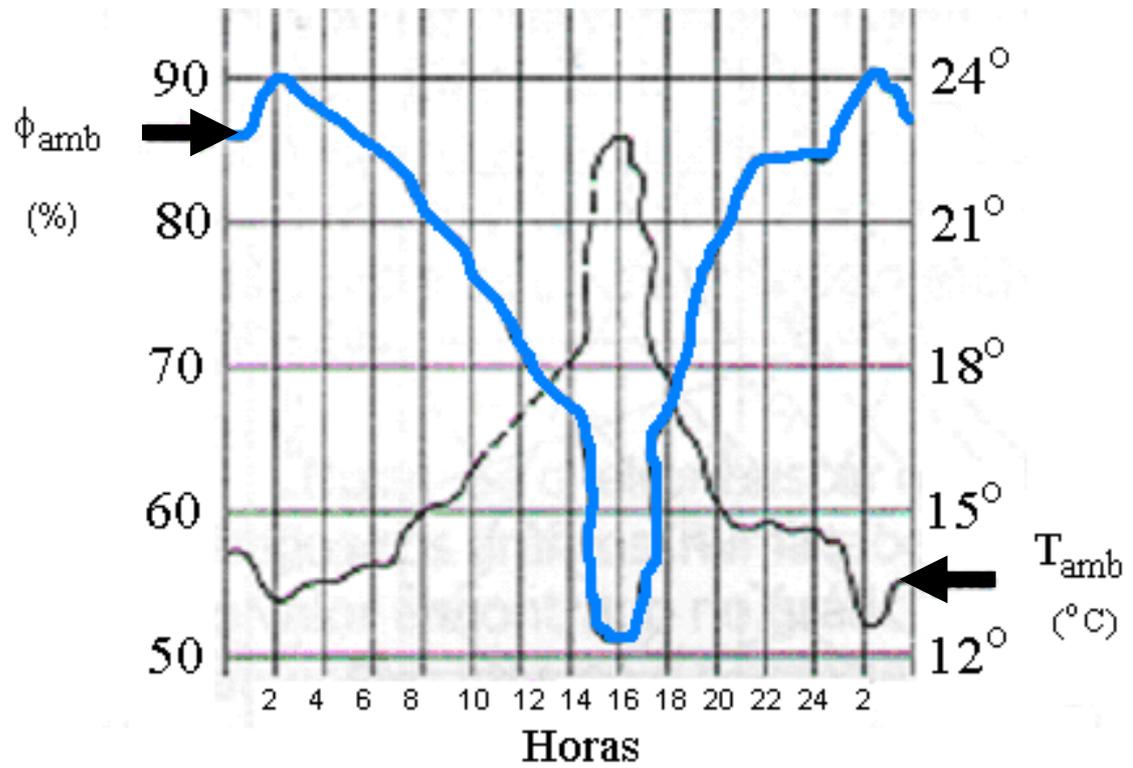


Fig. 50 - Variação da temperatura e umidade relativa do ar ambiente ao longo de 24 horas [Weber, 2005]

3. METODOLOGIA

3.1. MODELO MATEMÁTICO DA SECAGEM

Uma forma de criar um modelo matemático para a secagem de grãos é através da construção de um conjunto de equações diferenciais as quais são constituídas de funções e suas derivadas. Não adotaremos esta linha de trabalho, levando-se em consideração a complexidade envolvida na secagem, principalmente na determinação do coeficiente de película (h) que tem peso significativo nos mecanismos de transferências de calor e água; porém apresentaremos esta linha de pesquisa que é adotada por muitos pesquisadores [Pabis, 1997].

3.1.1. Volume de Controle Elementar no Leito Fixo de Secagem

Cria - se um volume de controle elementar de formato cúbico (fig. 51), o qual está teoricamente cheio de grãos fixos em relação ao volume, caracterizando um leito fixo de secagem, tornando assim possível o equacionamento dos fenômenos de transferência de calor e água que envolvem o ar de secagem e os grãos úmidos.

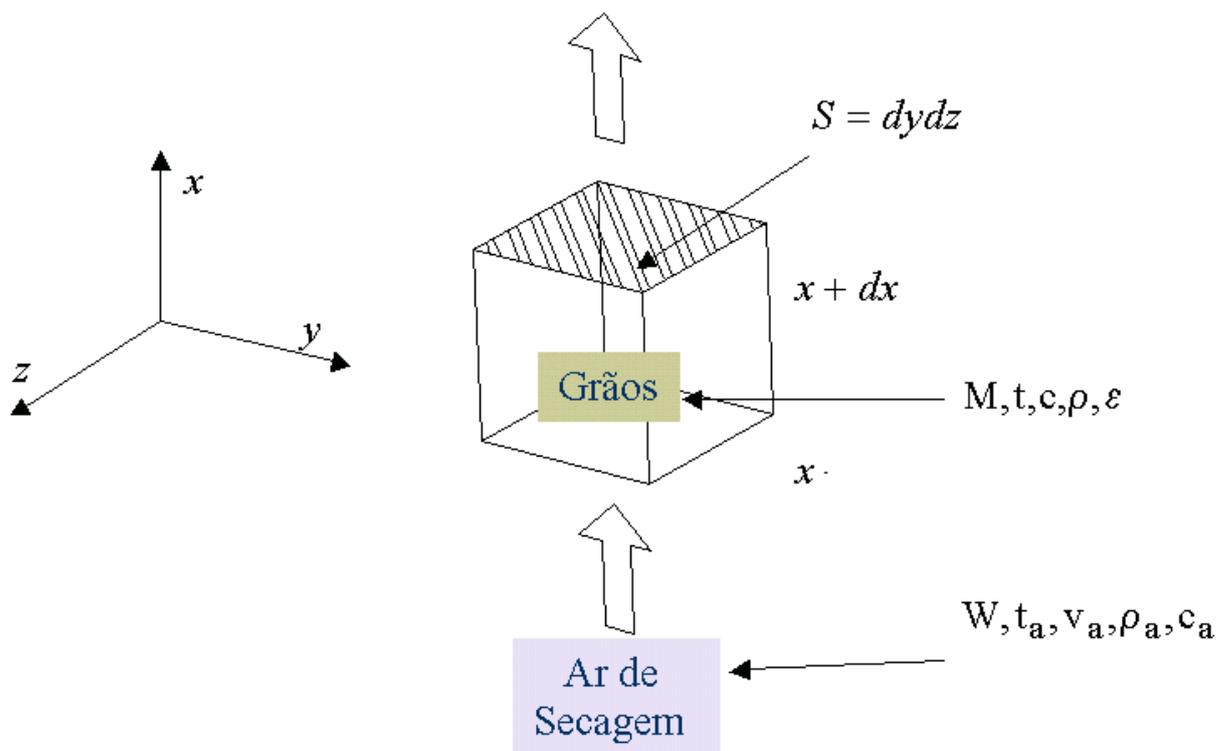


Fig. 51- Volume de controle de formato cúbico cheio de grãos sendo transpassado pelo ar de secagem

Admitindo-se as seguintes premissas:

1. A contração volumétrica do leito é desprezível; isto se deve ao fato de se ter perda de massa (água) do leito em estudo, porém, para curtos intervalos de tempo pode - se desprezar este efeito.
2. Os gradientes de temperatura dentro dos grãos em uma mesma temperatura são desprezíveis; isto se faz necessário para que se possa adotar um coeficiente de difusão constante (D) para o intervalo de tempo em consideração.
3. As transferências de calor e massa por condução entre os grãos em uma mesma temperatura são desprezíveis; isto se faz necessário para eliminar estas variáveis de fluxo através do volume de controle e simplificar o equacionamento.
4. O fluxo de ar e o fluxo de grãos são uniformes em qualquer lugar num mesmo plano, o que é bem razoável para os curtos intervalos de tempo assumidos.
5. $\frac{\partial T}{\partial \theta}$ e $\frac{\partial W}{\partial \theta}$ são desprezíveis se comparados a $\frac{\partial T}{\partial x}$ e $\frac{\partial W}{\partial x}$, o que é razoável admitir, na medida que o ar de secagem está sujeito a absorver muito mais umidade e perder calor (reduzir temperatura) ao deslocar-se pelos grãos.
6. As paredes da caixa são adiabáticas com calor específico desprezível, e serão consideradas revestidas com isolamento térmico, eliminando o fluxo de calor para fora do leito, tornando esta condição de contorno constante.
7. Calores específicos do ar e grão úmidos são constantes durante curtos intervalos de tempo, para evitar complexidade das equações, além de não ocasionar erros consideráveis, na medida que se tem um método numérico suficientemente robusto para dar suporte ao número de iterações ótimo.
8. A equação precisa de camada fina e a isoterma de equilíbrio de taxa de umidade são conhecidos, são premissas básicas para utilizarmos a teoria matemática de secagem de corpos sólidos individuais.

3.1.2. Modelo Bakker-Arkema [Pabis, 1997]

A importância dos cálculos dos valores de entalpia do grão e do ar se deve principalmente ao fato de termos mudança de fase da umidade que está sendo retirada, passando de fase líquida para fase gasosa através da evaporação. O Modelo Bakker-Arkema [Pabis, 1997] é composto pelas equações 61 e 62.

Balço de Entalpia do Ar

$$\frac{\partial t_a}{\partial x} = \frac{-h \cdot a_p}{G_a \cdot c_a + G_a \cdot c_v \cdot W} (t_a - t) \quad (61)$$

Balço de Entalpia do Grão

$$\frac{\partial t}{\partial \theta} = \frac{h \cdot a_p \cdot (t_a - t)}{\rho \cdot c + \rho \cdot c_w \cdot M} + \frac{h_v + c_v \cdot (t_a - t)}{\rho \cdot c + \rho \cdot c_w \cdot M} \cdot G_a \cdot \frac{\partial W}{\partial x} \quad (62)$$

3.1.3. Modelo Spencer [Pabis, 1997]

O modelo construído por Spencer [Pabis, 1997] é composto pelas equações 63, 64 e 65.

Equação da Temperatura do Ar:

$$c_a \cdot (G_a \cdot \frac{\partial t_a}{\partial x} + \varepsilon \cdot \rho_a \cdot \frac{\partial t_a}{\partial \theta}) = h \cdot (t - t_a) \quad (63)$$

Equação da Temperatura do Grão:

$$\frac{\partial t}{\partial \theta} = \frac{h \cdot (t_a - t) + h_v \cdot (1 - \varepsilon) \cdot \rho \cdot \frac{\partial M}{\partial \theta}}{(c + c_w \cdot M) \cdot (1 - \varepsilon) \cdot \rho} \quad (64)$$

Balço da Taxa de Umidade do Ar

$$v_a \cdot \frac{\partial \rho_v}{\partial x} + \varepsilon \cdot \frac{\partial \rho_v}{\partial \theta} = \rho \cdot (1 - \varepsilon) \cdot \frac{\partial M}{\partial \theta} \quad (65)$$

Sendo:

t	Temperatura do corpo sólido	$[^{\circ}\text{C}]$
t_a	Temperatura do ar de secagem	$[^{\circ}\text{C}]$
h	Coefficiente de transferência de calor convectivo	$[\text{w} / \text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{K}]$
a_p	Área da superfície da partícula / unidade de volume	$[\text{m}^2 / \text{m}^3]$
G_a	Fluxo mássico do ar de secagem	$[\text{kg}/\text{s}]$
C_a	Calor específico do ar	$[\text{cal} / \text{Kg} \cdot ^{\circ}\text{C}]$
c_v	Calor específico do vapor	$[\text{cal} / \text{Kg} \cdot ^{\circ}\text{C}]$
C_w	Calor específico da água	$[\text{J}/\text{kg} \cdot \text{K}]$
M	Conteúdo de umidade do corpo sólido base úmida	$[\%]$
W	Umidade absoluta ar	$[\frac{\text{gr H}_2\text{O}}{\text{kg ar sec o}}]$
ρ	Massa específica dos grãos	$[\text{Kg}/\text{m}^3]$
ϵ	Porosidade do leito de grãos	$[\%]$
ρ_a	Massa específica do Ar	$[\text{Kg}/\text{m}^3]$
θ	Tempo transcorrido no processo de secagem	$[\text{s}]$
h_v	Coefficiente de transferência de calor volumétrico	$[\text{kW} / \text{m}^3 \cdot \text{K}]$

3.2. SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

Os modelos matemáticos ou estruturas abstratas têm por objetivo expressar o mesmo comportamento dos sistemas reais de secagem quando submetidos às mesmas condições de trabalho. Estes modelos necessitam passar por um processo de validação através da comparação dos resultados obtidos através da simulação computacional, a qual se dá pela resolução numérica do conjunto de equações diferenciais, com os resultados experimentais provenientes do protótipo (sistema real), proporcionando confiabilidade ao modelo matemático. Na figura 52 tem-se um exemplo de diagrama de fluxo de informação de modelo matemático x protótipo.

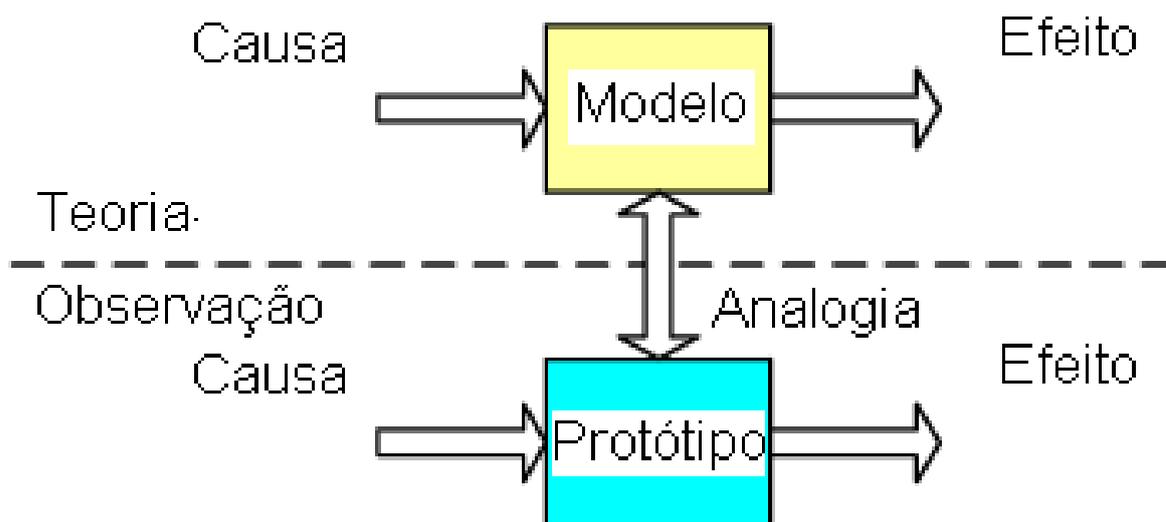


Fig. 52 - Exemplo de Diagrama do Fluxo de Informação de Modelo Matemático

Uma vez que o Modelo Matemático está validado logicamente e empiricamente, simulações computacionais podem ser usadas para aplicações práticas. A principal vantagem da simulação computacional é substituir experimentos empíricos de custo elevado e alto consumo de tempo. Em adição, simulações computacionais tornam possíveis experimentos que seriam muito difíceis ou até

impossíveis sob condições naturais. A simulação computacional de modelos de secagem de grão pode ter os seguintes objetivos

- a) Obter um conhecimento geral sobre o processo de secagem de grãos modelado.
- b) Prever desempenho do processo sob condições determinadas ou aleatórias.
- c) Possibilidade de projetar um secador novo ou melhorar os já existentes.
- d) Otimizar o controle do processo de secagem de grãos.(Foco do presente trabalho)

3. 3. MATERIAL UTILIZADO

Foi utilizado:

- Arroz em casca tipo 2 irrigado
- Faixa de umidade (b. u.) de 22 a 23 %
- Safra de 2003
- Origem: Fazenda das Palmeiras – Capituba – Guaratinguetá - SP

Os grãos foram armazenados hermeticamente em garrafas plásticas tipo PET, as quais foram condicionadas em geladeira sob temperatura de aproximadamente 5 °C, porque abaixo de 4 °C ocorreria dilatação da umidade e possível degradação da estrutura interna dos grãos.

3. 4. EQUIPAMENTOS

3. 4. 1. **Secador protótipo para secagem de 5 litros de grãos**

Com objetivo de determinar a distribuição da pressão e temperatura, parâmetros básicos para cálculo da condição termodinâmica do ar, dentro da camada de grãos situada entre as chapas perfuradas por onde passa o ar de secagem (Fig.53), realizando a secagem propriamente dita, no leito do sistema pneumático proposto para

secagem de quantidades maiores (3000 kg de grãos), foi construído o experimento mostrado nas figuras 54 e 55.

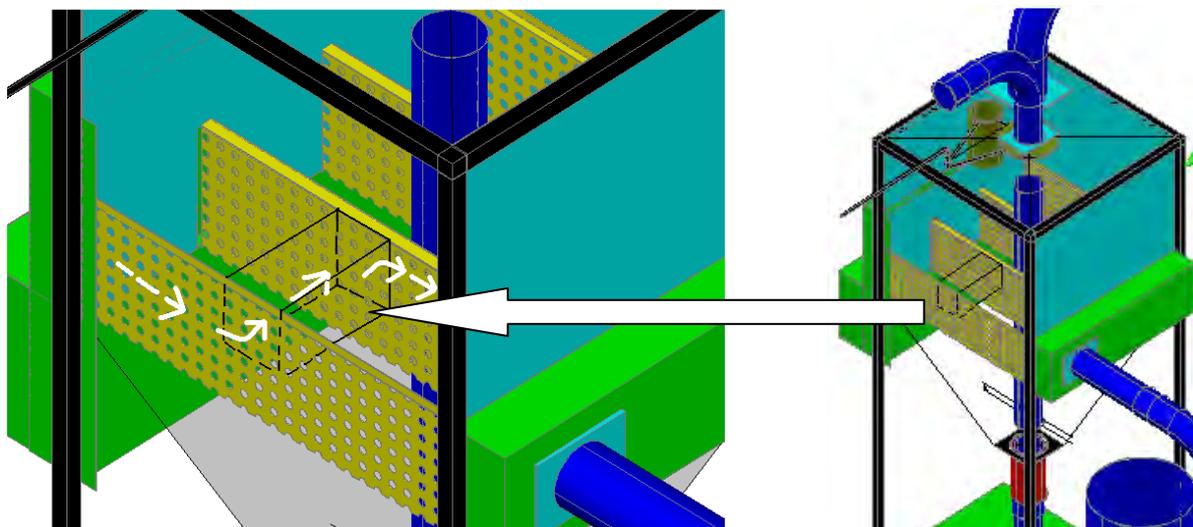


Fig. 53 – Localização do secador protótipo de 5 litros entre as passagens de ar do sistema de 150 litros

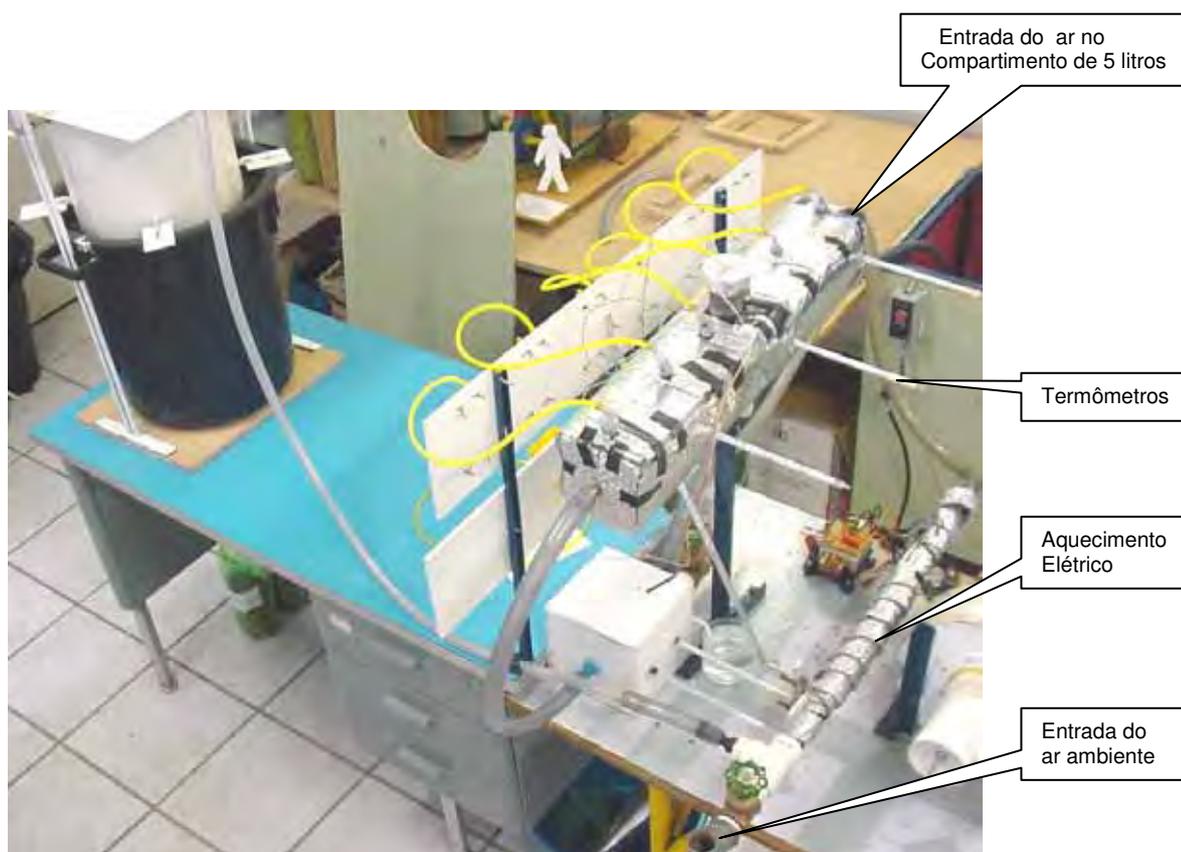


Fig. 54 – Montagem do volume para secagem de 5 litros de grãos I

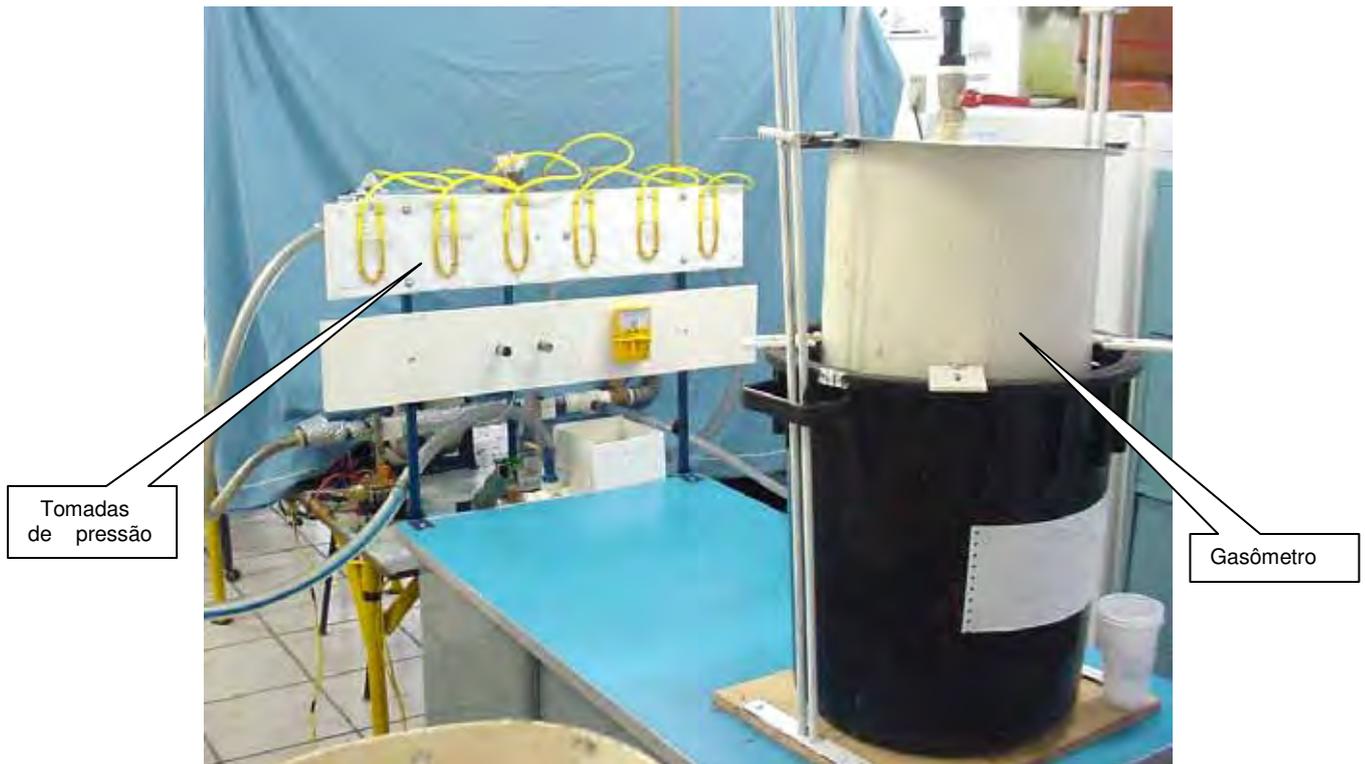


Fig. 55 – Montagem do volume para secagem de 5 litros de grãos II

O **objetivo** deste experimento foi elucidar as seguintes questões:

- Que deslocamento o ar de secagem percorre sem atingir o ponto de saturação?
- Qual a perda de carga imposta pelo meio poroso dos grãos?
- Qual a entalpia ótima do ar de secagem na entrada da camada?
- Qual o fluxo mássico mínimo de ar para que o ar de secagem saia da camada de grãos o mais próximo possível do ponto de saturação ($\phi \approx 100\%$)?

O funcionamento deste experimento se inicia com o ar ambiente recebendo calor através de aquecimento elétrico e atingindo a entrada do secador protótipo em formato de paralelepípedo e capacidade para 5 litros (fig. 56).

O ar aquecido atravessa o recipiente completamente cheio de grãos cedendo calor e ganhando umidade. Os valores de pressão e temperatura são medidos por termômetros e manômetros em U (fig. 57).



Fig. 56 – Termômetros inseridos no volume de 5 litros de grãos

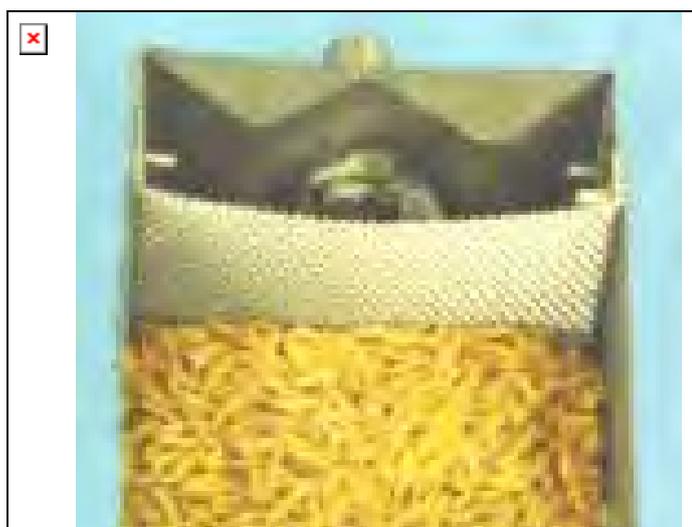


Fig. 57 - Vista interior do volume de 5 litros mostrando a chapa perfurada

No diagrama da Fig. 58 se pode ver a bomba de vácuo de palhetas de grafite responsável pela sucção do ar ambiente para dentro do sistema. O ar recebe energia térmica através de aquecimento elétrico e segue pelo volume de grãos que possui 6 tomadas de pressão e 3 termômetros.

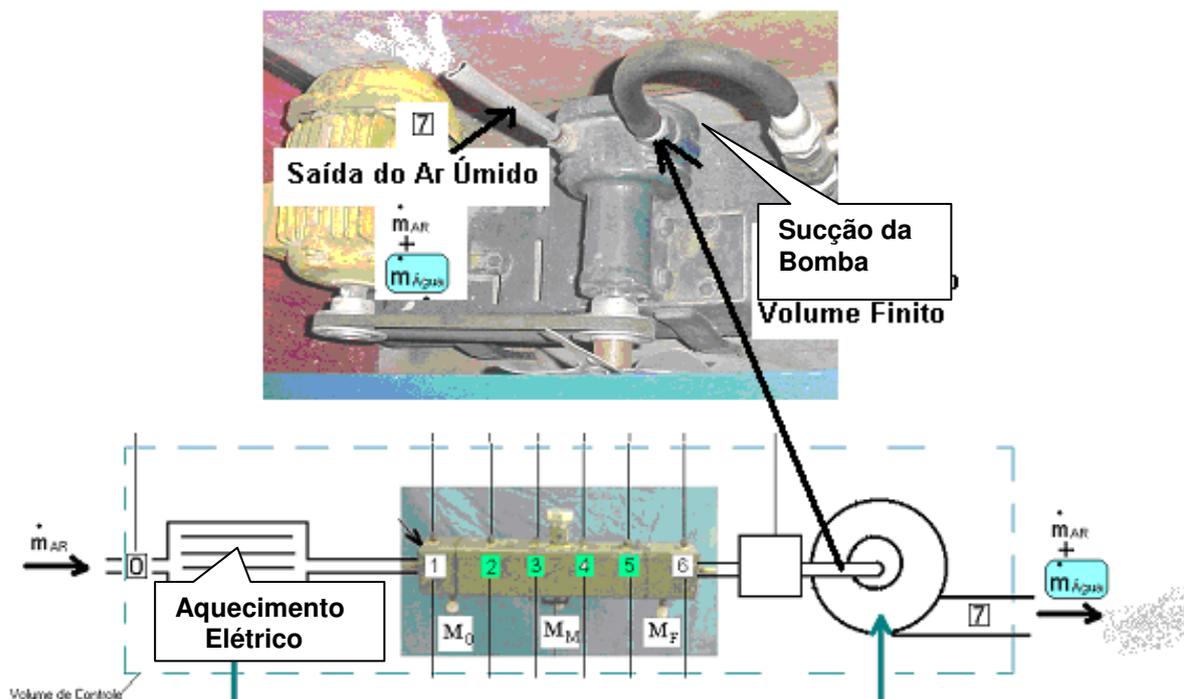


Fig. 58 – Esquema do volume de 5 litros mostrando a bomba de vácuo responsável pela sucção do ar

Os fluxos volumétricos de ar são medidos através de um gasômetro com isolamento por lâmina de água (Fig. 59) com capacidade para armazenar 30 litros de ar no seu interior (temperatura ambiente 24 °C, pressão atmosférica 712 [mmHg]).



Fig. 59 – Gasômetro para medição de volume de ar

3. 4. 2. Sistema pneumático para secagem de 150 litros de grãos

Para testes experimentais do Sistema Pneumático para Secagem de 150 litros de grãos, o qual denominamos SEGÁS 150 L, foi construído o protótipo ilustrado na figura 60.

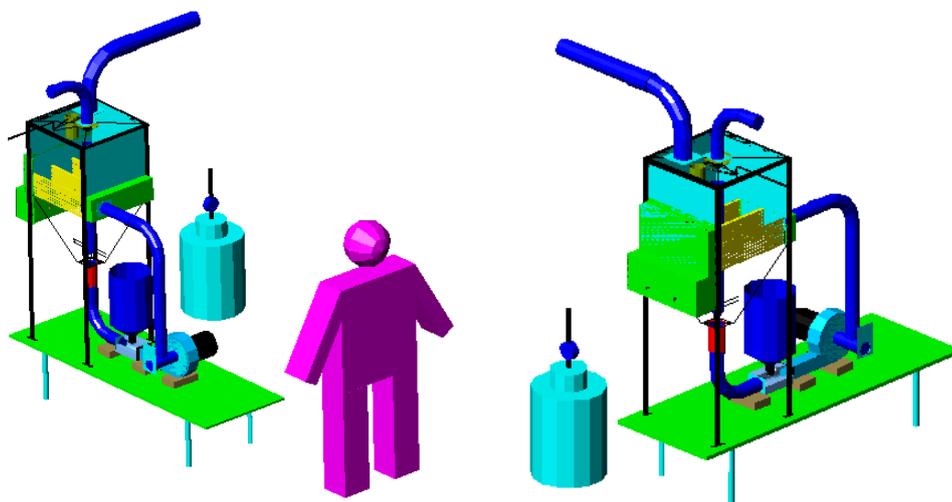


Fig. 60 - Desenho 3 D do protótipo com capacidade para processar 150 litros de grão.

O protótipo (Fig. 61) foi construído com objetivo de realizarmos os ensaios de todas as operações pertinentes ao sistema de secagem, ou seja, carga, secagem, descarga e limpeza utilizando-se somente fluxo de ar.



Fig. 61 - Protótipo com capacidade para processar 150 litros de grão.

3. 5. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3. 5. 1. Secador protótipo para secagem de 5 litros de grãos

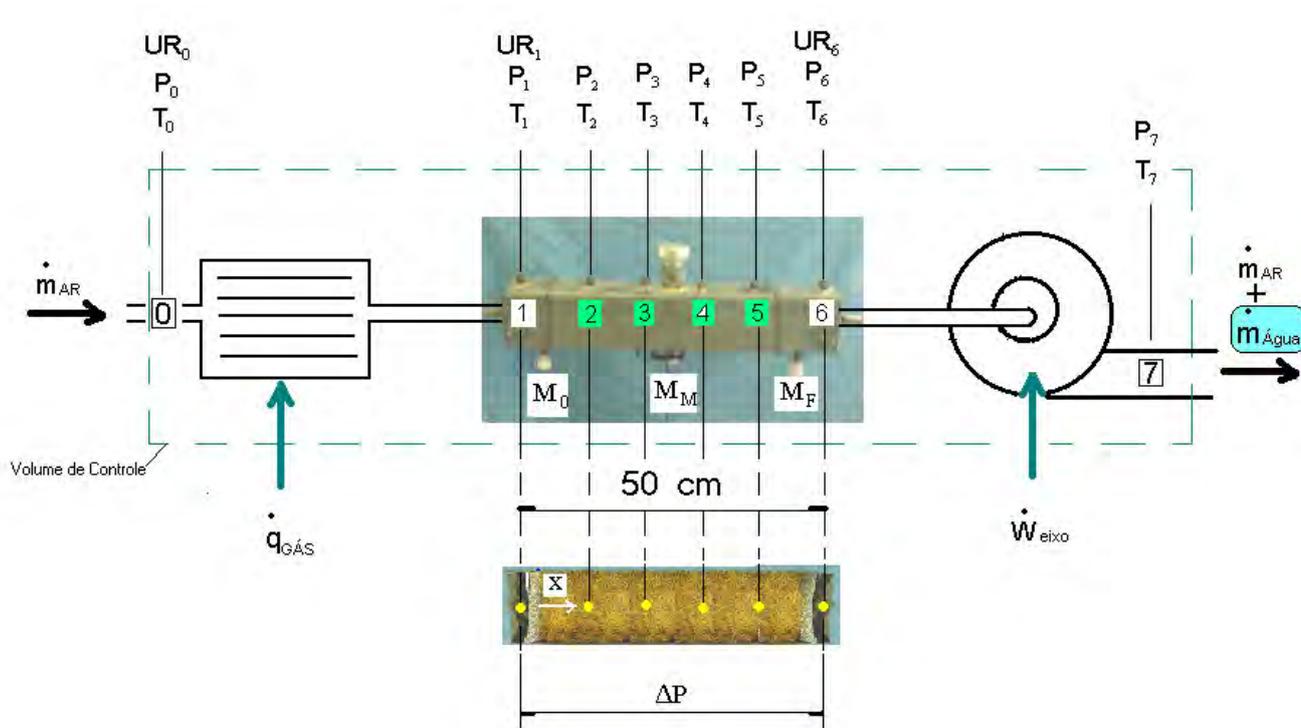


Fig. 62 - Fluxograma do secador protótipo para secagem de 5 litros de grãos.

UR Umidade relativa ar ambiente (0), ar aquecido (1) e ar úmido após passar pelos grãos (6)

Tem-se a seqüência de passos para operação do secador protótipo de 5 litros :

- Retira-se 3 garrafas (2 litros) de grãos da geladeira 24 horas antes do início do teste
- Preenche-se o secador protótipo completamente de grãos
- Promove-se o ajuste do fluxo mássico de ar, conectando-se o gasômetro na entrada do aquecimento de ar, estando o gasômetro cheio de ar (30 litros de ar)
- Liga-se a bomba de vácuo e procede-se o ajuste
- Após o ajuste, desconecta-se o gasômetro e passa-se a sugar ar do ambiente
- Liga-se o aquecimento elétrico

- A partir deste ponto, faz-se a coleta dos dados de pressão e temperatura de 50 em 50 minutos através da leitura nos manômetro em U, com água com fluido de trabalho, e nos termômetros inseridos em três pontos do secador protótipo (Fig. 63 e 64).



Fig. 63 - Manômetros em U

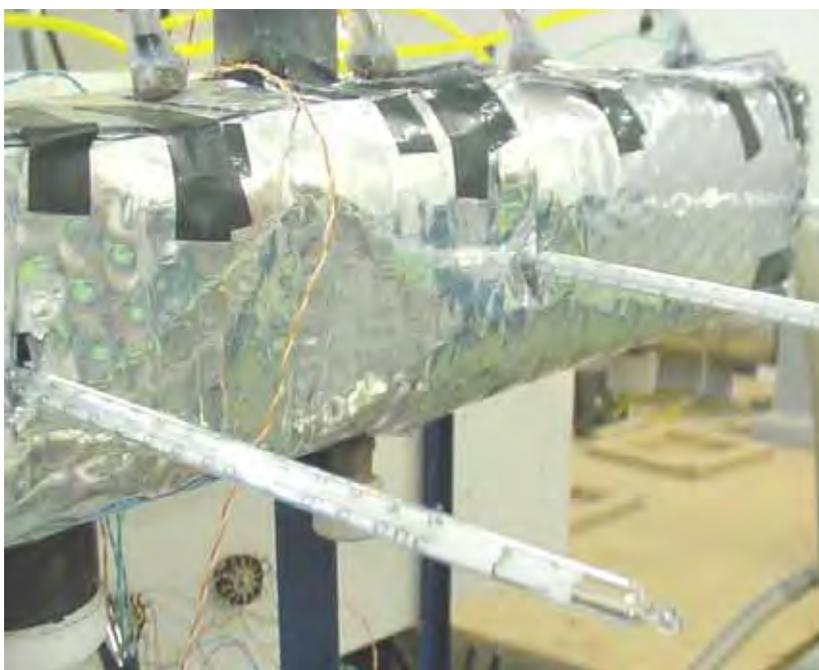
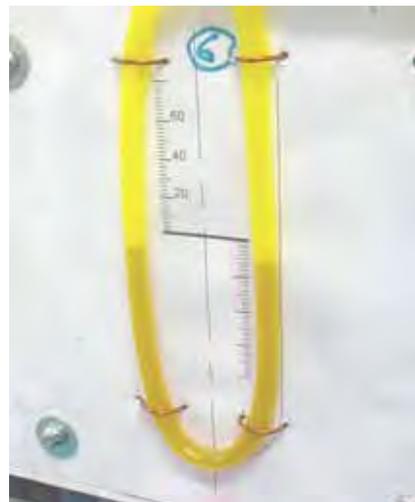


Fig. 64 - Termômetros

Os valores são anotados em formulário como mostrado na figura 65.

Ponto	P [mmca]	Tbu [oC]	Tbs [oC]	Sensor Ω	P [mmca]	Tbu [oC]	Tbs [oC]	Sensor Ω			
0		13,5	19			14	20				
1	53		42	7,5	55		72	4,8			
2	57			29	59			18			
3	59		17	32	60		28	18			
4	62			32	62			17			
5	68		16	32	66		25	23			
6	77			29	78			20			
7	141	17,4	17,5		142		24				
θ		0		$T_{GR\tilde{A}O}$	25		θ 50		$T_{GR\tilde{A}O}$	9,5	
Ponto	P [mmca]	Tbu [oC]	Tbs [oC]	Sensor Ω	P [mmca]	Tbu [oC]	Tbs [oC]	Sensor Ω			
0		14,5	20			14,2	20				
1	55		71,5	5	57		71	5			
2	59			11	60			9,5			
3	59		40	13	60		43	11			
4	61			11	62			9,5			
5	64		32	13	64		40	10			
6	74			18	70			14			
7	138	25,5	26,5		135	25	31,5				
θ		100		$T_{GR\tilde{A}O}$	8		θ 150		$T_{GR\tilde{A}O}$	8	
Ponto	P [mmca]	Tbu [oC]	Tbs [oC]	Sensor Ω	P [mmca]	Tbu [oC]	Tbs [oC]	Sensor Ω			
0		14,5	20								
1	58		70	5							
2	61			8,5							
3	60		44	10							
4	60			8,5							
5	63		43	9,5							
6	67			12							
7	134	25	35,5								
θ		200		$T_{GR\tilde{A}O}$	8		θ 250		$T_{GR\tilde{A}O}$		

Fig. 65 - Formulário de anotação dos dados dos testes com grãos dentro do secador protótipo de 5 litros

- Concomitantemente é realizada a coleta de amostras de grãos através de sangria em pontos localizados no início, meio e final do secador protótipo (Fig. 66).



Fig. 66 - Coleta de amostra de grãos no secador protótipo de 5 litros

- Após determinação da umidade base úmida das amostras, os valores são anotados em formulário como mostrado na figura 67.

PESAGEM DAS AMOSTRAS							
Frasco	M. Frasco ^g	m_u ^g	m_s ^g	M_{wb} [%]	θ [min]		
0	57,661	87,481	80,641	22,9	0		
1	59,067	64,354	63,745	11,5	50	O	
2	55,844	67,403	64,59	24,3		M	
3	58,845	65,247	63,667	24,7		F	
4	58,739	65,735	65,21	7,5	100	O	
5	59,457	67,005	65,386	21,4		M	
6	59,313	65,254	63,784	24,7		F	
7	59,034	68,044	67,532	5,7	150	O	
8	58,308	69,999	68,119	16,1		M	
9	59,023	72,012	69,215	21,5		F	
10	58,659	70,417	69,841	4,9	200	O	
11	58,482	74,852	72,978	11,4		M	
12	59,091	66,358	64,925	19,7		F	
13	59,098			0,0	250	O	
14	58,901			0,0		M	
15	58,432			0,0		F	
16	59,083			0,0	300	O	
17	59,216			0,0		M	
18	58,437			0,0		F	

Fig. 67 - Formulário de anotação dos dados de medição da massa de amostras de grãos em balança analítica (O/M/F – início, meio e fim do secador protótipo de 5 litros)

3. 6. SISTEMA DE GERENCIAMENTO TERMODINÂMICO

Tendo em vista as diferentes formas de abordagem do problema “Secagem de Grãos”, seja com equações analíticas de primeiro grau ou equações diferenciais envolvendo as funções pertinentes e suas derivadas, há que se encontrar uma solução plausível para este problema tão complexo e repleto de dificuldades matemáticas.

A maior contribuição deste trabalho de pesquisa será a estruturação do Sistema de Gerenciamento Termodinâmico (**S. G. T.**) que utiliza recursos computacionais e sensores para medir e armazenar as informações básicas do processo de secagem em tempo real e promover o gerenciamento eficiente da secagem, através da determinação dos valores:

• Q_{calor}	Potência térmica para aquecimento do ar de secagem	[kw]
• m_{secagem}	Fluxo mássico do ar de secagem	[kg/s]
$V_{\text{circulação}}$	Velocidade de circulação dos grãos dentro do leito	[m/s]

que resultem em taxas de transferência de calor e água ótimas para cada tipo de grão:

$\frac{\partial M}{\partial \theta}^{\text{Ótimo}}$	Taxa de transferência ótima de água dos grãos para ar	[grama /s]
$\frac{\partial H_t}{\partial \theta}^{\text{Ótimo}}$	Taxa de transferência ótima de calor do ar para os grãos	[kw]

, ou seja, que proporcionem os menores valores dos indicadores de desempenho para secagem de 1 kg de grãos:

$\Delta\theta_{\text{kg}}$	Tempo	[s /kg]
E_{kg}	Energia térmica e elétrica	[kJ/kg]
$\$_{\text{kg}}$	Custo	[R\$/kg]

e aumentando ao máximo os indicadores de qualidade:

% G.I. Percentual de grãos inteiros pós secagem [%]

% Bio Percentual de potencial biológico (nutritivo e germinativo) [%]

3. 6. 1. Fluxograma do S. G. T.

No fluxograma da Fig. 87 estão dispostas todas as principais variáveis relacionadas aos sensores e válvulas de controle, as quais serão utilizadas para a estruturação do Sistema de Gerenciamento Termodinâmico (**S. G. T.**).

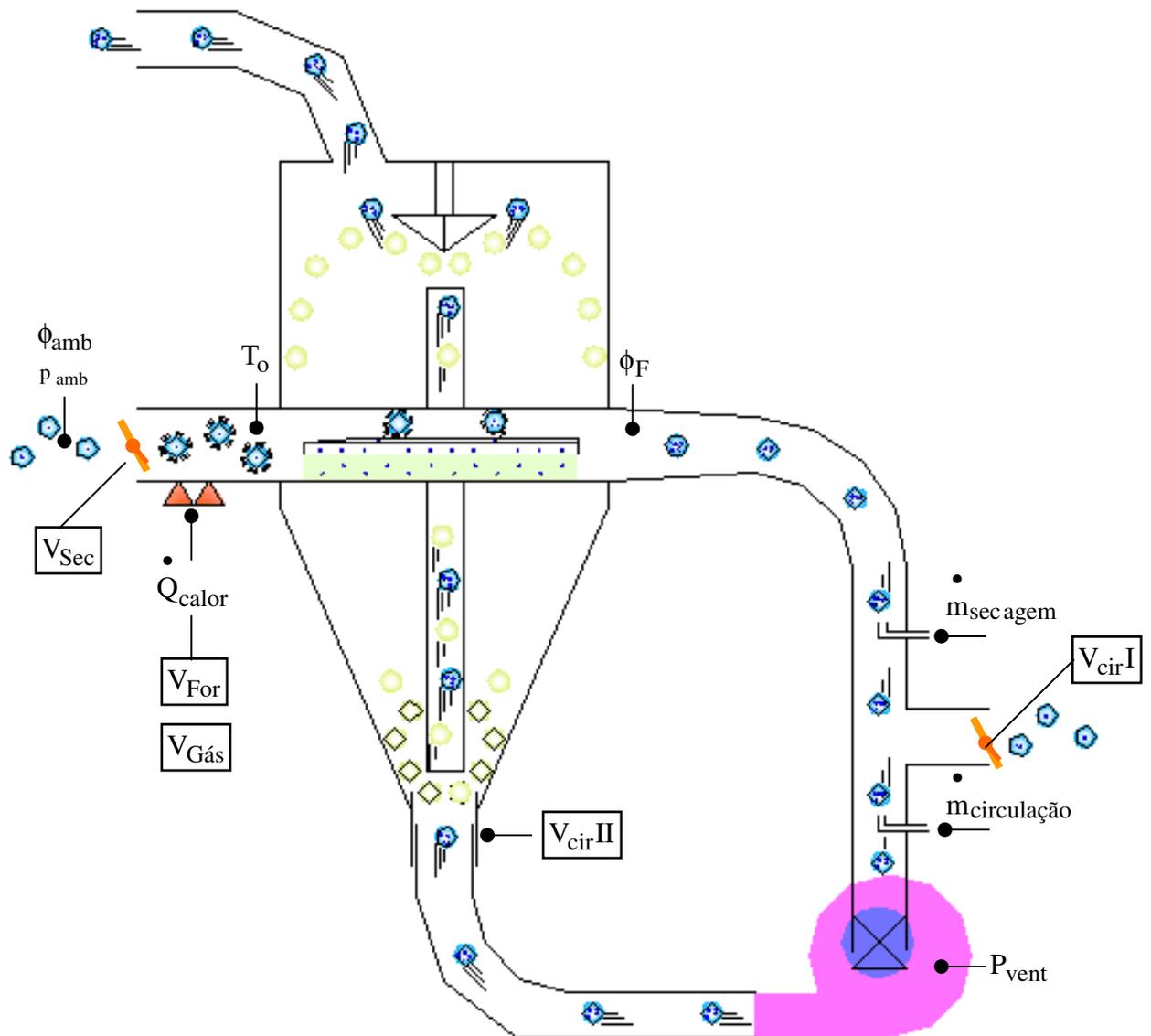


Fig. 87 - Fluxograma do Sistema de Gerenciamento Termodinâmico (S. G. T.)

3. 6. 2. Banco de dados

O S. G. T. será suportado por banco de dados com a estrutura básica da fig. 89.

BANCO DE DADOS (B.D.)													
Parâmetros Iniciais						Desempenho			Qualidade				
θ Inicial	θ Final	$\Delta\theta$ [min]	M Inicial	Altitude	Grão	R\$/m3 Lenha	R\$/m3 Gás	Batela da	$\Delta\theta$ kg	E kg	\$ kg	% GI	% Bio
		15											
Processo de Secagem													
Passo	θ [min]	V_{Sec}	V_{For}	Válvulas			Sensores			Cálculo			
				$V_{Gás}$	$V_{Circ I}$	$V_{Circ II}$	T_o	ϕ_{amb}	ϕ_F	P_{vent}	\dot{m}_{sec}	\dot{m}_{circ}	Ht_o
0	0												
1	15												
2	30												
...													
Sub Rotina - Cálculos Psicrométricos (PSICRO)													
$P_{ws} = 1000 \cdot \exp(\alpha)$													
$P_{ws}^* = 1000 \cdot \exp(\alpha)$													
$W_s^* = 0,62198 \cdot \frac{P_{ws}}{P - P_{ws}^*}$													
$W = \frac{(2501 - 2,381 \cdot T^*) \cdot W_s^* - (T - T^*)}{2501 + 1,805 \cdot T - 4,186 \cdot T^*}$													
$W_s = 0,62198 \cdot \frac{P_{ws}}{P - P_{ws}}$													
$P_w = \frac{P \cdot W}{W + 0,62198}$													
$T_D = E \cdot \beta^4 + F \cdot \beta^3 + G \cdot \beta^2 + H \cdot \beta + K$													
$Ht = T + W \cdot (2501 + 1,805 \cdot T)$													
$\phi = \frac{P_w}{P_{ws}}$													
$\mu = \frac{W}{W_s}$													
$r_e = \frac{0,2871 \cdot (T + 273,15) \cdot (1 + 1,6078 \cdot W)}{P}$													

Fig. 89 - Estrutura básica do banco de dados

3. 6. 3. Diagrama de blocos

O diagrama de blocos para servir de orientação inicial ao programa computacional do **S. G. T.** pode ser observado abaixo:

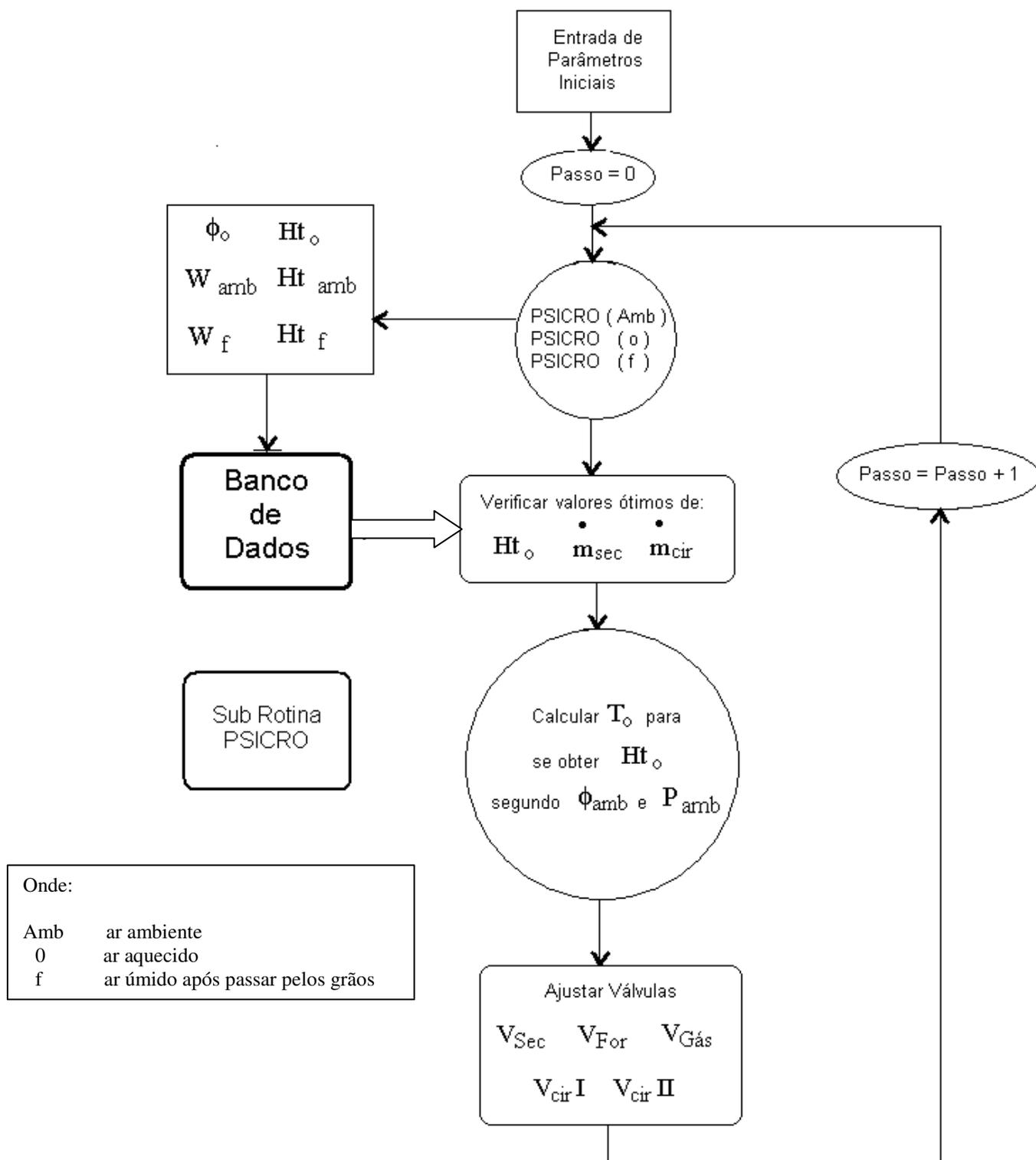


Fig. 90 - Diagrama de blocos do S. G. T.

Para dar início ao processo de secagem o programa do Sistema de Gerenciamento Termodinâmico solicita os parâmetros iniciais:

- Incremento de tempo para realizar ajustes do processo
- Altitude local
- Umidade inicial e tipo de grão
- Custo da energia específica do combustível utilizada para aquecimento

É dado início ao processo de secagem no passo 0 com tempo $\theta = 0$ [min]. Através da rotina *PSICRO* (Roteiro de cálculos psicrométricos) se calculam todos os valores relativos ao ar ambiente, de secagem e úmido obtido após passar pela massa de grãos:

- Entalpia
- Umidade relativa
- Umidade absoluta
- Fluxo mássico

Estes valores são armazenados no banco de dados para possibilitar a construção do histórico de cada processo de secagem. Logo em seguida é realizada uma consulta ao banco de dados sobre quais valores de:

- Entalpia
- Umidade relativa
- Fluxo mássico

do ar de secagem são mais apropriados para o tipo de grão, etapa do processo (1^a / 2^a) e condições do ar ambiente (Entalpia e Umidade Relativa). De posse desses valores é realizado o ajuste do aquecimento, fluxo mássico do ar de secagem e fluxo mássico do ar de circulação dos grãos no interior do leito de secagem.

O próximo ajuste será realizado após o término do incremento de tempo determinado inicialmente (Ex: $\Theta = 15$ [min]), ficando assim definido o passo 1 repetindo-se o ciclo descrito novamente até atingirmos a umidade de armazenamento dos grãos (+- 12% b.s.)

Os valores mais apropriados para o ar de secagem estão associados a menores consumos de tempo e energia, além de proporcionarem os maiores potenciais nutritivos e germinativos dos grãos.

3. 6. 4. Sistema de secagem para caracterização dos grãos

Com a finalidade de obter a caracterização dos principais grãos (arroz, feijão, milho, soja, café, trigo), ou seja, determinar:

- Taxas de transferência de calor e massa ótimos para cada tipo de grão
- Nível de entalpia ótimo do ar na entrada da massa de grãos
- Fluxo mássico de ar ótimo

parâmetros básicos para a calibração do **S. G. T.**, será necessária a construção do micro secador com capacidade para 30 litros de grãos (Fig. 91), no qual tem-se condição de simular o funcionamento do leito de secagem em escala real com baixo custo.

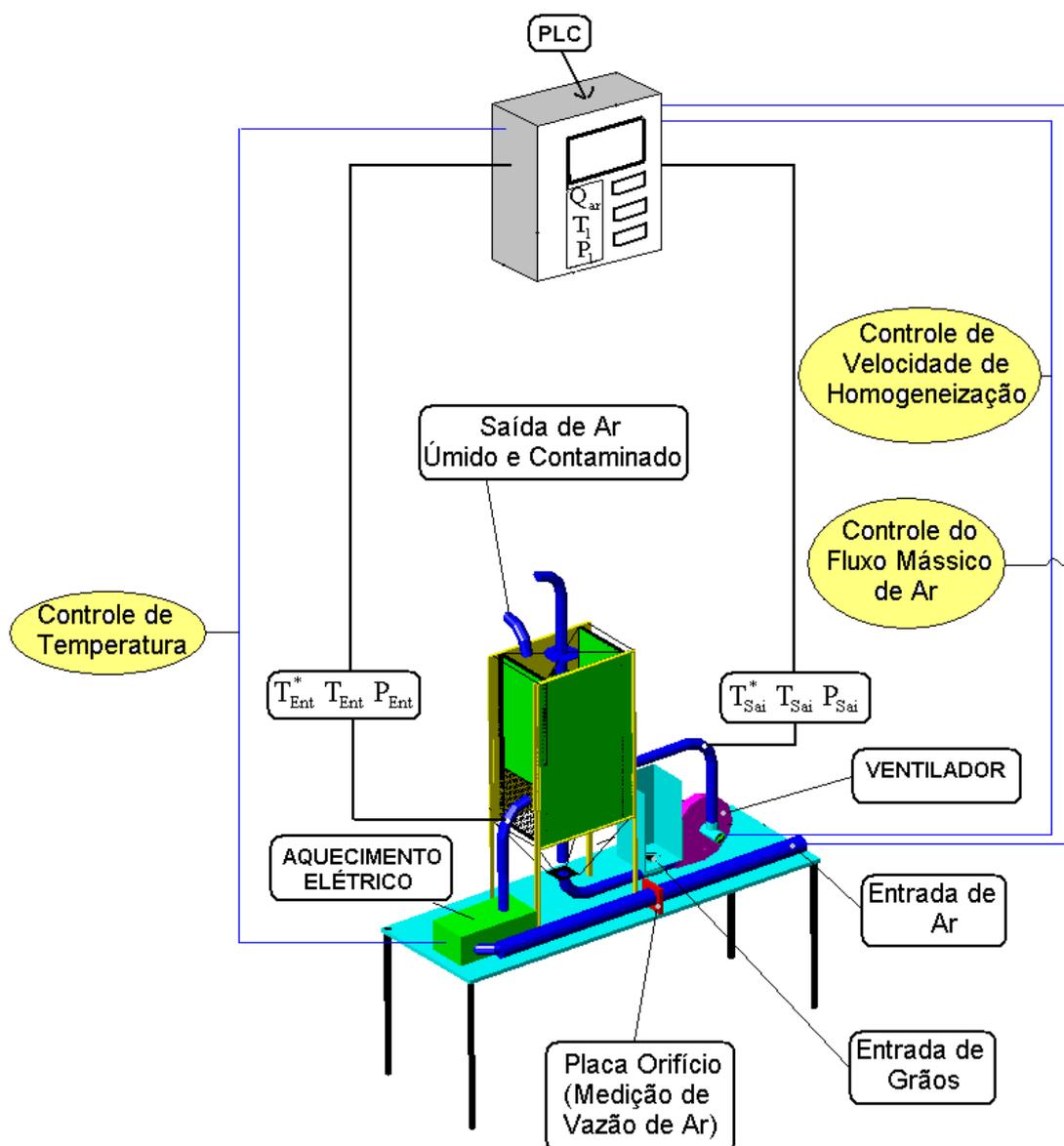


Fig. 91 – Secador protótipo para caracterização dos grãos

3. 7. MEDIDAS

3. 7. 1. Medição de variáveis relativas ao ar

3. 7. 1. 1. Fluxo Volumétrico

A medição do fluxo volumétrico de ar que alimenta o secador protótipo de grãos é feita através de gasômetro (Fig. 59) com capacidade para 30 litros, que está compatível com as vazões utilizadas no intervalo de 50 a 200 [litros / minuto].

3.7.1.2. Fluxo Mássico de Ar

Será utilizada fórmula (24) [Tubitak, Marmara Research Centre] proveniente do roteiro de cálculos psicrométricos para determinação do volume específico, possibilitando o cálculo do fluxo mássico:

$$\dot{m}_{ar} = \frac{Q_{ar}}{v_e}$$

3.7.1.3. Pressões relativas

Os valores de pressão serão obtidos através de manômetros em U construídos com dutos flexíveis de plástico e preenchidos com água (Fig.).

3.7.1.4. Temperaturas

As temperaturas foram medidas com termômetros de bulbo de mercúrio da marca Incoterm e precisão de $\pm 0,5$ °C (Fig. 96).



Fig. 96 - Termômetros

3.7.1.5. Umidade relativa

As umidades relativas do ar ambiente e do ar após passar pela massa de grãos foram medidas através dos valores de temperatura de termômetro de bulbo seco e úmido (Fig. 97 e 98).



Fig. 97 - Umidade relativa ambiente



Fig. 98 - Umidade relativa do ponto 7

3. 7. 2. Medição de variáveis relativas aos grãos

3. 7. 2. 1. Umidade (base úmida)

A umidade dos grãos é medida através de coleta de amostras nos pontos posicionados no início (Fig. 99), meio e final do secador protótipo de 5 litros de grãos em estudo. Mede-se a massa (Fig. 101), antes e depois das amostras seguirem para estufa (Fig. 100), à 105 °C por 24 horas, para tornar viável o cálculo.



Fig. 99 - Coleta de amostra de grãos



Fig. 100 – Estufa temperatura máxima de 150 °C



Fig. 101 – Balança analítica precisão +- 0, 01 gr

4. RESULTADOS

4. 1. APRESENTAÇÃO

Na fig. 103 pode-se ter uma visão dos valores de pressão e temperatura relativos aos pontos de medição do secador protótipo para secagem de 5 litros de grãos.

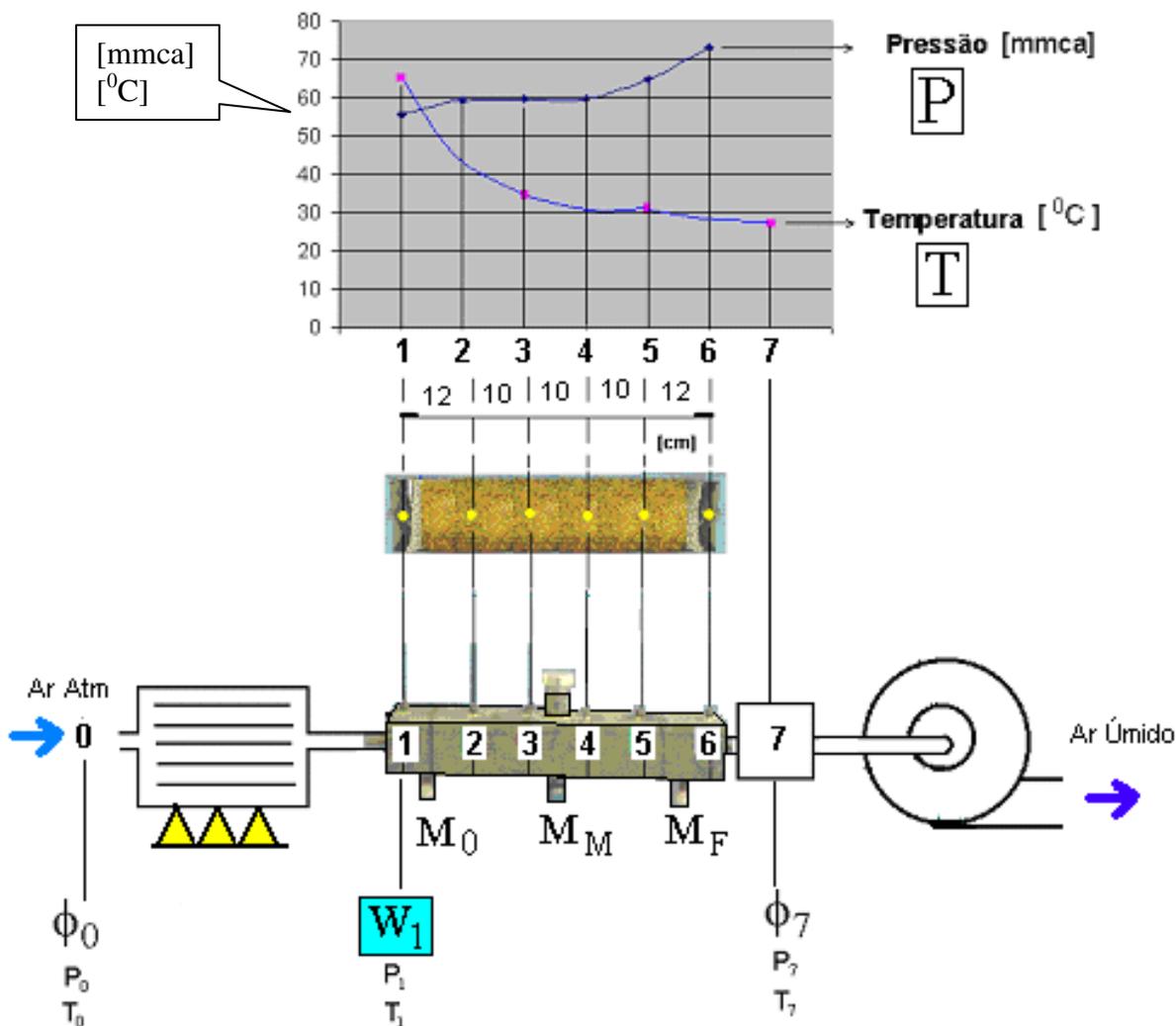


Fig. 103 - Secador protótipo 5 litros de grãos com pontos de coleta de amostras, medidas (P, T) e gráfico.

Foram realizados 5 testes com arroz do campo e somente os testes tipo 3, 4 e 5 foram aproveitados para a análise estatística que segue.

4. 1. 1. Teste tipo 3

Este teste foi realizado sem aquecimento do ar de secagem, tendo dados e resultados resumidos na tabela 1.

Tabela 1 - Planilha de resultados do teste N. 3

Variáveis de Entrada			Temperaturas			Variáveis Calculadas				
			Ponto:	0	1	7		0	1	7
Q_{ar}	87	[l/min]	T [°C]	18,1	18,1	15,6	W [kg H2O/kg Ar úmido]	0,009547	0,009547	0,010972
P_{Atm}	710	[mmhg]	T^* [°C]	14,5		14,8	H_t [kJ/kg Ar úmido]	42,3	42,3	43,3
							ϕ [%]	69,0	68,5	92,9
							T_D [°C]	12,3	12,2	14,40
							W_s [kg H2O/kg Ar úmido]	0,013941		0,011830
Desempenho			Transferência Média de Água			P_w [Pa]	1430,9		1640,9	
$E_{Térmica}$	179,2	%	$\frac{\partial M}{\partial \theta}$	0,002313	[gr H2O/s]	P_{wv} [Pa]	2075,2		1766,9	
	-0,007576	[MJ/kg]				P_{ws}^* [Pa]	1649,6		1685,5	
$E_{Mecânica}$	-79,2	%				W_s^* [kg H2O/kg Ar úmido]	0,011031		0,011276	
	0,003347	[MJ/kg]	Transferência Média de Calor			μ [%]	68,5		92,7	
			$\frac{\partial H_t}{\partial \theta}$	-1,641	[J/s]	v [m3/kg]	0,897		0,891	
$\Delta \theta$	250	min							ρ_a [kg/m3]	1,115
	15000	[s]				m_{ar}	0,001621991			[kg/s]

A taxa negativa de transferência de calor se deve a fato de não termos aquecimento do ar de secagem e ocorrer transferência de calor dos grãos para o ar. Através do gráfico de consumo de energia térmica e mecânica (Fig. 105), pode-se ter uma noção do peso maior da energia térmica no processo de secagem em relação a energia mecânica consumida.

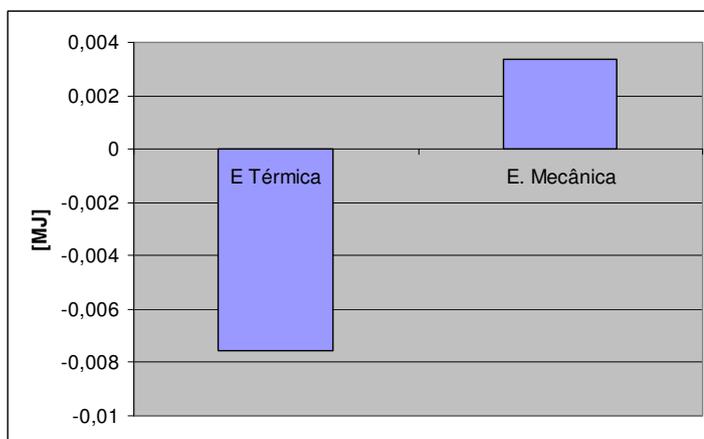


Fig. 105- Gráfico comparativo do consumo de energia térmica e mecânica do teste N. 3

No gráfico da Fig. 106 se tem a distribuição de pressão e temperatura proveniente da passagem do fluxo do ar de secagem através dos grãos dentro do secador protótipo de 5 litros.

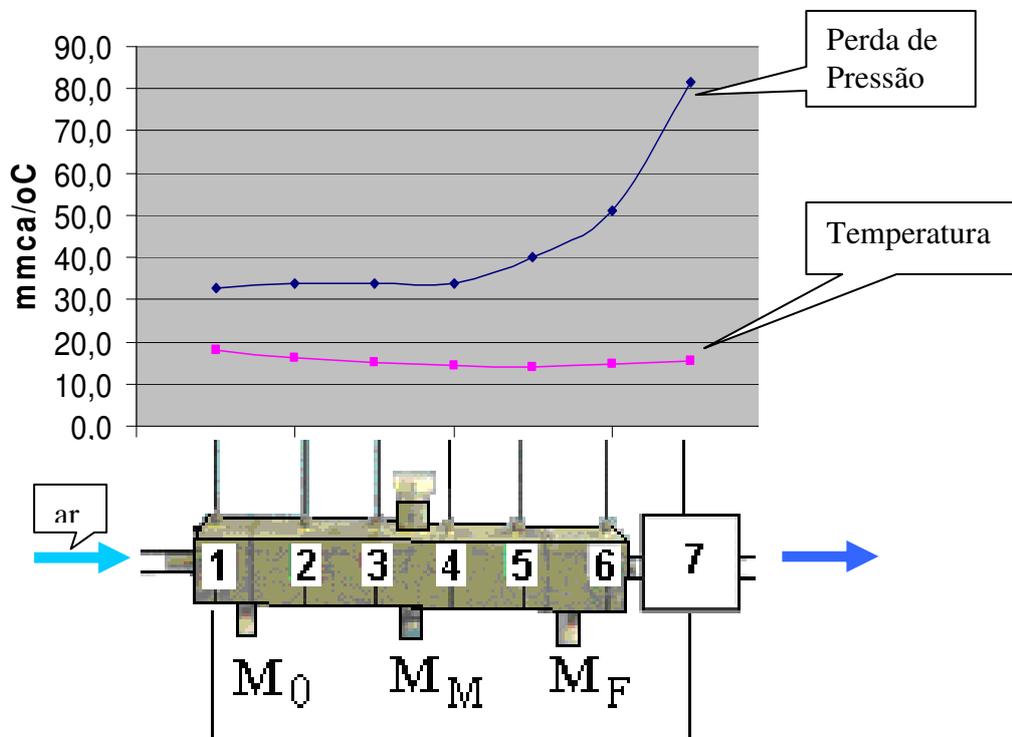


Fig. 106- Distribuição de pressões e temperaturas do teste N. 3

As três curvas do gráfico da Fig. 107 abaixo representam a umidade dos grãos no início (M_0), meio (M_M) e final (M_F) do secador protótipo de 5 litros durante o processo de secagem.

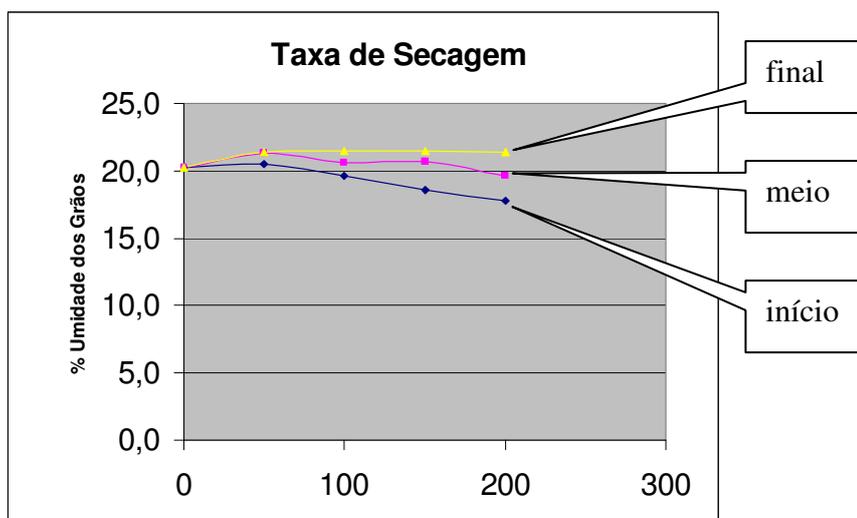


Fig. 107- Curvas de umidade dos grãos – Teste N. 3

4. 1. 2. Teste tipo 4

Este teste foi realizado com aquecimento do ar de secagem, tendo dados e resultados mostrados na tabela 2.

Tabela 2- Planilha de resultados do teste N. 4

Variáveis de Entrada			Temperaturas			Variáveis Calculadas				
			Ponto:	0	1	7		0	1	7
Q_{ar}	110	[l/min]	T [°C]	23,6	92,5	36,3	W [kg H2O/kg Ar úmido]	0,013028	0,013028	0,025707
P_{Atm}	710	[mmhg]	T^* [°C]	19,1		29,6	H_t [kJ/kg Ar úmido]	56,8	127,3	102,2
						ϕ [%]	66,5	2,5	62,3	
						T_D [°C]	17,0	16,9	27,9	
						W_s [kg H2O/kg Ar úmido]	0,019788		0,042309	
Desempenho			Transferência Média de Água			P_w [Pa]	1942,0		3757,0	
$E_{Térmica}$	97,6	%	$\frac{\partial M}{\partial \theta}$	0,024541	[gr H2O/s]	$P_{w\bar{w}}$ [Pa]	2918,6		6028,9	
	0,161008	[MJ/kg]				P_{ws}^* [Pa]	2215,1		4155,6	
$E_{Mecânica}$	2,4	%				W_s^* [kg H2O/kg Ar úmido]	0,014904		0,028559	
	0,003928	[MJ/kg]	Transferência Média de Calor			μ [%]	65,8		60,8	
			$\frac{\partial H_t}{\partial \theta}$	48,5	[J/s]	v [m3/kg]	0,919		0,977	
$\Delta \theta$	180	min				ρ_a [kg/m3]	1,088		1,023	
	10800	[s]				m_{ar}	0,001935546		[kg/s]	

Neste teste, com o auxílio da Fig. 109, pode-se ter uma real noção do consumo de energia térmica e mecânica no processo de secagem, na medida que foi utilizado aquecimento do ar de secagem.

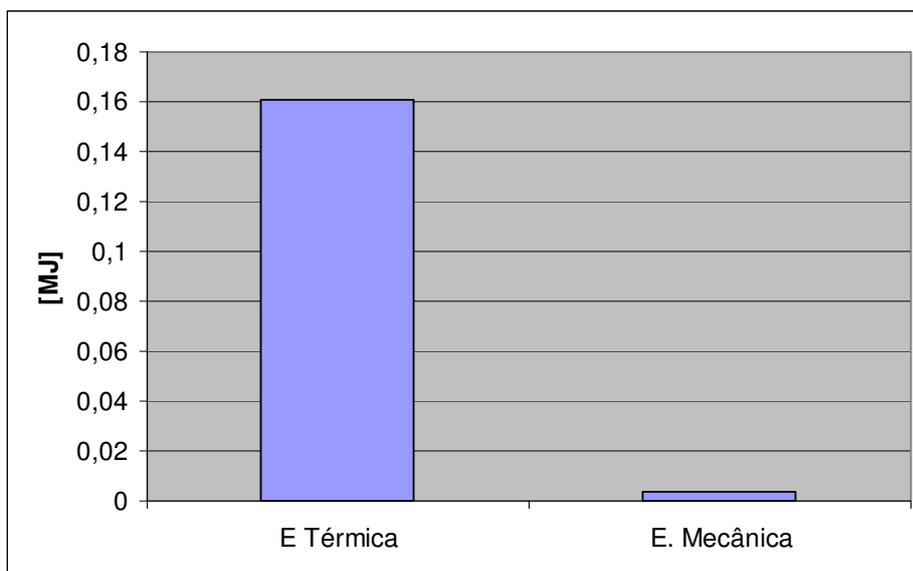


Fig. 109 - Gráfico comparativo do consumo de energia térmica e mecânica do teste N. 4

No gráfico da Fig. 110 se tem a distribuição de pressão e temperatura proveniente da passagem do ar de secagem através dos grãos do secador protótipo de 5 litros.

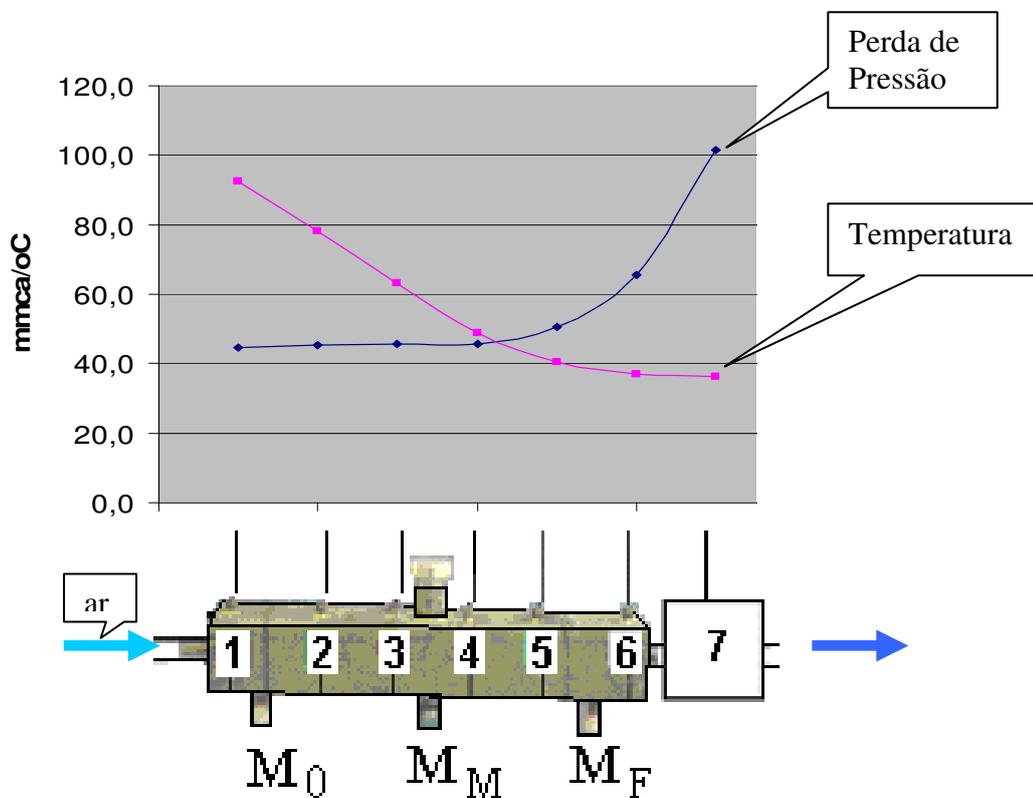


Fig. 110 - Distribuição de pressões e temperaturas do teste N. 4

As três curvas do gráfico da Fig. 111 representam a umidade dos grãos durante o processo de secagem.

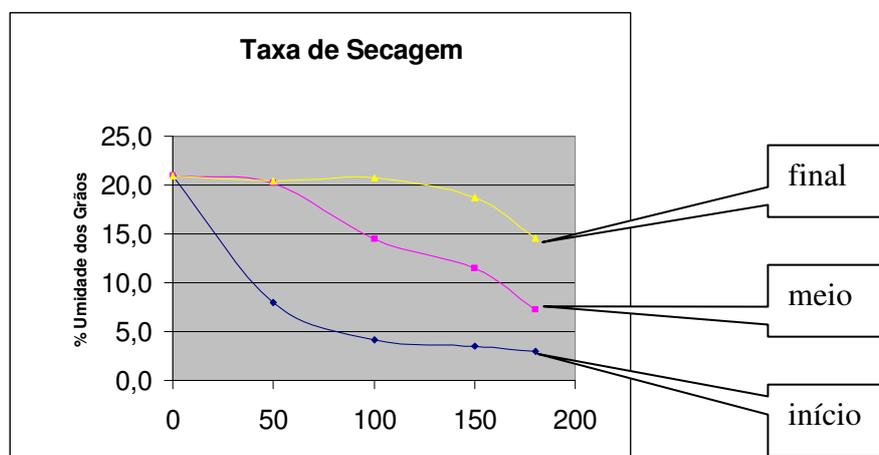


Fig. 111 - Curvas de umidade dos grãos – Teste N. 4

4. 1. 3. Teste tipo 5

Este teste foi realizado com aquecimento do ar de secagem, tendo dados e resultados mostrados na tabela 3.

Tabela 3 - Planilha de resultados do teste N. 5

Variáveis de Entrada			Temperaturas			Variáveis Calculadas				
			Ponto:	0	1	7		0	1	7
Q_{ar}	144	[l/min]	T [oC]	19,8	65,3	27,0	W [kg H2O/kg Ar úmido]	0,008456	0,008456	0,017636
P_{Atm}	710	[mmhg]	T^* [oC]	14,1		23,2	H_t [kJ/kg Ar úmido]	41,2	87,4	72,0
						ϕ [%]	55,0	5,0	73,2	
						T_D [oC]	10,5	10,4	21,78	
						W_s [kg H2O/kg Ar úmido]	0,015559		0,024359	
Desempenho			Tranferência Média de Água			P_w [Pa]	1269,6		2610,0	
$E_{Térmica}$	95,2	%	$\frac{\partial M}{\partial \theta}$	0,023999	[gr H2O/s]	P_{wg} [Pa]	2310,1		3567,4	
0,149400		[MJ/kg]				P_{ws}^* [Pa]	1613,3		2841,3	
$E_{Mecânica}$	4,8	%	Tranferência Média de Calor			W_s^* [kg H2O/kg Ar úmido]	0,010784		0,019247	
0,007491		[MJ/kg]				μ [%]	54,3		72,4	
						v [m3/kg]	0,901		0,936	
$\Delta \theta$	200	min	$\frac{\partial H_t}{\partial \theta}$	40,462	[J/s]	ρ_a [kg/m3]	1,110		1,068	
	12000	[s]				\dot{m}_{ar}	0,002614268		[kg/s]	

Através do gráfico de consumo de energia térmica e mecânica (Fig. 113) pode-se ter uma noção do peso de cada uma no processo de secagem.

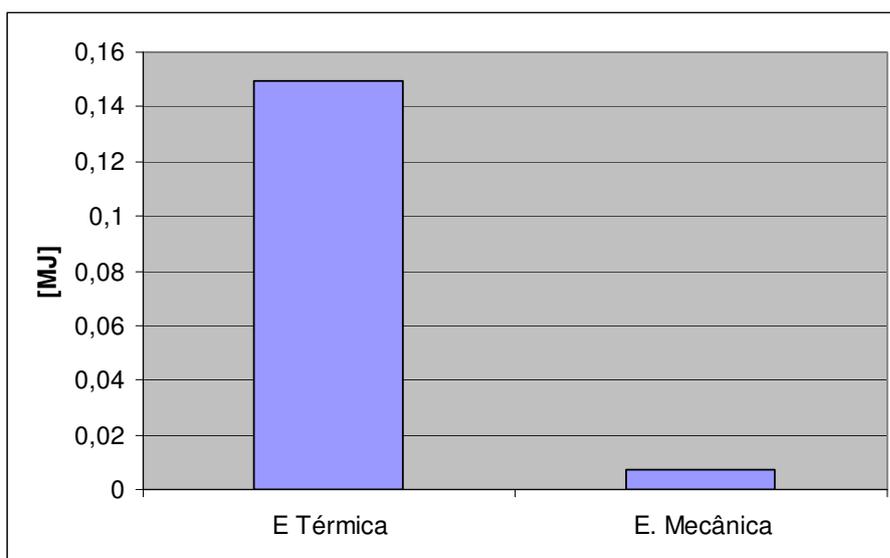


Fig. 113- Gráfico comparativo do consumo de energia térmica e mecânica do teste N. 5

No gráfico da Fig. 114 tem-se a distribuição de pressão e temperatura proveniente da passagem do ar de secagem através dos grãos dentro do secador protótipo de 5 litros.

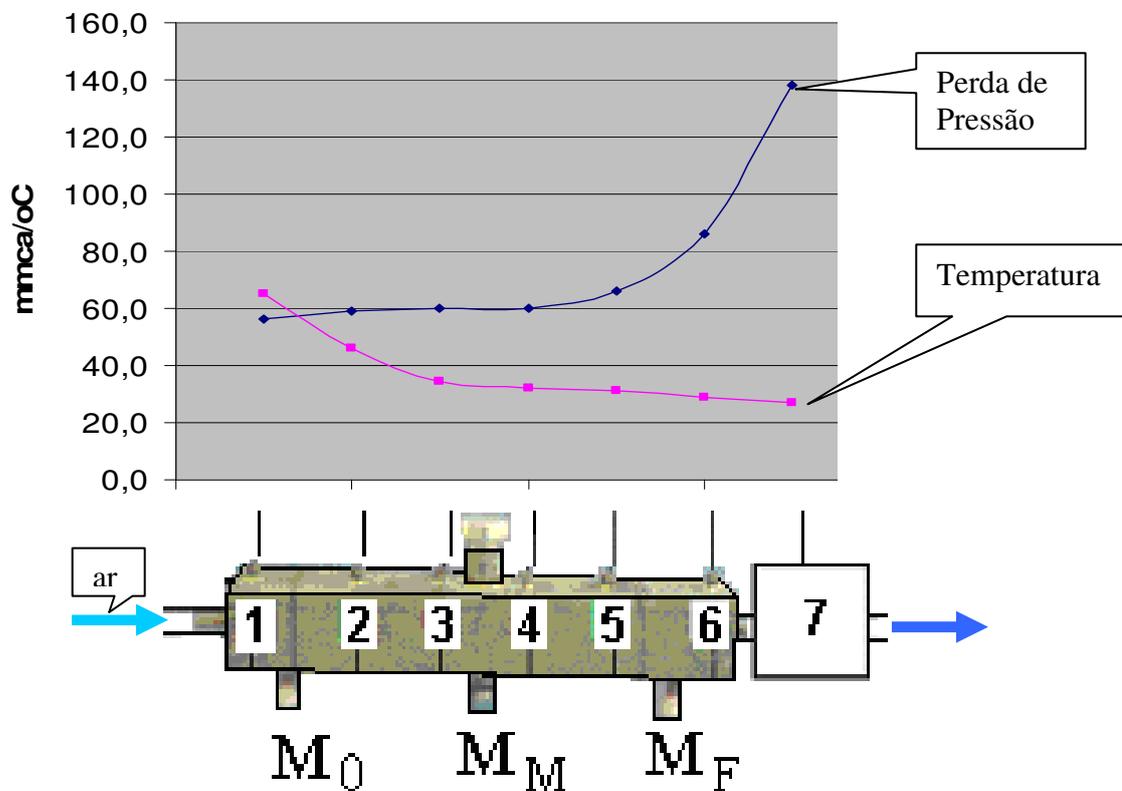


Fig. 114- Distribuição de pressões e temperaturas do teste N. 5

As três curvas do gráfico da Fig. 115 representam a umidade dos grãos durante o processo de secagem:

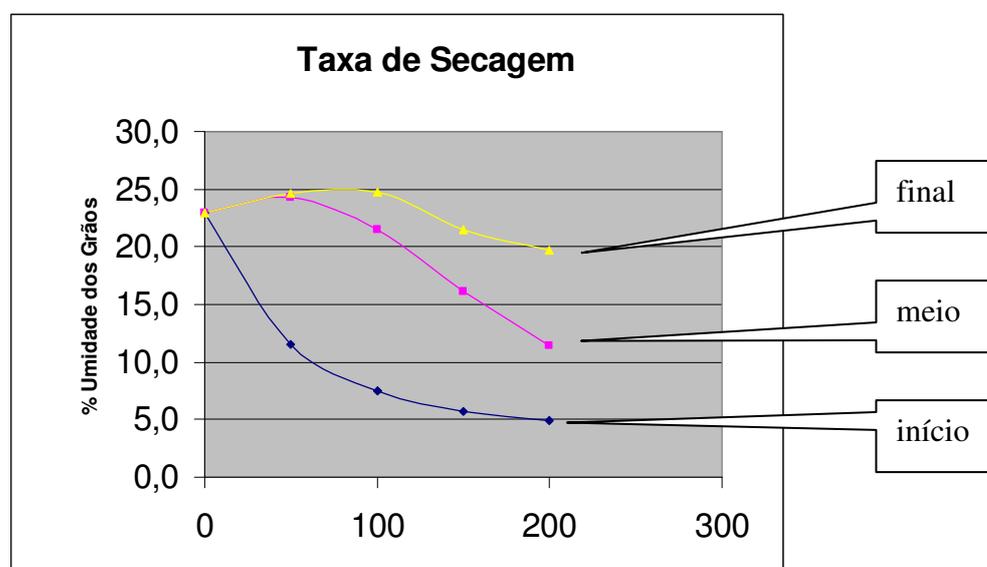


Fig. 115- Curvas de umidade dos grãos – Teste N. 5

O balanço geral dos três testes está ilustrado na tabela 4, foram descartados os testes 1 e 2 por não serem fidedignos, ou seja, contém erros próprios de início de experimentação do secador protótipo de 5 litros.

Tabela 4 - Balanço geral dos testes

Teste	$M_{inicial}$	\dot{m}_{AR}	Ht_1	$\Delta\phi_1^7$	$\partial M / \partial \theta$	$\partial Ht / \partial \theta$	$\Delta\theta$	$\Delta\theta_{12}$	E_{kg}	$C_{kg.lenha}$	$C_{kg.GLP}$	$C_{kg.GNV}$
	[%]	$\left[\frac{kg}{s}\right]$	$\left[\frac{kJ}{kg.Ar.Úm.}\right]$	[%]	$\left[\frac{gr.H_2O}{s}\right]$	$\left[\frac{J}{s}\right]$	[min]	[min]	$\left[\frac{MJ}{kg}\right]$	[R\$ / kg]		
3	20,3	0,00162	42,3	24,4	0,00231	-1,6	250	500	-0,00423			
4	21,0	0,00194	127,3	59,8	0,02454	48,5	180	85	0,16494	0,00175	0,01014	0,00495
5	22,9	0,00261	87,4	68,2	0,02400	40,5	200	115	0,15689	0,00184	0,00962	0,00481
							Média	100	0,16091	0,00179	0,00988	0,00488

A comparação de custo da secagem de um quilo de grãos utilizando-se três alternativas de combustível:

- Lenha com 40 % de umidade
- Gás liquefeito de petróleo (GLP)
- Gás natural veicular (GNV)

pode ser observada no gráfico da Fig. 117.

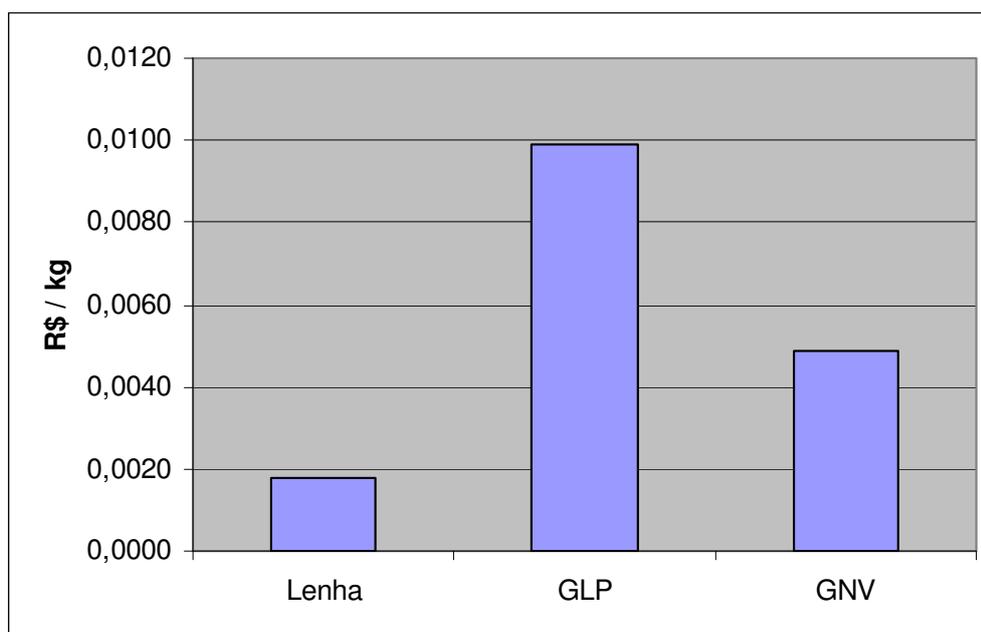


Fig. 117 - Custo de secagem de 1 kg de grãos.

Como resultado final tem-se a comparação entre o secador protótipo de 5 litros de grãos e o sistema de secagem convencional produzido pela CASP – Amparo/SP, com coluna de grãos para 5400 quilos (90 sacos) , levando-se em consideração os três indicadores principais de desempenho:

$\Delta\theta_{12}$	Tempo estimado para os grãos atingirem umidade de 12 % b. s.	[min]
E_{kg}	Energia total consumida para secagem de 1 quilo de grãos	[MJ/kg]
$C_{kg..lenha}$	Custo da secagem utilizando-se lenha com 40 % de umidade	[R\$/kg]

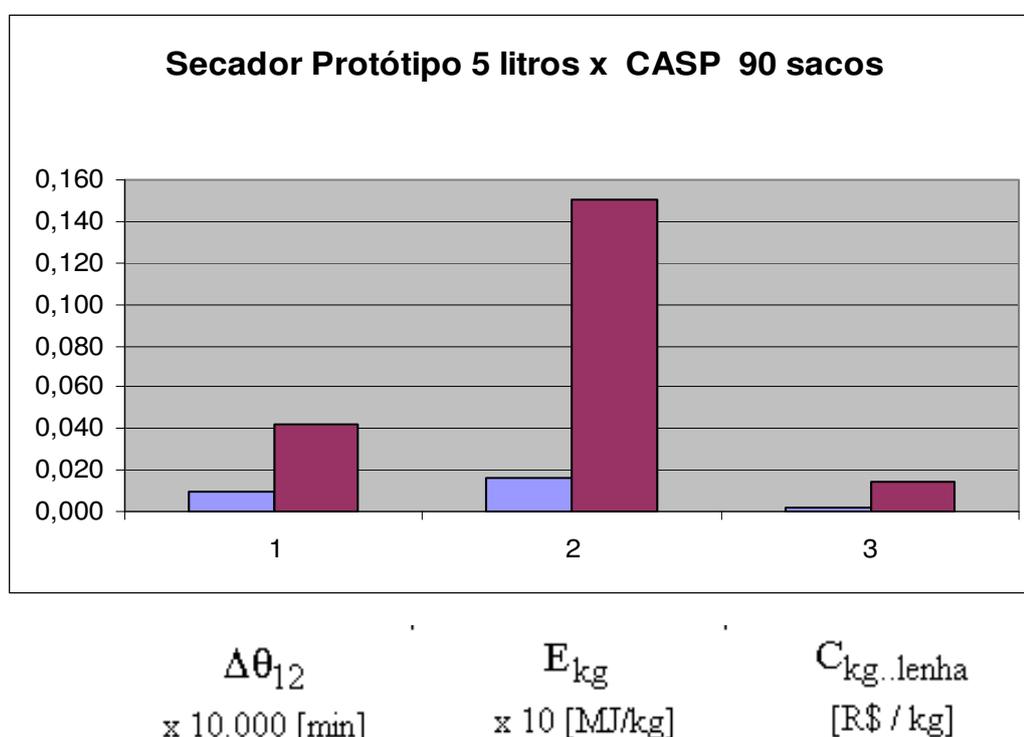


Fig 118 - Gráfico comparativo do Secador protótipo 5 litros x Secador CASP 90 sacos

O tempo consumido é o necessário para atingir a umidade de armazenamento (12 % b.s.). A energia consumida é a soma da térmica com a mecânica, sendo que a energia térmica representa aproximadamente 90 % do total para ambos os secadores. O custo foi calculado considerando somente o consumo de lenha. É importante salientar que o desempenho do secador protótipo pode ser ainda melhor se implementarmos a homogeneização da massa de grãos, a qual é realizada no secador convencional.

4. 2. DISCUSSÃO

Devido ao fato dos grãos contidos no secador protótipo de 5 litros de grãos não estarem sob processo de homogeneização, nota-se que ocorre um decréscimo rápido da umidade dos grãos localizados na região inicial (M_0) e, no intervalo de tempo de 0 a 100 minutos, tem-se um acréscimo da umidade dos grãos das regiões intermediária e final, justificando-se assim o processo de homogeneização para o leito de secagem em escala real. Através da análise das curvas de temperatura e pressão do ar, juntamente com as curvas de secagem dos testes 4 e 5 pode-se estimar o espaçamento ótimo entre dois compartimentos de placas perfuradas, de modo a promover o máximo aproveitamento da capacidade de transferência de calor e água do ar. Teríamos um espaçamento de +- 16 cm para o leito de secagem escala real, o qual é uma distância intermediária entre o início e o meio do secador protótipo de 5 litros, levando em consideração a perda de umidade acentuada mostrada na primeira curva e o ganho de umidade dos grãos do meio do secador protótipo, mostrado na segunda curva de secagem.

O desempenho demonstrado pelo secador protótipo de 5 litros, levando-se em conta o consumo de tempo, energia e custo do processo, é muito superior se comparado com o sistema convencional de secagem. O tempo consumido foi de 25 % em relação ao secador convencional e o consumo de energia foi de aproximadamente 15 %. O desenvolvimento do Sistema de Gerenciamento Termodinâmico do processo de secagem se justifica pela variação constante dos fatores que influenciam o processo de secagem, quais sejam:

- Propriedades físicas dos grãos
- Propriedades termodinâmicas do ar ambiente
- Etapa do processo (1^a ou 2^a)
- Altitude local

Tendo sempre em mente o objetivo principal de se obter grãos com maior potencial nutricional, germinativo e estrutural, possibilitando maior percentual de grãos inteiros e conseqüentemente maior valor comercial.

5. CONCLUSÃO

- O uso de fluxo de ar de secagem de baixa pressão possibilita temperaturas menores para retirada da umidade dos grãos, o que aumenta a qualidade de beneficiamento.
- A possibilidade de controle mais preciso do fluxo mássico e entalpia do ar proporciona um ajuste mais adequado do processo com relação às duas etapas inerentes à secagem.
- O uso de Transporte Pneumático para promover a carga/descarga dos grãos possibilita que o equipamento seja móvel e assim viabiliza a aquisição deste por grupos de pequenos produtores.
- O monitoramento termodinâmico do ar torna viável o cálculo das quantidades de calor (entalpia) e massa (água) transferidas durante o processo, sendo assim possível acompanhar os valores que realmente representam a secagem, os quais são dependentes das condições ambientais do local de funcionamento do sistema de secagem.
- A espessura ótima da camada de grãos, ou seja, pela qual o ar de secagem consegue atravessar e não entregar umidade aos grãos da porção final, está entre 10 e 25 cm.
- Ocorre perda acentuada de pressão no trecho do ponto 4 em diante, ou seja, após o ar percorrer 32 cm o escoamento passa de laminar para turbulento promovendo esta perda
- O teste tipo 3 no qual não houve aquecimento do ar de secagem, foi utilizado ar ambiente, mostra a necessidade de fornecermos energia térmica para acelerarmos o processo, neste caso, a comparação entre o teste tipo 3 e os outros testes com aquecimento (tipo 4 e 5) seria uma redução do tempo de 10 horas para 1 hora aproximadamente para conclusão do processo de secagem.

6. TRABALHOS FUTUROS / CONTRIBUIÇÃO

Como prosseguimento desta pesquisa pretendemos construir um protótipo para secar 60 kg de grãos similar ao realizado neste doutorado, introduzindo dispositivos vibro-acústicos posicionados no coletor de admissão do ar de secagem, como mostra a Fig.119 e 120 :

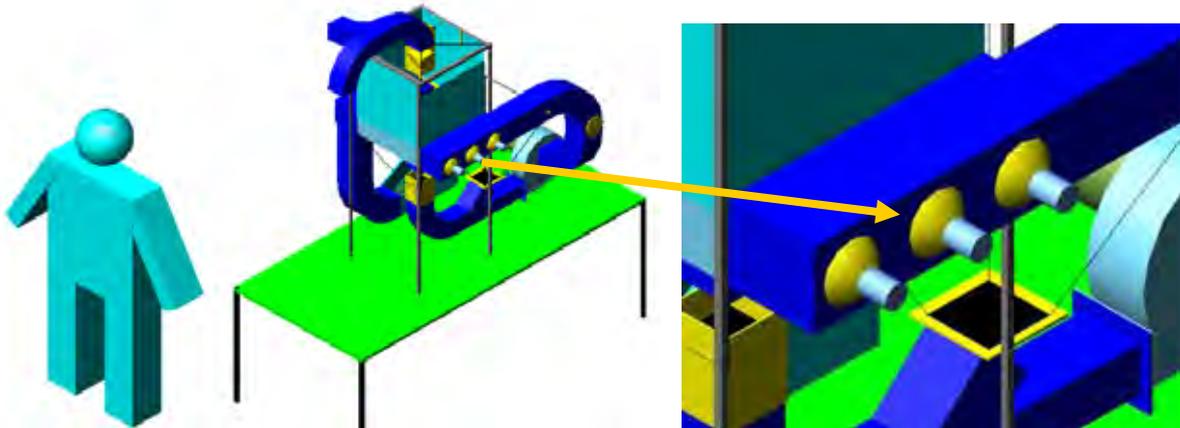


Fig. 119 – Sistema de secagem com dispositivos vibro-acústicos na região de escoamento do ar de secagem

A combustão pulsante será promovida por dispositivo vibro-acústico posicionado na região de combustão da biomassa na entrada do leito de secagem (Fig. 2):

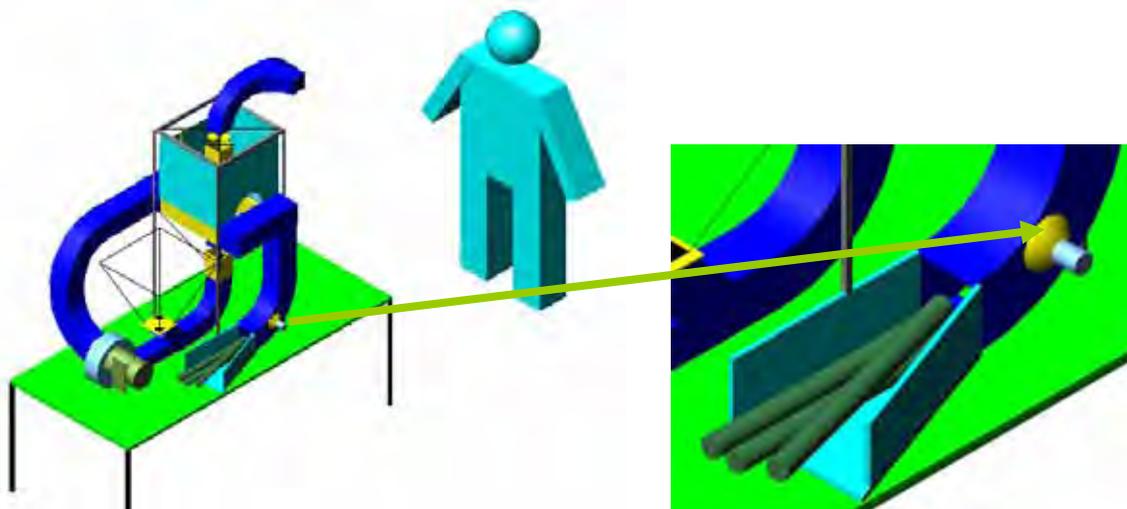


Fig. 120 – Sistema de secagem com dispositivos vibro-acústicos na região de combustão da biomassa

Através do uso de dispositivos vibro-acústicos (Carvalho) para produzir escoamento pulsante do ar de secagem e da combustão da biomassa, pretendemos aumentar a eficiência da secagem e da combustão.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 - AEROVENT, Grain Drying. A Manual of Aerovent Crop Drying Systems.
- 2 - BARROSO, M. A. S. " Secagem de Grãos em Leito de Jorro Não - Convencional", 1985, 69p. COPPE/UFRJ
- 3 - BLASZCZYK, J., Acoustically Disturbed Fuel Droplet Combustion, Fuel, 70(9), 1023-1025, 1991.
- 4 - CALLADO, V.M.A., Modelagem e Simulação de Secadores em Leitos Fixo e Deslizante, Tese de Doutorado, 170 p, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1993.
- 5 - CARVALHO, Nelson Moreira de, A Secagem de Sementes., 1994, 165p FUNEP Jabotical.
- 6 - DIAS, S.R.S.; Futata, F.P.L.; Carvalho, J.A.; Couto, H.S.; Ferreira, M.A., Investigation of Food Grain Drying with Pulsating Air Flows, International Comm. Heat and Mass Transfer, 31(3), 387-395, 2004.
- 7 - FOX, Mac Donald, Introdução a Mecânica dos Fluídos, 1997
- 8 - HALL, C. W. Drying and storage of agricultural crops., 1980, 381pp The AVI Publishing Company, Inc.
- 9 - HA, M.Y.; Yavuzkurt, S., Combustion of a Single Carbon or Char Particle in the Presence of High-intensity Acoustic Fields, Combustion and Flame, 86(1-2), 33-46, 1991.
- 10 - ISTA. International rules for testing seeds., 1985, 59p. Seed Sci. and Technology
- 11 - KELLY, J. F. Grain Dryers. Proceeding of the 1960 Short Course for Seedsmen., 1960, 58p. Ed. Seed Technology Laboratory
- 12 - LIMA, W.J.N., Secagem em Batelada de Arroz em Casca em um Leito de Jorro Cônico com Tubo Interno utilizando Ciclos de Resfriamento: Análise do Rendimento

de Grãos Inteiros, Dissertação de Mestrado, 93 p, Universidade Estadual de Campinas, 1997.

13 - MUJUNDAR, A., Industrial Drying Processes, John Wiley & Sons, 505 p, 1995.

14 - PABIS, S.; Jayas, D.S.; Cenkowski, S., Grain Drying, 302 p, John Wiley & Sons Inc., 1997.

15 - SHAPIRO, Moran, M. J., Princípios de termodinâmica para engenharia, LTC 4ª edição, 1998

16 - SAITO, M.; Sato, M.; Nishimura, A., Soot Suppression by Acoustic Oscillated Combustion, Fuel, 77(9/10), 973-978, 1998.

17 - TUBITAK, Marmara Research Centre, Food and Refrigeration Tecnology Departament, 10 p, 1994.

18 - YAVUZKURT, S.; Ha, M.Y.; Koopmann, G.M.; Scaroni, A.W., National Heat Transfer Conference, 106, p. 439, 1989.

19 - WEBER, Érico A., Excelência em Beneficiamento e Armazenagem de Grãos, Salles Editora 1ª edição, 2005

APÊNDICE A - Fatores que Influenciam a Qualidade dos Grãos

Os fatores que influenciam a qualidade dos grãos, ou seja, o percentual de grãos inteiros, o potencial germinativo e nutritivo são:

- Relação período de secagem / repouso
 - Favorece a difusão das moléculas de água evitando tensões internas.
- Adsorção de umidade de ar saturado por grãos mais secos
 - Promove elevados gradientes de umidade e tensões internas. Kunze avaliou o

processo de secagem de arroz em casca, utilizando secadores tipo bandeja, e observou que podem ocorrer fissuras pela adsorção de umidade durante o processo de secagem. A adsorção pode ocorrer nas camadas superiores dos secadores de grande porte, que recebem ar próximo da saturação proveniente da parte inferior do secador. Pode ocorrer adsorção do ar ambiente quando os grãos seguem para estocagem.

OBS.: Adsorção é a adesão de moléculas de um fluido (o adsorvido) a uma superfície sólida (o adsorvente); o grau de adsorção depende da temperatura, da pressão e da área da superfície - os sólidos porosos como o carvão são ótimos adsorventes. As forças que atraem o adsorvato podem ser químicas ou físicas.

- Choques Mecânicos e Térmicos
 - Promovem tensões internas.
- Temperatura alta de secagem
 - Ocorre “ encapsamento “ da umidade e possível formação de moléculas de água através da união de átomos de Hidrogênio e Oxigênio . Segundo Lima, 1997, apesar de ainda ter um grande teor de umidade no interior do grão, a transferência desta umidade para o ar de secagem pode estar sendo dificultada pelo endurecimento do amido em

função de estar submetido a altas temperaturas (acima de 90 °C), fenômeno conhecido como “case hardening” .Ocorre também um aumento do percentual de grãos quebrados, sendo que o menor percentual de grãos quebrados é obtido utilizando-se ar não aquecido e maior número de passagens dos grãos pela região de fluxo de ar de secagem.

- Elevada taxa de transferência de calor
 - Promove degradação da estrutura de carboidratos.
- Elevada taxa de transferência de umidade dos grãos para o ar de secagem
 - Promove elevação do gradiente de umidade centro/superfície e tensões internas.
- Umidade relativa ambiente elevada (+- 90 %)
 - Tem-se um aumento do nível de entalpia do ar e aumento de grãos quebrados .
- Gradiente interno de temperatura

- O gradiente de temperatura ocorre quando a temperatura do grão está a uma temperatura distinta do meio externo. Esta diferença é responsável pela dilatação ou contração térmica do grão causando as tensões internas e, conseqüentemente, fissuras. Recomenda-se o acréscimo (início do processo) e decréscimo gradual da temperatura (fim do processo) com objetivo de minimizar os gradientes de temperatura ar/grão.

Os gradientes de umidade (Ar – Grão) são mais críticos que os de temperatura, principalmente na 1ª etapa.

APÊNDICE B – Evolução do Sistema de Secagem Proposto



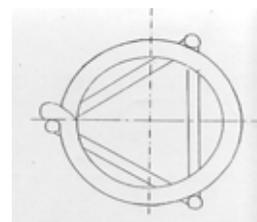
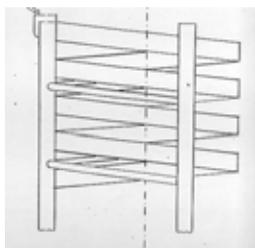
M1- Início do trabalho na Graduação Eng. Mecânica Unicamp. Este modelo propunha o uso de jorros dentro de um leito tubular. (1989)



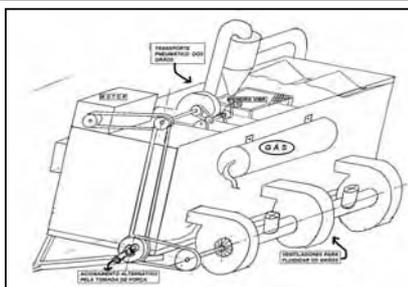
M2- Neste modelo a proposta seria utilizar leito fluidizado no interior do leito tubular. A intenção seria aumentar a eficiência do processo. (1990)



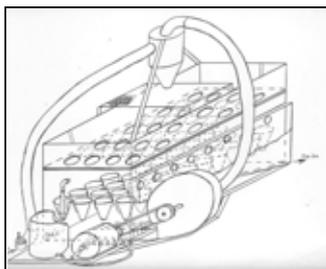
M3 -Passamos para o laboratório, onde montamos este modelo com objetivo de construir as curvas (Pressão x Vazão) de fluidização (1990)



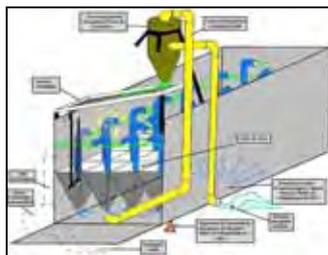
M4- Este modelo seria um leito tubular com fluidização interna dos grãos, estes desceriam por gravidade até o ponto inferior do equipamento. (1991)



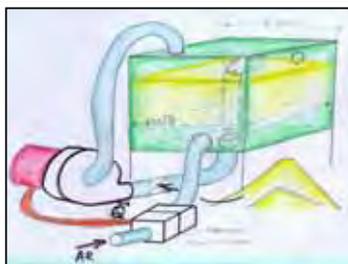
M5- Aqui temos a primeira tentativa de obtermos um equipamento móvel, utilizando vários leitos de jorro trabalhando em paralelo. (1994)



M6 - Este modelo tem o mesmo princípio do modelo anterior, portando algumas melhorias como a utilização de um ventilador maior no lugar de três menores.(1995)



M7 -Continuamos com leitos de jorro , porém com todos os jorros concatenados em uma sequência única, forçando os grãos a seguir um "caminho"dentro do secador.(2002)



M8-A proposta é obter um leito fixo sob baixa pressão do fluxo de ar de secagem,favorecendo assim o mecanismo de secagem.(2003)



M9 - Temos a proposta atual, utilizando os princípios do modelo anterior e com dispositivos para viabilizar as operações de carga,descarga, secagem e hogeneização da massa de grãos.A mobilidade do equip. é mantida.(2003)



M10

Tab. 11 - Evolução do Sistema de Secagem Proposto

APÊNDICE C – Testes Experimentais Transporte Pneumático

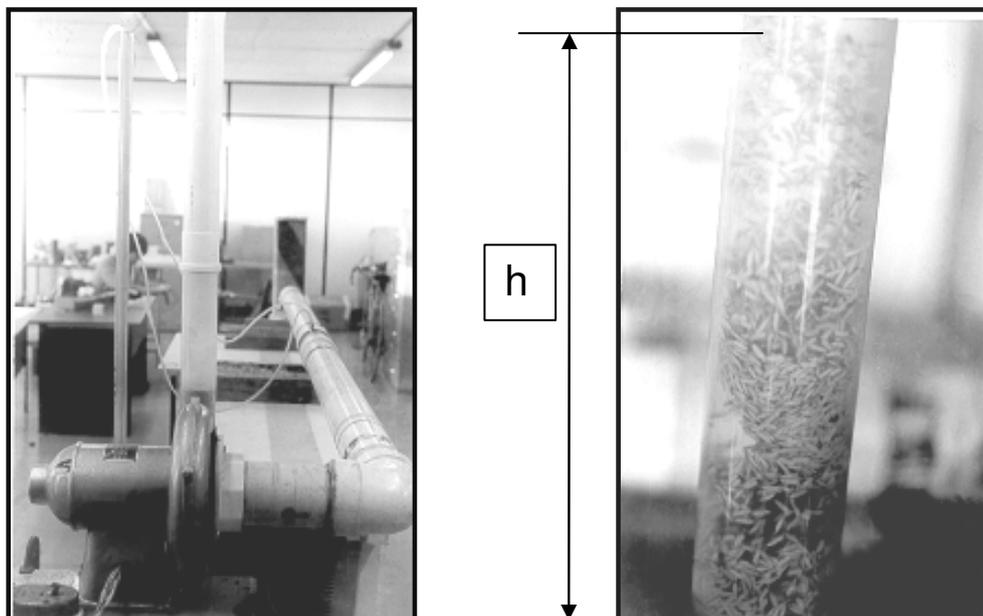


Fig. 120 -Vista Montagem Testes Transp. Pneumático

Motor elétrico :	Ventilador:
- Rotação 3640 [RPM]	- Rotor radial diâmetro 25 [cm]
- Potência 1 [CV]	- Pressão máxima \approx 400 [mmca]

Metodologia:

1) Deposita-se uma amostra constante de grãos no interior do tubo transparente de modo a obtermos uma coluna constante de 13 cm .

2) Acionando o ventilador, este entra em regime de rotação constante (3600 [RPM]) e promove-se a abertura gradual da válvula gaveta localizada na descarga do ventilador, obtendo assim um aumento do fluxo de ar pela coluna de grãos.

3) A medida da variação da pressão na coluna é obtida pela introdução de tomadas de pressão posicionadas no interior do escoamento, de maneira a medirmos a pressão total.

4) A medida de vazão é realizada através de laminador de fluxo previamente calibrado instalado na admissão do ventilador.

5) A medida da altura da coluna de grãos é realizada diretamente no tubo transparente com uma régua graduada em centímetros.

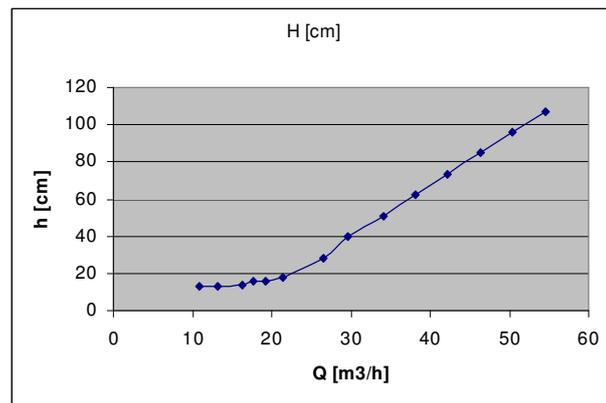
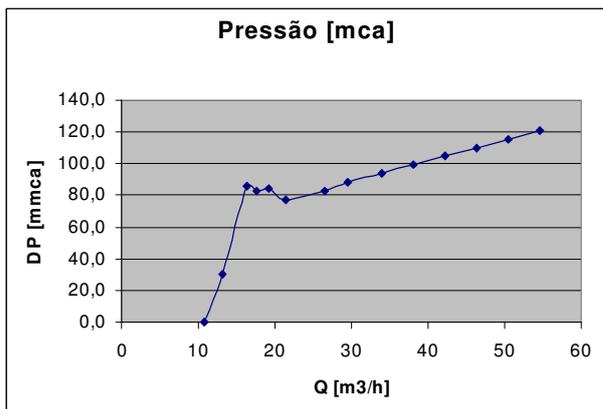


Fig. 121 - Gráfico $\Delta P \times Q$ e $\Delta P \times h$ - Arroz

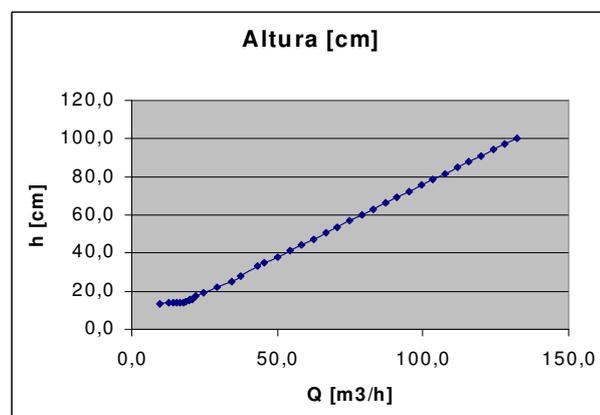
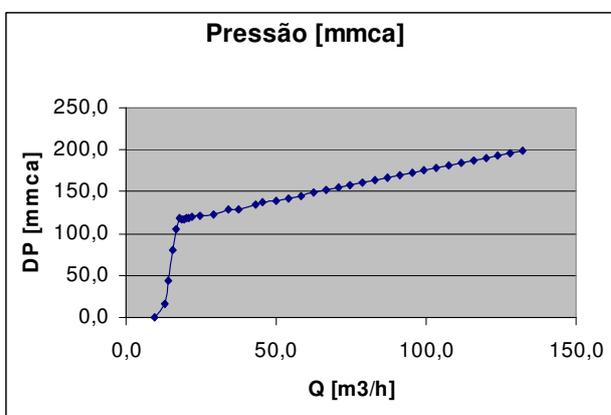


Fig. 122 - Gráfico $\Delta P \times Q$ e $\Delta P \times h$ - Feijão

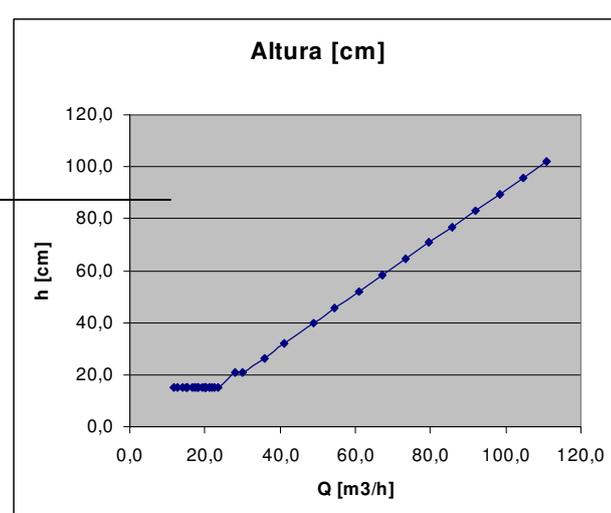
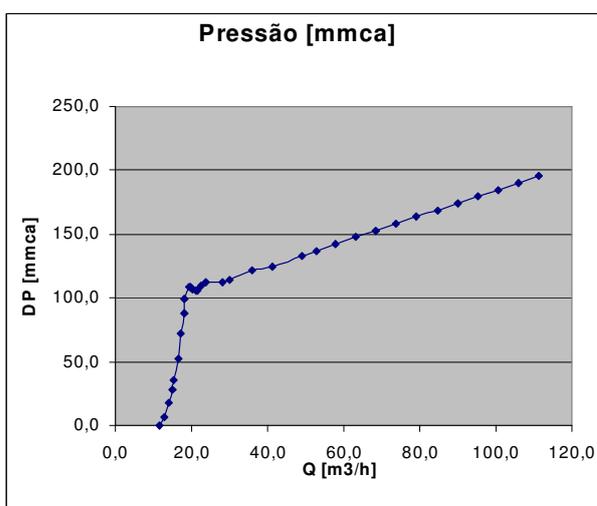
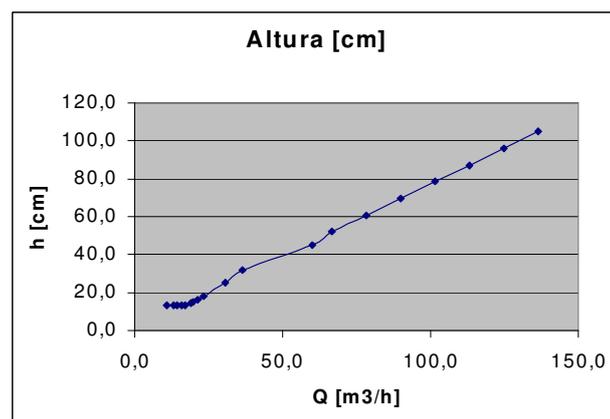
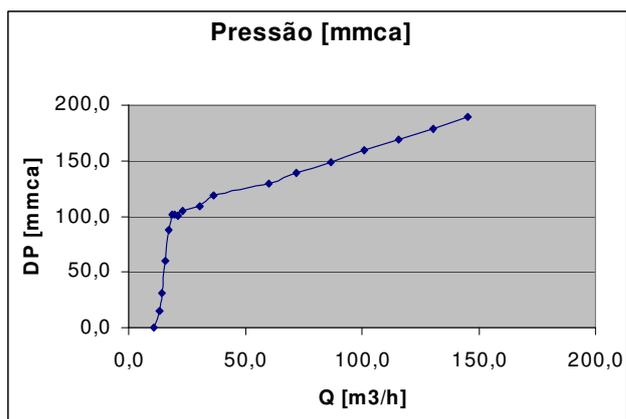
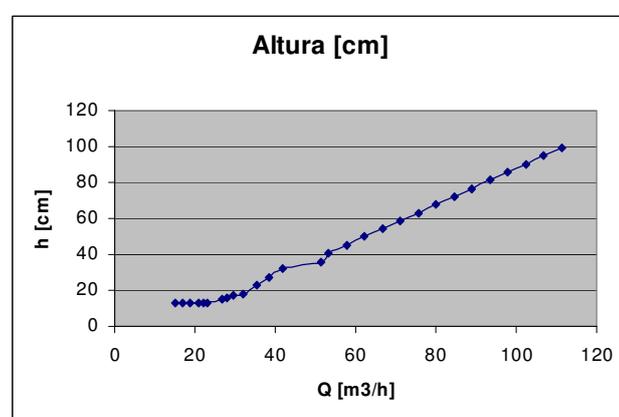
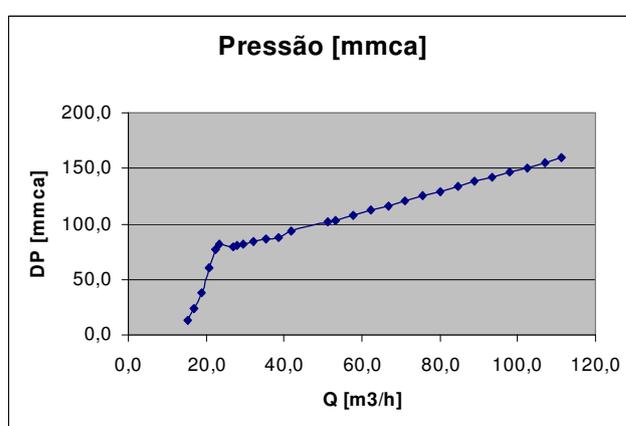
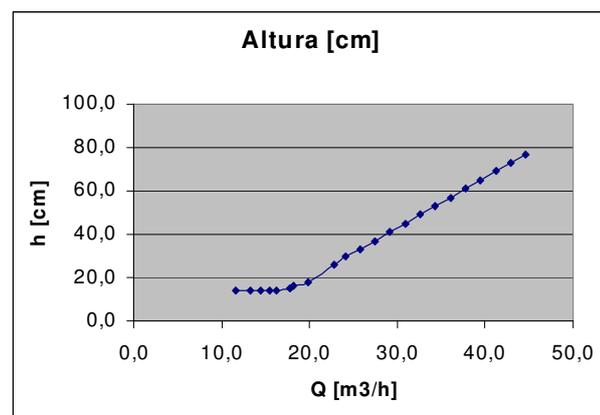
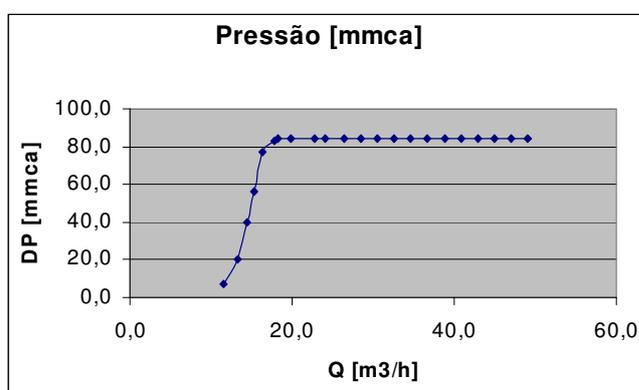


Fig. 123 - Gráfico $\Delta P \times Q$ e $\Delta P \times h$ - Milho

Fig. 124 - Gráfico $\Delta P_x Q$ e $\Delta P_x h$ - SojaFig. 125 - Gráfico $\Delta P_x Q$ e $\Delta P_x h$ - ErvilhaFig. 126 - Gráfico $\Delta P_x Q$ e $\Delta P_x h$ - Pimenta

APÊNDICE D – Velocidade Terminal

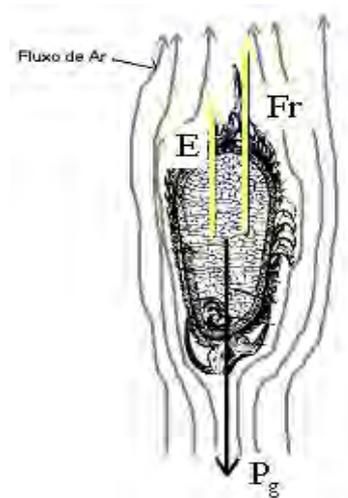


Fig. 127– Grão de arroz em suspensão no escoamento de ar

O grão sob ação do fluxo de ar em equilíbrio estático tem o seguinte somatório de forças na vertical:

$$P_g - E = Fr$$

Segundo Mohsenin, a força resistente é dada por:

$$Fr = \frac{1}{2} \cdot C \cdot A_p \cdot \rho_f \cdot V^2$$

portanto:

$$m \cdot g - \rho_f \cdot g \cdot V_p = \frac{1}{2} \cdot C \cdot A_p \cdot \rho_f \cdot V_t^2 \quad V_p = \frac{m}{\rho_f}$$

e a velocidade terminal fica determinada por:

$$V_t = \sqrt{\frac{2 \cdot m \cdot g \cdot (1 - \rho_f)}{C \cdot A_p \cdot \rho_f \cdot \rho_p}}$$

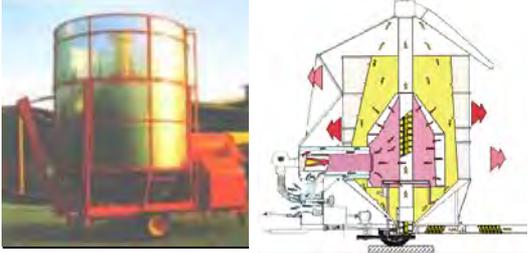
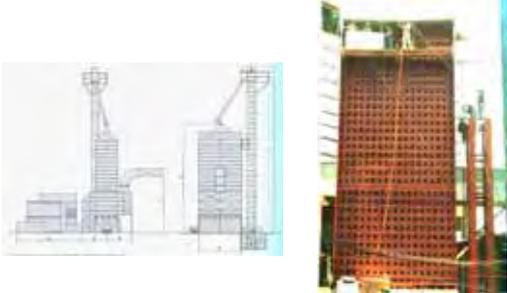
onde:

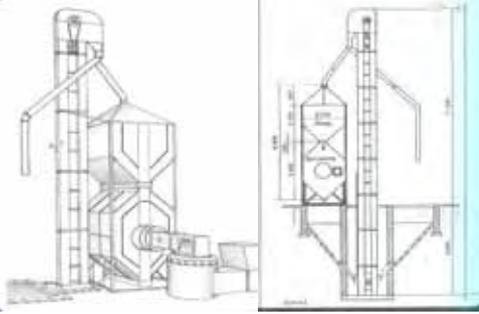
- P_g Peso
- E Empuxo
- Fr Força de arraste
- C Coeficiente de arraste função da forma do corpo
- A_p Área da projeção do corpo na direção do escoamento
- ρ_f Massa específica do fluido em escoamento (ar)

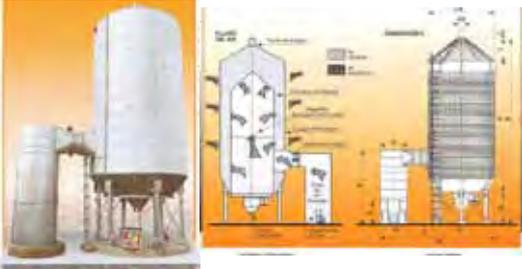
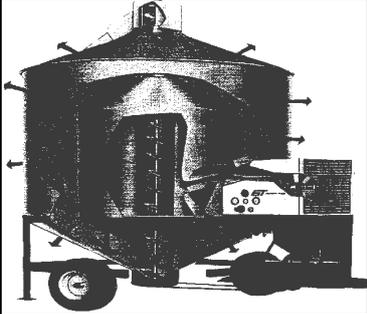
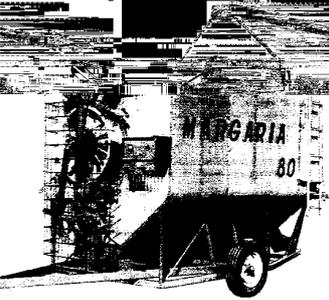
APENDICE E – Sistemas de Secagem Disponíveis Comercialmente

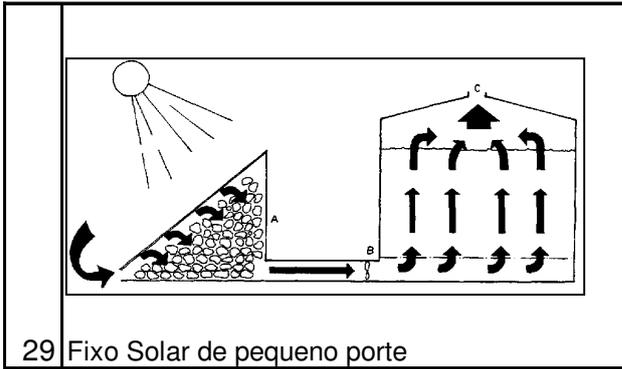
Secadores Disponíveis no Mercado																	
País	N.	Fabricante	Est.	Cidade	Email	Preço [R\$]	Data Cotação	Modelo	Dimensões Volume Total			Capacidade secagem [tonelada/h]	Capacidade carga desc. [ton/h]	Peso Equip. [kg]	Potência instalada [Cv]	Pressão Ventilador [mmca]	Vazão Ventilador [1000 m ³ /h]
									Comp. x Larg. x Altura	[C x L x A]	[m3]						
Hungria	1	Mikrotherm			midcom@matavnet.hu.			Estático									
Brasil	2	Agroamérica	SP	Tupá	agromerica@agromerica.com.br	19.514,25	08/mar	Estático	5 x 5,2 x 4,5	48,00				10	80	24	
Brasil	3	Agroamérica	SP	Tupá	agromerica@agromerica.com.br	30.429,00	08/mar	Móvel	6 x 2,4 x 3	23,00			1960	10	80	24	
Brasil	4	D'Andrea Agrotrends	SP	Limeira	info@agrotrends.com.br			Estático									
EUA	5	Aeroglide			sales@aeroglide.com			Estático									
UK	6	Master Farm			enquiries@masterfarm.co.uk			Estático									
EUA	7	ASREC Grain Dryer			mel-matheson@purdue.edu			Estático									
Brasil	8	Bandeirante	RS		sonia.band@via-rs.net			Estático									
USA	9	BEARD Industries			beard@graindryers.com			Estático									
Brasil	10	Carlos Becker Metalúrgica	RS	P. Alegre	info@carlosbecker.com.br			Estático	9,5x5,5x13		60			19			
Brasil	11	CASP	SP	Amparo	ventasagr@casp.com.br	40.526,00		Estático	4x4,5x6,4	9,00				5			
Brasil	12	Incobi			ventas@incobi.com.br			Estático	4x2,15x2,70	10,00							
Brasil	13a	Perozin	SC	Concórdia	perozin@perozin.com.br	15.000,00		Estático		9,00							
Brasil	13b	Perozin	SC	Concórdia	perozin@perozin.com.br	21.000,00		Estático		10,00							
Brasil	14	Pinhalense	SP	E. S. Pinhal	pinhalense@pinhalense.com.br			Rotativo									
Brasil	15	Palini	SP		palinives@ramtac.com.br					10,00				12			
Brasil	16	Sill	SP	Avaré	sill@sill.com.br												
Taiwan	17	Suncue Company Ltd.															
Brasil	18	Thor			thor@thor.com.br												
Brasil	19	Máquinas Vitória	RS	Pelotas	maquinas.vitoria.com.br												
Brasil	20a	KeplerWeber	RS	Panambi	marketing@kepler.com.br						40						
Brasil	20b	KeplerWeber	RS	Panambi	marketing@kepler.com.br												
Dinam.	21	Skantec			skantec@skantec.com.br												
Irlanda	22	Farrell Machinery															
Austrália	23	NECO															
EUA	24	Energy Miser															
EUA	25	Delux			info@deluxmfg.com												

Tabela 9 – Secadores disponíveis comercialmente

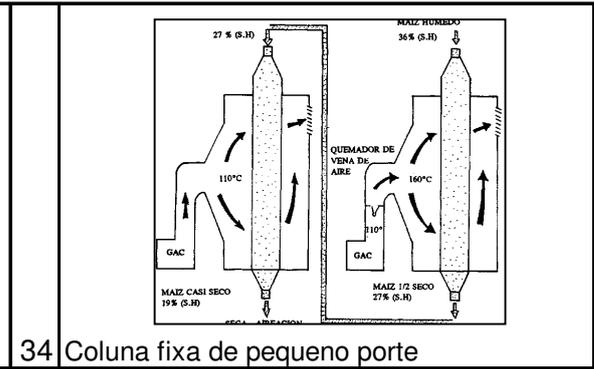
 <p>1 Produzido na Hungria .</p>	 <p>6 Produzido on Inglaterra, possui mobilidade.</p>
 <p>2 Produzido no Brasil, é próprio para amendoim</p>	 <p>7 Secador e silos(ao fundo) de grande porte</p>
 <p>3 Produzido no Brasil, próprio para amendoim (móvel)</p>	 <p>8 Brasileiro, instalação estática e baixo custo</p>
<p>4</p>	 <p>9 Equip.de grande porte (50 T/h) produzido nos EUA</p>
 <p>5 Equip.de grande porte produzido nos EUA</p>	 <p>10 Brasileiro de grande porte (60 T/h), estático.</p>

			
11	Brasileiro de médio porte (1,5 T/h)	15	
		16	
12	Brasileiro ,Rotativo pequeno porte (1,5 T/h)	16	Brasileiro,Coluna de pequeno porte
13a		17	
13a	Brasileiro,fixo de pequeno porte 700 (Kg/h)	17	Tailandes,coluna de pequeno porte.
13b		18	
13b	Brasileiro,coluna de pequeno porte (1,5 T/h)	18	
14		19	
14	Brasileiro,rotativo de pequeno porte (1 T/h)	19	

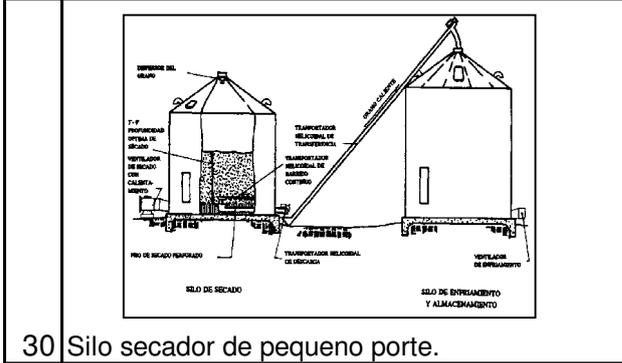
		
<p>20a</p>	<p>Brasileiro, Coluna de grande porte (50 T/h)</p>	<p>24 Fixo de médio porte</p>
<p>20b</p>		
<p>21</p>		
<p>22</p>		
<p>23</p>		<p>28 Fixo de pequeno porte</p>



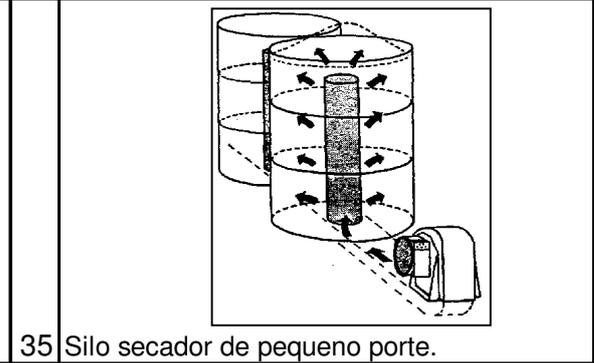
29 Fixo Solar de pequeno porte



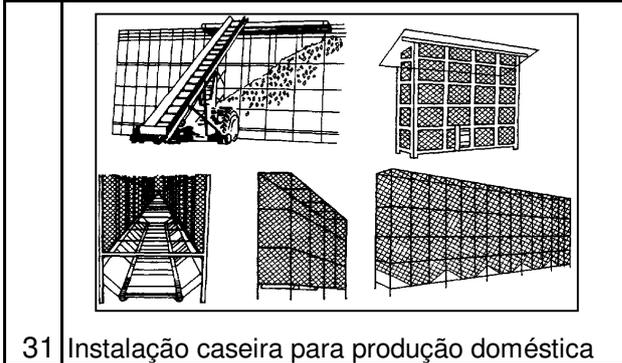
34 Coluna fixa de pequeno porte



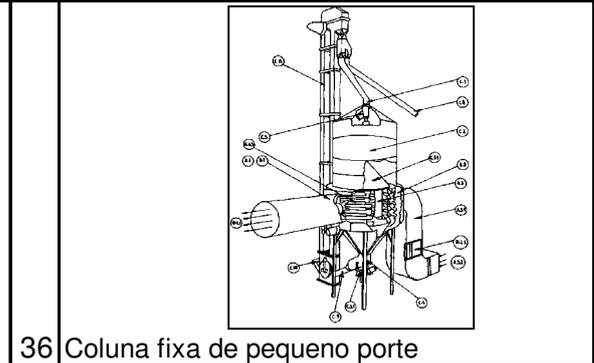
30 Silo secador de pequeno porte.



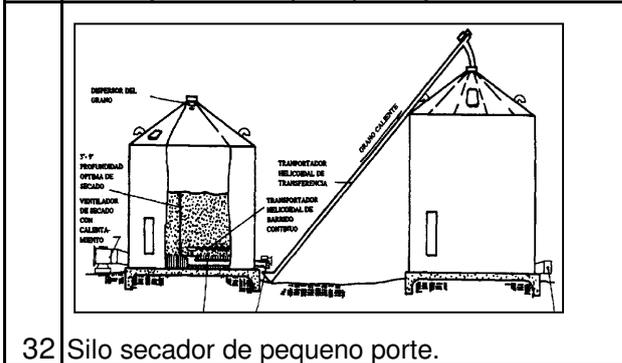
35 Silo secador de pequeno porte.



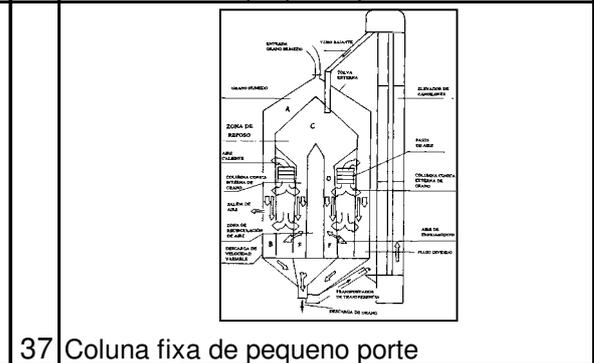
31 Instalação caseira para produção doméstica



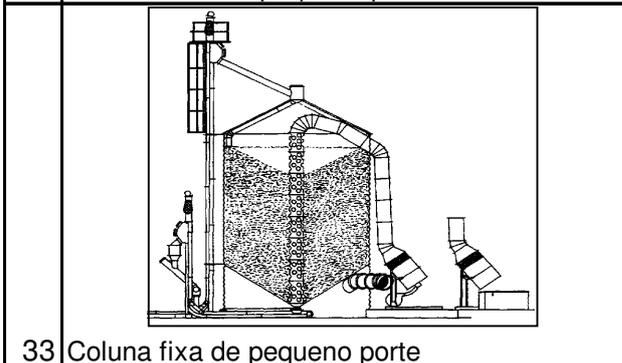
36 Coluna fixa de pequeno porte



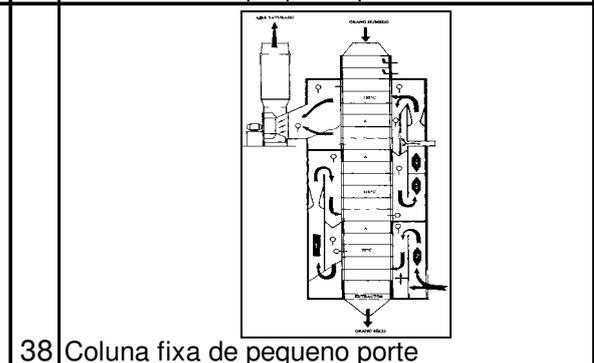
32 Silo secador de pequeno porte.



37 Coluna fixa de pequeno porte



33 Coluna fixa de pequeno porte



38 Coluna fixa de pequeno porte

	<p>47</p>
	<p>48</p>

Tab. 5 - Sistemas de Secagem disponíveis nacional e internacionalmente

ANEXO A – Propriedades Físicas dos Grãos

Características	Símbolo	Arroz em casca	Feijão	Milho	Soja	Trigo	Amendoim
% Umidade (base úmida)	M_{bu}	10,48	10,27	11,78	12,01	13,08	9,93
comprimento (cm)	d1	0,93	1,31	1,21	0,67	0,86	
largura (cm)	d2	0,30	1,10	1,06	0,56	0,40	
espessura (cm)	d3	0,22	1,00	0,54	0,64	0,38	
Propriedades							
Massa Específica Aparente [g/ml]	ρ_{ap}	0,62	0,79	0,74	0,74	0,82	0,63
Massa Específica Real [g/ml]	ρ_r	1,17	1,26	1,21	1,20	1,32	1,03
Massa de 1000 grãos ($M_{bs}=10\%$) [g]	S	15,00	200,00	260,00	150,00	29,00	
Diâmetro Equivalente [mm]	d_e	4,11	6,80	8,53	6,39	3,48	9,67
Área superficial [mm ²]	S		138	166,00		38,04	
Área Projetada [mm ²]	A_p	12,70	36,60		32,10		
Porosidade [%]	ϵ	46,79	37,75	38,60	37,99	37,39	39,79
Massa [mg]	m			263,00		29,00	
Coefficiente de Atrito c/ Chapa Galv.	A	0,01	0,02	0,02	0,25	0,20	0,03
Atrito interno	A_{int}	0,69	0,63	0,60	0,76	0,78	1,02
Velocidade Terminal [m/s]	V_t	8,50	14,07	12,50	14,83	11,12	14,50
Coefficiente de Arrasto	Ar	0,402	0,393	0,404	0,389	0,399	0,408
Calor espec. matéria seca [J/kg.oK]	c_d	1637,00	1293,00	1534,00		1260,00	
Condutividade Térmica [W/m . oK]	K	0,106		0,171		0,154	

Tab. 6 - Propriedades Físicas dos Grãos [Pabis, 1997]

ANEXO B – Valores Médios de Poder Calorífico Inferior (PCI)

Tab. 7 - Poder Calorífico inferior de vários combustíveis

Valores Médios - Ano 2000			
Produto	PCI [kcal/kg]	PCI [KJ/kg]	Massa específica [t/m ³] 1)
Alcool Hidratado	5952	24879,4	0,81000
Alcool anidro	6400	26752,0	0,79000
Asfalto diluído de Petróleo	9590	40086,2	1,04000
Coque Verde de Petróleo	8390	35070,2	1,04000
GLP	11030	46105,4	0,55000
Gás Natural	13160	55008,8	0,00074
Gasolina A	10010	41841,8	0,72000
Galolina C	8980	37536,4	0,72000
Gasolina de aviação	10600	44308,0	0,72000
Nafta (não energética)	10630	44433,4	0,70000
Óleo Combustível Marítimo	9590	40086,2	0,98000
Óleo Combustível 2)	9590	40086,2	0,98000
Óleo Diesel	10060	42050,8	0,83000
Óleo Lubrificante	10080	42134,4	0,88000
Outros Energéticos	9670	40420,6	0,90000
Outros Não-Energéticos	9040	37787,2	1,00000
Parafina	10400	43472,0	0,75000
Petróleo Importado ATE	10160	42468,8	0,88000
Petróleo Importado BTE	10160	42468,8	0,85000
Petróleo Nacional (Mar)	10160	42468,8	0,89000
Petróleo Nacional (Mistura Terra e Mar)	10160	42468,8	0,86000
Petróleo Nacional (Terra)	10160	42468,8	0,86000
QAV	10400	43472,0	0,79000
Querosene Iluminante	10400	43472,0	0,79000
Solvente	10550	44099,0	0,73000
Fonte: Petrobrás / ABAST			
1) Á temperatura de 20 oC e 1 atm para os derivados de petróleo e de gás natural			
2) Óleos Combustíveis ATE e BTE			

Tab.8 - PCI da madeira

Cavacos de Madeira usados na Suécia, base seca.

Carbono	49%
Hidrogênio	6,4%
Enxofre	0,05%
Oxigênio	42,1%
Nitrogênio	0,45%
Cinzas	2,0%
PCI (base seca)	18500 kJ/kg
Umidade (base úmida)	50%