



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS
FACULDADE DE AGRONOMIA ELISEU MACIEL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE
SEMENTES

DESENVOLVIMENTO DE MÓDULO COMPUTACIONAL PARA A SECAGEM ESTACIONÁRIA DE SEMENTES

DANIEL SILVA GUIMARÃES

Tese apresentada à Universidade Federal de Pelotas, sob a orientação do Prof. Leopoldo Baudet, *Ph.D.*, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Sementes, para obtenção do título de Doutor em Ciências.

PELOTAS

Rio Grande do Sul - Brasil

Novembro de 2005

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

Dados de catalogação na fonte:
(Marlene Cravo Castillo – CRB-10/744)

M963d Guimarães, Daniel Silva

Desenvolvimento de módulo computacional para a secagem estacionária de sementes / Daniel Silva Guimarães ; orientador Leopoldo Baudet . – Pelotas, 2005. –165f. : il. Tese (Doutorado). Ciência e Tecnologia de Sementes. Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel. Universidade Federal de Pelotas,. Pelotas, 2005.

1. Aeração secante 2. Simulação 3. Pressão estática 4. Sementes 5. Grãos I Baudet, Leopoldo (orientador) II .Título.

CDD 631.54

COMITÊ DE ORIENTAÇÃO

ORIENTADOR:

LEOPOLDO BAUDET
Eng. Agrônomo, *Ph.D.*
Professor Titular
Universidade Federal de Pelotas

CO-ORIENTADORES:

FRANCISCO AMARAL VILLELA
Eng. Agrícola, Dr.
Professor Adjunto
Universidade Federal de Pelotas

SILMAR TEICHERT PESKE
Eng. Agrônomo, *Ph.D.*
Professor Titular
Universidade Federal de Pelotas

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Dr. Leopoldo Baudet Labbé

Prof. Dr. Francisco Amaral Villela

Prof. Dr. Wolmer Brod Peres

Prof. Dr. Manoel Artigas Schirmer

Prof. Dr. Manoel Brenner de Moraes

Prof. Dr. Luiz Antonio de Almeida Pinto

Aprovada em: 07/11/2005.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por tudo, pelo constante amparo.

Ao Professor Leopoldo Mário Baudet, pela orientação, colaboração e amizade.

Ao Professor Francisco Amaral Villela, pela co-orientação, colaboração, amizade e incentivo.

Aos professores e funcionários do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Sementes, pela atenção e cordialidade.

Aos Colegas, pela amizade e companheirismo.

Aos meu pais, Rev. Eloy J. L. Guimarães (in memoriam) e
Prof^a. Clélia Ferreira da Silva Guimarães.

À minha esposa,
Ana Leonor

Aos meus filhos,
Vinícius, Daniel Júnior e Gabriel.

DEDICO

ÍNDICE

RESUMO.....	IX
ABSTRACT	X
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	5
2.1. Secagem de sementes de soja	5
2.2. Princípios da secagem	6
2.2.1. Parâmetros externos.....	6
2.2.1.1. Pressão parcial de vapor do ar saturado	7
2.2.1.2. Pressão parcial de vapor	9
2.2.1.3. Volume específico do ar	10
2.2.1.4. Razão de mistura.....	10
2.2.1.5. Calor latente de vaporização	11
2.2.1.6. Determinação da entalpia da mistura ar-vapor de água	12
2.2.1.7. Temperatura de bulbo úmido.....	13
2.2.1.8. Validação das expressões das propriedades psicrométricas do ar	15
2.2.1.9. Pressão atmosférica	15
2.2.2. Parâmetros internos.....	17
2.2.2.1. Grau de umidade	17
2.2.2.2. Higroscopicidade e equilíbrio higroscópico.....	19
2.2.2.3. Diferentes comportamentos da semente em relação ao EH.....	19
2.2.2.4. Equações e curvas de equilíbrio higroscópico.....	20
2.2.2.5. Equação de <i>HENDERSON-THOMPSON</i>	23
2.2.2.6. Equação de <i>CHUNG-PFOST</i>	24
2.2.2.7. Equação de <i>ROA</i>	25
2.2.2.8. Equações da <i>ASAE D245.5 (1995)</i>	26
2.2.2.9. Utilização das EEH e CEH.....	27
2.2.2.10. Calor específico da semente.....	29
2.2.2.11. Calor latente de vaporização	30

2.2.2.12. Massa específica	33
2.3. Teoria da secagem	34
2.3.1. Secagem em camada fixa.....	34
2.3.1.1. O processo de secagem em leito fixo	35
2.3.1.2. Equação de balanço de calor.....	37
2.3.2. Secagem da camada elementar – camada delgada.....	41
2.3.2.1. Equações de camada delgada obtidas teoricamente	43
2.3.2.2. Equações semi-empíricas.....	49
2.3.2.3. Equações de secagem empíricas	51
2.3.2.3.1. Equação de <i>THOMPSON (1968)</i>	51
2.3.2.3.2. Equação de <i>ROA & MACEDO (1976)</i>	51
2.3.2.3.3. Equação camada delgada de <i>TROEGER & HUKILL (1971)</i>	54
2.3.2.4. Equações de acordo com <i>ASAE S448 DE 1999</i>	56
2.4. Modelos de secagem.....	57
2.4.1. Classificação dos modelos.....	57
2.4.2. Modelo da Universidade Estadual de Michigan (<i>MSU</i>)	61
2.4.2.1. Estabelecimento do modelo.....	62
2.4.2.1.1. ED da variação de temperatura do ar	63
2.4.2.1.2. ED da variação da temperatura da semente em relação ao tempo	66
2.4.2.1.3. ED da variação da <i>RM</i> ao passar pela camada elementar.....	70
2.4.2.1.4. Equação diferencial da variação do grau de umidade em relação ao tempo	72
2.4.2.1.5. Condições iniciais de contorno	72
2.4.2.1.6. Validação e solução para o modelo de camadas espessas	73
2.4.3. O modelo de <i>THOMPSON</i>	74
2.4.3.1. Princípios físicos utilizados na concepção do modelo	74
2.4.3.2. Expressões das propriedades físicas utilizadas na simulação	75
2.4.3.3. Relações utilizadas no modelo de <i>THOMPSON</i>	75
2.4.3.3.1. Equação da camada delgada	75
2.4.3.3.2. Equilíbrio higroscópico, calor latente e calor específico	77
2.4.3.3.3. Hipóteses de simplificação do processo de simulação	77
2.4.3.3.4. Balanço térmico	78
2.4.3.3.5. Temperatura de equilíbrio inicial.....	81
2.4.3.3.6. Seqüência a ser utilizada no processo de simulação	82
2.4.3.3.7. Balanço de calor e determinação da temperatura final.....	84

2.4.3.3.8. Determinação do calor de vaporização da água da semente.....	84
2.4.3.3.9. Temperatura final da camada delgada	85
2.4.3.3.10. Verificação da existência do ponto de inconsistência do ar.....	86
2.4.3.3.11. Secagem da camada espessa.....	86
2.4.3.3.12. Versatilidade do modelo	87
2.5. Resistência exercida pela semente à passagem do ar.....	87
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	93
3.1. Modelagem computacional.....	93
3.1.1. Parâmetros externos.....	94
3.1.2. Parâmetros internos.....	94
3.2. Secagem	95
3.2.1. Caracterização da célula de secagem	95
3.2.2. Instrumentos de medição.....	98
3.2.3. Máquina de ar e peneiras	99
3.2.4. Metodologia	99
3.3. Vazão e pressão.....	100
3.3.1. Instrumentos de medição.....	101
3.3.2. Procedimento estatístico.....	101
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	103
4.1. Secagem experimental.....	103
4.1.1. Umidade final da semente	103
4.1.2. Variações de temperatura.....	104
4.1.3. Curvas de secagem	108
4.2. Modelagem computacional.....	113
4.2.1. Descrição e telas do programa <i>SeeDry</i>	113
4.2.2. Procedimento de discretização	119
4.2.3. Variação da massa específica	121
4.2.4. Comparativo entre as curvas de secagem obtidas por simulação e experimentalmente	122
4.3. Pressão Estática.....	126
5. CONCLUSÕES	135
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	136
7. APÊNDICES	140

DESENVOLVIMENTO DE MÓDULO COMPUTACIONAL PARA A SECAGEM ESTACIONÁRIA DE SEMENTES

Autor: Daniel Silva Guimarães

Orientador: Prof. Leopoldo Baudet, PhD.

Resumo - O presente trabalho teve por objetivo o desenvolvimento de programa para microcomputador para a determinação do tempo de secagem de sementes e grãos em camada fixa. Para validação do programa, experimentalmente, foram utilizados três lotes de sementes de soja da cultivar *Monsoy 7575* depositadas em uma célula de secagem com fundo em chapa de aço perfurada, com 1,85m de diâmetro, uma altura de camada de 1,21m e secados até o grau de umidade médio de 12% (base úmida). Antes de ser armazenada, a semente foi limpa numa máquina de ar e peneiras para a retirada de materiais indesejáveis. O fluxo de ar utilizado foi de $0,43\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-3}$ ($35,64\text{m}^3\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{t}^{-1}$) com um conjunto de resistências elétricas para o aquecimento do ar ambiente de até 5°C. Adicionalmente foi determinada a resistência à passagem de ar pela camada de sementes para fluxos de ar entre $0,12$ e $0,43\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-3}$ ($9,82$ e $35,64\text{m}^3\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{t}^{-1}$) através da medida da queda de pressão. Os resultados obtidos experimentalmente foram comparados com os obtidos no programa desenvolvido, mostrando que o modelo e o conjunto de equações utilizadas são válidos para a simulação de secagem de sementes de soja em camada fixa e que o uso de microcomputadores e programas específicos torna acessível a simulação de secagem para profissionais, sem a necessidade de conhecimentos aprofundados dos fenômenos envolvidos e sua modelagem físico-matemática. Outro resultado mostrou que há uma variação de pressão menor que a obtida pela equação de *HUKILL & SHEDD (1955)* com coeficientes do padrão D272.3 da *American Society of Agricultural Engineers*. Assim sendo, Novos coeficientes para a equação de *HUKILL & SHEDD* foram estabelecidos.

Termos para indexação: aeração secante; simulação; pressão estática; sementes e grãos.

DEVELOPMENT OF A COMPUTATIONAL MODULE FOR STATIONARY SEED DRYING

Author: Daniel Silva Guimarães

Adviser: Prof. Leopoldo Baudet, PhD.

ABSTRACT - The present work had for objective the development of a microcomputer program to determine the drying time of seeds and crops for fixed bed. It was used three lots of soybean seeds of cultivate *Monsoy 7575* storage in a perforated floor drying bin with 1,86m of diameter and seed depth of 1,21m. The seeds were dried to 12% (wet basis). Before storage, the seeds were cleaned in a air screen machine to remove undesirable materials. The air flow was $0,43\text{m}^3.\text{s}^{-1}.\text{m}^{-3}$ ($35,64\text{m}^3.\text{min}^{-1}.\text{t}^{-1}$) and the air was heated of until 5°C by a set of electrical resistances. In addition, the pressure drop across grain seed bed was measured for the air flow rates $0,12$ e $0,43\text{m}^3.\text{s}^{-1}.\text{m}^{-3}$ ($9,82$ e $35,64\text{m}^3.\text{min}^{-1}.\text{t}^{-1}$). The experimental results were compared to results of developed program concluding that the model and equations used are valid to simulate soybean seeds drying in a fixed bed and the use of microcomputers and specific programs make possible the use of this tool by professionals without physic and mathematic model phenomena knowledge. Another result showed that it has a variation of lesser pressure that the gotten one for the expression of HUKILL & SHEDD (1955) with coefficients of the D272.3 standard of American Society of Agricultural Engineers. New coefficients were established for the HUKILL & SHEDD expression.

Index terms: drying aeration; drying simulation; static pressure; grains and seeds

1. INTRODUÇÃO

O alimento é um direito fundamental e é negado a centenas de milhões de homens. Segundo a Organização das Nações Unidas para a Alimentação (FAO, 2001), no Brasil existem aproximadamente dezesseis milhões de famintos – cerca de 10% da população.

As perdas de pós-colheita, atualmente, estão estimadas em torno de 20 a 30% da produção anual de grãos. A diminuição destas perdas provocaria, de imediato, um aumento na disponibilidade de alimentos com um mínimo de investimento, pois os recursos financeiros aplicados em pesquisa e difusão tecnológicas são largamente compensados pelo aproveitamento de recursos já gastos em etapas anteriores no processo de produção.

Os danos devido ao retardamento de secagem de sementes fazem com que esta etapa do processo de beneficiamento seja considerada o ponto crítico de uma Unidade de Beneficiamento de Sementes (UBS). A obtenção de sementes de alta qualidade está diretamente relacionada com o tempo para iniciar, duração e forma com que a semente é secada. A análise dos pontos críticos de “estrangulamento de fluxo” de uma UBS aponta, invariavelmente, para a secagem. A escolha do método de secagem e, conseqüentemente, do secador é, desta forma, de relevante importância.

O elevado custo dos equipamentos de secagem a serem utilizados numa UBS faz com que o correto dimensionamento e adequada operação sejam críticos tanto no projeto de uma unidade nova como na alteração de uma unidade existente.

A análise do processo de secagem em secadores deve ser cuidadosamente efetuada antes da implantação de uma UBS. Dependendo das espécies e cultivares de sementes a serem secadas, há a necessidade de um cuidadoso estudo prévio de todas as variáveis explanatórias envolvidas no processo.

Por tratar-se de um ser biologicamente ativo o estudo do fenômeno da secagem de sementes é de alta complexidade e envolve a análise de diversos fatores que intervém direta e/ou indiretamente no processo. Apesar de ser uma área onde o conhecimento científico existente necessite de um número maior e mais aprofundado de pesquisas relativas aos mecanismos inerentes ao processo de retirada da água da semente, é possível com os recursos tecnológicos existentes - principalmente computacionais - ter-se uma estimativa aceitável das variáveis envolvidas e com isto se alcançar resultados práticos satisfatórios.

As tecnologias existentes devem, contudo, ser aprimoradas e um dos recursos mais empregados para a verificação de níveis de eficiência e otimização de sistemas, é o uso de modelos matemáticos que reproduzam de forma virtual, em microcomputadores, os processos de interesse.

Neste sentido, pesquisas com o intuito de contribuir para a diminuição das perdas de pós-colheita são da maior importância, através do desenvolvimento de processos de avaliação de desempenho de equipamentos e técnicas inovadoras de incremento da qualidade de sementes com a incorporação de novos conhecimentos. O Brasil encontra-se tecnologicamente defasado na área de pré-condicionamento de sementes, destacando-se as etapas que envolvem a secagem, o armazenamento e o beneficiamento.

A quase inexistência de pesquisas que envolvam de maneira integrada as áreas de controle de qualidade, adoção de tecnologia de ponta e o controle computacional dos processos envolvidos ressaltam a importância desta área de conhecimento. Esta é uma estratégia que consiste na representação, através da modelagem físico-matemática, de um processo físico. O primeiro passo é, portanto, a construção de um modelo matemático por meio do qual o processo possa ser descrito. Os modelos de secagem podem ser utilizados para prever o

comportamento de um tipo particular de secador e, também, para determinar o efeito da mudança em certos parâmetros na eficiência de secagem (SINÍCIO & ROA, 1980).

Com os aumentos da velocidade e da capacidade de processamento e diminuição de custo dos microcomputadores tornou-se possível sua utilização no estudo de diversos processos, entre eles, o de secagem de sementes. As atuais técnicas computacionais permitem que processos possam ser representados e analisados em ambientes gráficos interativos, onde é possível a visualização, de tal forma que estudos que há algum tempo somente podiam ser realizados em centros de processamento de dados com computadores de alta capacidade e por equipes especializadas, sejam hoje acessíveis para todos àqueles que, com alguma formação técnica, deles necessitem (MATA & DANTAS, 1998).

No Brasil, pesquisadores, projetistas, produtores e os demais envolvidos na importante etapa da secagem no processo de beneficiamento de sementes, não dispõem de forma acessível as informações necessárias ao dimensionamento adequado. O desenvolvimento de “softwares” que permitam a análise computacional da secagem de sementes possibilitará a otimização do processo. Os recursos computacionais disponibilizam um instrumento eficiente de avaliação sistemática dos dados que intervêm no processo o que conduz a uma maior eficiência no dimensionamento e expressiva redução de custos e tempo de projeto. O desenvolvimento deste tipo de programa de computador facilita o controle interno de qualidade das empresas produtoras de sementes. Outro fator relevante é a falta de dados a serem utilizados nos modelos computacionais para sementes de grandes culturas brasileiras, como é o caso de soja, milho e arroz.

A inexistência destes dados para as espécies e cultivares produzidos no Brasil pode conduzir a resultados totalmente distintos dos reais. Desta forma, com a finalidade de contribuir para o aperfeiçoamento da secagem de sementes de soja em camada fixa, o presente trabalho teve os seguintes objetivos:

- Desenvolvimento de programa para microcomputador para a simulação do processo de secagem de sementes, através do Modelo de THOMPSON *et al.* (1968) e comparação com os testes experimentais realizados;
- Verificação experimental do programa pela determinação do tempo de secagem em camada fixa para sementes de soja;

- Determinação da resistência à passagem de ar pela semente de soja cultivar *Monsoy 7575*, armazenada em uma célula de prova para fluxos de ar entre 0,12 e 0,43m³.s⁻¹.m⁻³ (9,82 e 35,64m³. min⁻¹.t⁻¹) e ajuste dos parâmetros da fórmula de *HUKILL & SHEDD (1955)*.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Secagem de sementes de soja

As sementes atingem o ponto de máximo vigor e germinação ao alcançar a maturidade fisiológica. Este estágio é caracterizado como demarcador e a partir dele a semente, tendo interrompido a ligação vascular com a planta mãe, não recebe mais nutrientes permanecendo ligada a esta apenas fisicamente. Neste ponto a semente atinge o seu conteúdo máximo de reservas e seu grau de umidade é ainda muito alto. O grau de umidade no ponto de maturidade fisiológica para a semente de soja situa-se em torno de 50%. É nesta fase que as plantas iniciam o processo de secagem no campo. A partir da maturidade fisiológica, o grau de umidade decresce rapidamente até alcançar um patamar em que oscila de acordo com as trocas realizadas com o ar ambiente. Devido às dificuldades apresentadas na colheita mecânica e aos danos mecânicos, sementes de soja necessitam secar no campo até graus de umidade de 15 a 18 %. Isto acontece, em condições favoráveis num período de quinze dias depois de alcançar a maturidade fisiológica (*PESKE et al., 2003*).

A secagem artificial da semente de soja envolve uma série de peculiaridades. Por se altamente suscetível ao dano mecânico, uma alternativa é a secagem de sementes de soja em camadas fixas. Neste tipo de secagem, a semente permanece estática e o ar de secagem é forçado a passar através do espaço intersticial da

massa de sementes. A temperatura máxima recomendável do ar, para este tipo de secagem, deve ser de 38 °C.

Estudos conduzidos por *LEVIEN (2005)* mostraram a obtenção de melhores resultados de germinação das sementes na operação de secagem de soja, em secador estacionário com distribuição radial do ar, quando se utiliza baixa umidade relativa do ar no início da secagem e alta umidade relativa do ar no final da secagem.

2.2. Princípios da secagem

O estudo da simulação de secagem de sementes depende da utilização de um conjunto de equações que traduzam matematicamente os fenômenos envolvidos no processo.

Segundo *SODHA (1987)*, a secagem é regida por dois conjuntos de parâmetros:

- Parâmetros referentes às propriedades do ar de secagem, também conhecidos como “parâmetros externos”, que se referem ao estabelecimento das relações existentes entre o ar e o vapor de água do ar de secagem.
- Parâmetros referentes às propriedades do produto a ser secado, também conhecido como “parâmetros internos”, que se referem ao estabelecimento das relações existentes entre a semente e o seu grau de umidade.

2.2.1. Parâmetros externos

Na secagem, o ar é o meio utilizado para retirar água da semente sendo, desta forma, o conhecimento de suas propriedades de importância fundamental.

No estabelecimento das relações entre o ar de secagem e o vapor de água nele contido são utilizadas várias equações. As duas grandezas fundamentais (grandezas a partir das quais as demais são estabelecidas) são: a razão de mistura e a temperatura do ar. As cartas psicrométricas têm por base estes dois parâmetros (*BERN & BOILY, 1985*).

Na confecção de um modelo matemático que represente os fenômenos envolvidos no processo de secagem, há a necessidade de se estabelecer de forma algébrica as relações existentes entre as propriedades do ar de secagem. Estas mesmas propriedades se encontram expressas de forma gráfica na carta psicrométrica.

A obtenção da temperatura do ar e da umidade relativa pode ser efetuada através da leitura do termômetro de bulbo seco e termômetro de bulbo úmido ou de medidores que, através de transdutores, informam diretamente o valor destes parâmetros.

Portanto, é a partir da temperatura e umidade relativa do ar ambiente e da temperatura do ar de secagem que as demais características do ar podem ser estabelecidas.

2.2.1.1. Pressão parcial de vapor do ar saturado

O ar atmosférico, composto basicamente da mistura de gases e vapor de água, pode ser considerado uma mistura ideal de gases que segue a lei de *GIBBS-DALTON* para pressões parciais (*BROOKER et al., 1992*). A lei de *GIBBS-DALTON* para este caso pode ser expressa por:

$$P = \sum P_p \quad (1)$$

Sendo:

P_p – pressão parcial;

P – pressão total.

Considerando-se que a soma das pressões parciais devido aos gases é igual à pressão do ar seco, a equação (1) passa a ser:

$$P = P_a + P_v \quad (2)$$

O subscrito *a* refere-se ao ar e o subscrito *v* é refere-se ao vapor de água.

Para as condições de secagem da semente, a lei dos gases perfeitos expressa de forma satisfatória a relação existente entre a pressão, a temperatura e o volume de ar seco associado ao vapor da água. Assim sendo, pode-se escrever, através da equação de *Clapeyron* ou equação de estado dos gases ideais, para o ar seco segundo equação (2):

$$P_a V_a = m_a R_a T_{abs} \quad (3)$$

E para o vapor de água:

$$P_v V_v = m_v R_v T_{abs} \quad (4)$$

Sendo:

P – pressão parcial (Pa).

V – volume (m^3).

m – massa (kg);

R – constante do gás, quociente entre a constante universal dos gases e a massa molar (para o ar seco é de $287,09 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ e para o vapor da água é de $461,91 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$).

T_{abs} – temperatura absoluta do bulbo seco (K).

Os índices *a* e *v*, nas equações (3) e (4) correspondem ao ar seco e ao vapor de água, respectivamente.

A equação de *Clausius-Clapeyron* pode ser usada para determinar a pressão de vapor do ar de secagem *HOWEL & BUCKIUS (1987 apud BROOKER et al.)*. Como a temperatura do ar utilizado na secagem de sementes é muito inferior a do ponto crítico de vapor da água, os termos da equação de *Clausius-Clapeyron* podem ser escritos da seguinte forma (*COSTA, 1977*):

$$\frac{dP_v}{dT_{abs}} = \frac{L_{sat}}{T_{abs} V_v} \quad (5)$$

O calor latente de vaporização L_{sat} é determinado para a condição de saturação e obtido usando-se a seguinte equação:

$$L_{sat} = 2,503 \times 10^6 - 2,386 \times 10^3 (T_{abs} - 273,16) \quad (6)$$

$$273,16 \leq T_{abs} (K) \leq 338,72$$

Explicitando-se V_V a equação (4), substituindo seu valor juntamente com o valor de L_{sat} na (6) e na (5), resolvendo a equação diferencial resultante por separação de variáveis e integrando obtém-se a equação que expressa P_s (Pa) em função T_{abs} (K):

$$P_s = \exp\left(60,43 - \frac{6829,81}{T_{abs}} - 5,17 \ln(T_{abs})\right) \quad (7)$$

A relação entre P_s e T_{abs} é representada, contudo, mais satisfatoriamente através da fórmula empírica adaptada (ASAE D271.2, 1980) :

$$\ln\left(\frac{P_s}{R_1}\right) = \frac{A + BT_{abs} + CT_{abs}^2 + DT_{abs}^3 + ET_{abs}^4}{FT_{abs} - GT_{abs}^2} \quad (8)$$

$$273,16 \leq T_{abs} (K) \leq 533,16$$

Sendo:

$$\begin{array}{ll} R_1 = 22.105.649,25 & A = -27.405,526 \\ B = 97,5413 & C = -0,146244 \\ D = 0,12558 \times 10^{-3} & E = -0,48502 \times 10^{-7} \\ F = 4,34903 & G = 0.39381 \times 10^{-2} \end{array}$$

Sendo:

$$T_{abs} = T + 273,16 \quad (9)$$

2.2.1.2. Pressão parcial de vapor

Através da umidade relativa e da pressão parcial de vapor saturado (obtida a partir da temperatura) se pode determinar a pressão parcial de vapor do ar:

$$P_v = \frac{UR}{100} P_s \quad (10)$$

2.2.1.3. Volume específico do ar

O volume específico do ar é obtido diretamente das leis para um gás ideal, através da seguinte equação:

$$\begin{aligned} \mu_{esp} &= \frac{1}{\rho_a} = \frac{R_a \cdot T_{abs}}{P_a} = \frac{287,09 \cdot T_{abs}}{P_{atm} - P_v} \\ p / P_v &< P_{atm} \\ 255,38 &\leq T_{abs} \leq 533,16 \end{aligned} \quad (11)$$

Sendo:

R_a – constante de *Clapeyron* para o ar seco – $287,09(\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$;

ρ_a – massa específica do ar seco ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$).

Uma outra equação útil para a determinação do volume específico é:

$$\mu_{esp} = \frac{R_a T_{abs}}{P_{atm}} (1 + 1,608 \cdot RM) \quad (12)$$

2.2.1.4. Razão de mistura

A razão de mistura, também chamada de razão úmida e umidade absoluta, expressa a massa de vapor de água por unidade de massa do ar seco.

Para a sua obtenção se aplicam as leis válidas para um gás ideal num volume arbitrário “V” de ar úmido a uma temperatura T_{abs} . A massa de vapor de água é calculada levando-se em consideração as equações (3) e (4), isolando n_a , n_v e a massa de ar seco, respectivamente. Uma vez que $V = V_v = V_a$ esta razão se torna:

$$RM = \frac{n_v}{n_a} = \frac{R_a \cdot P_v}{R_v \cdot P_a} = \frac{R_a \cdot P_v}{R_v \cdot (P_{atm} - P_v)} \quad (13)$$

Sendo:

$$R_a = 287,09 \text{ kg m}^2 \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1};$$

$$R_v = 461,91 \text{ kg m}^2 \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}.$$

Substituindo-se os valores das constantes R_a e R_v na equação (13) se obtêm:

$$RM = \frac{0,6219 \cdot P_v}{P_{atm} - P_v}$$

$$p / P_v < P_{atm} \tag{14}$$

$$255,38 \leq T_{abs} \leq 533,16$$

2.2.1.5. Calor latente de vaporização

O calor latente de vaporização é determinado, para a condição de saturação, pela equação desenvolvida por *BROOKER (1967)* e dados experimentais obtidos por *KEENAN & KEYES (1936 apud BROOKER et al., 1992)*.

Dois equações são usadas para a determinação de L_{sat} em função da temperatura absoluta:

$$L_{sat} = 2,503 \times 10^6 - 2,386 \times 10^3 \cdot (T - 273,16)$$

$$273,16 \leq T(K) \leq 338,72 \tag{15}$$

e:

$$L_{sat} = (7,33 \times 10^{12} - 1,60 \times 10^7 \cdot T^2)^{1/2}$$

$$338,72 < T(K) \leq 533,16 \tag{16}$$

Sendo:

L_{sat} – calor latente de vaporização saturado ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$).

T – temperatura absoluta do ar (K).

2.2.1.6. Determinação da entalpia da mistura ar-vapor de água

A entalpia da mistura ar - vapor de água, em joules por quilograma de ar seco, é obtida pela soma da entalpia do ar, entalpia da água no ponto de orvalho, entalpia da evaporação na temperatura de ponto de orvalho e da entalpia do vapor de água superaquecido (ASAE D271.2, 1980):

$$E = 1006,92540 (T_{abs} - 273,16) + 4186,8 RM (T_{po} - 273,16) + L_{po} RM + 1875,6864 RM (T_{abs} - T_{po}) \quad (17)$$

$$273,16 \leq T_{po} \leq 373,16$$

Sendo:

L_{po} – calor latente de vaporização da água no ponto de orvalho ($J.kg^{-1}$);

T_{po} – temperatura do ponto de orvalho (K).

A partir do diagrama entalpia-temperatura da água, foi constatado empiricamente que, para baixas pressões de vapor como as que ocorrem durante a secagem de sementes, a entalpia do vapor de água superaquecido é aproximadamente igual à do vapor saturado para uma mesma temperatura THRELKELD (1982 apud BROOKER et al., 1992), permitindo que se expresse:

$$E = c_a \cdot (T - T_o) + RM [c_v \cdot (T - T'_o) + L_{ref}] \quad (18)$$

Sendo:

T_o – temperatura referencial para o ar seco ($^{\circ}C$);

T'_o – temperatura referencial para a água ($^{\circ}C$);

L_{ref} – calor de vaporização à temperatura referente da água T'_o ($J.kg^{-1}$);

c_a – calor específico do ar seco ($J.kg^{-1}.^{\circ}C^{-1}$);

c_v – calor específico do vapor de água ($J.kg^{-1}.^{\circ}C^{-1}$).

A equação (18) pode ser simplificada usando-se uma expressão empírica para a entalpia do vapor de água superaquecido contido no ar.

Atribuindo-se zero ao valor da entalpia do líquido saturado igual à temperatura de 273,16K ($0^{\circ}C$) e plotando a entalpia específica do vapor de água versus T , THRELKELD (1982 apud BROOKER et al., 1992), obteve a seguinte relação linear entre a

entalpia, em joules por quilograma, para o vapor de água superaquecido e a temperatura:

$$\begin{aligned} E_v &= 2.512.131,0 + 1.552,4 \cdot T \\ 0 \leq T(^{\circ}C) &\leq 100 \end{aligned} \quad (19)$$

Com a entalpia à T_0 igual a zero, a entalpia do ar úmido em joules por quilograma à temperatura T ($^{\circ}C$) pode ser determinada por:

$$\begin{aligned} E &= 1.006,9 \cdot T + RM \cdot [2.512.131,0 + 1.552,4 \cdot T] \\ 0 \leq T(^{\circ}C) &\leq 100 \end{aligned} \quad (20)$$

2.2.1.7. Temperatura de bulbo úmido

BROOKER et al. (1992), apresentam a seguinte equação para a determinação da temperatura de bulbo úmido:

$$T_{bu} = T_{\infty} - \frac{K_D \cdot L \cdot \rho_{as}}{K_{conv}} \cdot (RM_{bu} - RM_{\infty}) \quad (21)$$

Sendo:

T_{bu} – Temperatura de bulbo úmido ($^{\circ}C$);

T_{∞} - Temperatura da mistura livre de ar-vapor de água ($^{\circ}C$);

K_D – Coeficiente de transferência de massa por convecção ($m \cdot s^{-1}$);

K_{conv} – Coeficiente de transferência de calor por convecção ($W \cdot m^{-2} \cdot ^{\circ}C^{-1}$);

L – Calor de vaporização na saturação ($J \cdot kg^{-1}$);

ρ_{as} – Massa específica do ar seco ($kg \cdot m^{-3}$);

RM_{bu} – Razão de mistura à temperatura de bulbo úmido ($kg \cdot kg^{-1}$);

RM_{∞} - Razão de mistura do ar livre ($kg \cdot kg^{-1}$).

O quociente entre os coeficientes de transferência de massa, K_D , e de transferência de calor por convecção, K_{conv} , depende do fluxo de ar que entra em contato com a gaze do termômetro de bulbo úmido. Este quociente pode ser considerado constante e igual a $1.006,93 \text{ J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$, para uma velocidade mínima de $4,6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ e para a pressão atmosférica normal. Considerando-se, ainda, negligenciáveis os efeitos da transmissão de calor por condução e irradiação na haste do termômetro. HOLMAN (1986 apud BROOKER et al., 1992), chegou a seguinte equação para a determinação do quociente entre estes dois coeficientes:

$$\frac{K_{conv}}{K_D} = \rho_{ar} \cdot c_a \cdot \left(\frac{S_c}{P_r} \right)^{2/3} \quad (22)$$

Sendo:

S_c – número de *Schmidt*.

P_r – número de *Prandtl*.

O quociente entre os números de *Schmidt* (S_c) e *Prandtl* (P_r) é chamado de número de *Lewis* (L_e). Os valores para S_c , P_r , L_e e para a razão $K_{conv} \cdot K_D^{-1}$ são fornecidos na TABELA 1 e variam em função da temperatura e da pressão atmosférica.

TABELA 1 – Relação $K_{conv} \cdot K_D^{-1}$ - 101.325 Pa

TEMP (°C)	Sc	Pr	Le	Le2/3	$K_{conv} \cdot K_D^{-1}$ $\text{J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{°C}^{-1}$
-17,8	0,594	0,720	0,825	0,880	1223
0,0	0,594	0,715	0,831	0,884	1149
10,0	0,605	0,713	0,849	0,896	1124
25,0	0,596	0,709	0,841	0,891	1061
37,8	0,604	0,705	0,857	0,902	1030
65,6	0,608	0,702	0,866	0,909	952
93,3	0,612	0,694	0,882	0,920	891
121,1	0,616	0,692	0,890	0,925	833

Fonte: HOMAN (1986 apud BROOKER et al., 1993).

2.2.1.8. Validação das expressões das propriedades psicrométricas do ar

Após comparações efetuadas entre os dados obtidos através de mecanismos estatísticos e aqueles procedentes das leis referentes ao comportamento de um gás ideal, *BARWICK et al. (1967 apud BROOKER et al., 1992)* concluíram que o erro destas últimas é inferior a 1%, para um intervalo de temperaturas de -18°C a 93°C , o que demonstra a validade prática das equações descritas neste capítulo na determinação das propriedades psicrométricas do ar de secagem.

2.2.1.9. Pressão atmosférica

Sabe-se que conforme aumenta a altitude diminui a pressão e que a pressão ao nível do mar, P_0 , é de 101.325 Pa.

Para um volume elementar de gás, considerando-se o ar atmosférico como um gás ideal (FIGURA 1), se tem:

$$\Delta P = -\frac{\text{Peso do ar}}{\text{Área}} = -\frac{mg}{A} \quad (23)$$

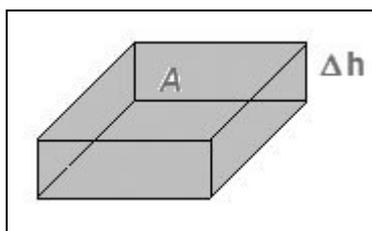


FIGURA 1 - Volume elementar.

$$\Delta P = -\frac{\text{Peso do ar}}{\text{Área}} = -\frac{mg}{A} \quad (24)$$

O sinal negativo deve-se ao fato de a pressão diminuir conforme aumenta a altitude.

Tem-se, ainda, que:

$$\rho = \frac{m}{V} \Rightarrow m = \rho V \quad (25)$$

mas:

$$V = A \Delta h \quad (26)$$

e:

$$m = \rho A \Delta h \quad (27)$$

Que se substituindo (27) em (24):

$$\Delta P = -\frac{\rho A \Delta h g}{A} = -\rho g \Delta h \quad (28)$$

Sendo:

ρ – massa específica do ar (kg.m^{-3});

g – aceleração da gravidade - $9,806$ (m.s^{-2}).

Mas ρ varia com pressão de acordo com a equação de *Clapeyron*:

$$PV = \frac{m}{M} RT \quad (29)$$

Sendo:

P – pressão (Pa); V – volume (m^3);

m – massa (kg); M – constante massa molar - $0,0288$ (kg);

R – constante universal dos gases perfeitos - $8,3145$ ($\text{J.K}^{-1}.\text{mol}^{-1}$);

T – temperatura (K).

$$\frac{V}{m} = \frac{RT}{PM} = \frac{1}{\rho} \quad \text{ou} \quad \rho = \frac{m}{V} = \frac{M}{RT} P \quad (30)$$

Substituindo-se (30) em (28):

$$\Delta P = -\frac{MP}{RT} g \Delta h \quad (31)$$

Que na forma diferencial fica:

$$dP = -\frac{MP}{RT} g dh \quad (32)$$

Considerando-se que a pressão varia da pressão ao nível do mar ($h=0$) até a pressão P_h , correspondente a altura h , tem-se que:

$$\int_{P_o}^{P_h} \frac{dP}{P} = -\frac{Mg}{RT} \int_0^h dh \Rightarrow \ln(P) \Big|_{P_o}^{P_h} = -\frac{Mg}{RT} h \Big|_0^h \Rightarrow \ln\left(\frac{P_h}{P_o}\right) = -\frac{Mg}{RT} h \quad (33)$$

e:

$$P_h = P_o e^{-\frac{Mg}{RT} h} \quad (34)$$

Explicitando-se $h = f(P_h)$, se tem:

$$h = \frac{RT}{Mg} \ln\left(\frac{P_o}{P_h}\right) \quad (35)$$

2.2.2. Parâmetros internos

2.2.2.1. Grau de umidade

O grau de umidade pode ser expresso em percentagem de massa em base úmida, isto é, pelo quociente entre a massa de água contida e a massa total de uma determinada substância. Para sementes, utiliza-se a equação (36) para a determinação do grau de umidade:

$$M_{bu} (\%) = \frac{m_{H_2O}}{m_{H_2O} + m_{MS}} \cdot 100 \quad (36)$$

Sendo:

M_{bu} (%) – grau de umidade, base úmida (%);

m_{H_2O} – massa de água (kg);

m_{MS} – massa de matéria seca (kg).

No estudo da secagem de sementes, expressar o grau de umidade em base úmida pode induzir a uma interpretação errônea, pois conforme diminui a massa de água também diminui a massa total (matéria seca + água). Assim sendo, se durante o processo de secagem há um decréscimo de umidade de quatorze por cento para doze por cento (base úmida), ou seja, dois pontos percentuais de umidade, a massa total diminui de 2,27% (GUIMARÃES & BAUDET, 2001).

A igualdade (37) permite determinar a redução da massa em função da umidade inicial e final, base úmida, de um determinado lote de sementes:

$$m_F = \frac{100 - M_{buf}(\%)}{100 - M_{bui}(\%)} \cdot 100 \quad (37)$$

Sendo:

m_F – massa final (kg);

$M_{buf}(\%)$ – grau de umidade final, base úmida (%);

$M_{bui}(\%)$ – grau de umidade inicial, base úmida (%).

A diferença percentual é, portanto, obtida através do quociente da diferença entre a massa inicial e final e a massa inicial, ou seja:

$$\Delta m(\%) = \frac{m_i - m_f}{m_f} \cdot 100 = \frac{M_{bui}(\%) - M_{buf}(\%)}{100 - M_{buf}(\%)} \cdot 100 \quad (38)$$

Sendo:

$\Delta m(\%)$ – perda percentual da massa (%);

m_i – massa inicial (kg);

m_f – massa final (kg).

Para se obter uma grandeza que melhor represente a umidade a ser removida e que sirva de base para as determinações físico-matemáticas utilizadas na simulação é mais conveniente se expressar o grau de umidade em base seca.

A equação (39) permite determinar o grau de umidade em base seca e a equação (40) mostra como converter o grau de umidade base úmida em base seca (ASAE D245.4, 1980):

$$M_{bs} = \frac{m_{H_2O}}{m_{ms}} \quad (39)$$

$$M_{bs} = \frac{M_{bu}}{1 - M_{bu}} \quad (40)$$

Sendo:

M_{bs} – grau de umidade base seca decimal;

M_{bu} – grau de umidade base úmida decimal.

2.2.2.2. Higroscopicidade e equilíbrio higroscópico

Segundo *BROOKER et al. (1992)*, o equilíbrio higroscópico (EH) pode ser definido como o grau de umidade alcançado pela semente depois de ter sido exposto a um ambiente controlado (umidade relativa e temperatura do ar constantes) por um período de tempo infinitamente longo.

O EH de uma semente depende de uma série de fatores, entre eles podem ser citados:

- Umidade relativa do ar em contato com a semente;
- Temperatura do ar em contato com a semente;
- Espécie e cultivar da semente;
- Integridade física da semente.

Na simulação de secagem o conceito de EH é importante na determinação do grau de umidade mínimo que pode ser alcançado pela semente conforme as condições de secagem impostas.

2.2.2.3. Diferentes comportamentos da semente em relação ao EH

As sementes de cada espécie apresentam diferentes características de pressão de vapor de água para uma determinada temperatura e umidade relativa do ar. Assim sendo, se para o trigo com 16%b.u. de umidade para a temperatura de

30°C, a pressão parcial de vapor é de 3.061Pa, para a aveia a pressão, nas mesmas condições, é de 3.289Pa. A pressão parcial de vapor da semente para os diversos graus de umidade e temperatura irá determinar se a mesma cederá (dessorção) ou absorverá (sorção) umidade quando exposta à mistura ar e vapor de água (*BROOKER et al., 1992*).

Em um ambiente controlado a 30°C e a 75% de umidade relativa, se pode determinar através da equação (8) a pressão parcial de vapor saturado do ar que será de 4.242,23Pa, sendo a pressão parcial de vapor obtida pelo produto, equação (10): $0,75 \times 4.242,23 = 3.181,67\text{Pa}$. É interessante observar que se o trigo e a aveia forem colocados neste ambiente, o trigo irá absorver umidade, pois sua pressão parcial de vapor é de 3.061Pa < 3.181,67Pa, enquanto que a aveia irá ceder umidade ao ar, pois sua pressão parcial de vapor é de 3.289Pa > 3.181,67Pa. Isto significa que, dependendo da espécie, uma mesma característica psicrométrica do ar poderá fazer com que as sementes cedam ou recebam umidade.

A semente ao alcançar a condição de equilíbrio dinâmico entre as pressões parciais de vapor diz-se que atingiu o grau de umidade de equilíbrio higroscópico ou simplesmente equilíbrio higroscópico (EH). A umidade relativa do ar que envolve a semente é chamada de umidade relativa de equilíbrio para uma determinada temperatura.

Em termos termodinâmicos, o equilíbrio é alcançado quando a energia livre de troca para o material for igual à zero. O processo de sorção é acompanhado por um decréscimo na entropia.

O grau de umidade de equilíbrio para um produto em particular varia, desta forma, com a umidade relativa e com a temperatura do ar e pode ser expresso em base úmida ou em base seca. Para o uso na simulação de secagem, onde diversos cálculos matemáticos são necessários usa-se, geralmente, a umidade do produto em base seca decimal.

2.2.2.4. Equações e curvas de equilíbrio higroscópico

A relação entre o grau de umidade de equilíbrio de uma semente e a respectiva umidade relativa de equilíbrio para uma determinada temperatura pode

ser expressa por curvas de equilíbrio higroscópico (CEH), denominadas isotermas (FIGURA 2).

Na simulação de secagem, há necessidade da utilização de equações matemáticas capazes de expressar algebricamente as CEH, chamadas de Equações de Equilíbrio Higroscópico (EEH).

Muitos modelos teóricos e empíricos têm sido propostos para o estabelecimento das EEH. Os modelos teóricos são baseados na condensação capilar (modelo de *KELVIN*), na adsorção cinética (equações de: *LANGMUIR*, *BET - BRUNAUER*, *EMMETT & TELLER* e *GAB - GUGGENHEIM, ANDERSON, DE BOER*) ou potencial de intensidade de campo (*HARKINS-JURA*). Estas equações teóricas têm sido pouco usadas por não expressarem o EH ar-semente com a precisão necessária para os intervalos de valores de temperatura e umidade relativa utilizadas praticamente nos problemas de secagem de sementes (*BROOKER et al., 1992*).

BROOKER et al. (1992) mencionam, ainda, que existe uma lacuna para o EH acima de 98% de umidade relativa do ar devido ao desenvolvimento de fungos antes que o EH seja alcançado.

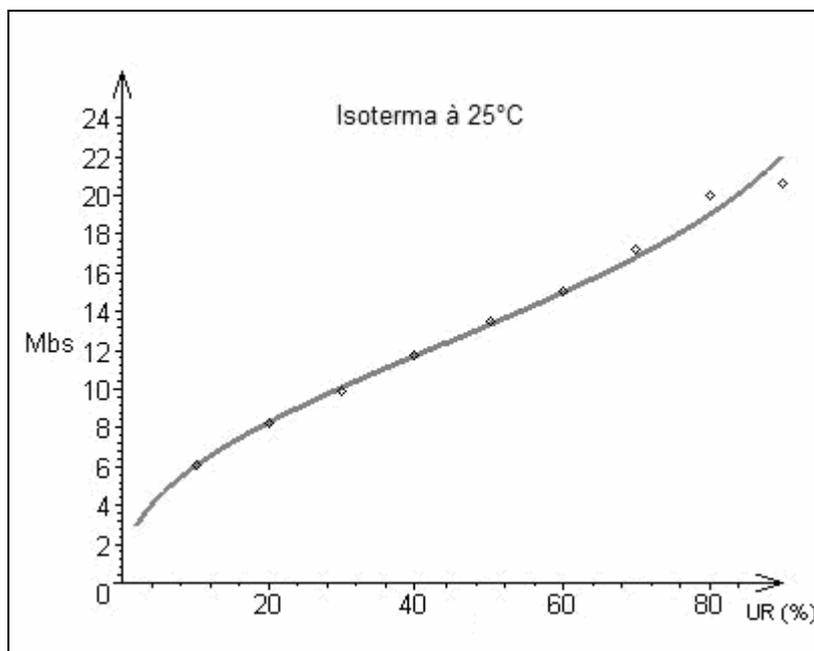


FIGURA 2 - Curva de equilíbrio higroscópico para semente de trigo à 25°C.

O EH também é influenciado pela composição química da semente. A TABELA 2 mostra um comparativo entre o EH entre o milho que apresenta alto teor de amido e, portanto, altamente higroscópico; para a soja rica em proteína e com alto teor de lipídios e para o arroz em casca.

TABELA 2 – EH: UR=70% e 25 °C

SEMENTE	EH (base úmida)
MILHO	14,0 %
SOJA	12,1 %
ARROZ	13,4 %

FONTE: ASAE D245.4 (1980)

Várias teorias têm sido propostas para explicar o fenômeno do EH de produtos biológicos, entre elas podem ser citadas:

- Condensação da água nos vasos capilares da estrutura porosa do produto;
- Sorção de monocamadas de água na superfície da estrutura porosa devido a forças oriundas de desbalanceamento químico;
- Sorção de múltiplas camadas de água nas superfícies porosas por forças de origem química;
- Sorção ou dessorção de água como resultado de campos potenciais existentes sobre as superfícies das estruturas porosas;
- Sorção de umidade como resultado da função de "GIBBS".

Nenhuma teoria isolada ou em combinação, contudo, permite quantificar com precisão e com a generalidade necessária o conceito de higroscopicidade. Não obstante, algumas destas teorias têm sido úteis para explicar alguns fenômenos isolados e para o desenvolvimento de outras equações empíricas e semi-empíricas que têm demonstrado ser mais geral, preciso e de fácil utilização. (BROOKER *et al.*, 1992).

2.2.2.5. Equação de HENDERSON-THOMPSON

A relação semi-empírica estabelecida por HENDERSON (1952 apud BROOKER et al., 1992), é uma das EEH mais conhecida é baseada na equação de adsorção de GIBBS. A equação (41) é válida para produtos biológicos, inclusive sementes:

$$1 - \frac{P_v}{P_{vs}} = \exp(-h \cdot T_{abs} \cdot M_{bs}^i (\%)) \quad (41)$$

Sendo:

P_v – pressão de vapor (Pa);

P_{vs} – pressão de vapor saturado (Pa);

h e i – são constantes relativas ao produto;

T_{abs} – temperatura absoluta (K).

M_{bs} – é o grau de umidade de equilíbrio, base seca (decimal);

A equação (41), contudo, mostrou-se inadequada para sementes. Uma equação mais precisa foi, posteriormente, desenvolvida por THOMPSON (1967 apud ASAE Data: ASAE D245.4, 1980 e BROOKER et al., 1992), baseada na equação de HENDERSON, denominada “Equação de HENDERSON MODIFICADA” ou “Equação de HENDERSON-THOMPSON”:

$$1 - \frac{P_v}{P_{vs}} = \exp(-K \cdot (T + C_H) \cdot (100 \cdot M_{bs}^i)^N) \quad (42)$$

Pondo-se $M_{bs} = f(UR)$, tem-se:

$$M_{bs} = 0,01 \cdot \left[\frac{\ln(1-UR)}{-A \cdot (T + C)} \right]^{1/B} \quad (43)$$

Ou $UR = g(M_{bs})$:

$$UR = 1 - \exp[-A \cdot (T + C) \cdot (100 \cdot M_{bs})^B] \quad (44)$$

Sendo:

M_{bs} – é o grau de umidade de equilíbrio, base seca (decimal);

T – é a temperatura (°C);

A , B e C – são constantes que dependem do produto.

A TABELA 3 contém os valores das constantes A , B e C para as expressões (42), (43) e (44).

TABELA 3 - Coeficientes HENDERSON-THOMPSON

SEMENTE	$A \times 10^{-5}$	B	C
MILHO	8,6541	1,8634	49,810
ARROZ	1,9187	2,4451	51,161
SOJA	30,5327	1,2164	134,136
TRIGO, DURO	2,5738	2,2110	70,318

Fonte: ASAE D245.4 (1980).

2.2.2.6. Equação de CHUNG-PFOST

A equação empírica de “CHUNG” - CHUNG & PFOST (1967 apud BROOKER et al., 1992), é representada pela seguinte equação:

$$M_{bs} = E - F \cdot \ln[-(T + C) \cdot \ln(UR)] \quad (45)$$

e:

$$UR = \exp\left[\frac{-A}{(T + C)} \cdot \exp(-B \cdot M_{bs})\right] \quad (46)$$

A TABELA 4 apresenta os valores para as constantes A , B , C , D , E e F para a equação de CHUNG-PFOST.

TABELA 4 - Coeficientes para equação de CHUNG

SEMENTE	A	B	C	E	F
MILHO	312,30	16,958	30,205	0,33872	0,058970
ARROZ	594,61	21,732	35,703	0,29394	0,046015
SOJA	328,30	13,917	100,288	0,41631	0,071853
TRIGO, DURO	921,65	18,077	112,350	0,37761	0,055318

Fonte: ASAE D245.4 (1980).

2.2.2.7. Equação de ROA

A equação proposta por ROA (1974 apud ROA & ROSSI, 1980) é completamente empírica e apresenta valores mais precisos e de aplicação mais geral.

Esta EEH apresenta a umidade de equilíbrio higroscópico em função do produto de um polinômio de terceiro grau por uma exponencial cujo expoente também é uma função do produto de uma polinomial de quarto grau pela temperatura. A EEH proposta por ROA (1974), é expressa da seguinte forma:

$$M_{eq} = \left(\sum_{i=1}^3 p_i \cdot UR^i \right) \exp \left[\left(\sum_{i=0}^4 q_i \cdot UR^i \right) (T + q_5) \right] \quad (47)$$

Sendo:

M_{eq} – grau de umidade do produto (decimal);

$\sum_{i=1}^3 p_i \cdot UR^i = p_1 \cdot UR + p_2 \cdot UR^2 + p_3 \cdot UR^3$, sendo p_i constantes obtidas por

estimação não linear;

$\sum_{i=0}^4 q_i \cdot UR^i = q_0 + q_1 \cdot UR + q_2 \cdot UR^2 + q_3 \cdot UR^3 + q_4 \cdot UR^4$, sendo q_i constantes

obtidas por estimação não linear;

T – temperatura (°C);

UR – umidade relativa do ar (decimal).

Para a determinação dos valores dos coeficientes p_i e q_i é indispensável o conhecimento preliminar e aproximado dos coeficientes procurados para

determinada temperatura. Com base numa isoterma selecionada, também chamada de “isoterma média”, se obtêm, por regressão polinomial, os coeficientes p_1 , p_2 e p_3 , passando a equação (47) a ter a forma:

$$\frac{1}{(T + q_5)} \ln \left[\frac{M_{eq}}{\sum_{i=1}^3 (p_i \cdot UR^i)} \right] = \sum_{i=0}^4 (q_i \cdot UR^i) \quad (48)$$

Fixando-se o valor de q_5 em 273,16, transforma-se a temperatura em temperatura absoluta. Para a obtenção dos valores das constantes q_i , efetua-se nova regressão polinomial com todos os grupos de umidade de equilíbrio e os valores correspondentes de temperatura e umidade relativa de equilíbrio do ar. Os valores obtidos de q_0 , q_1 , q_2 , q_3 , q_4 e $q_5 = 273,16$ e dos valores de p_1 , p_2 , p_3 anteriormente determinados constituem as estimativas iniciais da regressão não linear. Os valores de q_i e p_i são apresentados na TABELA 5.

TABELA 5 - Parâmetros para a equação da UNICAMP

PARÂMETROS	ARROZ EM CASCA	SOJA	MILHO	TRIGO
p_1	1,31697	0,469448	0,4610442	0,755662
p_2	-2,33363	-0,295153	-0,7001334	-1,22575
p_3	1,72367	0,17048	0,4523106	0,93125
q_0	-0,00385	0,00219	-0,007337	0,00347
q_1	-0,01837	-0,00691	-0,044321	-0,04891
q_2	0,03399	-0,22417	0,139807	0,15416
q_3	-0,03157	0,46542	-0,159269	-0,19603
q_4	0,00966	-0,24788	0,063424	0,08618
q_5	97,44	32,08	-26,21	255,39

FONTE: ROA & ROSSI (1980)

2.2.2.8. Equações da ASAE D245.5 (1995)

A norma *ASAE D245.5 (1995)* recomenda a utilização da equação de *HENDERSON MODIFICADA*, equação (44) ; a equação de *CHUNG-PFOST*, equação (46) e, também:

- equação de *HALSEY MODIFICADA*:

$$UR = \exp \left[- \frac{\exp(A + B T)}{(100 M_{bs})^C} \right] \quad (49)$$

- equação de *OSWIN MODIFICADA*:

$$UR = \left[\left(\frac{A + B T}{100 M_{bs}} \right)^C + 1 \right]^{-1} \quad (50)$$

- equação de *GUGGENHEIM-ANDERSON-DeBOER (GAB)*:

$$M_{bs} = \frac{A \cdot B \cdot C \cdot UR}{100 (1 - B \cdot UR)(1 - B \cdot UR + B \cdot C \cdot UR)} \quad (51)$$

Os valores para as constantes *A*, *B* e *C* das equações (44), (46), (49) e (50) são apresentados na TABELA 6 .

2.2.2.9. Utilização das EEH e CEH

Para o estabelecimento de uma EEH, de acordo com *SINÍCIO & ROA (1979 apud ROSSI & ROA, 1980)*, a mesma deve satisfazer a determinados requisitos básicos, tais como:

- Precisão;
- Generalidade;
- Aplicabilidade em todas as faixas de variáveis;
- Facilidade de uso.

TABELA 6 – Valores das constantes *A*, *B* e *C* da ASAE D245.5 (1999)

EQUAÇÃO	SEMENTE		<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>
HENDERSON MOD. eq. (44)	MILHO		$6,661 \times 10^{-5}$	1,9677	42,143
	ARROZ	LONGO	$4,1276 \times 10^{-5}$	2,1191	49,828
		MÉDIO	$3,5502 \times 10^{-5}$	2,31	27,396
		CURTO	$4,8524 \times 10^{-5}$	2,0794	45,646
	TRIGO		$4,3295 \times 10^{-5}$	2,1119	41,565
CHUNG-PFOST eq. (46)	MILHO		374,37	18,662	31,656
	ARROZ	LONGO	412,02	17,528	39,016
		MÉDIO	363,06	18,04	26,674
		CURTO	433,88	16,86	48,282
	TRIGO	VERM.	610,34	15,526	93,213
HALSEY MOD eq. (49)	SOJA	EUA	2,87	-0,0054	1,38
		BRITÂNICO	3,0446	-0,0054321	1,5245
OSWIN MOD. eq. (50)	MILHO		15,303	-0,1084	3,0358
	ARROZ	LONGO	14,431	-0,07886	3,137
		CURTO	14,816	-0,087027	2,8368
	TRIGO	VERM.	15,868	-0,10378	3,0842

Estes requisitos, em especial o segundo e terceiro, não são fáceis de serem atendidos, principalmente tratando-se de sementes produzidas em diferentes regiões. Embora uma metodologia na determinação das EEH que garanta um razoável atendimento dos requisitos acima já esteja estabelecida, existe a necessidade de mais pesquisa para a determinação de qual EEH e quais coeficientes devem ser utilizados para os diferentes tipos de sementes e diferentes variedades para as diversas regiões produtoras.

Segundo *BROOKER et al. (1992)*, devido a uma lacuna de conhecimento existente, a utilização de equações empíricas e semi-empíricas, em lugar das

equações que quantificam as diversas teorias existentes sobre o EH, tem alcançado melhores resultados.

2.2.2.10. Calor específico da semente

BROOK & FOSTER (1981 apud BROOKER et al., 1992), estabeleceram equações lineares que relacionam o calor específico com o grau de umidade para alguns tipos de sementes:

$$c_{sem} = A_a + B_b \cdot M_{bu} \% \quad (52)$$

Sendo:

c_{sem} – calor específico ($\text{kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ ou $\text{kcal.kg}^{-1}.\text{°C}^{-1}$);

$M_{bu}\%$ – grau de umidade (base úmida, percentual);

A e B – constantes, conforme TABELA 7;

Índices a e b: a e b =1 → para c_{sem} em $\text{kcal.kg}^{-1}.\text{°C}^{-1}$

a e b =2 → para c_{sem} em $\text{kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$

TABELA 7 - Constantes para as equações (52) e (53)

SEMENTE	A_1	B_1	A_2	B_2
MILHO	0,350	0,00851	1,465	0,0356
ARROZ COM CASCA	0,265	0,01070	1,110	0,0448
TRIGO DURO BRANCO	0,283	0,00724	1,185	0,0303
SOJA	0,391	0,00461	1.637	0,0193

FONTE: BROOKER et al.(1992)

Passando o grau de umidade base úmida para grau de umidade base seca, explicitando na (40), a equação (52) pode-se expressa em função do grau de umidade base seca:

$$c_{sem} = \frac{A_a + (A_a + 100 B_b) M_{bs}}{1 + M_{bs}} \quad (53)$$

Sendo:

M_{bs} – grau de umidade (base seca decimal).

A equação (53) apresenta, em geral, maior facilidade de utilização na aplicação de modelos de simulação.

2.2.2.11. Calor latente de vaporização

O calor latente de vaporização (L_{sem}) pode ser definido como a energia necessária para evaporar água da semente a certa temperatura e grau de umidade.

O calor latente de vaporização da água é necessário no cálculo da energia necessária a evaporação de uma quantidade de água de um produto úmido (SODHA, 1987).

Para a secagem de sementes, o calor latente de vaporização (L_{sem}) da água das sementes é, muitas vezes, considerado constante e próximo do valor do calor latente de vaporização da água. Contudo, o uso deste valor conduz a erros consideráveis principalmente para baixos graus de umidade das sementes (SODHA, 1987).

O calor latente de vaporização pode ser obtido através do grau de umidade da semente para diferentes umidades relativas. OTHMER (1940 apud ROA & MACEDO, 1980), a partir da equação de Clausius-Clapeyron obteve uma equação para a determinação de L_{sem} .

Combinando-se as equações (4) e (5), obtêm-se:

$$\frac{dP_v}{dT} = \frac{L_{H_2O} P_v}{R T^2} \quad (54)$$

Sendo:

P_v – pressão parcial de vapor a uma dada temperatura absoluta (T) e a uma dada condição de umidade de equilíbrio higroscópico do produto (M_{eq});

L_{H_2O} – calor latente molar de vaporização da água ($J.kg^{-1}$);

R – constante universal dos gases perfeitos - $8,3145 (J.K^{-1}.mol^{-1})$.

Assumindo-se L constante dentro de certo intervalo de temperaturas e integrando-se a equação (54):

$$\ln(P_v) = -\frac{L_{H_2O}}{R} \frac{1}{T} + C \quad (55)$$

Onde C é uma constante resultante da integração. A equação (55) é a equação de uma reta com coeficiente angular $-\frac{L_{H_2O}}{R}$ e os valores podem ser obtidos para determinado produto, a vários graus de umidade. Os valores da pressão de vapor, P_v , na superfície do produto, a uma determinada umidade e temperatura, são determinados a partir das curvas de equilíbrio higroscópico. Com estas curvas o valor da umidade relativa do ar, UR , é encontrado. P_v é obtido através do produto (ROA & ROSSI, 1980):

$$P_v = UR P' \quad (56)$$

Onde P' é a pressão parcial de vapor saturado da água livre.

A partir da equação de *Clausius-Clapeyron* OTHMER (1940), derivou outra para o cálculo de L_{sem} :

$$\ln(P_v) = \frac{L_{H_2O}}{L_{sem}} \ln(P') + C \quad (57)$$

Para L_{sem} em joules por quilograma de semente.

A equação de OTHMER apresenta maior precisão em relação à equação (55) e pode ser aplicada a uma faixa maior de temperaturas.

Utilizando o método acima e a equação de equilíbrio higroscópico (48), ROA (1974 apud ROA & ROSSI, 1980), obteve, para a soja, a seguinte equação:

$$L_{sem} = [1,77 (M)^{-0,165}] (587,34 - 0,567 T) \quad (58)$$

De forma semelhante usando a equação de *Clapeyron*, GALLAHER (1941 apud HALL, 1957) obtiveram a equação que expressa o quociente $\frac{L_{sem}}{L_{H_2O}}$ em função das pressões parciais de vapor saturado e das umidades de equilíbrio higroscópico:

$$\frac{L_{sem}}{L_{H_2O}} = \ln\left(\frac{UR_1 P_{s1}}{UR_2 P_{s2}}\right) - \ln\left(\frac{P_{s1}}{P_{s2}}\right) \quad (59)$$

Onde UR_1 e UR_2 são as umidades relativas de equilíbrio, em decimal, correspondentes ao grau de umidade da semente que se quer determinar, obtidos da equação de equilíbrio higroscópico para dois pontos pré-estabelecidos de temperatura. Os valores das pressões parciais de vapor saturado podem ser obtidos através da equação (8) para as duas temperaturas pré-estabelecidas.

BROOKER et al. (1992) fornecem, ainda, uma equação obtida a partir da plotagem da curva que expressa o quociente $\frac{L_{sem}}{L_{H_2O}}$ em função do percentual de umidade base seca da semente:

$$L_{sem} = (2.502,2 - 2,39 \cdot T) \cdot [1 + A_3 \cdot \exp(-B_3 \cdot M_{bs})] \quad (60)$$

Sendo:

L_{sem} – calor latente de vaporização ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$);

T – temperatura ($^{\circ}\text{C}$);

M_{bs} – grau de umidade da semente (base seca decimal);

A_3, B_3 – constantes conforme TABELA 8.

TABELA 8 - Coeficientes para a equação (60)

SEMENTE	A_3	B_3
MILHO	1,2925	16,961
ARROZ COM CASCA	2,0692	21,739
SOJA	0,7000	14,969
TRIGO	1,2287	17,612

FONTE: BROOKER et al. (1992).

2.2.2.12. Massa específica¹

A massa específica de uma substância é o quociente entre determinada massa desta substância e o volume correspondente.

$$\gamma_{sem} = \frac{m}{V} \quad (61)$$

Para sementes, quando o espaço intersticial é considerado, denomina-se de massa específica aparente. Quando o espaço intersticial não é levado em consideração denomina-se de massa específica real.

A massa específica utilizada na secagem de sementes é, em geral, a aparente e por este motivo quando há referência à massa específica ou massa específica sem outra especificação refere-se à aparente.

A massa específica varia, em maior ou menor grau de acordo com a espécie, com o grau de umidade da semente. A TABELA 9 mostra esta variação. *VILELA & ROA (1976 apud ROSSI & ROA, 1980)* estabeleceram uma expressão que relaciona a variação da massa volumétrica em função do grau de umidade para o café. *BROOKER et al. (1992)* apresentam um gráfico estabelecendo a variação da massa específica em função do grau de umidade.

GUIMARÃES & BAUDET (2002), baseados em dados tabelas estabeleceram as seguintes relações:

Para o trigo:

$$M_{bu} \% = -0,113 \cdot \gamma_{sem} + 99,29 \quad (62)$$

Para o arroz:

$$M_{bu} \% = 0,409 \cdot \gamma_{sem} - 232,45 \quad (63)$$

Para o milho:

$$M_{bu} \% = -0,137 \cdot \gamma_{sem} + 113,61 \quad (64)$$

¹ A “massa específica” pode também ser chamada de “massa volumétrica” ou “densidade absoluta”. Há, atualmente, uma forte tendência ao uso do termo “massa volumétrica”.

TABELA 9 - Massa específica a diferentes umidades

SEMENTE	GRAU DE UMIDADE	MASSA ESPECÍFICA
	% (base úmida)	kg.m ⁻³
MILHO ¹	7,3	753
	13,0	737
	16,2	721
	19,2	689
	24,9	657
ARROZ ¹	12,0	586
	14,0	588
	16,0	606
	18,0	615
SOJA ²	8,9	778
	14,1	738
TRIGO ¹	7,3	790
	11,0	790
	14,1	756
	17,1	727
	19,3	703

FONTE: ¹BROOKER et al., 1973; ²ROA & ROSSI, 1980.

2.3. Teoria da secagem

2.3.1. Secagem em camada fixa

A análise da secagem em camada fixa está baseada na equação de balanço térmico que conduz a uma conveniente rapidez computacional para a determinação do tempo de secagem, da quantidade de água a ser removida e das propriedades da zona de secagem (*BROOKER et al., 1992*).

Este tipo de análise é importante, pois se conhecendo a temperatura do ar de secagem ao entrar na massa de sementes e ao sair, é possível calcular o tempo que determinada quantidade de semente leva para secar (NEVES, 2001).

2.3.1.1. O processo de secagem em leito fixo

O processo de secagem em camada fixa (ou estacionária) pode ser esquematicamente representado através da FIGURA 3. O ar de secagem é insuflado pelo sistema de ventilação, podendo ou não sofrer aquecimento, formando uma região de alta pressão sob o fundo perfurado (*plenum*) movendo-se, desta forma, da parte inferior da célula de secagem até a parte superior da camada de sementes. Ocorrendo, desta forma, uma troca de umidade entre o ar e a semente devido à diferença na pressão de vapor de água existente entre o ar de secagem e a semente (GUIMARÃES, 2001).

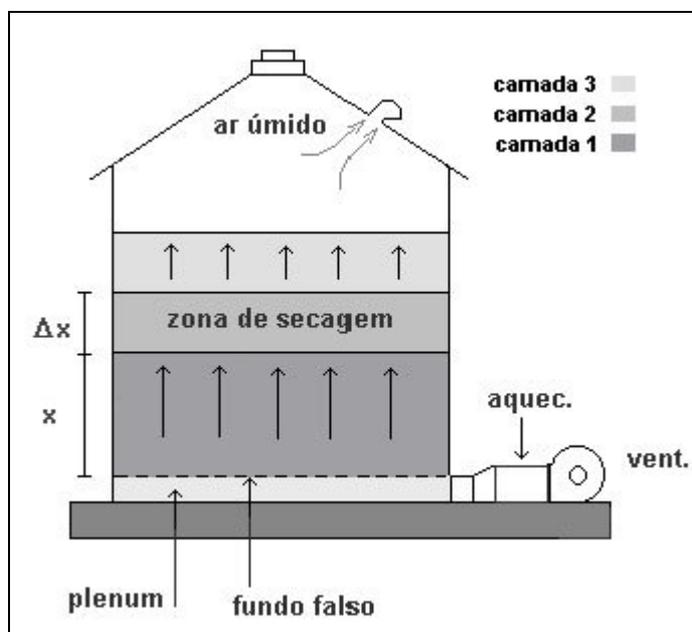


FIGURA 3 - Secagem em camada fixa.

No decorrer do processo de secagem, formam-se três camadas distintas na massa de sementes:

- Uma primeira camada já em equilíbrio com o ar de secagem;
- Uma segunda camada em que a secagem está se procedendo;
- Uma terceira camada onde a secagem ainda não iniciou.

Após a superfície limite entre a segunda e a primeira camada alcançar a superfície da semente, todo o lote encontra-se em equilíbrio com o ar de secagem e, portanto, o processo de secagem estará finalizado.

A superfície limite entre a segunda e a terceira camada é denominada de frente de secagem.

A semente que se encontra abaixo da segunda camada já alcançou o equilíbrio higroscópico com o ar de secagem e encontra-se na umidade de equilíbrio M_{eq} . A semente que se encontra acima da frente de secagem ainda não está seca e possui um grau de umidade M_o . O ar que passa pela semente acima da frente de secagem está em equilíbrio com as condições iniciais. Na camada onde ocorre a secagem propriamente dita, a semente cede ao ar de secagem umidade através da evaporação fazendo diminuir a temperatura. Neste processo de secagem evaporativa, a temperatura do ar passa da temperatura inicial T_o para a temperatura de equilíbrio com a semente T_{eq} . Tem-se, desta forma, a existência de dois gradientes na zona de secagem:

- Um gradiente devido à troca de umidade na forma de vapor de água representado pela diferença entre os graus de umidade inicial e de equilíbrio da semente: $M_o - M_{eq}$.
- Um gradiente devido ao decréscimo de temperatura do ar representado pela diferença: $T_a - T_{eq}$.

Para que a análise possa ser simplificada pode se assumir que no processo de secagem o ar possui temperatura e umidade relativa uniformes (*BROOKER et al., 1992*).

Se a camada de sementes não é espessa e/ou a velocidade do ar de secagem é suficientemente elevada, a zona de secagem pode se estender completamente sobre todo o leito e a umidade média final da semente será alcançada antes que a camada de sementes, que se encontra sobre o fundo falso (primeira camada), tenha alcançado o equilíbrio higroscópico com o ar de secagem.

2.3.1.2. Equação de balanço de calor

Pode-se considerar que o ar de secagem transfira à semente, a quantidade de calor necessária à evaporação da água, até que alcance o grau de umidade de equilíbrio M_{eq} .

O ar transfere energia à semente, na forma de calor sensível, que o utiliza para evaporar uma determinada massa de água (calor latente). Neste processo a temperatura do ar diminui enquanto a água é evaporada da semente – resfriamento evaporativo.

GUIMARÃES & BAUDET (2001), mostram o procedimento para a obtenção da equação de balanço de calor:

O balanço de energia pode ser representado pela igualdade:

$$Q_{Sar} = Q_{Lsem} \quad (65)$$

Sendo:

Q_{Sar} – calor sensível do ar (J);

Q_{Lsem} – calor latente necessário de vaporização da água da semente (J).

e:

$$m_{ar} \cdot c_{ar} \cdot (T_0 - T_c) = m_{H_2O} \cdot L_{sem} \quad (66)$$

Sendo:

m_{ar} – massa do ar de secagem (kg).

m_{H_2O} – massa de água a ser evaporada (kg).

L_{sem} – calor latente de vaporização da água da semente ($J \cdot kg^{-1}$).

T_0 – Temperatura inicial ($^{\circ}C$);

T_c – Temperatura final ($^{\circ}C$).

As mudanças ocorridas durante o processo de secagem estão representadas na FIGURA 4.

Expressando-se a massa de ar de secagem (m_{ar}) em função da vazão de ar fornecida pelo ventilador (V_{az}), tem-se que:

$$m_{ar} = V_{ar} \cdot \rho_{ar} = \frac{V_{az}}{\mu_{esp}} \cdot t \quad (67)$$

Sendo:

V_{ar} – volume do ar de secagem (m^3);

ρ_{ar} – massa específica do ar de secagem ($kg.m^{-3}$);

V_{az} – vazão ou fluxo de ar fornecido pelo ventilador ($m^3.s^{-1}$);

μ_{esp} – volume específico do ar de secagem ($m^3.kg^{-1}$).

Substituindo-se a massa (m_{ar}) no primeiro membro da expressão (66):

$$m_{ar} \cdot c_{ar} \cdot (T_0 - T_c) = \frac{V_{az}}{\mu_{esp}} \cdot t \cdot c_{ar} \cdot (T_0 - T_c) \quad (68)$$

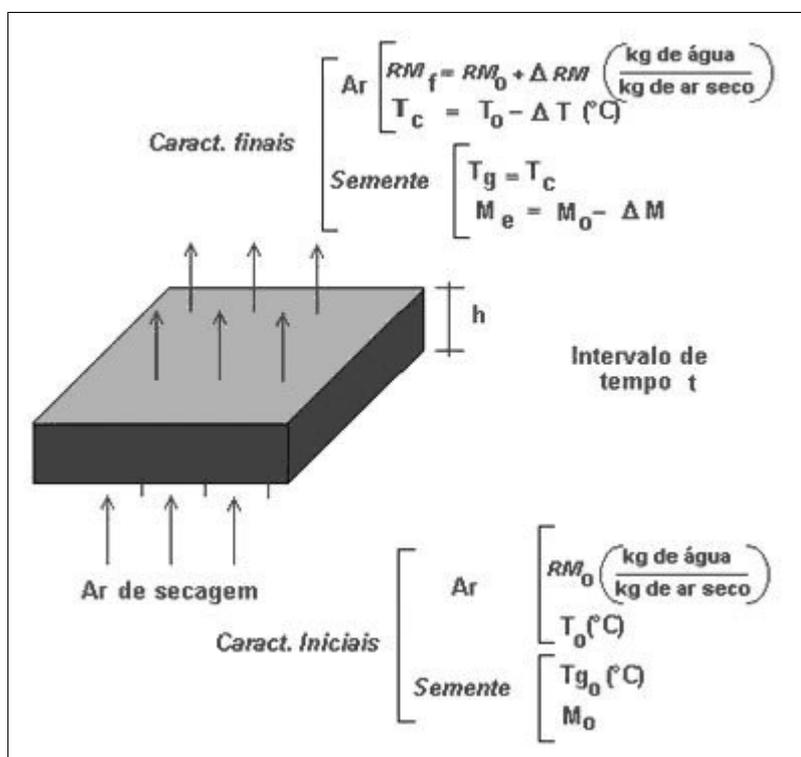


FIGURA 4 - Variações na camada elementar.

A massa total de sementes a ser secada é obtida a partir do seguinte expressão:

$$m_t = m_{H_2O} + m_{ms} = V_{OL} \cdot \gamma_{sem} \quad (69)$$

Sendo:

m_t – massa total de sementes (kg);

m_{H_2O} – massa de água contida na semente (kg);

m_{ms} – peso da matéria seca (kg);

V_{OL} – volume de sementes (m^3);

γ_{sem} – massa específica aparente da semente ($kg \cdot m^{-3}$).

De acordo com a equação (39) se tem que a massa de água inicial da semente é de:

$$mi_{H_2O} = M_0 \cdot m_{ms} \quad (70)$$

Analogamente se obtém mf_{H_2O} :

$$mf_{H_2O} = M_{eq} \cdot m_{ms} \quad (71)$$

A diferença entre a massa inicial e a massa final fornece a massa de água a ser evaporada da semente:

$$m_{H_2O} = mi_{H_2O} - mf_{H_2O} = M_0 \cdot m_{ms} - M_{eq} \cdot m_{ms} = m_{ms} \cdot (M_0 - M_{eq}) \quad (72)$$

Substituindo o primeiro membro da equação (66) utilizando a equação (68) e o segundo membro utilizando a equação (72), obtêm-se:

$$\frac{V_{az}}{\mu_{esp}} t c_a (T_0 - T_c) = L_{sem} m_{ms} (M_0 - M_{eq}) \quad (73)$$

Explicitando-se a variável t , têm-se:

$$t = \frac{\mu_{esp} L_{sem} m_{ms} (M_0 - M_{eq})}{c_a (T_0 - T_c) V_{az}} \quad (74)$$

Para que o tempo t , em segundos, possa ser determinado necessita-se conhecer os seguintes fatores (GUIMARÃES & BAUDET, 2001):

- Referentes à semente:

- Espécie e cultivar;
- Grau inicial de umidade (M_0);
- Massa específica aparente (γ_{sem}).

- Referentes ao ar de secagem – características psicrométricas:
 - Temperatura do ar de secagem no *plenum* (T_0);
 - Umidade relativa do ar (UR);
 - Pressão atmosférica (P_{atm}).
- Referentes às características geométricas da célula de secagem - características que permitam a determinação da massa de sementes a serem secadas, tais como:
 - Altura e diâmetro, se a célula de secagem é cilíndrica;
 - Altura e dimensões da base se a célula de secagem é prismática.
- Referentes ao sistema de aeração:
 - Vazão do ventilador (V_{az}) ou vazão específica (V_{AZesp});
 - Pressão estática do ventilador (P_e).

No estabelecimento da equação (74) não foram levadas em consideração as variações de temperatura que ocorrem quando o ar de secagem e a semente possuem diferentes temperaturas, no início da operação de secagem; a existência de uma possível condensação do vapor de água contido no ar saturado, na parte superior da camada de secagem, durante o avanço da frente de secagem; variações nas condições do ar de secagem (a temperatura e a umidade relativa do ar de secagem permanecem constantes no decorrer do processo). Estas hipóteses têm como vantagem a simplificação da análise físico-matemática do processo de secagem. Mesmo assim, pela facilidade de aplicação e seguindo limites pré-estabelecidos para as variáveis que intervêm neste tipo de análise, a equação de balanço de calor é de utilidade prática.

Algumas indicações, de caráter geral podem ser citadas. Entre elas devem ser destacadas as seguintes:

- A temperatura do ar de secagem quando aquecido deve se situar entre cinco e dez graus Celsius acima da temperatura ambiente. Praticamente se observa que a passagem do ar de secagem pelas pás do ventilador pode incrementar em até três graus Celsius a temperatura do ar de secagem;
- A espessura da camada de sementes no processo de secagem estacionária não deve ser grande, variando entre um e dois metros.

Segundo *ZIMMER (1989)*, para soja e sementes com tamanho similar a espessura da camada não deve ultrapassar a um metro e meio;

- A umidade relativa do ar de secagem não deve ser inferior a quarenta por cento para que não haja sobressecação das camadas inferiores, (*PESKE & BAUDET, 1983*);
- A temperatura do ar para a secagem de sementes não deve ser superior a quarenta e três graus Celsius;
- O fluxo de ar (vazão específica) a ser utilizada deve estar compreendida entre quatro e dezoito metros cúbicos de ar por minuto por tonelada de semente.

Atualmente seca-se sementes de soja em secador estacionário com distribuição radial de ar com $30\text{m}^3.\text{min}^{-1}.\text{m}^{-3}$.

2.3.2. Secagem da camada elementar – camada delgada

Na secagem estacionária (leito fixo), se considera que a semente tenha alcançado o equilíbrio térmico e higroscópico com o ar de secagem. Para que se possa expressar matematicamente uma razão de secagem em função do tempo é necessário um tratamento mais aprimorado. É necessária a utilização de equações que representem à secagem de uma camada elementar de sementes.

Segundo *BROOKER et al. (1992)*, produtos biológicos ao serem secados em lotes comportam-se de maneira diferente daquela quando são secados como partículas individuais. No caso da secagem em lotes, as sementes apresentam uma razão de secagem constante, o que não acontece para o caso da secagem em pequenas porções (camada delgada). Devido a esse comportamento, o estudo da secagem é dividido em duas partes distintas: secagem de camada delgada e secagem em camada espessa.

Na simulação de secagem utilizam-se modelos que, em sua grande maioria, partem do estudo da secagem da camada delgada para que após seja efetuado, através de processo iterativo, o estudo em camada espessa, conforme mostra FIGURA 5. Os modelos baseados nestes processos têm sido muito utilizados atualmente devido ao grande desenvolvimento na capacidade de processamento dos microcomputadores e diminuição no custo de aquisição.

Vários pesquisadores desenvolveram equações representativas da secagem em camada delgada. Algumas equações foram concebidas de forma puramente teórica, partindo de hipóteses que permitissem a simplificação do tratamento matemático. Outras foram obtidas de forma empírica ou elaboradas a partir de modelos teóricos com coeficientes de correção obtidos experimentalmente.

De uma forma geral, as equações de camada delgada podem ser classificadas em três grandes grupos:

- Equações teóricas;
- Equações semiteóricas;
- Equações empíricas.

Grande parte das equações da camada elementar está embasada em hipóteses que, sem comprometer de forma significativa os resultados obtidos, simplifiquem o tratamento matemático. Podem ser citados:

- O estudo de *LAGUERRE et al. (1989 apud COURTOIS, 1991)*, constatando a existência de uma inércia térmica em produtos a serem secados quando submetidos a uma rápida mudança na temperatura do ar de secagem;
- Experimentos efetuados por *ABID et al. e LASSERAN (1988 - 1989 apud COURTOIS, 1991)*, com a utilização de micro sensores tipo termopares, observando que o gradiente térmico existente entre a parte central da semente e a sua superfície era negligenciável após alguns minutos;
- *HENDERSON & PABIS (1961 apud BERN & BOILY, 1985)* já haviam feito este mesmo tipo de medida entre dois pontos para o milho, um localizado na superfície e outro no interior, concluindo que a transferência de calor ocorre por convecção e que o gradiente térmico pode ser desprezado depois de três a quatro minutos.

Uma constatação importante na análise da secagem em camada delgada refere-se à independência da tecnologia utilizada pelos secadores e específica para o produto a ser secado. Devido a esta especificidade, muitos autores como *FORTES (1978)*, *BIMBENET et al. (1984 apud COURTOIS, 1991)* e *BROOKER et al., (1992)*, desenvolveram estudos para diversos tipos de produtos agrícolas e alimentos.

Segundo *LEVESQUE et al. e STROSHINE & MARTINS (1986 apud COURTOIS, 1991)*, para uma mesma espécie e variedade, o estágio de maturidade e o formato

geométrico da semente tem importância relevante em seu comportamento durante o processo de secagem.

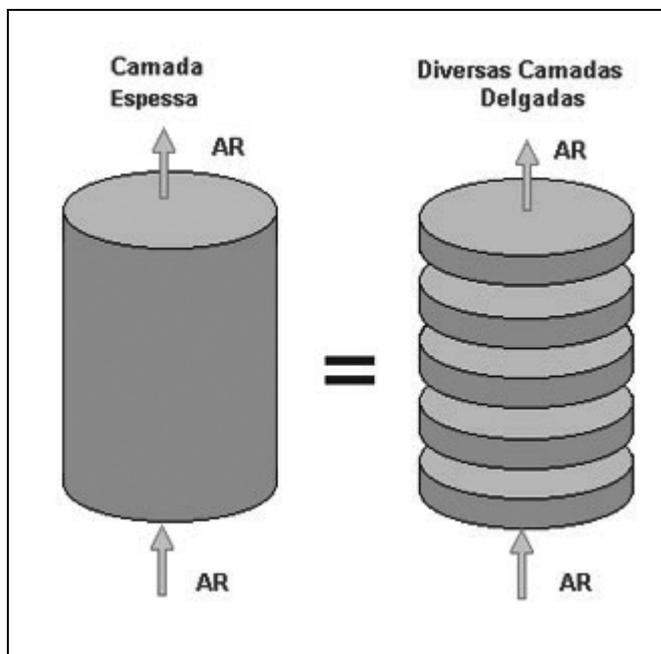


FIGURA 5 - Secagem em camada espessa.

DAUDIN (1982 apud COURTOIS, 1991), define camada elementar (camada delgada) como sendo a camada de produto a secado, suficientemente pequena, onde se pode considerar constantes as características do ar de secagem (velocidade, temperatura e razão de mistura) em qualquer ponto da camada. Isto implica na ausência de um gradiente entre as sementes. Na verdade, o estudo da secagem em camada delgada leva em consideração uma variação média na interação existente entre o ar de secagem e a semente.

2.3.2.1. Equações de camada delgada obtidas teoricamente

A secagem de sementes difere acentuadamente da secagem de outros produtos amplamente estudados de utilização industrial tais como: papel, produtos químicos, areia, entre outros. Uma das principais diferenças está no fato de se tratar de um produto biológico e, mais especificamente no caso de sementes, um organismo vivo que deve preservar suas características de alta germinação e vigor.

A grande diversidade de sementes existentes, com suas especificidades características, faz com que a abordagem da simulação ocorra de forma a agrupar sementes de características similares quanto à secagem. Uma abordagem de forma geral conduziria a resultados enganosos, que certamente não corresponderiam aos resultados experimentais e não teriam qualquer aplicação prática. Contudo, muitas concepções da secagem de outros produtos foram inicialmente utilizadas para embasar a análise da secagem de sementes.

Segundo *BROOKER et al. (1992)* se pode dividir a secagem em duas etapas distintas:

- Taxa de secagem constante: durante este período a secagem ocorre de forma similar à evaporação da água livre. A taxa de secagem é determinada basicamente pelo ar de secagem e muito pouco pelas características do produto que está sendo secado;
- Taxa de secagem decrescente: o início deste período de secagem ocorre quando a taxa de transferência de água no interior da semente é inferior àquela necessária para repor a água evaporada de sua superfície.

De acordo com *HALL (1957)*, a fase de taxa decrescente de secagem é determinada basicamente pelo produto que está sendo secado e envolve:

- O movimento de umidade no interior da semente em direção à superfície por difusão;
- A remoção da umidade da superfície da semente;
- O período de secagem a taxa decrescente pode, ainda, ser dividido em duas fases:
 - Superfície de secagem não saturada.
 - Secagem cuja taxa de difusão de água no interior da semente é pequena, sendo a difusão determinante da velocidade de secagem.

Estudos mais recentes indicam que estes períodos podem ainda ser subdivididos em maior número.

Para o período de taxa de secagem constante de produtos de origem biológica com grau de umidade inicial acima de 70 – 75 % a secagem deve ser simulada, levando-se em consideração três parâmetros externos: velocidade do ar, temperatura do ar e umidade do ar. O produto nestas condições comporta-se como se uma pequena camada de água cobrisse sua superfície. Se as condições do ar ambiente forem constantes, a secagem ocorrerá numa razão constante. Esta razão pode ser representada pela equação de *HENDERSON & PERRY (1955 apud HALL, 1980)*:

$$\frac{dM}{dt} = \frac{K_D S}{R_v T} (P_{vbu} - P_{v\infty}) = \frac{K_{conv} \cdot S}{L} (T_\infty - T_{bu}) \quad (75)$$

Sendo:

$\frac{dM}{dt}$ – Taxa constante de secagem;

K_D – Coeficiente convectivo de transferência de massa ($m \cdot s^{-1}$);

L – Calor de vaporização ($J \cdot kg^{-1}$);

S – Área de superfície elementar (m^2).

R_v – Constante gasosa para o vapor de água - $461,91 (kg \cdot m^2 \cdot s^{-2} \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1})$;

T – Temperatura absoluta (K);

T_{bu} – Temperatura bulbo úmido (K);

T_∞ – Temperatura do ar de secagem (K);

P_{vbu} e $P_{v\infty}$ – Pressões parciais de vapor associadas às temperaturas T_{bu} e T_∞ (Pa).

Devido aos graus de umidade com que são colhidas grande parte das sementes, abaixo de 70%, e da dificuldade na determinação dos parâmetros S , K_D e K_{conv} , decorrente da forma irregular da maioria dos produtos biológicos, a equação acima deve ser usada somente para casos e processos muito específicos sob condições ambientais controladas.

Para a fase de taxa decrescente de secagem, o produto não se comporta como se estivesse recoberto por uma fina camada de água, pois a resistência à retirada de água cresce de forma mais acentuada que a externa.

Para estes casos não devem ser considerados apenas os mecanismos externos (convecção de calor e transferência de massa), mas também deve ser

considerada a dinâmica interna da semente, tais como: transmissão de calor por condução e transferência de massa por difusão.

Um grande número de mecanismos térmicos e mecânicos têm sido propostos para descrever a transferência de umidade em meios porosos de capilaridade higroscópica sem alteração de volume, como é o caso das sementes, entre eles podem ser citados:

- Transferência devido à capilaridade.
- Transferência devido a diferente concentração de umidade (difusão líquida).
- Transferência devido à força osmótica.
- Transferência devido à força gravitacional.
- Transferência de vapor devido ao gradiente de umidade (difusão de vapor).
- Transferência de vapor devido ao gradiente térmico (difusão térmica).

LUIKOV et al. (1966 apud BROOKER et al., 1992) desenvolveram um modelo matemático para descrever a secagem de produtos tais como às sementes baseado nos mecanismos mencionados, assumindo inexistência de alteração volumétrica e que o fluxo de umidade ocorre devido à diferença de concentração.

Duas equações de fluxo laminar foram desenvolvidas para expressar a transferência de massa e energia:

$$\Omega = -\rho \left(D_m \frac{\partial M}{\partial x} + D_{th} \frac{\partial T_{sem}}{\partial x} \right) \quad (76)$$

$$\Phi = - \left(k_{th} \frac{\partial T_{sem}}{\partial x} + k_m \frac{\partial M}{\partial x} \right) \quad (77)$$

Sendo:

Ω – Fluxo de massa (kg.s^{-1});

ρ – Massa específica (kg.m^{-3});

D – Coeficiente de difusão para o vapor e para a fase líquida ($\text{m}^2.\text{s}^{-1}$);

Φ – Fluxo de calor (J.s^{-1});

k – Coeficiente de transferência de energia (s^{-1});

x – Coordenada (m);

T_{sem} – temperatura da semente (K);

Coeficiente “ m ” – referente à transferência devido ao gradiente de umidade.

Coeficiente “ th ” – referente à transferência devido ao gradiente de temperatura.

Aplicando as leis de conservação de massa e energia, obtém-se as equações diferenciais de duplo estado de variação para o conteúdo de umidade e a temperatura em uma partícula de secagem unidimensional:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \nabla^2 k_{11} M + \nabla^2 k_{12} T_{sem} \quad (78)$$

$$\frac{\partial T_{sem}}{\partial t} = \nabla^2 k_{12} + \nabla^2 k_{22} T_{sem} \quad (79)$$

Onde k_{11} e k_{22} são coeficientes fenomenológicos: $K_{11} = D$ e $K_{22} = 1/\alpha$ e os outros valores de k resultam da combinação de efeitos dos gradientes de umidade e transferência de energia. Estes coeficientes para a grande maioria das sementes são desconhecidos.

Na utilização da análise de secagem de sementes, com uma precisão satisfatória em termos de engenharia, a consideração dos efeitos combinados de temperatura e umidade não necessita ser levada em consideração. Pode-se, ainda, negligenciar o gradiente de temperatura existente no interior da semente, ficando a equação de *LUIKOV*:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \nabla^2 DM \quad (80)$$

As equações de *LUIKOV* foram resolvidas para muitas condições e formas por *CRANK (1957 apud BROOKER et al. 1992)*. Para a sua utilização na secagem de sementes, se devem levar em consideração o formato da semente. É aceito que a umidade flui no interior da semente por difusão de vapor e/ou líquida. O coeficiente de transferência k_{11} tem sido chamado de coeficiente de difusão, D , expresso em $m^2.s^{-1}$ ou $m^2.h^{-1}$. Para um valor constante de D equação de *LUIKOV* pode ser escrita da seguinte forma:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D \left(\frac{\partial^2 M}{\partial r^2} + \frac{c}{r} \frac{\partial M}{\partial r} \right) \quad (81)$$

Onde c é igual à zero para uma simetria plana, igual à unidade para um corpo de forma cilíndrica e igual a dois para a esfera.

Levando em consideração as condições iniciais:

$$M(r,0) = M(\text{inicial}) \quad \text{para } r \leq R$$

$$M(R,t) = M(\text{equilíbrio}) \quad \text{para } t > 0$$

CRANK & CHAPMAN (1957-1984 apud BROOKER et al. 1992), obtiveram para uma semente de forma esférica e simetria radial a seguinte solução:

$$MR = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp\left(-\frac{n^2 \pi^2}{9} X^2\right) \quad (82)$$

Para um elemento com a forma de um cilindro infinito, a solução passa a ser:

$$MR = \sum \frac{4}{\lambda_n^2} \exp\left(-\frac{\lambda_n^2}{4} X^2\right) \quad (83)$$

Onde λ_n é a raiz da função de Bessel de ordem zero. Nestas equações o grau de umidade médio e o tempo são expressos de forma adimensionais por MR (chamada de razão de umidade) e X , respectivamente:

$$MR = \frac{M(t) - M_{eq}}{M_o - M_{eq}} \quad (84)$$

e:

$$X = \frac{S}{V} (Dt)^{1/2} \quad (85)$$

Onde S representa a área superficial e V o volume da semente. Estes valores para corpos com formas regulares, como a esfera e o cilindro são 3/radianos e 2/radianos, respectivamente.

A solução apresentada foi baseada em séries infinitas e considera constante o coeficiente de difusão da semente D . Este coeficiente, na verdade, varia em função da temperatura e o grau de umidade fazendo as equações apresentadas expressar apenas aproximadamente a real razão de secagem.

A solução destas equações, através do método das diferenças finitas, considerando D como função da temperatura e da umidade e abrange, também, o período de razão de secagem não constante, mas necessita de uma malha considerável e, por conseguinte um tempo de simulação muito longo para ser usada em grande parte das aplicações.

As equações (82) e (83) assumem que o formato da semente é esférico ou cilíndrico, ocorrência com raras exceções. Mesmo assim, para determinados tipos de sementes que possuem forma aproximada às previstas nas equações, os resultados da razão de secagem encontrados foram considerados aceitáveis para os padrões utilizados em engenharia. Porém, para que seja estabelecida uma forma mais adequada aos reais formatos das sementes, são incorporados ao valor de D dados obtidos experimentalmente, desta forma, passa-se à utilização de equações semi-empíricas.

2.3.2.2. Equações semi-empíricas

Uma simplificação da solução da equação de difusão, onde são consideradas coordenadas esféricas – equação (82) - pode ser utilizada no estabelecimento da razão de secagem. Embora o somatório considere n variando de 1 à ∞ , decorrendo daí o somatório dos infinitos termos (série), se levar-se em consideração apenas o primeiro termo da equação (82):

$$\frac{M - M_{eq}}{M_o - M_{eq}} = \frac{6}{\pi^2} \exp\left(\frac{-D\pi^2 t}{r_o^2}\right) \quad (86)$$

Fazendo-se:

$$\frac{-D\pi^2}{r_o^2} = -K \quad (87)$$

Obtém-se:

$$\frac{M - M_{eq}}{M_o - M_{eq}} = \frac{6}{\pi^2} \exp(-Kt) \quad (88)$$

As equações (82) e (88) fornecem valores significativamente diferentes apenas para pequenos valores de t .

Uma relação similar a da equação (86) e análoga à lei de resfriamento de *Newton*, é também usada freqüentemente para a análise da secagem de sementes. Nesta equação assume-se que o decréscimo na razão de secagem da semente que está envolvida pelo ar de secagem é proporcional a diferença entre o grau de umidade num determinado instante e o grau de umidade de equilíbrio:

$$\frac{dM}{dt} = k(M - M_{eq}) \quad (89)$$

Resolvendo a equação diferencial (89) por separação de variáveis, integrando-se no intervalo apropriado:

$$\frac{M - M_{eq}}{M_o - M_{eq}} = \exp(-kt) \quad (90)$$

As equações (90) e (88) muitas vezes não expressam com precisão necessária as curvas de secagem para sementes, fornecendo razões de secagem iniciais muito baixas e muito altas quando se aproximam do grau de umidade de equilíbrio.

A equação (90) assume que a razão de secagem da semente é proporcional a diferença entre a umidade atual e o grau de umidade de equilíbrio, para uma dada temperatura.

Uma modificação empírica desta equação de camada elementar utilizada para descrever a secagem de diversos tipos de sementes, incluindo milho e arroz é a equação (90) – equação de *PAGE* - na forma:

$$\frac{M - M_{eq}}{M_o - M_{eq}} = \exp(-k't^{N'}) \quad (91)$$

Onde N' é uma constante e k' é a constante de secagem modificada. A equação (91) expressa, geralmente, com maior precisão a secagem que as equações (88) e (90), embora com uma razão de secagem inicial muito alta. Os termos k , K , k' e N' dependem do tipo de semente, da temperatura, da variedade e da umidade do ar.

2.3.2.3. Equações de secagem empíricas

Com o objetivo de melhor representar o comportamento das sementes durante a secagem, equações puramente empíricas para camada delgadas foram desenvolvidas e têm sido largamente utilizadas.

2.3.2.3.1. Equação de THOMPSON (1968)

THOMPSON *et al.* (1968 *apud* ROSSI & ROA, 1980), realizaram testes com a secagem de milho em camada delgada propondo a seguinte equação exponencial de segundo grau:

$$t = A_T \cdot \ln(MR) + B_T \cdot [\ln(MR)]^2 \quad (92)$$

Sendo:

$$A_T = -1,706 + 0,0088 \cdot T_{eq} \quad (93)$$

$$B_T = 148,7 \cdot \exp(-0,059 \cdot T_{eq}) \quad (94)$$

Sendo:

T_{eq} – temperatura de equilíbrio (°C);

t – tempo de secagem para alcançar MR à temperatura de secagem (h);

MR – razão de umidade (adimensional).

2.3.2.3.2. Equação de ROA & MACEDO (1976)

ROA & MACEDO (1976 *apud* ROSSI & ROA, 1980) propuseram a seguinte equação empírica de secagem em camadas delgadas:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = -mq(M - M_{eq})(P_{vs} - P_v)^n t^{q-1} \quad (95)$$

Integrando a equação (95) acima para a condição inicial $M(t = 0) = M_o$ e se considerando constantes a temperatura e umidade do ar para a camada elementar, obtém-se:

$$MR = \frac{M - M_{eq}}{M_o - M_{eq}} = e^{[-m(P_{vs} - P_v)^n t^q]} \quad (96)$$

Sendo:

P_{vs} – pressão parcial de vapor do ar saturado à temperatura ambiente (kgf.cm⁻²);

P_v – pressão parcial de vapor do ar (kgf.cm⁻²);

t – tempo de secagem (h);

M, M_o, M_{eq} – grau de umidade, grau de umidade inicial, grau de umidade de equilíbrio (base seca, decimal).

Explicitando-se M em (96) e substituindo-se t por “ $t + \Delta t$ ”, se tem:

$$M = (M_o - M_{eq}) \exp[-m(P_{vs} - P_v)^n (t + \Delta t)^q] + M_{eq} \quad (97)$$

Os parâmetros m , n e q são obtidos por regressão linear a partir de dados experimentais da secagem de camadas delgadas dos produtos. Esses são obtidos no laboratório, colocando uma camada de uma semente de altura numa peneira de arame, onde o ar com temperatura e umidade controladas passa através das sementes. A pesagem das sementes é feita a certos intervalos de tempo até que sua umidade tenha atingido ou tenha chegado próximo ao equilíbrio higroscópico.

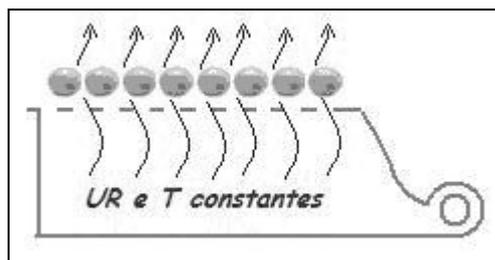


FIGURA 6 - Obtenção dos parâmetros da equação (97)

ROA & ROSSI (1980) salientam que os dados obtidos por diversos experimentos (*ROA & MACEDO, 1976*, para feijão e café; *VILELA & ROA, 1976*, para café cereja; *ALTEMANI, 1976*, para banana; *YOUNG & WHITAKER, 1969*, para amendoim; *FREIRE, 1977*, para cacau e *THOMPSON, 1968*, para milho) consideram as condições de entrada do ar de secagem constantes, denominado “processo estático”, não ocorre na prática, onde as condições de temperatura e umidade relativa do ar são variáveis dentro de camadas mais espessas. Desta forma, surgem discrepâncias entre os valores calculados com base nas equações de secagem em camadas delgadas e os valores de secagem em camadas espessas. *FIORENZE & ROA (1976 apud ROA & ROSSI, 1980, p. 81.)* desenvolveram uma metodologia para estimar os parâmetros das equações de secagem de camadas delgadas quando submetidas às variações de temperatura e umidade do ar. Esta forma de obtenção de parâmetros é denominada de “processo dinâmico”.

ROA et al. (1977 apud ROA & ROSSI, 1980), com o objetivo de determinar se a equação de secagem de camada delgada obtida pelo processo dinâmico (*FIORESE & ROA, 1976*) melhora a previsão da secagem em silos quando comparada com equações obtidas pelo método convencional utilizaram as equações de camada delgada de *ROA & MACEDO (1976)*, processos dinâmico e estático, e a equação de *TROEGER & HUKILL (1971 apud BROOKER et al., 1973 p. 255.)* no modelo de secagem de *THOMPSON et al. (1968)*. A simulação matemática daí resultante foi comparada com curvas experimentais de secagem de cinco toneladas de soja (variedade Santa Rosa), chegando as seguintes conclusões:

- A simulação com a utilização da equação de camada delgada de *TROEGER & HUKILL* foi a que mais se aproximou dos resultados experimentais;
- A simulação com a utilização da equação de camada delgada de *ROA & MACEDO* – processo dinâmico apresentou resultados mais próximos dos experimentais que a simulação com a utilização de camada delgada de *ROA & MACEDO* – processo estático.

ROA & ROSSI (1980), salientam, ainda que a vantagem da equação de *TROEGER & HUKILL* na simulação de secagem em silos se deve ao fato de ter sido originada de um total de trezentos e cinquenta provas experimentais para o milho com condições

de temperatura entre 33 e 72 °C; umidades relativas entre 0 e 80%; velocidade do ar entre 0,10 e 0,81m³.s⁻¹.m⁻² e grau de umidade inicial entre 21 e 42%, base seca.

A TABELA 10 apresenta os parâmetros m , n e q para a equação (97) para a soja, variedade Santa Rosa, obtidos pelos métodos convencional e dinâmico.

Explicitando-se, na equação (96), o tempo em função da relação MR , se tem:

$$t = \left[-\frac{\ln(MR)}{m(P_{vs} - P_v)^n} \right]^{\frac{1}{q}} \quad (98)$$

TABELA 10 - Parâmetros equação (97), para soja

PARÂMETRO	PROCESSO ESTÁTICO	PROCESSO DINÂMICO
m	0,004942	0,24232
n	0,47088	0,15897
q	0,511680	0,459716

2.3.2.3.3. Equação camada delgada de TROEGER & HUKILL (1971)

TROEGER & HUKILL (1971 apud SODHA et al.,2000, p. 105.) determinaram a razão de secagem usando a equação:

$$\frac{dM}{dt} = -k[M - M_{eq}]^a \quad (99)$$

Onde $M = M(t)$ e o expoente “a” é uma constante com valor superior a unidade. Para o intervalo de temperatura entre 33 e 72 °C, umidade relativa entre 0 e 80%, velocidade do ar entre 0,10 e 0,81m³.s⁻¹.m⁻² e grau de umidade inicial entre 21 e 42%, base seca; TROEGER & HUKILL (1971 apud ROA & ROSSI, 1980, p.86.) sugeriram o seguinte conjunto de equações para o milho

$$t = P_1(M - M_{eq})^{q_1} - P_1(M_o - M_{eq})^{q_1} \quad se \quad M_o \geq M \geq M_{x_1} \quad (100)$$

$$t = P_2(M - M_{eq})^{q_2} - P_2(M_{x_1} - M_{eq})^{q_2} + t_{x_1} \quad se \quad M_{x_1} \geq M \geq M_{x_2} \quad (101)$$

$$t = P_3(M - M_{eq})^{q_3} - P_3(M_{x_2} - M_{eq})^{q_3} + t_{x_2} \quad se \quad M_{x_2} \geq M \geq M_{eq} \quad (102)$$

Para:

$$M_{x_1} = 0,40(M_o - M_{eq}) + M_{eq} \quad (103)$$

$$M_{x_2} = 0,12(M_o - M_{eq}) + M_{eq} \quad (104)$$

$$t_{x_1} = P_1(M_{x_1} - M_{eq})^{q_1} - P_1(M_o - M_{eq})^{q_1} \quad (105)$$

$$t_{x_2} = P_2(M_{x_2} - M_{eq})^{q_2} - P_2(M_{x_1} - M_{eq})^{q_2} + t_{x_1} \quad (106)$$

$$P_1 = \exp(-1,49 + 6,42 M_o^{1,25} - 3,15 UR + 9,62 M_o \sqrt{UR} + 0,054 T - 0,00656 V) \quad (107)$$

$$P_2 = \exp[2,247 + 7,49 (UR + 0,01)^{0,67} - 0,0322 T] \quad (108)$$

$$P_3 = 0,12(M_o - M_{eq})^{(q_2 - q_3)} \left(\frac{P_2 q_2}{q_3} \right) \quad (109)$$

$$q_1 = -3,468 + 2,87 M_o - \left[\frac{0,019}{UR + 0,015} \right] + 0,0288 T \quad (110)$$

$$q_2 = -\exp(0,810 - 3,11 UR) \quad (111)$$

$$q_3 = -1,0 \quad (112)$$

Sendo:

M , M_o e M_{eq} – grau de umidade, grau de umidade inicial e grau de umidade de equilíbrio (base seca decimal);

t – tempo de secagem (min);

UR – umidade relativa (decimal);

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

V – velocidade do ar ($\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$).

Na simulação se necessita de $M = f(t)$. Para $M_f (M \rightarrow M_f)$ e $t \rightarrow t + \Delta t$:

$$M_f = \left[\left(\frac{t + \Delta t}{P_1} \right) + (M_o - M_{eq})^{q_1} \right]^{\frac{1}{q_1}} + M_{eq} \quad (113)$$

$$M_o \geq M_f \geq M_{x_1}$$

$$M_f = \left\{ \left(\frac{t + \Delta t}{P_2} \right) + (M_{x_1} - M_{eq})^{q_2} + \frac{P_1}{P_2} \left[(M_o - M_{eq})^{q_1} - (M_{x_1} - M_{eq})^{q_1} \right] \right\}^{\frac{1}{q_2}} + M_{eq} \quad (114)$$

$$M_{x_1} \geq M_f \geq M_{x_2}$$

$$M_f = \left\{ \left(\frac{t + \Delta t}{P_3} \right) + (M_{x_2} - M_{eq})^{q_3} + \frac{P_2}{P_3} \left[(M_{x_1} - M_{eq})^{q_2} - (M_{x_2} - M_{eq})^{q_2} \right] + \frac{P_1}{P_3} \left[(M_o - M_{eq_1})^{q_1} - (M_{x_1} - M_{eq})^{q_1} \right] \right\}^{\frac{1}{q_3}} + M_{eq} \quad (115)$$

$$M_{x_2} \geq M_f \geq M_{eq}$$

2.3.2.4. Equações de acordo com ASAE S448 DE 1999

A ASAE S448 DE 1999 estabelece valores dos parâmetros k' e N' para a equação de PAGE, equação (91):

- Para o milho e o tempo a ser obtido em horas (MISRA & BROOKER, 1980):

$$k' = \exp(-7,1735 + 1,2793 \ln T + 0,137 v) \quad (116)$$

$$2,1 \leq T(^{\circ}\text{C}) \leq 71,1$$

$$N' = 0,0811 \ln(\text{UR}\%) + 0,78 M_o \quad (117)$$

$$3 \leq \text{UR}\% \leq 71,1$$

Sendo:

v – velocidade ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$);

M_o – grau de umidade inicial (base seca decimal);

T – temperatura ($^{\circ}\text{C}$)

- Para o arroz e o tempo expresso em horas (AGRAWAL & SINGH, 1977):

$$k' = 0,02958 - 0,4456 \text{UR}\% + 0,01215 T \quad (118)$$

$$32 \leq T(^{\circ}\text{C}) \leq 51$$

$$N' = 0,13365 + 1,93653 \text{UR}\% - 1,77431 \text{UR}\%^2 + 0,009468 T \quad (119)$$

$$19 \leq \text{UR}\% \leq 85$$

- Para a soja e o tempo expresso em minutos (HUTCHINSON & OTTEN, 1982):

$$k' = 0,033 + 0,0003 T \quad (120)$$

$$32 \leq T(^{\circ}C) \leq 49$$

$$N' = 0,3744 + 0,00916 T \text{ UR}\% \quad (121)$$

$$34 \leq \text{UR}\% \leq 65$$

- Para o trigo e o tempo expresso em segundos (O'CALLAGHAN *et al.*, 1971):

$$k' = 139,3 \exp\left(\frac{-4426}{T + 273}\right) \quad (122)$$

$$T(^{\circ}C) \leq 100$$

$$n = 1 \quad (123)$$

2.4. Modelos de secagem

O estudo da secagem em camada delgada permite com que modelos de simulação sejam concebidos. Os modelos foram classificados ou ordenados por diversos pesquisadores levando em conta os princípios físicos em que foram concebidos.

2.4.1. Classificação dos modelos

Segundo COURTOIS (1991), os modelos de secagem podem ser divididos em três grupos:

- Modelos baseados na "difusão" onde o material biológico a ser secado é assimilado a uma forma conhecida, geralmente a esfera ou um cilindro finito, supostamente homogêneo e isotrópico. A solução para este tipo de modelo foi executada:
 - A partir de solução através de séries infinitas, CRANK (1967 *apud* BROOKER *et al.*, 1992; COURTOIS, 1991), supondo constantes a difusividade e o grau de umidade superficial. Este modelo está restrito ao período de taxa decrescente;
 - A partir do método das diferenças finitas HAGHIGHI & SEGERLIND e PATIL (1988 *apud* COURTOIS, 1991) abrangendo também o período de secagem de taxa constante, mas tendo como desvantagem o tempo necessário para a simulação.

- Modelos baseados na *Teoria da Termodinâmica de Processos Irreversíveis TPI* ("*Irreversible Thermodynamics*"), com maior ou menor simplificação. Este tipo de modelo tem como vantagem permitir uma comparação entre diferentes fluxos. A desvantagem é que este tipo de modelo foi concebido para materiais inertes, principalmente areia, que são bastante distintos das sementes. Todavia, com muitas simplificações, muitas vezes fazendo com que se tornasse um simples modelo difuso-convectivo, foi utilizado. *FORTES (1978)* e *FORTES & OKOS (1981)* que simularam o processo de seca-aeração considerando a água no estado líquido, o vapor e o fluxo de calor. Esta abordagem, contudo, apresenta um grande número de constantes de difícil determinação.
- Modelos "*pseudofísicos*", ou considerados como tal, baseados na utilização de leis físicas já estabelecidas. Este tipo de modelo segue a concepção do uso de compartimentos para a simulação e é amplamente utilizado na biologia. Apresenta a grande vantagem de exigir o uso de poucos recursos computacionais na simulação do gradiente existente no produto a ser secado. Segundo *COURTOIS (1991)*, uma aplicação bastante interessante foi feita por *TOYODA (1988)* na simulação da secagem de arroz associando uma semente a dois compartimentos concêntricos ou dois tanques em cascata para a umidade e um compartimento simples para a temperatura, considerando que o fluxo de água existente entre os dois compartimentos é proporcional à diferença do grau de umidade.

COURTOIS (1991) se utilizou de um modelo pseudofísico para a secagem de milho, considerando três compartimentos para o grau de umidade a uma temperatura uniforme, ocorrendo no compartimento periférico à vaporização da água enquanto que o gradiente de umidade se processaria nos dois compartimentos internos.

BOILY & BERN (1985) classificaram os modelos de secagem em dois tipos:

- *Semiteóricos ou baseados na difusão*, baseados na equação de difusão resolvida por *CRANK (1964)*, equações (82) e (83);
- *Modelos empíricos* baseados na equação de secagem de *PAGE (91)*.

BROOKER et al. (1992) classificam os modelos de secagem de camada espessa para o dimensionamento de diversos tipos de secadores nos seguintes tipos:

- Modelos baseados em equações diferenciais que expressam nas leis de transferência de calor e massa e que conduzem a um sistema complicado de equações capazes de serem resolvidas com a utilização de recursos computacionais. Mesmo assim este tipo de modelo assume as seguintes hipóteses de simplificação:
 - A diminuição de volume do produto ao ser secado é negligenciável;
 - Gradiente de temperatura interna do produto é desprezível.
 - A condução devido ao contato semente-semente é desprezível;
 - A vazão e o fluxo de sementes (para o caso de secadores) são constantes e o ventilador é acoplado diretamente;
 - Os termos $\frac{\partial T}{\partial t}$ e $\frac{\partial RM}{\partial t}$ são desprezíveis em relação à $\frac{\partial T}{\partial x}$ e $\frac{\partial RM}{\partial x}$, ou seja, a variação da temperatura e a razão de mistura com respeito ao tempo é negligenciável em relação à variação destas em relação à espessura da camada elementar considerada;
 - A célula de secagem é considerada adiabática, com capacidade térmica negligenciável;
 - Calor da mistura ar-vapor de água e da semente são consideradas constantes para um período elementar de tempo;
 - As equações de secagem desenvolvidas para um elemento e para o equilíbrio higroscópico são suficientemente precisas para a simulação do processo de secagem;
 - A evaporação da água da semente se dá à temperatura do ar de secagem.

Através do uso de modelo baseado em equações diferenciais, os seguintes tipos de secagem podem ser simulados:

- i. *Secagem em leito fixo*, aplicável à secagem em silos e a secadores de colunas para lotes de sementes (batch), Sendo o balanço de energia e de massa é feito através da análise das trocas num volume diferencial ($S.dx$) localizado arbitrariamente no leito fixo de sementes a serem secadas.
- ii. *Secagem de fluxo cruzado*, onde a direção "x" do fluxo de ar e do fluxo da massa de sementes a serem secadas "y" são perpendiculares. Os balanços de energia e de massa podem ser efetuados através de um volume diferencial para uma determinada posição na massa de sementes que se desloca de uma maneira similar a da secagem de leito fixo.
- iii. *Secagem de fluxo concorrente*, tomando-se por base as mesmas considerações que a secagem de leito fixo este modelo de secagem é obtido através do balanço de massa e calor num elemento diferencial de volume do secador ($S.dx$).
- iv. *Secagem de fluxo contra corrente*, neste caso o ar e a massa de sementes a serem secadas se deslocam em sentidos opostos. A modelagem matemática para este caso consiste na formulação do balanço de energia e massa de um volume elementar do sistema ($S.dx$), considerando o deslocamento da semente como sendo o sentido positivo. Pode-se, também neste caso, assumirem-se as mesmas considerações que a secagem em leito fixo.

Os tipos de secagem citados tomam por base o modelo de secagem em leito fixo para as distintas condições de contorno.

- Modelos baseados na camada estacionária utilizados para a simulação de secagem em silos e secadores de colunas;
- Modelos simplificados de camada espessa. Devido o trabalho e a complexidade muitas vezes envolvidos na utilização dos modelos baseados em equações diferenciais, muitas vezes é mais conveniente a utilização de modelos simplificados.

- Modelos logarítmicos de camada espessa. *HUKILL (1954 apud BROOKER et al. 1992)* analisando uma célula com ar de secagem à vazão constante, considerando o calor sensível da semente desprezível e a entalpia do ar que passa pela semente igual à energia necessária para a evaporação obteve uma equação diferencial que relaciona a variação da umidade em relação ao tempo com a variação da temperatura em relação à profundidade. *HUKILL*, assumindo que equação obtida descreve a taxa de secagem $\left(\frac{dM}{dt}\right)$ da camada delgada, uma equação exponencial similar é válida para um fator adimensional do ar quando a temperatura é decrescente ao longo da camada. A solução analítica da equação resulta na seguinte equação:

$$MR = \frac{2^D}{2^D + 2^Y - 1} \quad (124)$$

Sendo:

Y – tempo equivalente (adimensional);

D – unidade de profundidade
(adimensional).

- Modelos baseados no balanço de energia e massa. Nestes modelos é assumido que condições de equilíbrio entre o ar de secagem e a semente existem para cada camada durante um período discreto de tempo.

2.4.2. Modelo da Universidade Estadual de Michigan (*MSU*)

O *MSU* é um modelo baseado em um sistema de equações diferenciais (*ED*) que parte das hipóteses de simplificação (item 2.4.1). São válidas ainda as seguintes considerações:

- O processo de secagem se dá por dessorção adiabática;
- As camadas encontram-se uniformemente compactadas;
- A transferência de calor é regida pela energia convectiva do ar;

- A transferência de massa das sementes para o ar, considerado gás inerte, é determinada através da utilização de uma equação para a secagem de uma semente para a razão de dessorção considerada;
- A existência de equilíbrio higroscópico na camada periférica das sementes devido à ocorrência instantânea da dessorção e sorção;
- O volume do espaço intersticial (ϵ) por onde o ar de secagem se desloca é considerado constante;
- A altura ou espessura da camada de sementes é considerada uniforme;
- A área da superfície externa da semente é considerada constante.

2.4.2.1. Estabelecimento do modelo

O estabelecimento do modelo parte do balanço de energia e massa de um volume diferencial ($S \cdot dx$) localizado arbitrariamente numa posição da camada de sementes a ser secado (FIGURA 7).

Existem quatro incógnitas neste modelo: o grau de umidade médio da semente M ; a razão de mistura do ar RM ; a temperatura do ar T ; a temperatura da semente T_{sem} .

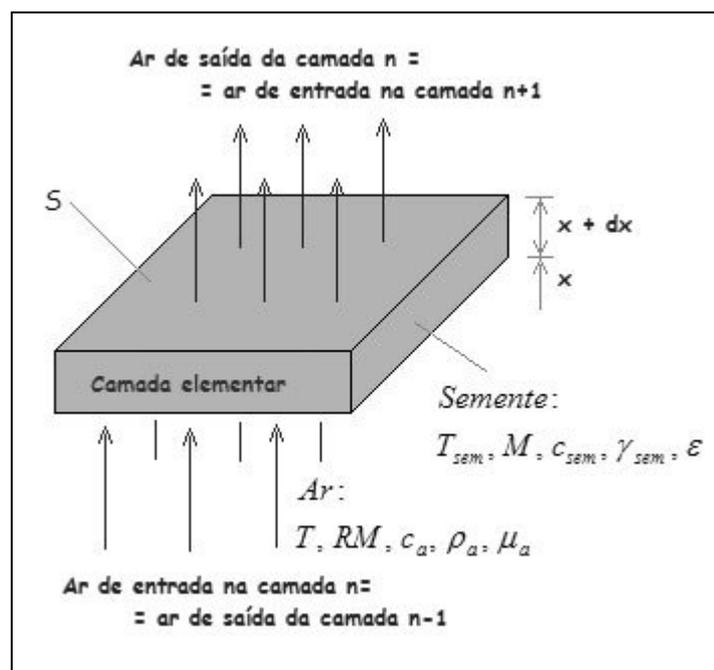


FIGURA 7 - Camada elementar.

No estabelecimento deste modelo obtêm-se um sistema de quatro equações diferenciais (ED) com quatro incógnitas que, com as condições de contorno, possui solução única.

2.4.2.1.1. ED da variação de temperatura do ar

A energia transferida por convecção do ar para a semente é igual à diferença entre a energia (calor) do ar de entrada e de saída na camada elementar acrescida da variação, em relação ao tempo, do calor do ar existente no espaço intersticial (FIGURA 7).

Considerando-se que o ventilador utilizado na secagem forneça uma vazão, V_{AZ} , o fluxo de ar (vazão específica - Vaz_{esp}), será:

$$V_a = \frac{V_{AZ}}{S \cdot dx} \quad (125)$$

Como:

$$\rho_a = \frac{1}{\mu_{esp}} \quad (126)$$

Onde μ_{esp} é a massa específica do ar. O fluxo de ar seco fornecido pelo ventilador é:

$$V_{AZ} \rho_a = Vaz_{esp} dx \rho_a S = v_a \rho_a S \quad (127)$$

Sendo v_a o fluxo de ar por unidade de área.

Para um intervalo diferencial de tempo dt :

$$m_{as} = V_{AZ} \rho_a dt = v_a \rho_a S dx \quad (128)$$

Sendo m_a a massa de ar seco.

Como o ar de secagem é uma mistura de ar seco e vapor de água se tem que:

$$m_a = m_{as} + m_v \quad (129)$$

Sendo:

m_a – massa do ar (kg);

m_{as} – massa do ar seco (kg);

m_v – massa de vapor de água contida no ar de secagem (kg).

A massa de vapor de água pode ser expressa em função da massa de ar seco e da razão de mistura do ar de secagem:

$$m_v = v_a \rho_a RM S dt \quad (130)$$

Substituindo-se (130) e (128) em (129):

$$m_a = v_a \rho_a S dt + v_a \rho_a RM S dt \quad (131)$$

Aplicando o princípio das trocas de calor para um decréscimo de temperatura dT (o ar cede calor à semente) e considerando as acima:

$$dQ_a = dQ_v + dQ_{as} \quad (132)$$

Sendo:

dQ_{ar} – variação do calor do ar de secagem (J);

dQ_v – variação do calor do vapor de água contida no ar de secagem (J);

dQ_a – variação entalpia do ar seco (J).

e:

$$dQ_a = dQ_{as} + dQ_v = m_{as} c_{as} (T + dT) + m_v c_v (T + dT) \quad (133)$$

Substituindo-se na (133) a (131) e pondo-se em evidência os fatores comuns:

$$dQ_a = (v_a \rho_a c_{as} + v_a \rho_a c_v RM) S dt (T + dT) \quad (134)$$

Determinando a variação do calor do ar dQ_a em função da espessura dx da camada elementar, têm-se:

$$\frac{dQ_a}{dx} = (v_a \rho_a c_{as} + v_a \rho_a c_v RM) S dt \left(\frac{dT}{dx} + \frac{d(dT)}{dx} \right) \quad (135)$$

Ou:

$$dQ_a = (v_a \rho_a c_{as} + v_a \rho_a c_v RM) \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \cdot S \cdot dt \cdot dx \quad (136)$$

Pois:

$$\frac{dT}{dx} \cong \frac{\partial T}{\partial x} \quad e \quad \frac{d(dT)}{dx} \cong 0 \quad (137)$$

Pode-se estabelecer, ainda, a variação do calor sensível do ar de secagem no espaço intersticial do volume elementar $S dx$ em relação ao tempo pondo-se dQ_a em função da porosidade ε :

$$dQ_a = (\rho_a c_{as} + \rho_a c_v RM) \cdot \varepsilon \cdot S \cdot dx \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \cdot dt \quad (138)$$

Sendo:

ε - porosidade da camada delgada ($m^3 \cdot m^{-3}$).

A variação total do calor sensível do ar no intervalo de tempo dt é igual a soma das equações (136) e (138):

$$dQ_T = (\rho_a c_{as} + \rho_a c_v RM) S dx \left(v_a \frac{\partial T}{\partial x} + \varepsilon \frac{\partial T}{\partial t} \right) \quad (139)$$

Isto ocorre, pois o ar se move através do produto havendo assim uma troca de convectiva de calor.

A variação de calor sensível do ar, em relação ao tempo, resultante da transferência de calor por condução, baseada na lei de resfriamento de *Newton*:

$$\Theta = \frac{dQ}{dt} = K_{conv} S_e (T - T_{sem}) \quad (140)$$

Sendo:

K_{conv} - coeficiente de transferência de calor por convecção ($J \cdot s^{-1} \cdot ^\circ C^{-1} \cdot m^{-2}$).

Explicitando dQ em (140) e considerando-se " S_e " a área efetiva igual a:

$$S_e = a S dx \quad (141)$$

Sendo " a " o quociente entre a área da superfície de troca (soma das áreas das superfícies das sementes) e o volume elementar ($m^2 \cdot m^{-3}$).

Substituindo S_e na (140):

$$dQ_T = K_{conv} a (T - T_{sem}) S dx dt \quad (142)$$

Sendo:

T - temperatura do ar ($^\circ C$);

T_{sem} – temperatura da semente ($^{\circ}\text{C}$).

Igualando-se as equações (139) e (142):

$$v_a \frac{\partial T}{\partial x} + \varepsilon \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{-K_{conv} a}{\rho_a c_{as} + \rho_a c_v RM} (T - T_{sem}) \quad (143)$$

Como o valor do termo $\varepsilon \frac{\partial T}{\partial t}$ pode ser desprezado se comparado com o termo $v_a \frac{\partial T}{\partial x}$, ou seja, a variação da temperatura na camada elementar em relação ao tempo pode ser considerada muito pequena e está multiplicada por um número menor que a unidade (ε). Considerando-se, ainda:

$$\rho_a v_a = G_a \quad (144)$$

$$\rho_a v_a RM = G_v \quad (145)$$

$$G_v = G_a RM \quad (146)$$

Passando o denominador da (143) a ser:

$$G_a c_{as} + G_v c_v = G_a c_{as} + G_a c_v RM \quad (147)$$

A equação diferencial que expressa a variação da temperatura em relação à espessura da camada elementar pode ser escrita da seguinte forma:

$$\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{-K_{conv} a}{G_a (c_{as} + c_v RM)} (T - T_{sem}) \quad (148)$$

2.4.2.1.2. ED da variação da temperatura da semente em relação ao tempo

A energia transferida por convecção do ar a camada elementar é igual à soma algébrica das energias necessárias para aquecer a semente, para evaporar a água da semente e para aquecer o vapor de água extraído.

De acordo com a equação fundamental da calorimetria, num instante t o calor da semente para o volume elementar ($S.dx$) é:

$$dQ_{Tsem} = m_{Tsem} \cdot c_{Tsem} \cdot (T_{sem} + dT_{sem}) \quad (149)$$

Sendo:

dQ_{Tsem} – energia transferida à semente úmido devido à variação $(T_{sem} + dT_{sem})$ de temperatura (J);

m_{Tsem} – massa de semente úmida (kg);

c_{Tsem} – calor específico da semente úmida (J / kg °C).

Como:

$$m_{Tsem} \cdot c_{Tsem} = m_{sem} \cdot c_{sem} + m_{sem} \cdot c_{H_2O} \cdot M \quad (150)$$

Sendo:

M – grau de umidade da massa de sementes (base seca decimal);

m_{sem} – massa de sementes (kg);

c_{sem} – calor específico da semente (J.kg⁻¹.°C⁻¹);

c_{H_2O} – calor específico da água (J.kg⁻¹.°C⁻¹).

Substituindo (150) em (149):

$$dQ_{Tsem} = (m_{sem} \cdot c_{sem} + m_{sem} \cdot c_{H_2O} \cdot M) \cdot (T_{sem} + dT_{sem}) \quad (151)$$

A massa de sementes pode ser expressa em função da massa específica, pois:

$$\gamma_{sem} = \frac{m_{sem}}{V_{sem}} = \frac{m_{sem}}{S \cdot dx} \quad (152)$$

Explicitando-se m_{sem} :

$$m_{sem} = \gamma_{sem} \cdot S \cdot dx \quad (153)$$

Substituindo na equação (151):

$$dQ_{Tsem} = (\gamma_{sem} \cdot c_{sem} + \gamma_{sem} \cdot c_{H_2O} \cdot M) \cdot S \cdot dx \cdot (T_{sem} + dT_{sem}) \quad (154)$$

Assim, a variação do calor sensível na camada elementar $S \cdot dx$, em função do tempo, é:

$$\frac{dQ_{Tsem}}{dt} = (\gamma_{sem} \cdot c_{sem} + \gamma_{sem} \cdot c_{H_2O} \cdot M) \cdot S \cdot dx \cdot \left(\frac{\partial T_{sem}}{\partial t} + \frac{\partial (dT_{sem})}{\partial t} \right) \quad (155)$$

Considerando $\frac{\partial(T_{sem})}{\partial t} \cong 0$, por ser muito pequeno se comparado com a variação da temperatura da semente em relação ao tempo: $\frac{\partial T_{sem}}{\partial t}$, tem-se que a diferencial dQ_{Tsem} será:

$$dQ_{Tsem} = (\gamma_{sem} \cdot c_{sem} + \gamma_{sem} \cdot c_{H_2O} \cdot M) \cdot S \cdot dx \cdot \left(\frac{\partial T_{sem}}{\partial t} \right) \cdot dt \quad (156)$$

A semente sofre um aumento de temperatura devido incremento de energia, dQ_{Tsem} , no intervalo de tempo dt . Por esta razão se convencionou que o sinal de dQ_{Tsem} é positivo.

O montante de água evaporada no intervalo de tempo dt é igual ao incremento da razão de mistura sofrida pelo ar que passa pela camada elementar. Utilizando a equação que expressa o calor latente de vaporização da água da semente tem-se que:

$$Q = m_a \cdot L_{sem} \quad (157)$$

Sendo:

m_a – massa de ar (kg);

L – calor latente de vaporização da água da semente (J. kg⁻¹).

A massa de ar pode ser decomposta na soma da massa de ar seco acrescida da massa de vapor de água nela contida, equação (129). Além disso, sendo a massa de vapor de água do ar o produto da massa de ar seco pela razão de mistura, se tem:

$$d(RM) = \frac{dm_{H_2O}}{m_{as}} \Rightarrow dm_{H_2O} = d(RM) \cdot m_{as} \quad (158)$$

E:

$$m_{as} = v_a \cdot \rho_a \cdot S \cdot dt = G_a \cdot S \cdot dt \quad (159)$$

Conforme equação (128) e levando em consideração a equação (144):

$$dm_a = d(RM) \cdot m_{as} = d(RM) \cdot G_a \cdot S \cdot dt \quad (160)$$

Substituindo (160) em (157):

$$dQ = G_a \cdot S \cdot dt \cdot d(RM) \cdot L_{sem} \quad (161)$$

A quantidade de calor cedida pelo ar e, portanto, com sinal negativo, ao atravessar a camada de espessura dx no intervalo de tempo dt , será:

$$\frac{dQ}{dx} = G_a \cdot S \cdot dt \cdot \left(\frac{\partial(RM)}{\partial x} \right) \cdot L_{sem} \quad (162)$$

E o calor necessário à evaporação no período dt :

$$dQ = G_a \cdot S \cdot dx \cdot dt \cdot \left(\frac{\partial(RM)}{\partial x} \right) \cdot L_{sem} \quad (163)$$

Deve-se, ainda, acrescentar ao calor da equação (151) àquele referente ao calor sensível necessário para aquecer o vapor de água retirado da semente da temperatura inicial T_{sem} à temperatura do ar T no intervalo de tempo dt :

$$dQ = (c_{as} \cdot G_a + c_v \cdot G_a \cdot RM) \cdot S \cdot dx \cdot dt \cdot (T - T_{sem}) \quad (164)$$

Derivando-se dQ em relação à dx , tem-se que:

$$\begin{aligned} \frac{dQ}{dx} &= \frac{d(c_{as} \cdot G_a + c_v \cdot G_a \cdot RM) \cdot S \cdot dx \cdot dt \cdot (T - T_{sem})}{dx} = \\ &= c_v \cdot G_a \cdot S \cdot dt \cdot \frac{\partial(RM)}{\partial x} \cdot (T - T_{sem}) \end{aligned} \quad (165)$$

O calor, desta forma, será:

$$dQ = c_v \cdot G_a \cdot S \cdot dt \cdot \frac{\partial(RM)}{\partial x} \cdot (T - T_{sem}) \cdot dx \quad (166)$$

O sinal a ser atribuído à equação (166) também é negativo, pois o ar de secagem diminui de temperatura, ou seja, perde calor.

O balanço final de calor na semente é efetuado levando em consideração as expressões (166), (163), (156) e (142):

$$\begin{aligned} &K_{conv} \cdot a \cdot (T - T_{sem}) \cdot S \cdot dx \cdot dt = \\ &= (\rho_{sem} \cdot c_{sem} + \rho_{sem} \cdot c_{H_2O} \cdot M) \cdot S \cdot dx \cdot \left(\frac{\partial T_{sem}}{\partial t} \right) \cdot dt - \\ &G_a \cdot S \cdot dx \cdot dt \cdot \left(\frac{\partial(RM)}{\partial x} \right) \cdot L_{sem} - c_v \cdot G_a \cdot S \cdot dt \cdot \frac{\partial(RM)}{\partial x} \cdot (T - T_{sem}) \cdot dx \end{aligned} \quad (167)$$

Explicitando-se a variação da temperatura da semente em relação ao tempo e pondo-se em evidência os termos comuns:

$$\begin{aligned} \frac{\partial T_{sem}}{\partial t} = & \frac{K_{conv} \cdot a}{\rho_{sem} \cdot c_{sem} + \rho_{sem} \cdot c_{H_2O} \cdot M} \cdot (T - T_{sem}) + \\ & + \frac{L_{sem} + c_v \cdot (T - T_{sem})}{\rho_{sem} \cdot c_{sem} + \rho_{sem} \cdot c_{H_2O} \cdot M} \cdot G_a \cdot \frac{\partial(RM)}{\partial x} \end{aligned} \quad (168)$$

2.4.2.1.3. ED da variação da *RM* ao passar pela camada elementar

A perda de umidade por parte da semente, no volume elementar $S \cdot dx$ é igual à diferença entre o vapor de água do ar de entrada e o de saída acrescida da razão de mistura ar contido no espaço intersticial.

A massa de água contida no ar de secagem é:

$$m_{H_2O} = m_{as} \cdot RM \quad (169)$$

E a variação da massa de água contida no ar de secagem para a camada elementar $S \cdot dx$:

$$dm_{H_2O} = G_a \cdot S \cdot dx \cdot dt \cdot d(RM) \quad (170)$$

Derivando em relação à x e considerando-se a variação da razão de mistura em relação ao acréscimo $x + dx$, obtêm-se:

$$\frac{dm_{H_2O}}{dx} = G_a \cdot S \cdot \frac{\partial(RM)}{\partial x} \cdot dt \quad (171)$$

A variação da massa de água que se dá no ar de secagem ao passar pela camada delgada $S \cdot dx$ será, portanto:

$$dm_{H_2O} = G_a \cdot S \cdot \frac{\partial(RM)}{\partial x} \cdot dt \cdot dx \quad (172)$$

E a variação da massa de água devido à razão de mistura do ar intersticial contido no volume elementar em relação ao intervalo de tempo dt , será de:

$$dm_{H_2O} = \rho_{as} \cdot d(RM) \cdot dt \cdot dV \quad (173)$$

Expressando dV em função da porosidade ε (em decimal):

$$dV = \varepsilon \cdot S \cdot dx \quad (174)$$

Substituindo a equação (174) na (173) e derivando em relação à dt :

$$\frac{dm_{H_2O}}{dt} = \varepsilon \cdot S \cdot dx \cdot \rho_{as} \cdot \frac{\partial(RM)}{\partial t} \quad (175)$$

A variação da massa de água contida no ar intersticial será desta forma:

$$dm_{H_2O} = \varepsilon \cdot S \cdot dx \cdot \rho_{as} \cdot \frac{\partial(RM)}{\partial t} \cdot dt \quad (176)$$

A massa de água contida na semente, em função de seu grau de umidade, no volume elementar será fornecida pela equação:

$$dm_{H_2O} = \rho_{sem} \cdot S \cdot dx \cdot d(M) \quad (177)$$

A variação da massa de água da semente em relação ao tempo será obtida através da derivada:

$$\frac{dm_{H_2O}}{dt} = \rho_{sem} \cdot S \cdot dx \cdot \frac{\partial M}{\partial t} \quad (178)$$

A variação da massa de água será obtida pela diferencial:

$$dm_{H_2O} = \rho_{sem} \cdot S \cdot dx \cdot \frac{\partial M}{\partial t} \cdot dt \quad (179)$$

Efetuando-se o balanço de massa através das equações (179), (176) e (172), obtêm-se:

$$\begin{aligned} \rho_{sem} \cdot S \cdot dx \cdot \frac{\partial M}{\partial t} \cdot dt &= \\ = \varepsilon \cdot S \cdot dx \cdot \rho_{as} \cdot \frac{\partial(RM)}{\partial t} \cdot dt - G_a \cdot S \cdot \frac{\partial(RM)}{\partial x} \cdot dt \cdot dx & \end{aligned} \quad (180)$$

Efetuando o balanço de massa se pode observar que a razão de mistura do ar aumentou com a variação do grau de umidade da semente em relação ao tempo e ao passar pelo volume elementar $S \cdot dx$, mas sofreu um decréscimo em relação ao ar contido no espaço intersticial. Devido a isto, na equação (180), ao ser efetuado o balanço de massa, considerou-se o acréscimo de razão de mistura com o sinal positivo e o decréscimo com o sinal negativo.

Como a variação da razão de mistura em relação ao tempo é muito pequena pode ser negligenciada. Arranjando os termos da equação (180) e explicitando-os em função de $\frac{\partial(RM)}{\partial x}$ obtém-se a equação diferencial do balanço de transferência de massa para o ar:

$$\frac{\partial(RM)}{\partial x} = -\frac{\rho_{sem}}{G_a} \frac{\partial M}{\partial t} \quad (181)$$

2.4.2.1.4. Equação diferencial da variação do grau de umidade em relação ao tempo

Para o estabelecimento da equação representativa do balanço de massa em relação à semente a ser secada se utiliza uma das equações de camada delgada apresentada no item 2.3.2. Essa pode ser expressa por uma equação teórica de difusão, semi-empírica ou por uma equação empírica.

Têm-se, portanto, que a equação diferencial será do tipo:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \text{equação de camada elementar} \quad (182)$$

As equações diferenciais (148), (168), (181) e (182), constituem o modelo para a secagem em camada estacionária.

Devido à impossibilidade de uma solução analítica para este sistema, soluções numéricas devem ser empregadas.

2.4.2.1.5. Condições iniciais de contorno

Para que se processe a solução numérica de um sistema de equações que modelem um fenômeno físico condições iniciais e de contorno devem ser conhecidas. Para o caso do modelo de secagem estacionária de sementes estas condições são dadas pelas condições iniciais de temperatura do ar e da semente e pelo grau de umidade inicial da semente e razão de mistura do ar de secagem.

Expressando-se de forma matemática, tem-se que as condições iniciais e de contorno são:

$T(0;t) = T_i$ - temperatura inicial do ar de secagem.

$T_{sem}(x;0) = T_{semi}$ - temperatura inicial da semente.

$RM(0;t) = RM_i$ - razão de mistura do ar de secagem.

$M(x;0) = M_i$ - grau de umidade inicial do produto a ser secado.

É importante observar que se deve levar em consideração, ainda o fluxo específico de ar G_a , dado pela equação (144) para:

$$G_a(0;t) = Vaz_{esp} \cdot \rho_{ar} - \text{fluxo específico de ar.}$$

Através do sistema de equações (148), (168), (181) e (182); e conhecendo-se as curvas de umidade de equilíbrio, as curvas de secagem de camadas delgadas e as propriedades físicas do produto (que constam do sistema de equações), pode-se calcular matematicamente, com a utilização de recursos computacionais o comportamento da secagem do produto considerado, como função das propriedades psicrométricas e de vazão do ar de entrada na célula de secagem. Esta simulação é obtida através da integração simultânea do sistema mencionado.

2.4.2.1.6. Validação e solução para o modelo de camadas espessas

O modelo de simulação *MSU* consiste de quatro equações diferenciais hiperbólicas com quatro incógnitas que deve ser resolvida através de integração numérica pela substituição de diferenças finitas nas derivadas.

Para a solução numérica de camada espessa, a camada de sementes deve ser dividida em um grande número de subcamadas e o modelo expresso através de diferenças finitas. Em cada subcamada a semente é considerada com temperatura e grau de umidade uniformes devido à espessura considerada – 10^{-2} m ou menos. As características psicrométricas do ar que entra numa determinada camada delgada são as mesmas com que o ar sai da camada elementar precedente. Utiliza-se na integração numérica do sistema de equações o intervalo de tempo discretizado em 10^{-2} h (*BROOKER et al., 1992*).

As principais fontes de erro neste tipo de simulação são (*BROOKER et al., 1992*):

- A precisão da equação de camada delgada utilizada;

- A insuficiente precisão das equações isotérmicas de equilíbrio higroscópico para umidades relativas acima de 90%;
- A falta de precisão na medida dos parâmetros de entrada, tais como: vazão e temperatura do ar de secagem;
- Espessura e intervalo de tempo utilizados na discretização.

2.4.3. O modelo de THOMPSON

THOMPSON *et al.* (1968 *apud* BERN & BOILY, 1985) desenvolveram um modelo para a simulação da secagem utilizando um conjunto de equações que representam algebricamente os balanços de energia (calor) e de massa para uma camada delgada. Este modelo foi concebido inicialmente para a secagem de milho, tendo sido o mesmo posteriormente, com adaptações, ampliado para outros tipos de sementes (ROSSI & ROA, 1980 e MATA & DANTA, 1998).

2.4.3.1. Princípios físicos utilizados na concepção do modelo

Na simulação de camada espessa foi considerado um conjunto sobreposto de diversas camadas delgadas para as quais o processo é aplicado de forma iterativa. Transferências simultâneas de calor e umidade ocorrem durante a secagem do produto.

Para que os fenômenos de transferência sejam expressos matematicamente, as trocas que ocorrem entre o ar de secagem e a semente devem ser consideradas conforme mostrado na FIGURA 4.

Assume-se implicitamente que não existam transferências radiais de calor e de umidade e que não ocorram trocas significativas de calor e umidade com o meio, ou seja, estritamente no sentido mencionado, trata-se de um processo adiabático.

O ar de secagem, a uma temperatura inicial T_i e uma razão de mistura RM_i , deve passar por uma camada delgada de sementes que se encontra a uma temperatura inicial T_{sem} e um grau de umidade M_i num intervalo de tempo Δt . Durante este intervalo de tempo ocorre a evaporação referente à umidade retirada

da semente representada por ΔM . A RM_i do ar aumenta em ΔRM , equivalente a perda de umidade do produto ΔM . Durante a secagem, a energia usada para aquecer a semente e evaporar uma parcela de seu grau de umidade faz com que o ar de secagem perca calor resfriando-se (resfriamento evaporativo). Como resultado deste processo se tem o resfriamento do ar em ΔT e o aumento na temperatura da semente em ΔT_{sem} (SILVA, 2000 e GUIMARÃES & BAUDET, 2001).

As razões de transferência de energia (calor) $\frac{dQ}{dt}$ e de massa (água) $\frac{dm}{dt}$ entre o ar e a semente devem ser determinadas afim de que possam ser determinadas as trocas de umidade - ΔM - e temperatura - ΔT - que ocorrem na camada delgada no intervalo de tempo Δt .

2.4.3.2. Expressões das propriedades físicas utilizadas na simulação

O processo matemático de simulação de secagem só é válido se os resultados alcançados forem suficientemente precisos na determinação do tempo de secagem considerando-se os padrões utilizados em engenharia. Para que isto ocorra as variáveis independentes, ou seja, aquelas relativas à semente e ao ar de secagem envolvidas no processo, tenham seus valores determinados com precisão, pois em função destes serão obtidos os valores das variáveis dependentes do processo, tais como: tempo de secagem, quantidade de água retirada, temperatura do ar de saída entre outros.

Para que este objetivo seja alcançado, equações que expressem de forma adequada às propriedades físicas do produto a ser secado devem ser utilizadas.

2.4.3.3. Relações utilizadas no modelo de THOMPSON

2.4.3.3.1. Equação da camada delgada

THOMPSON *et al.* (1968) propuseram uma equação exponencial empírica de segunda ordem – equações (92), (93) e (94). Estas equações foram concebidas inicialmente para a secagem de milho em um intervalo de temperatura entre 49°C e 170°C e de grau de umidade da semente de 12% a 33% base úmida (milho) e para

um fluxo de ar de $6\text{m}^3.\text{min}^{-1}.\text{m}^{-2}$ a $18\text{m}^3.\text{min}^{-1}.\text{m}^{-2}$, mas como tem sido utilizada, com modificações, para um grande número de produtos agrícolas estes intervalos de validade podem sofrer algumas variações.

A FIGURA 8 mostra as curvas de secagem de acordo com a equação (105) para temperaturas de secagem de 20°C , 30°C , 40°C , 50°C e 60°C .

Segundo *BOILY & BERN (1985)*, a temperatura do ar de secagem é o fator que mais afeta a taxa de secagem.

Os valores apresentados para *A* e *B* nas equações (93) e (94) foram obtidos pelo método dos quadrados mínimos (*ROSSI & ROA, 1980*).

HENDERSON & PABIS (1961 apud BERN & BOYLE, 1985), mediram a temperatura no centro e em dois pontos da superfície de uma semente de milho e verificaram que quando a semente é aquecida por convecção a diferença entre o centro e a superfície é significativa até três ou quatro minutos, ou seja, a transferência de energia na forma de calor ocorre rapidamente entre a superfície e o centro da semente. Este fato permitiu simplificar consideravelmente o modelo matemático, pois a temperatura da semente e a temperatura do ar podem ser consideradas iguais.

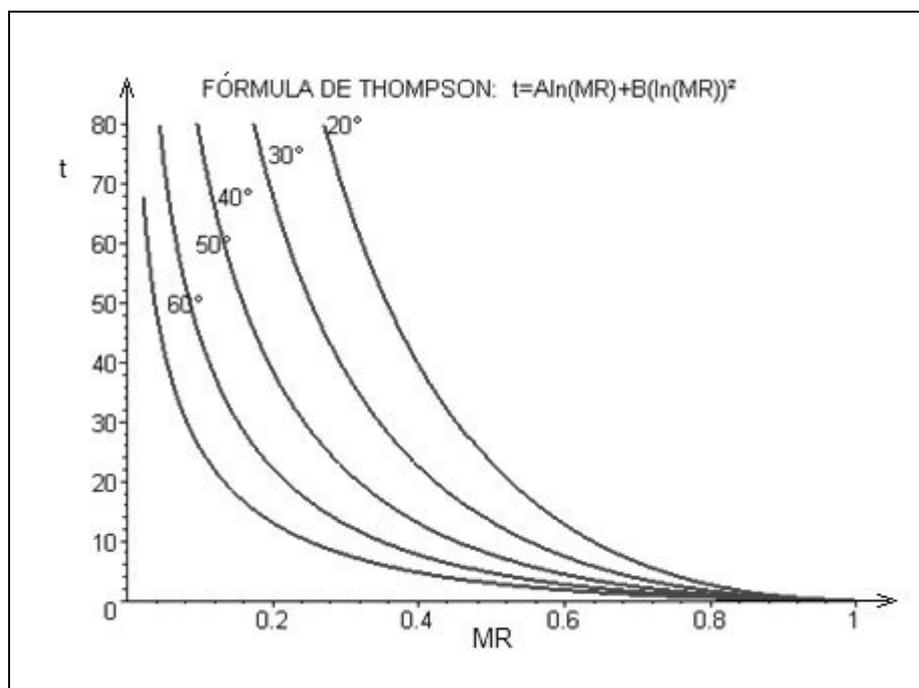


FIGURA 8 - Valores da fórmula de Thompson.

2.4.3.3.2. Equilíbrio higroscópico, calor latente e calor específico

A equação originalmente utilizada foi a de *HENDERSON-THOMPSON*, equação (43), com coeficientes para o milho ligeiramente diferentes dos apresentados TABELA 3. Para o calor latente de vaporização da água da semente pode ser utilizada uma das expressões do item 2.2.2.11 e o calor específico da semente conforme item 2.2.2.10.

2.4.3.3.3. Hipóteses de simplificação do processo de simulação

Os dados de partida para o modelo de *THOMPSON* são (*GUIMARÃES & BAUDET, 2001*):

- Duas características independentes do ar de secagem, geralmente a temperatura e a razão de mistura ou a temperatura e a umidade relativa do ar, a partir das quais se podem determinar as demais características;
- A temperatura inicial e o grau de umidade da semente;
- Outras propriedades físicas e higroscópicas da semente e do ar, como função das condições de operação.

Pode-se prever, matematicamente, a secagem do produto, em qualquer posição, "x", da célula de secagem para um determinado tempo "t".

O procedimento utilizado para a determinação das variações médias que ocorrem durante o processo de secagem de uma camada delgada, para um incremento de tempo Δt , está baseado numa simplificação que consiste em dividir-se o mesmo em três fases psicrométricas:

- 1º. Equilíbrio de temperatura entre a semente e o ar de secagem (ponto de estado 1 ao ponto de estado 2 – FIGURA 9);
- 2º. Secagem (retirada da água do produto) à temperatura de equilíbrio;
- 3º. Resfriamento evaporativo do ar e da semente (ponto de estado 2 ao ponto de estado 3 – FIGURA 9).

Essas três fases ocorrem, na realidade, de forma simultânea, mas a divisão do processo simplifica de forma significativa a simulação.

2.4.3.3.4. Balanço térmico

Os balanços de energia na camada delgada são efetuados em termos de calor por unidade de massa de ar seco (kJ.kg^{-1}). É necessária a aplicação de um fator multiplicativo R_T ao calor específico da semente que permita a conversão nas mesmas unidades do balanço de energia efetuado. Esse fator é obtido através da seguinte relação:

$$R_T = \frac{m_{T_{sem}}}{m_{as}} \quad (183)$$

Sendo:

$m_{T_{sem}}$ – massa total da semente (matéria seca + água) ao grau de umidade em que o calor específico da semente é determinado (kg);
 m_{as} – massa de ar seco (kg).

Isto porque o calor específico (c_{sem}) é dado em função do grau de umidade da semente. A partir da equação (52), se obtém:

$$c_{sem} = A + B M_{bu} \% = A + 100 B \frac{M_{bs}}{1 + M_{bs}} = \frac{A + (A + 100 B)M_{bs}}{1 + M_{bs}} \quad (184)$$

Sendo:

M_{bu} - o grau de umidade atual da semente (base úmida percentual);
 M_{bs} - grau de umidade atual da semente (base seca decimal).

A massa total de semente (matéria seca + água) depende do volume da célula de secagem e da massa específica aparente da semente:

$$m_{T_{sem}} = V_{ol} \gamma_{sem} = S_{st} \Delta x \gamma_{sem} \quad (185)$$

A massa total de semente por unidade de área pode ser expressa por:

$$\frac{m_{T_{sem}}}{S_{st}} = \gamma_{sem} \Delta x \quad (186)$$

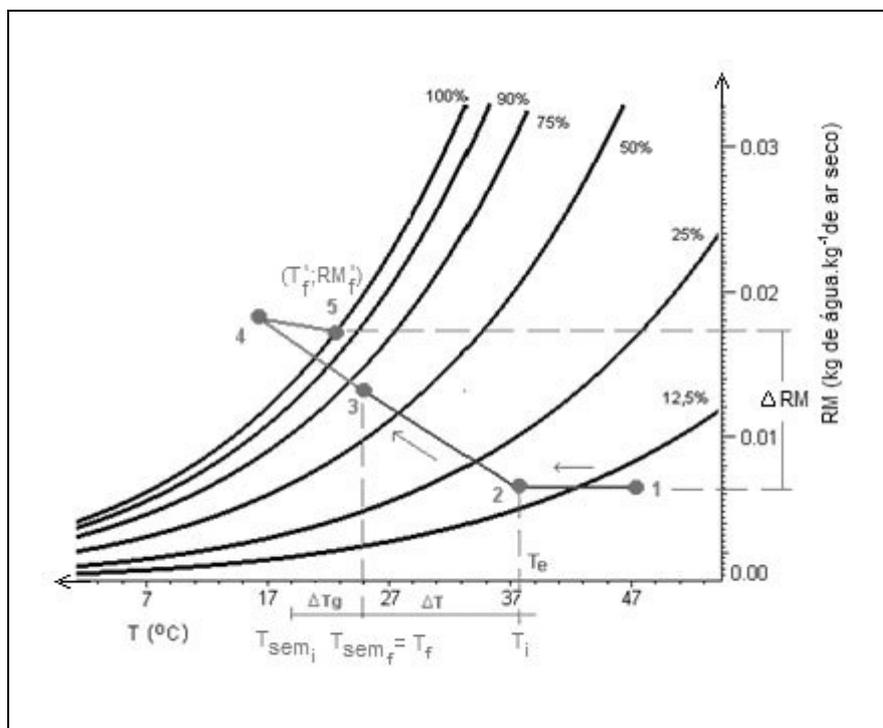


FIGURA 9 - Etapas de secagem do Modelo de THOMPSON.

A $m_{T_{sem}}$ está relacionada com a m_{ms} através das expressões:

$$m_{T_{sem}} = m_{ms} + m_{H_2O} \quad (187)$$

$$M_{bs_o} = \frac{m_{H_2O}}{m_{ms}} \Rightarrow m_{H_2O} = M_{bs_o} m_{ms} \quad (188)$$

Substituindo (188) em (187):

$$m_{T_{sem}} = m_{ms} + M_{bs_o} m_{ms} = m_{ms} (1 + M_{bs_o}) \quad (189)$$

Sendo M_{bs_o} o grau de umidade para o qual foi estabelecida a massa específica aparente - γ_{sem} .

Considerando que a massa específica aparente da semente tenha sido estabelecida para o grau de umidade inicial da semente e multiplicando pelo termo

“ $1 + M_{bs}$ ” para que seja corrigido o valor para o grau de umidade atual da semente, se pode assumir que:

$$\frac{m_{Tsem}}{S_{st}} = \frac{\gamma_{sem} \Delta x}{1 + M_{bs_o}} (1 + M_{bs}) \quad (190)$$

Como M_{bs_o} é constante em todo o processo de simulação e M_{bs} variável para cada etapa é conveniente que o termo que envolve esta última grandeza apareça na expressão de balanço térmico ficando, desta forma, o valor de R_T constante.

A massa de ar seco por unidade de área é função do fluxo de ar (vazão) fornecida pelo ventilador e do volume específico do ar. Se a fonte de aquecimento do ar de secagem encontra-se localizada depois do ventilador o ar a ser considerado deve ser o ar ambiente. Caso contrário, o ar a ser considerado para o cálculo do volume específico deve ser o ar de secagem.

A massa de ar seco é obtida através do volume específico:

$$\mu_{esp} = \frac{V_a}{m_{as}} \Rightarrow m_{as} = \frac{V_a}{\mu_{esp}} \quad (191)$$

O volume de ar é função da vazão de ar fornecida pelo ventilador:

$$V_a = V_{az} \Delta t \quad (192)$$

Substituindo (192) na (191) e levando em consideração que:

$$V_{AZesp} = \frac{V_{az}}{S_{st}} \quad (193)$$

Tem-se que:

$$\frac{m_{as}}{S_{st}} = \frac{\left(\frac{V_{az}}{S_{st}}\right) \Delta t}{\mu_{esp}} \Rightarrow \frac{m_{as}}{S_{st}} = \frac{V_{AZesp} \Delta t}{\mu_{esp}} \quad (194)$$

Substituindo (194) e (190) em (183), se tem:

$$R_T = \frac{\gamma_{sem} \mu_{esp} S_{st} \Delta x}{(1 + M_{bs_o}) V_{az} \Delta t} (1 + M_{bs}) \quad (195)$$

Sendo μ_{esp} obtido pela equação (12).

Como nas equações de balanço de massa e energia o fator R_T sempre multiplica o calor específico da semente, se pode fazer:

$$R_T c_{sem} = \frac{\gamma_{sem} \mu_{esp} \Delta x}{(1 + M_{bs_o}) V_{az_{esp}}} [A + (A + B) M_{bs}] \quad (196)$$

O primeiro fator da equação (196) sempre será constante e expresso por:

$$R = \frac{\gamma_{sem} \mu_{esp} \Delta x}{(1 + M_{bs_o}) V_{az_{esp}}} \quad (197)$$

A temperatura de equilíbrio, T_{eq} , entre o ar de secagem e a semente é determinada através do balanço de calor sensível entre as condições iniciais do ar e da semente, primeiro membro da equação (198), e as condições de equilíbrio, segundo membro da equação (198).

$$\begin{aligned} c_a T_i + RM_i (2512131 + 1552,4 T_i) + T_{sem_i} R_T c_{sem} = \\ = c_a T_{eq} + RM_i (2512131 + 1552,4 T_{eq}) + T_{eq} R_T c_{sem} \end{aligned} \quad (198)$$

Sendo:

T_{eq} – temperatura de equilíbrio ($^{\circ}\text{C}$);

c_a – calor específico do ar seco (J/kg de ar $^{\circ}\text{C}$);

T_i – temperatura inicial ($^{\circ}\text{C}$);

RM_i – razão de mistura inicial do ar (kg de vapor d'água/kg de ar seco);

c_g – calor específico do produto (kJ/kg $^{\circ}\text{C}$);

T_{semo} – temperatura inicial da semente ($^{\circ}\text{C}$);

R_T – relação entre a massa seca da semente e massa de ar seco (kg de semente/kg de ar);

M_{bs} – grau de umidade atual da semente (base seca decimal).

2.4.3.3.5. Temperatura de equilíbrio inicial

Explicitando T_{eq} e efetuando-se as devidas simplificações na equação (198)²:

² Para entrada em quilocalorias a equação (199) se torna:

$$T_{eq} = \frac{(0,24 + 0,37 RM_i) T_i + c_{sem} R_T T_{sem_i}}{0,24 + 0,37 RM_i + c_{sem} R_T} \quad (199 \text{ a})$$

$$T_{eq} = \frac{(1006,9 + 1552,4 RM_i) T_i + c_{sem} R_T T_{sem_i}}{1006,9 + 1552,4 RM_i + c_{sem} R_T} \quad (199)$$

A temperatura T_{eq} é utilizada como temperatura do ar de secagem na camada em que a simulação está sendo considerada. T_{eq} é uma temperatura diferente da temperatura do ar de entrada (ar de secagem), T_i .

O balanço térmico resultante da equação (199) permite a determinação da temperatura T_{eq} , mas não abrange a remoção de umidade da semente. Normalmente o produto não atinge a temperatura T_{eq} antes que o resfriamento evaporativo acompanhe a transferência de calor sensível.

Na FIGURA 9 o caminho do ponto de estado 1 \rightarrow ponto de estado 2, representa a transferência de calor sensível. Neste "percurso" a razão de mistura - RM_i - do ar permanece constante.

O grau de umidade de equilíbrio - M_{eq} - é determinado através da equação (43) ou equivalente, utilizando-se da umidade relativa do ar antes da secagem e da temperatura de equilíbrio T_{eq} obtida na equação (199).

No processo de secagem em leito fixo a temperatura do ar de secagem, T_{eq} , em um determinado ponto do leito, usualmente é modificada à medida que a secagem naquele ponto progride. Uma nova curva de secagem é, então, especificada e substitui a curva obtida anteriormente. A transformação da curva de secagem, nesse ponto considerado, é feita determinando-se o "tempo equivalente de secagem". O tempo equivalente de secagem é determinado através da equação de secagem de camada delgada (92) (ROA & ROSSI, 1980).

2.4.3.3.6. Seqüência a ser utilizada no processo de simulação

A partir da determinação da temperatura de equilíbrio T_{eq} , as seguintes etapas na seqüência do processo de simulação necessitam ser executados:

- 1º. Cálculo inicial da razão de umidade antes da remoção de umidade através da equação (84) - ponto de estado 1, FIGURA 9. Caso seja o primeiro período de secagem se faz $M = M_0$;

2º. Cálculo do tempo de equilíbrio através da equação (92) - ponto de estado 2, FIGURA 9;

3º. Determinação do tempo equivalente t_{eq} :

$$t_{eq(j)} = t_{eq(j-1)} + \Delta t \quad (200)$$

Sendo:

$t_{eq(j)}$ - tempo do j -ésimo período (h);

$t_{eq(j-1)}$ - tempo do período anterior ao considerado (h);

Δt - intervalo de tempo discretizado (h).

4º. Determinação da razão de umidade ao final do processo do presente período de secagem. MR_f é calculada explicitando-se MR na equação (92), usando T_{eq} e as constantes A_T e B_T obtidas pelas equações (93) e (94), respectivamente.

$$MR_f = \exp\left(\frac{-A_T - \sqrt{A_T^2 + 4 \cdot B_T \cdot t_{eq(j)}}}{2 \cdot B_T}\right) \quad (201)$$

5º. O grau de umidade final após o período Δt é obtido por:

$$M_f = (M_0 - M_{eq}) \cdot MR_f + M_{eq} \quad (202)$$

6º. A água evaporada durante o processo - ΔRM - é determinada através da diferença entre o grau de umidade inicial e final multiplicado pelo fator R_T . O índice "f" refere-se às condições finais de equilíbrio que precedem à secagem (ponto de estado 2, FIGURA 9).

$$\Delta RM = \frac{(M - M_f)}{100} \cdot R_T \quad (203)$$

7º. A determinação da razão de mistura após a transferência de umidade da semente para o ar (ponto de estado 3, FIGURA 9) é determinada pela relação:

$$RM_f = RM + \Delta RM \quad (204)$$

8º. A partir de um novo balanço de calor entre o ar e a semente pode ser determinada a temperatura final T_f da camada.

2.4.3.3.7. Balanço de calor e determinação da temperatura final

A temperatura final da camada elementar é determinada através do balanço de calor. Igualando-se os valores que representam as características térmicas iniciais e finais do ar e da semente.

Expressando algebricamente o balanço de calor para esta etapa do processo de simulação:

Condições antes da secagem da camada:

A entalpia do ar, fornecida pela equação (20) para a temperatura de equilíbrio T_{eq} e a razão de mistura (RM) inicial, deve ser somada ao calor da semente convertido para a unidade adequada:

$$c_{sem} \cdot T_{eq} \cdot R_T + c_{H_2O} \cdot \Delta RM \cdot T_{eq} \quad (205)$$

Condições finais, após a umidade haver sido removida:

A entalpia do ar, fornecida pela equação (20) para a temperatura de equilíbrio T_f e a razão de mistura RM final, deve ser somada ao calor da semente convertido para a unidade adequada:

$$c_{sem} \cdot T_{semf} \cdot R_T + \Delta L \cdot \Delta RM \quad (206)$$

Sendo:

c_{sem} – calor específico da semente, equação (52) e TABELA 7 ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$);

c_{H_2O} – calor específico da água ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$);

ΔRM – fornecido pela equação (203) ($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$);

ΔL – diferença entre o calor latente de vaporização da semente produto e o calor latente de vaporização da água livre ($^\circ\text{C}$).

2.4.3.3.8. Determinação do calor de vaporização da água da semente

O produto $\Delta L \cdot \Delta RM$ representa o calor necessário para evaporar a água da semente acima do necessário para evaporar a mesma quantidade de água livre.

O termo ΔL é o resultado de uma diferença:

$$\Delta L = L_{sem} - L_{AL} \quad (207)$$

Sendo:

L_{sem} – é o calor latente de vaporização da água – item 2.2.2.11, página 30 (kJ.kg^{-1});

T_{eq} – temperatura ($^{\circ}\text{C}$).

L_{AL} – é o calor latente de vaporização da água livre dado pela equação:

$$L_{AL} = 2.502,2 - 2,39 \cdot T_{eq} \quad (208)$$

A equação (208) é a mesma equação (15), página 11, para L_{AL} em quilo joules por quilograma (kJ.kg^{-1}) e T_{eq} em graus Celsius ($^{\circ}\text{C}$).

2.4.3.3.9. Temperatura final da camada delgada

Realizando o balanço de energia, conforme item 2.4.3.3.7 página 84, verifica-se a existência de duas incógnitas - T_f e T_{semf} . Contudo, de acordo com o exposto a página (76) a resposta térmica da semente é rápida o que permite considerar $T_f = T_{gf}$.

Explicitando a expressão resultante em relação à T_f , se obtém:

$$T_f = \frac{(1,0069 + 1,5529 \cdot RM)T_{eq} - \Delta RM(2.512,131 + \Delta L - c_{H_2O} \cdot T_{eq}) + c_{sem} \cdot T_{eq} \cdot R_T}{1,0069 + 1,5529 \cdot RM_f + c_{sem} \cdot R_T} \quad (209)$$

A temperatura T_f é a temperatura final da semente e do ar para a camada delgada considerada.

Desta forma o ponto de estado 3, FIGURA 9, é determinado. O percurso 2 → 3 representa o efeito do resfriamento evaporativo que acompanha a secagem da semente.

2.4.3.3.10. Verificação da existência do ponto de inconsistência do ar

Após a realização de cada balanço de calor ser efetuado é necessário verificar se o ponto determinado pela temperatura e pela razão de mistura do ar é factível (consistente), ou seja, se este não excede 100% de umidade relativa do ar. Este ponto encontra-se representado na FIGURA 9 pelo ponto de estado 4. Caso isto ocorra é necessário determinar um novo ponto de estado, localizado sobre a linha de saturação (100% de umidade relativa) - representado na FIGURA 9 pelo ponto de estado 5. Desta forma, a equação (209) deve ser satisfeita para dois novos valores de $T_f \rightarrow T_f'$ e $RM_f \rightarrow RM_f'$ para uma umidade relativa de 100%. Para isto é necessária a utilização de um algoritmo que determine os valores de T_f' e H_f' .

2.4.3.3.11. Secagem da camada espessa

O modelo de *THOMPSON* pode ser utilizado para simular a secagem estacionária. A umidade evaporada é carregada pelo ar fazendo com que sua temperatura decresça enquanto absorve a umidade retirada do produto.

Para o caso de secagem em camada espessa consideramos uma série de camadas delgadas sobrepostas (FIGURA 5). A secagem é simulada através do cálculo das variações do ar e umidade que ocorrem quando este passa de uma camada para outra. Cada camada é simulada para um intervalo de tempo Δt . As características do ar de saída de uma determinada camada são as características do ar de entrada na camada subsequente e assim de forma sucessiva. A simulação se procede, desta forma, para cada camada da massa total a ser secada. Uma vez que todas as camadas tenham sido processadas, o processo deve ser repetido para um segundo, terceiro intervalo de tempo e assim sucessivamente até que o grau de umidade médio final desejado seja alcançado.

O ar de secagem da primeira camada depende das condições do ar atmosférico que, impulsionado pelo ventilador, tem suas características psicrométricas modificadas pela existência ou não de uma fonte de aquecimento.

2.4.3.3.12. Versatilidade do modelo

Este modelo pode ser utilizado para a simulação de secagem de outros produtos, tais como: soja, trigo, arroz e sorgo. Para que isto seja possível é necessário um conjunto apropriado de equações que descrevam as propriedades físicas da semente a ser simulada.

2.5. Resistência exercida pela semente à passagem do ar

O ar é o meio mais utilizado na secagem e na conservação de sementes. Para sementes de soja é recomendável que a colheita seja realizada quando, pela primeira vez, o grau de umidade se encontra abaixo de 18% base úmida (PESKE *et al.*, 2003). Devido a isto um adequado dimensionamento de sistemas de secagem e aeração necessita de dados confiáveis em relação à resistência à passagem de ar pela massa de sementes a ser beneficiada. Esta resistência é caracterizada pela variação de pressão ao longo da massa e depende de vários fatores. A redução de pressão pode ser considerada linear ao longo da camada para um mesmo fluxo de ar (FIGURA 10) para as espessuras de camadas usualmente utilizadas na secagem e conservação de sementes e pode ser expressa em função de uma série de variáveis (BERN, 1985), conforme mostra a equação (210).

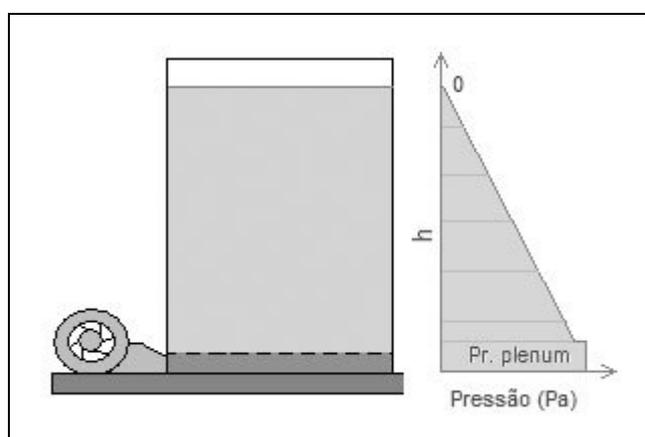


FIGURA 10 - Variação de pressão.

$$\frac{\Delta P}{h} = f(v, \rho_a, \mu'_a, \varepsilon_{sem}, D, d_{sem}, \varphi_{sem}, \tau, \chi) \quad (210)$$

Sendo:

ΔP – Variação de pressão (Pa);

h – Altura ou espessura da camada (m);

v – Velocidade aparente ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$);

ρ_a – Massa específica do ar ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$);

μ'_a – Viscosidade ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$);

ε_{sem} – Porosidade (adimensional);

D – Diâmetro da célula (m)

d_{sem} – Diâmetro equivalente da partícula do meio poroso (m);

φ_{sem} – Fator de forma (adimensional);

τ – Fator de rugosidade (adimensional);

χ – Fator de orientação granular (adimensional).

Os valores das variáveis φ_{sem} , τ e χ são suficientemente pequenas e podem ser negligenciadas. Para a maior parte das sementes de grandes culturas $D > 16d$, o efeito da parede da célula pode ser desprezado e a variável D desconsiderada.

De forma geral a perda de carga de um fluido ao passar por um meio poroso é dada pela equação de *FORCHHEIMER*:

$$\frac{\Delta P}{h} = \frac{1}{K_1} \mu' v + \frac{1}{K_2} \rho v^2 \quad (211)$$

Sendo:

K_1 – Coeficiente *darcyniano* de permeabilidade (m^2);

K_2 – Coeficiente de permeabilidade não *darcyniano* (m);

μ' – viscosidade do fluido ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$);

v – Velocidade aparente do fluido ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$);

ρ – Massa específica do fluido ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$).

Os coeficientes K_1 e K_2 são parâmetros referentes à permeabilidade que obedecem ou não a Lei de *DARCY*, respectivamente. Estes parâmetros incorporam

as propriedades estruturais do meio e são função apenas das características do material poroso.

ERGUN (1952 apud *BENNET & MYERS, 1978*) definiu um número de *Reynolds* e um fator de atrito sem constantes numéricas, fornecidos pelas expressões (212) e (213):

$$R_{e_{sem}} = \frac{d_{sem} v \rho_a}{\mu'_a (1 - \varepsilon)} \quad (212)$$

$$f_{sem} = \frac{d_{sem} \Delta P \varepsilon^3}{h \rho_a v^2 (1 - \varepsilon)^2} \quad (213)$$

Sendo:

$R_{e_{sem}}$ – número de *Reynolds* (adimensional);

f_{sem} – fator de atrito (adimensional).

Para escoamento laminar $R_{e_{sem}} < 1,0$ e por analogia ao escoamento em diversos outros sistemas, relaciona-se o fator de atrito a uma constante dividida por $R_{e_{sem}}$.

$$f_{sem} = \frac{C_1}{R_{e_{sem}}} \quad (214)$$

Resultados de experimentos *BENNET & MYERS (1978)* mostram que o valor de C_1 é igual a 150 e, portanto:

$$f_{sem} = \frac{150}{R_{e_{sem}}} \quad (215)$$

OU:

$$\frac{d_{sem}^2 \rho_a \Delta P \varepsilon^3}{\mu_a h v (1 - \varepsilon)^2} = 150 \quad (216)$$

A equação (216) é denominada de *KOZENY-CARMAN*. Esta equação está de acordo com a lei de *DARCY*, pois prevê, para um dado leito e fluido, que a vazão é diretamente proporcional à redução de pressão - vide primeira parcela do segundo membro da equação (211).

Para o caso de um escoamento completamente turbulento se pode admitir que o fator de atrito - f_{sem} - se aproxima de um valor constante e que todos os leitos com enchimento poroso possuem a mesma rugosidade relativa - segunda parcela do segundo membro da equação (211) - ou seja:

$$f_{sem} = \left(\frac{7}{4}\right) \frac{d_{sem} \Delta P \varepsilon^3}{h v^2 (1 - \varepsilon)} \quad (217)$$

A equação (217) é conhecida como equação de *BURKE-PLUMMER*.

Para escoamento com números de *Reynolds* intermediários, *ERGUN* propôs a seguinte equação geral:

$$f_{sem} = \frac{150}{R_{e_{sem}}} + \frac{7}{4} \quad (218)$$

Ou, substituindo-se (212) e (213) na (218):

$$\frac{\Delta P}{h} = 150 \frac{\mu_a v (1 - \varepsilon)^2}{d_{sem}^2 \varepsilon^3} + \frac{7}{4} \frac{\rho_a v^2 (1 - \varepsilon)}{d_{sem} \varepsilon^3} \quad (219)$$

A equação (219) pode ser aplicada para qualquer material granular como meio poroso e para qualquer fluido. Contudo, para uma maior precisão se deve recorrer, para o caso de sementes, a equações empíricas.

A equação geral de perda de carga em relação ao fluxo de ar para sementes é dada por:

$$v = a \left(\frac{\Delta P}{h} \right)^b \quad (220)$$

As constantes a e b são estabelecidas para cada espécie em particular. A equação (220), em geral, é apresentada na forma gráfica utilizando-se escalas logarítmicas para os eixos das abscissas e das ordenadas. De acordo com *SHEDD (1953)*, a equação (220) somente é adequada para uma pequena gama de valores de fluxo de ar devido a pouca linearidade das curvas obtidas ao serem plotadas num gráfico de escala logarítmica, pois há a necessidade da determinação de diferentes valores das constantes a e b .

HUKILL E SHEDD (1955 apud BROOKER et al., 1992), estabeleceram uma equação empírica que leva em consideração a natureza não linear da resistência imposta ao

fluxo de ar e que relaciona a perda de carga por unidade de espessura do leito (ou altura da camada) com a velocidade do ar (fluido), com a porosidade e o diâmetro equivalente, ou seja:

$$\frac{\Delta P}{h} = f(v, \varepsilon, d_{sem}) \quad (221)$$

Obtendo, desta forma, a equação:

$$\frac{\Delta P}{h} = \frac{\gamma_0 v^2}{\ln(1 + \gamma_1 v)} \quad (222)$$

Sendo v uma velocidade aparente expressa pelo fluxo de ar por unidade de área da seção transversal da célula.

A velocidade - v - pode ser expressa, também, em função da perda de carga unitária - $\Delta P/h$ - pela equação (BROOKER *et al.*, 1992):

$$v = \exp\left(A + B \ln\left(\frac{\Delta P}{h}\right) + C \left(\ln\left(\frac{\Delta P}{h}\right)^2 \right) \right) \quad (223)$$

A equação (222) é aplicável para uma ampla gama de fluxos de ar usando-se as mesmas constantes - γ_0 e γ_1 . A TABELA 11 apresenta os coeficientes para algumas espécies de sementes.

TABELA 11 – Constantes para a fórmula (222)

SEMENTE	γ_0	γ_1
MILHO	$2,07 \times 10^4$	30,4
ARROZ	$2,57 \times 10^4$	13,2
SOJA	$1,02 \times 10^4$	16,0
TRIGO	$2,70 \times 10^4$	8,77

Fonte: ASAE D272.3 (1999)

A TABELA 12 apresenta os coeficientes para a equação (223).

TABELA 12 – Constantes para a fórmula (223)

SEMENTE	A	B	C
MILHO	-6,55	1,01	$-3,25 \times 10^{-2}$
ARROZ	-7,68	1,10	$-2,79 \times 10^{-2}$
SOJA	-6,53	1,07	$-3,45 \times 10^{-2}$
TRIGO	-8,05	1,06	$-1,84 \times 10^{-2}$

FONTE: BROOKER et al., 1992

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Modelagem computacional

Na elaboração do *software* de simulação foi utilizado o modelo de THOMPSON (1968) – item 2.4.3, com equação de equilíbrio higroscópico (EEH) de HENDERSON MODIFICADA - equação (43), item 2.2.2.5 - com coeficientes constantes na TABELA 3 e os resultados comparados com os obtidos experimentalmente. As propriedades psicrométricas do ar foram determinadas a partir expressões constantes na ASAE D271.2.

Os dados experimentais obtidos foram processados e representados graficamente no “*Microsoft Excel 2003*”, com a utilização de “*macros*” em “*Visual Basic for Applications*” para funções especiais e procedimentos iterativos.

As determinações algébricas e cálculos para a plotagem dos gráficos foram executados através do “*software*” de computação algébrica “*Maple IX*”.

A linguagem de programação utilizada no desenvolvimento do *software* de simulação foi o “*Visual Basic 6.0 – Professional Edition*” para ambiente “*Windows XP*” com banco de dados “*Microsoft Access 2003*”.

3.1.1. Parâmetros externos

Na determinação das propriedades psicrométricas do ar foram utilizadas as equações:

- Pressão parcial de vapor saturado – equação (8);
- Pressão parcial de vapor – equação (10);
- Volume específico – equações (11) e (12);
- Razão de mistura – equação (14);
- Calor latente de vaporização na saturação – equação (15);
- Pressão atmosférica e altitude – equações (34) e (35);
- Para a determinação da temperatura de bulbo úmido e ponto de inconsistência da equação de balanço de energia do modelo de *THOMPSON* foi utilizado o método iterativo da bissecção (*CONTE, 1977; RUGGIERO & LOPES, 1988 e GOMES, 1999*).

3.1.2. Parâmetros internos

Na determinação dos parâmetros internos foram utilizadas as equações:

- Grau de umidade em base úmida – equação (36);
- Grau de umidade em base seca – equação (39);
- Conversão entre bases de umidade – equação (40);
- Calor específico da semente – equações (52) e (53);
- Calor latente de vaporização da água da semente – equação (60).

Para a massa específica foram estabelecidas novas relações entre as variáveis.

3.2. Secagem

3.2.1. Caracterização da célula de secagem

Foi utilizada uma célula de secagem (FOTOGRAFIA 1) em chapas de aço corrugadas e aparafusadas, com diâmetro de 1,85m e altura de 1,75m. Esta célula foi dotada de um fundo de chapa de aço perfurado instalado a uma altura do *plenum* de 0,25m (FIGURA 11). Foi utilizado um ventilador centrífugo tipo *Limited Load* acoplado diretamente ao eixo de um motor de 1,5hp (IV pólos – 1720 rpm) com rotor de 400mm de diâmetro e curva característica conhecida.

Para a identificação dos pontos de medição na célula de secagem, foi adotada a seguinte convenção:

- Para as medidas referentes à secagem, temperatura e grau de umidade, as alturas (cotas) dos pontos foram designadas pelos números (1), (2), (3), (4) e (5);
- Para as medidas referentes à pressão estática, as alturas (cotas) dos pontos foram designadas pelas letras A, B, C, D e F.

Dois conjuntos de orifícios laterais com separação angular de 90°, foram feitos na célula utilizada, distribuídos da seguinte forma: A - no *plenum*, B (85mm) acima do fundo perfurado e os demais eqüidistantes 228mm, verticalmente, nas posições: C (313mm), D (541mm), E (769mm) e F(997mm), conforme FIGURA 11 e FOTOGRAFIA 2.

A célula de secagem foi dotada de fundo falso perfurado para permitir uma distribuição uniforme do ar de secagem. A chapa perfurada utilizada possuía um percentual de área aberta de 7,5% (quociente entre a área dos furos pela área total) e diâmetro de furo utilizado foi de 2,0mm em disposição alternada (FIGURA 12 e FOTOGRAFIA 2).



FOTOGRAFIA 1 - Célula de secagem.

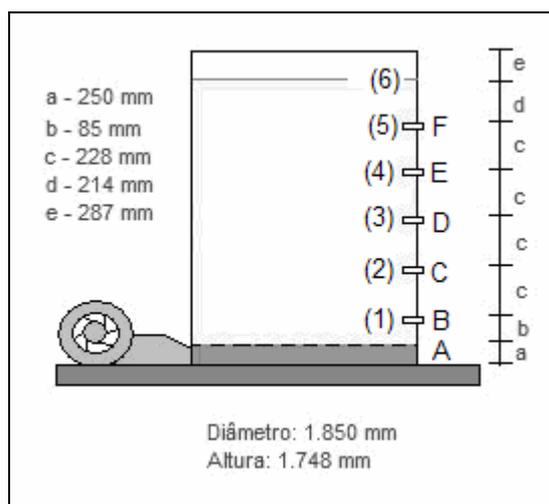


FIGURA 11 - Dimensões da célula de secagem.

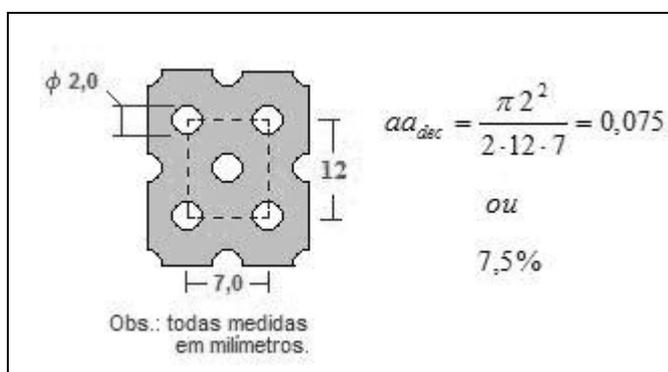
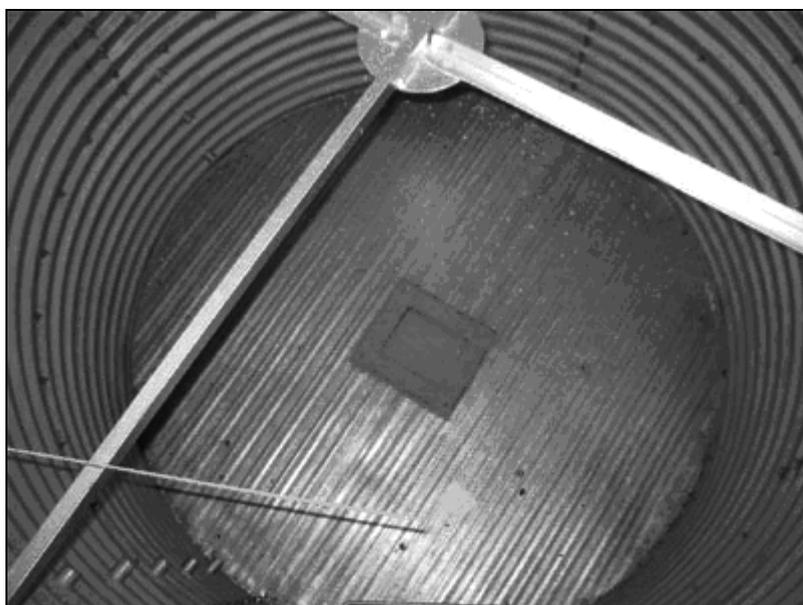


FIGURA 12 - Chapa perfurada.



FOTOGRAFIA 2 - Detalhe do fundo perfurado.

No duto de saída do ventilador foi colocado um conjunto de seis resistências elétricas com o objetivo de aumentar a temperatura do ar de secagem em até 5°C. Para o controle de temperatura foi acoplado em série ao inversor de frequência, um termostato digital controlado por um sensor de temperatura PT – 100, localizado no *plenum*.

O sistema foi dotado de um inversor de frequência marca WEG, modelo CFW – 08, programável, *software* versão 3.9X – 0899.4689 P/6, com *display* de sete segmentos com quatro dígitos, saída de frequência de 0 a 300Hz com resolução de 0,01Hz, regulação de velocidade de 1% da velocidade nominal (modo V/F – escalar) e 0,5% da velocidade nominal (modo vetorial *sensorless*) - FOTOGRAFIA 3.



FOTOGRAFIA 3 – Inversor.

3.2.2. Instrumentos de medição

A determinação dos graus de umidade das sementes foi realizada com um determinador de umidade Universal e em estufa de ventilação forçada marca *BIOPAR*, na qual se utilizou o método oficial de acordo com *BRASIL (1992)*. Na medição de umidade relativa do ar foram utilizados dois instrumentos: um higrômetro e um psicrômetro. O higrômetro utilizado foi da marca *TFA*, de fabricação alemã, com intervalo de medição de 10% a 99% de umidade relativa e o psicrômetro de

marca *INCOTERM*, escala dos termômetros de bulbo úmido e bulbo seco de -10°C a 50°C, divisão de escala de 1°C.

3.2.3. Máquina de ar e peneiras

A máquina de ar e peneiras utilizada foi da marca *KEPLER WEBER*, modelo LC 160, com quatro peneiras, duas colunas de ar e capacidade nominal de 15t.h⁻¹, com a seguinte seqüência de peneiras: 1^a peneira – furo redondo de 9,0mm de diâmetro; 2^a peneira – furo redondo de 5,0mm de diâmetro; 3^a peneira – furo redondo de 8,0mm de diâmetro e 4^a peneira – furo oblongo de 4,0 x 19mm.

3.2.4. Metodologia

A secagem foi realizada na Unidade de Beneficiamento de Sementes do Departamento de Fitotecnia da Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel da Universidade Federal de Pelotas, RS.

Depois da passagem das sementes de soja, cultivar *Monsoy 7575*, pela máquina de ar e peneiras, a célula de secagem foi carregada com elevador de canecas. Foram secadas três lotes de semente com altura de camada de 1,21m até o grau de umidade médio de 12%_{bu} e, a cada hora, durante o processo de secagem, foram efetuadas medidas de temperatura e umidade relativa do ar ambiente, temperatura e umidade relativa do ar do *plenum*, velocidade do ar na entrada no ventilador, pressões estática e dinâmica no *plenum* (posição A) e pressão estática nas posições B, C, D, E e F, e grau de umidade da semente nas posições (1), (2), (3), (4), (5) e (6), FIGURA 11 e FIGURA 13.

A temperatura da semente foi medida numa amostra, de aproximadamente 100g, retirada da massa e colocada numa caixa de isopor depois de três minutos para que o equilíbrio térmico entre a semente e termômetro fosse alcançado. As amostras de diferentes pontos, para uma mesma altura, foram misturadas com o objetivo que a medida efetuada representasse as médias evitando-se, desta forma, a ocorrência de viés para sementes localizadas mais próximas ou mais afastadas da entrada do ar.

O fluxo de ar para a secagem dos três lotes foi de $0,43\text{m}^3.\text{s}^{-1}.\text{m}^{-3}$ ($35,64\text{m}^3.\text{min}^{-1}.\text{t}^{-1}$).

3.3. Vazão e pressão

A determinação da vazão foi efetuada através da medida da velocidade do ar no duto de alimentação e confrontada com a velocidade determinada pela equação (224), *RESNIK & HALLIDAY(1974)*, com o objetivo de evitar, desta forma, efeitos decorrentes do regime de escoamento do fluido (ar): laminar, turbilhonar ou variar entre os dois regimes.

$$V_{az} = A_d \sqrt{\frac{2 g \rho'}{\rho}} \quad (224)$$

Sendo:

V_{az} – Vazão de ar ($\text{m}^3.\text{s}^{-1}$);

A_d – Área do duto (m^2);

ρ - Massa específica do ar ($\text{kg}.\text{m}^{-3}$);

ρ' - Massa específica do líquido manométrico – água ($\text{kg}.\text{m}^{-3}$);

g - aceleração da gravidade ($\text{m}.\text{s}^{-2}$).

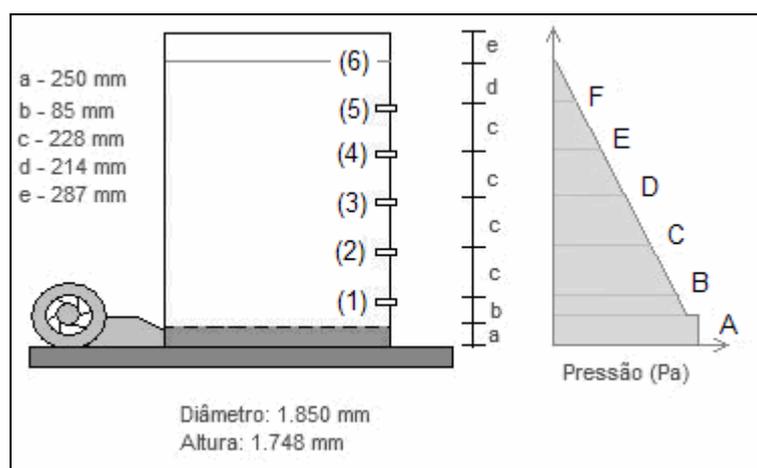


FIGURA 13 – Pontos de medição.

Para a avaliação da pressão estática, a rotação do motor foi ajustada em 20, 25, 30, 40, 50 e 60Hz, para que diferentes fluxos de ar correspondentes a 573, 717,

860, 1147, 1433 e 1720rpm fossem testados, respectivamente. As medições de pressão foram realizadas utilizando-se o manômetro digital e o manômetro de tubo em “U” e os resultados comparados. A vazão foi determinada através da média das medições em diferentes pontos da seção transversal do duto de entrada com anemômetro e o resultado conferido com a pressão dinâmica medida. Os resultados do fluxo de ar, pressão estática e pressão dinâmica foram plotados sobre a curva do ventilador para as diferentes rotações e confirmação dos valores medidos.

3.3.1. Instrumentos de medição

Para a medição da pressão foram utilizados: manômetro digital marca *DWYER INSTRUMENTS* (fabricação norte-americana) que permite medidas de 0 a 4,97kPa, manômetro de tubo “U” e tubo de *Pitot* n° 18. Para a vazão foi utilizado anemômetro digital marca *TFA* (fabricação alemã) com faixa de medição de 0,2m.s⁻¹ a 30m.s⁻¹.

3.3.2. Procedimento estatístico

Os parâmetros γ_0 e γ_1 da equação (222) de *SHEDD* foram obtidos por regressão não linear utilizando-se o método de *Gauss-Newton* (Procura numérica direta – *Direct numerical search*) e quadrados mínimos (*GALLANT, 1975*). Na inferência dos parâmetros da regressão não linear foi adotado o teorema assintótico e a variância estabelecida pela equação:

$$s^2(g) = \frac{\sum_{i=1}^n [Y_i - f(X_i, g)]^2}{n - p} (D'D)^{-1} \quad (225)$$

Os intervalos de confiança para os parâmetros estabelecido por:

$$\frac{g_k - \gamma_k}{s(g_k)} \sim t(n - p) \quad k = 0, 1, 2, \dots, p - 1 \quad (226)$$

e:

$$g_k \pm t(1 - \alpha/2; n - p) s(g_k) \quad (227)$$

Sendo: $t(1-\alpha/2; n-p)$ é o $(1-\alpha/2)100$ percentil da distribuição t com $(n-p)$ graus de liberdade.

Os resultados obtidos através de regressão foram plotados em um gráfico juntamente com os resultados obtidos experimentalmente para avaliação visual do ajuste do modelo utilizado.

Na determinação dos parâmetros A , B e C da equação (223) foi utilizada a regressão não linear por anamorfose (SPIEGEL, 1972 e CORRÊA DA SILVA 1999).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Secagem experimental

4.1.1. Umidade final da semente

A TABELA 13 apresenta os graus de umidade ao concluir a secagem dos três lotes de sementes, para cada posição em função do tempo, obtidos pelo método da estufa. A variação do grau de umidade entre as posições no topo e na base da camada de sementes foi de 0,7 pontos percentuais para o lote 1 e de 1,4 pontos percentuais para os lotes 2 e 3.

TABELA 13 – Médias de graus de umidade (%bu) determinados pelo método da estufa

PONTOS	LOTE 1	LOTE 2	LOTE 3
	1	2	3
(1)	12,7	12,2	12,4
(2)	12,9	12,4	12,6
(3)	13,1	12,9	13,2
(4)	13,1	13,2	13,6
(5)	13,1	13,4	13,8
(6)	13,4	13,5	13,7

4.1.2. Variações de temperatura

As TABELA 14, TABELA 15 e TABELA 16 apresentam as variações de temperatura da massa de sementes em relação ao tempo para cada um dos lotes. Observou-se que a resposta térmica foi rápida se comparada com a redução do grau de umidade da semente, o que está de acordo com *BROOKER et al., 1992*. A temperatura média do ar ambiente foi de 12,3°C, 18,3°C e 22,8°C para um incremento na temperatura do ar de secagem, promovido pela fonte de aquecimento (resistências elétricas), de 4,3°C; 2,5°C e 1,7°C, respectivamente. A umidade relativa média do ar ambiente foi de 84,8%, 75,2% e 72,5% para os lotes 1, 2 e 3, respectivamente, o que mostra que a fonte de calor produziu maior aquecimento para temperaturas mais baixas. Este fato pode ser atribuído a maior razão de mistura do ar utilizado na secagem do lote 3 relativamente a do lote 1.

Com o incremento de temperatura promovido pela fonte de aquecimento, a umidade relativa do ar de secagem foi reduzida, em média, para 64,5% (lote 1), 64,5% (lote 2) e 65,6% (lote 3) o que conduziu a um ponto de equilíbrio (equação 44) de 11,4%, 11,2% e 11,3% (base úmida), respectivamente, evidenciando que a umidade relativa do ar situou-se muito próxima do limite superior (40 – 70%), recomendado na secagem estacionária, de acordo com *VILLELA & PESKE (2003)*.

Os tempos de secagem e temperatura média do ar foram de 7,3h e 16,5°C, para o lote 1; 7,0h e 20,8°C, para o lote 2 e 7,0h e 24,5°C, para o lote 3, respectivamente, o que mostra que a temperatura do ar de secagem foi fator determinante nos resultados obtidos, pois, para os três lotes, a variação média da temperatura de 2,8°C determinou uma redução na umidade relativa do ar de secagem de 13,5 pontos percentuais (TABELA 17, TABELA 18 e TABELA 19).

As temperaturas de todos os pontos de medição acompanharam a variação da temperatura do ar de secagem, apresentando uma defasagem devido à inércia térmica. Contudo, para o lote 1, as curvas de temperatura para os diferentes pontos de medição apresentaram tendência decrescente com variação oscilando entre 0,7 a 2,0°C, enquanto que para os lotes 2 e 3 a tendência foi crescente com variação de 1,2 a 2,0 e 0,2 a 3,0°C, respectivamente. Para os intervalos de variação foram desconsiderados os primeiros períodos por serem o início do processo e o ponto 6 por sofrer alterações da camada de ar acima da superfície da semente. É

importante, ainda, salientar que o lote 3, embora tenha alcançado o grau de umidade médio desejado, teve a secagem interrompida devido à falta de energia elétrica, fazendo com que a temperatura do ar ambiente e do ar de secagem (*plenum*) medida fosse à mesma (TABELA 16).

TABELA 14 – Temperaturas das camadas de sementes do lote 1

HORA	TEMPERATURA DO AR (°C)			TEMP. DA MASSA DE SEMENTES (°C)					
	AMB. (°C)	PLENUM (°C)	SAÍDA SEM.	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
16:20	14,0	18,4	14,5	14,5	14,5	14,5	14,5	14,5	14,5
17:20	14,3	18,5	14,6	18,0	17,0	16,3	16,0	16,0	16,0
18:20	13,0	17,3	14,7	17,0	16,0	15,5	15,5	15,2	15,2
19:20	11,6	15,8	13,9	16,0	15,3	15,2	14,8	14,0	14,8
21:00	10,7	15,2	13,5	14,8	14,8	14,8	14,7	14,1	14,1
23:40	10,1	14,0	12,6	13,9	13,9	13,5	13,0	13,0	13,5
média:	12,28	16,53							

TABELA 15 – Temperaturas do lote 2

HORA	TEMPERATURA DO AR (°C)			TEMP. DA MASSA DE SEMENTES (°C)					
	AMB. (°C)	PLENUM (°C)	SAÍDA SEM.	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
9:30	14,8	15,8		13,8	15,2	15,0	15,5	15,3	13,8
11:07	17,2	18,4	16,2	18,3	17,8	17,8	17,6	17,1	18,0
13:12	19,6	22,9	18,8	22,0	21,0	20,2	20,2	20,0	19,9
15:00	20,5	24,2	19,5	22,8	22,3	21,5	20,8	20,8	20,8
16:30	19,4	22,6		22,8	22,7	21,8	21,3	20,8	20,8
média:	18,3	20,8							

TABELA 16 - Temperatura do lote 3

HORA	TEMPERATURA DO AR (°C)			TEMP. DA MASSA DE SEMENTES (°C)					
	AMB. (°C)	PLENUM (°C)	SAÍDA SEM.	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
10:20	17,7	20,4	17,7	16,3	16,3	16,6	16,7	16,7	17,3
11:40	21,2	23,4	19,5	21,7	20,9	21,2	20,6	21,5	21,4
13:40	24,0	24,4	21,9	24,4	23,9	23,8	23,7	23,5	23,2
14:35	25,7	27,9	23,1	26,8	26,2	25,4	24,9	24,8	24,8
16:00	25,6	28,1	22,8	27,8	26,5	25,5	24,8	24,8	24,2
17:15	22,7	22,7	22,9	24,8	24,8	24,3	23,8	23,5	24,2
média	22,8	24,5							

A temperatura do primeiro ponto de medição, localizado próximo do *plenum*, 0,085m acima da chapa perfurada, foi muito próxima à temperatura do ar de secagem, tendo sido alcançada já nos primeiros minutos de secagem para os três lotes. Observou-se, ainda, que as temperaturas tendem a se igualar no final do processo. Isto, contudo, não ocorre devido, provavelmente, às variações de temperatura do ar ambiente e da capacidade do ventilador de efetuar a reposição da massa de ar para a altura da camada utilizada.

Há de se considerar que, caso a fonte de calor utilizada (resistências elétricas) possuísse maior potência, o tempo de secagem seria menor, pois a umidade relativa mínima do ar de secagem foi 51,1% (para 24,2°C) e a temperatura máxima foi de 27,8°C (para umidade relativa de 58,7%) ambas aquém dos limites de 36,7°C (MIRANDA, 1978) e 40 - 70% de umidade relativa do ar de secagem (VILLELA & PESKE, 2003).

TABELA 17 - Dados relativos ao lote 1

HORA	Ps _{ArAmb.}	Ps _{ArAq.}	Pv	RM	UR _{ArAq.}	M _{eq}	M _{eq}
	Pa	Pa	Pa	10 ⁻³ .kg.kg ⁻¹	%	dec b.s.	% b.u.
16:20	1598	2115	1246	7,750	58,9	11,3	10,2
17:20	1629	2128	1270	7,904	59,7	11,5	10,3
18:20	1497	1973	1197	7,444	60,7	11,8	10,5
19:20	1365	1794	1188	7,383	66,2	13,5	11,9
21:00	1286	1726	1170	7,273	67,8	14,0	12,3
23:40	1236	1598	1174	7,295	73,5	16,1	13,8
média	1428	1880	1212	7,532	64,5	12,9	11,4

TABELA 18 – Dados relativos ao lote 2

HORA	Ps _{ArAmb.}	Ps _{ArAq.}	Pv	RM	UR _{ArAq.}	M _{eq}	M _{eq}
	Pa	Pa	Pa	10 ⁻³ .kg.kg ⁻¹	%	dec b.s.	% b.u.
9:30	1682	1794	1480	9,229	82,5	19,9	16,6
11:07	1961	2115	1471	9,167	69,5	14,3	12,5
13:12	2279	2790	1573	9,812	56,4	10,4	9,4
15:00	24010	3017	1542	9,619	51,1	9,2	8,4
16:30	2251	2740	1801	11,262	65,7	12,9	11,4
média	2102	2452	1580	9,861	64,5	12,6	11,2

TABELA 19 – Dados relativos ao lote 3

HORA	Ps _{ArAmb.}	Ps _{ArAq.}	Pv	RM	UR _{ArAq.}	M _{eq}	M _{eq}
	Pa	Pa	Pa	10 ⁻³ .kg.kg ⁻¹	%	dec b.s.	% b.u.
10:20	2024	2395	1720	10,749	71,8	15,0	13,0
11:40	2516	2876	1887	11,809	65,6	12,8	11,3
13:40	2981	3054	2027	12,708	66,4	12,9	11,5
14:35	3300	3755	2244	14,094	59,8	11,0	9,9
16:00	3280	3799	2230	14,009	58,7	10,7	9,7
17:20	2757	2757	1957	12,259	71,0	14,5	12,7
média	2776	3069	2013	12,614	65,6	12,7	11,3

4.1.3. Curvas de secagem

As curvas de secagem (FIGURAS 17 a 19), para o Ponto 1 (0,085 m), caracterizam o período de taxa decrescente (HALL, 1980), apresentando tendência de comportamento logarítmico. As curvas obtidas para os demais pontos apresentam, aparentemente, discordância da curva típica de secagem. Contudo, isto pode ser explicado pela altura da camada submetida à secagem, pelas características psicrométricas do ar de secagem e pela pequena diferença entre os teores inicial e final de umidade da semente. A hipótese é que as curvas obtidas para estes pontos representem segmentos intermediários da curva típica (NEVES, 2001).

Confrontando as curvas de secagem com as respectivas curvas de temperatura verifica-se que, para os três lotes, as concavidades são inversas, indicando que a temperatura ao alcançar valores mais altos, as curvas de cota mais baixa apresentam a forma esperada para o período de taxa decrescente – curva logarítmica. Ocorre, ainda, um incremento na velocidade de secagem e uma maior estratificação em relação aos graus de umidade alcançados em cada nível. A curva de secagem média tem tendência linear, pois as camadas mais afastadas do ar de entrada têm este comportamento, o que não ocorre para as camadas mais próximas ao *plenum*.

Na primeira hora de secagem do lote 1, pôde se observar que houve um incremento de 4,2°C na temperatura do ar de secagem, de 14,3°C para 18,5°C (TABELA 14), o que fez com que a umidade relativa do ar ambiente diminuísse de 78% para 59,7% (TABELA 20 e FIGURA 14) e a umidade de equilíbrio higroscópico da semente situar-se em 10,2% bu – pressão parcial de vapor de 1.246 Pa (TABELA 17). Houve, ainda, na primeira hora, certa estratificação dos diferentes pontos (níveis) onde foram coletadas as amostras, tanto de temperatura como do grau de umidade. Contudo, isto não ocorreu para os demais períodos de secagem do lote 1.

Deve, ainda, ser mencionado que nos períodos de secagem correspondentes às 21h e 23h40min, o grau de umidade de equilíbrio higroscópico da semente com o ar de secagem (umidade relativa de 67,8% e 73,5% e temperatura de 15,2°C e 14,2°C) foi de 12,3%bu e 13,9%bu, respectivamente, ou seja, acima do grau de umidade final desejado. Neste ponto, a secagem foi interrompida, pois o grau de umidade final médio havia sido alcançado. A partir da umidade relativa do ar ambiente de 91% e temperatura de 10,7°C (21h e 23h40min), a fonte de aquecimento do sistema não teve a capacidade necessária para modificar as características psicrométricas do ar. Este fato evidencia que, apesar da recomendação ser de um incremento de temperatura do ar de secagem em relação à temperatura ambiente, em camada fixa, da ordem de 5 a 10°C (PESKE & BAUDET, 1984; SILVA, 2000; GUIMARÃES & BAUDET, 2001), é necessário que o sistema de aquecimento seja projetado com margem de segurança para que possa responder, quando as propriedades psicrométricas do ar forem desfavoráveis para a secagem com ar ambiente.

O lote 1 foi secado com a temperatura mais alta (18,0°C) no início do processo e a temperatura mais baixa (13,9°C) no final, o que representa uma variação de 4,1°C. Isto fez com que o ponto de nível mais baixo, situado a 0,085m do *plenum*, alcançasse grau de umidade de 11,6% bu e o mais alto, imediatamente abaixo da superfície da camada de sementes, atingisse 12,4% bu, ou seja, uma diferença de 0,8 pontos percentuais. A redução no grau de umidade foi de 0,11 pontos percentuais por hora. Esta “velocidade de secagem” pode ser considerada baixa segundo BRANDENBURG *et al.* (1961), que recomendam a remoção de 0,3 pontos percentuais por hora para um fluxo de ar de 5,5m³.min⁻¹.t⁻¹ e temperatura de 43°C.

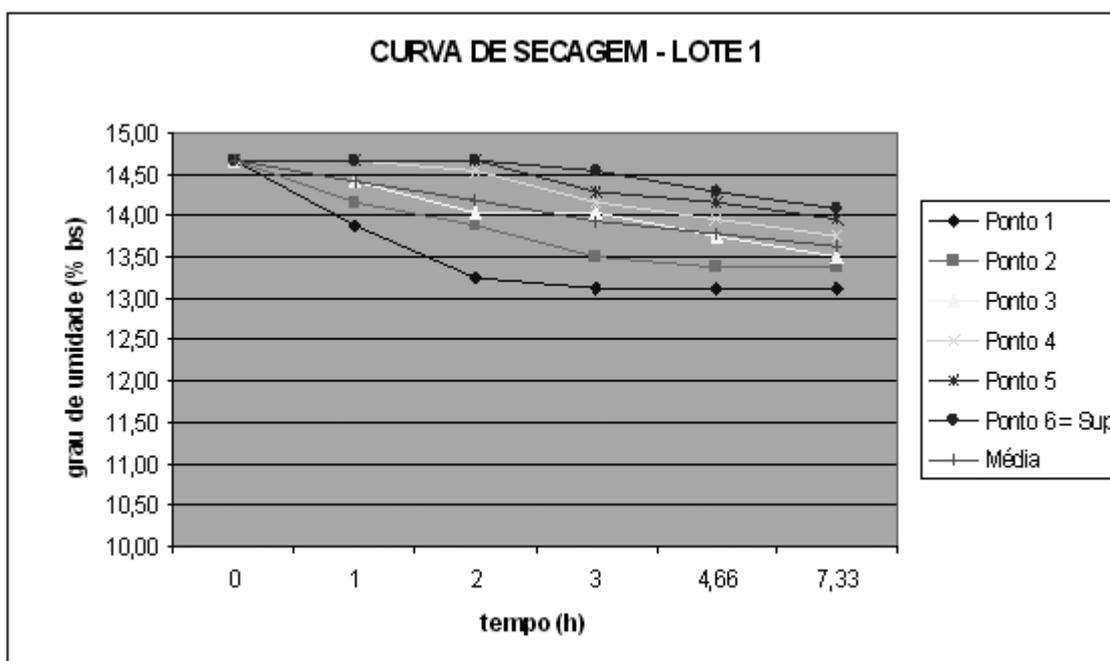


FIGURA 14 - Curva de secagem do lote 1.

TABELA 21 - UR e grau de umidade do lote 2

HORA	UMID. REL.		GRAU DE UMIDADE (% BASE ÚMIDA)						
	AR AMB.	AR DE SAÍDA	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	MÉDIA
9:30	88,0	84,0	12,8	12,8	12,8	12,8	12,9	12,9	12,8
11:07	75,0	81,0	12,6	12,6	12,7	12,7	12,8	12,9	12,7
13:12	69,0	81,0	11,6	12,2	12,6	12,6	12,8	12,8	12,4
15:00	64,0	81,0	11,0	11,6	12,3	12,5	12,8	12,8	12,1
16:30	80,0	83,0	10,6	11,4	11,9	12,5	12,7	12,8	12,0
MÉDIA	75,2	82,0							

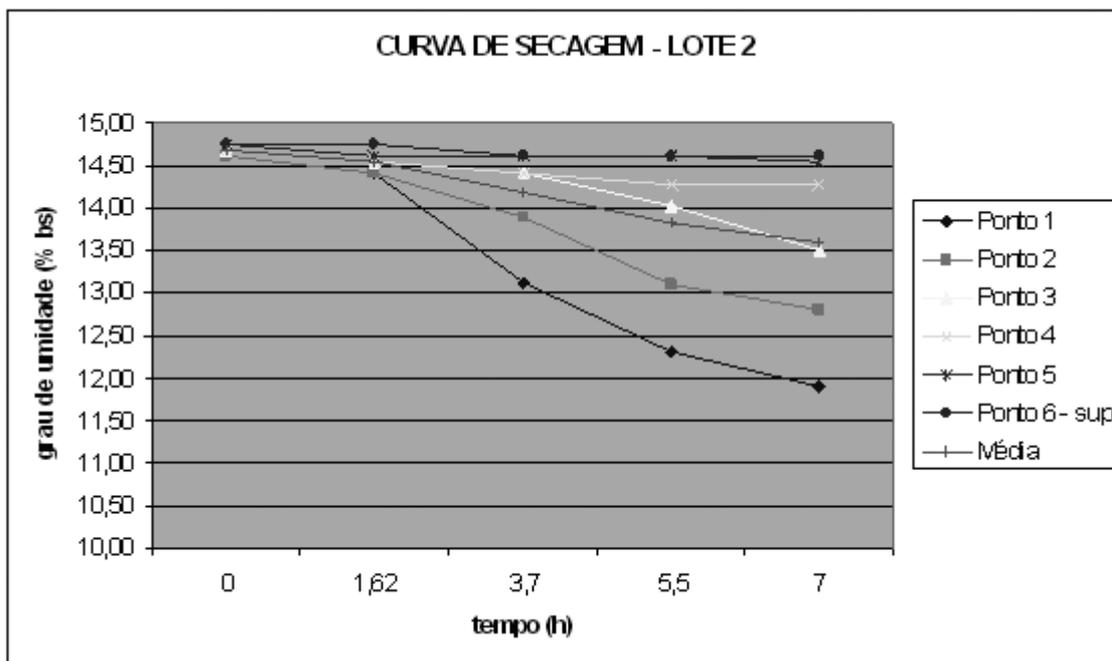


FIGURA 15 - Curva de secagem lote 2.

TABELA 22 - UR e grau de umidade do lote 3

HORA	UMID. REL.		GRAU DE UMIDADE (% BASE ÚMIDA)						
	AR AMB.	AR DE SAÍDA	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	MÉDIA
10:20	85,0		12,8	12,8	12,8	12,8	12,8	12,9	12,8
11:40	75,0	81,0	12,7	12,8	12,8	12,8	12,8	12,9	12,8
13:40	68,0	81,0	11,8	12,6	12,7	12,8	12,8	12,9	12,6
14:35	68,0	78,0	10,6	12,3	12,6	12,8	12,8	12,9	12,3
16:00	68,0	80,0	10,6	11,7	12,2	12,7	12,8	12,9	12,2
17:15	71,0	75,0	10,6	11,5	11,9	12,4	12,7	12,9	12,0
MÉDIA	72,5	79,0							

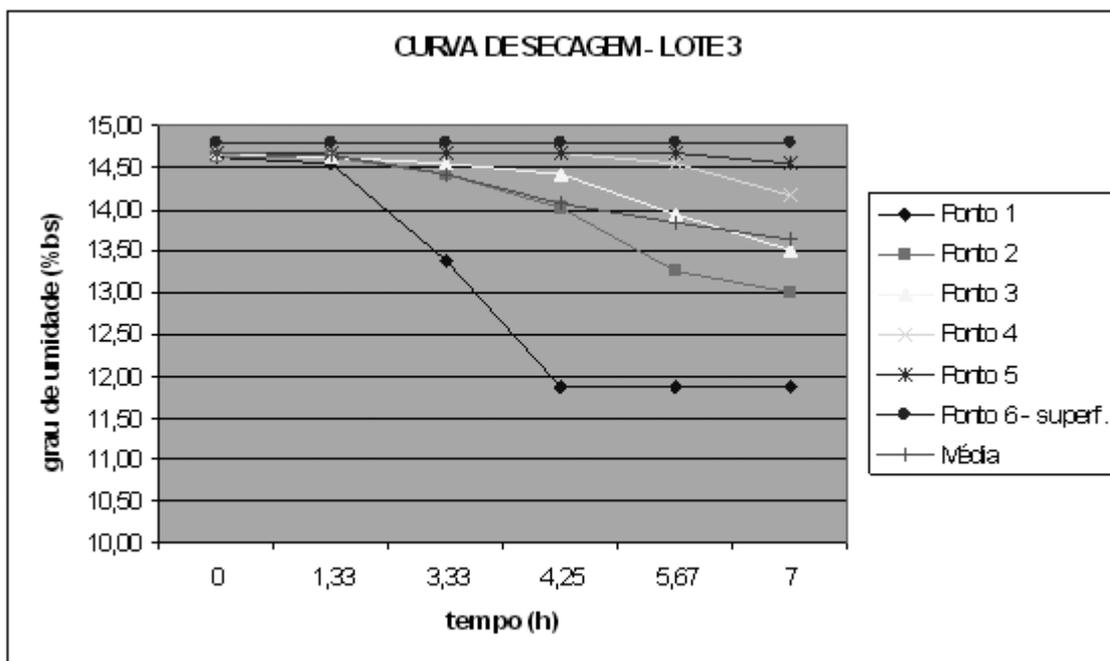


FIGURA 16 - Curva de secagem do lote 3.

4.2. Modelagem computacional

Para a modelagem computacional, foi desenvolvido um programa de computador para ambiente *MS - Windows*, denominado de “*SeeDry*”, que permitisse a simulação da secagem de sementes em camada fixa. O programa permite a simulação da secagem de sementes de soja, milho, arroz e trigo.

4.2.1. Descrição e telas do programa *SeeDry*

A tela principal do *SeeDry* é apresentada na FIGURA 17.

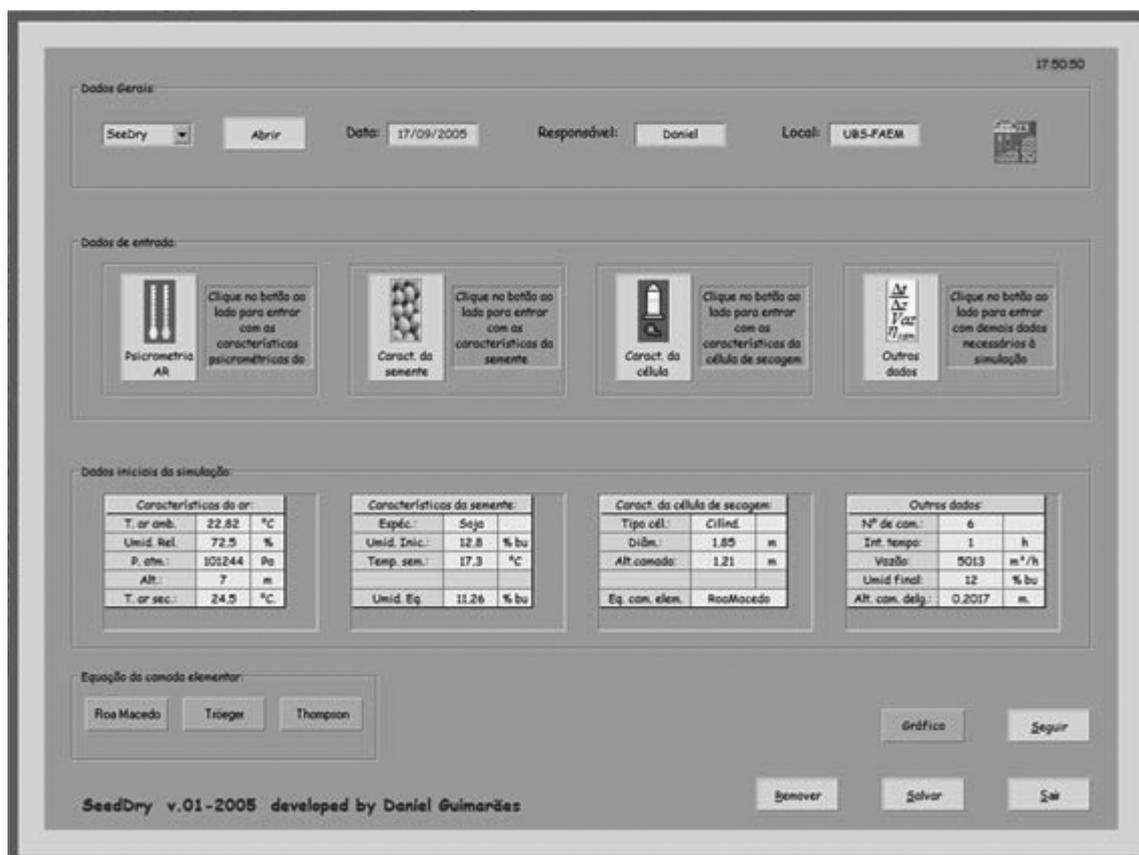


FIGURA 17 - Tela principal do *SeeDry*.

O usuário pode optar pela utilização de uma das três equações de camada delgada disponíveis: *ROA & MACEDO* (equação 97); *TROEGER & HUKILL* (equações 113, 114 e 115, respectivamente) e *THOMPSON et al.* (equação 92).

Basicamente, os dados de partida necessários para a simulação no *SeeDry* são:

- Características psicrométricas do ar (FIGURA 18):
 - Temperatura do ar ambiente (°C);
 - Umidade relativa do ar ambiente (%);
 - Pressão atmosférica (Pa);
 - Altitude do local (m);
 - Temperatura do ar de secagem (°C).

PSICROMETRIA - AR DE SECAGEM

Características do ar ambiente:

Temperatura	22.82	°C
Umidade Relativa	72.5	%
Pressão Atmosférica	101243	Pa.
Altitude	7	m.
Temperatura ar	24.5	°C.

Características psicrométricas do ar ambiente:

Pressão parcial de vapor do ar saturado	2776.62	Pa.
Pressão parcial de vapor do ar ambiente	2013.05	Pa.
Volume específico do ar ambiente	0.85628926	m³ de
Razão de mistura do ar	0.01261625	kg de vapor/kg
Entalpia do ar	55.12	KJ/kg de ar seco ou 13.17
Temperatura bulbo úmido	19.27	°C.
Temperatura ponto de orvalho	17.6	°C.

Características psicrométricas do ar de secagem:

Pressão parcial de vapor do ar saturado	3072.06	Pa.
Pressão parcial de vapor do ar de secagem	2013.05	
Volume específico do ar aquecido	0.86115	m³ de
Razão de mistura do ar	0.01262	kg de vapor/kg de ar
Entalpia do ar	56.84	KJ/kg de ar seco ou 13.58
Temperatura bulbo úmido	19.79	°C.
Temperatura ponto de orvalho	17.6	°C.
Umidade relativa do ar aquecido	65.53	%.

Fechar

FIGURA 18 - Tela "Psicrometria - Ar de secagem".

Depois de informadas as características iniciais, o programa calcula e atualiza as demais características psicrométricas derivadas, tais como: pressão parcial de vapor da saturado, pressão parcial de vapor, razão de mistura, volume específico, entalpia, temperatura bulbo úmido e temperatura ponto de orvalho para o ar ambiente e o ar aquecido (ar de secagem).

As características psicrométricas do ar dependem da pressão atmosférica do local onde é efetuada a secagem, por isso, o *SeeDry* a partir da pressão ou da altitude do local informada, corrige as demais características psicrométricas utilizando a fórmula barométrica (item 2.2.1.9).

- Características da semente (FIGURA 19):
 - Espécie;
 - Umidade inicial (% base úmida);
 - Temperatura (°C).

Características da semente:

Semente

Umidade inicial % BU

Temp. inicial °C.

Escolha a espécie:

Soja Arroz

Milho Trigo

FIGURA 19 - Tela "Características - Semente".

- Características da célula de secagem (FIGURA 20):
 - Tipo de célula (cilíndrica ou prismática);
 - Dimensões (m);
 - Altura da camada de sementes (m).

Nesta tela devem ser informadas as características geométricas da célula de secagem. O *SeeDry* prevê dois tipos de seção transversal da célula de secagem: circular (cilíndrica) e poligonal (prismática). Deve, ainda, ser informada a altura total da camada a ser secada.

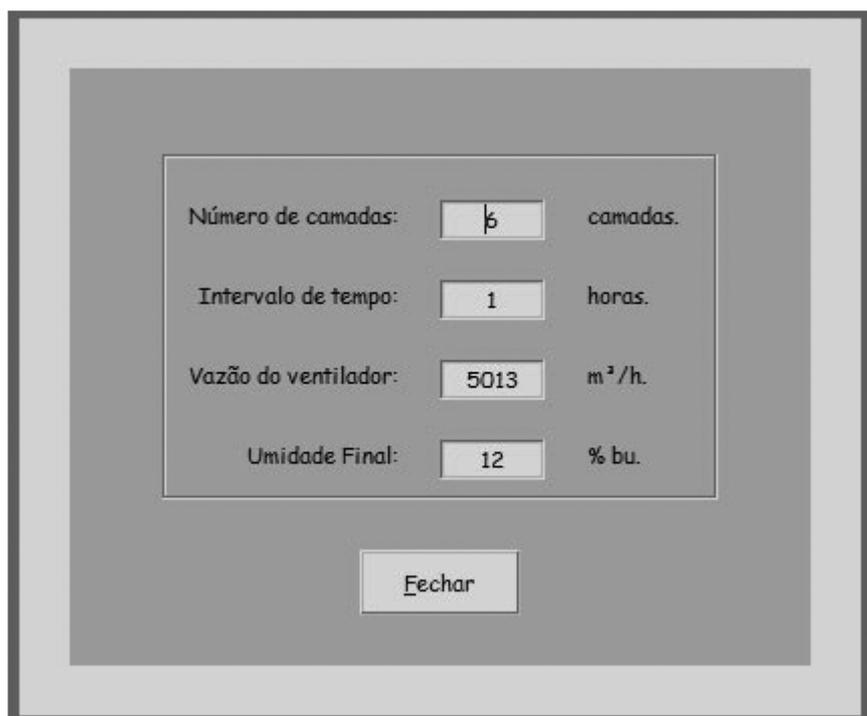
The image shows a software window titled "Características da célula de secagem". It contains three main sections:

- A selection area with two radio buttons: "Célula cilíndrica" and "Célula prismática".
- A section for dimensions with three input fields: "Diâmetro:" with the value "1,85" and unit "m"; "Largura:" with an empty field and unit "m"; and "Comprimento:" with an empty field and unit "m".
- A section for "Alt. camada:" with the value "1,21" and unit "m".
- A "Fechar" button at the bottom.

FIGURA 20 - Tela "Características da célula de secagem".

- Outros dados:

- Número de camadas;
- Intervalo de tempo de simulação (h);
- Vazão do ventilador (m^3/h);
- Umidade final (% base úmida).



Número de camadas:	<input type="text" value="6"/>	camadas.
Intervalo de tempo:	<input type="text" value="1"/>	horas.
Vazão do ventilador:	<input type="text" value="5013"/>	m ³ /h.
Umidade Final:	<input type="text" value="12"/>	% bu.

FIGURA 21 - Tela "Outros dados".

Nesta tela devem ser informados: o número de camadas a ser simulada (discretização da camada espessa - Δx), o intervalo de tempo a ser utilizado na simulação (discretização do intervalo de tempo - Δt), vazão do ventilador e grau de umidade final desejada da semente.

Na FIGURA 22 é apresentada tela com os resultados da simulação constando para cada camada e para cada período a massa específica da semente, a temperatura inicial da semente, a pressão parcial de vapor do ar, o volume específico do ar, o valor da constante R - equação (197), calor específico da semente, a razão de umidade inicial, a temperatura de equilíbrio inicial, umidade relativa de equilíbrio inicial, grau de umidade de equilíbrio inicial da semente, razão de umidade final, calor de latente de vaporização adicional para a semente, razão de mistura final do ar, temperatura final, tempo e grau de umidade médio da camada espessa (base úmida percentual).

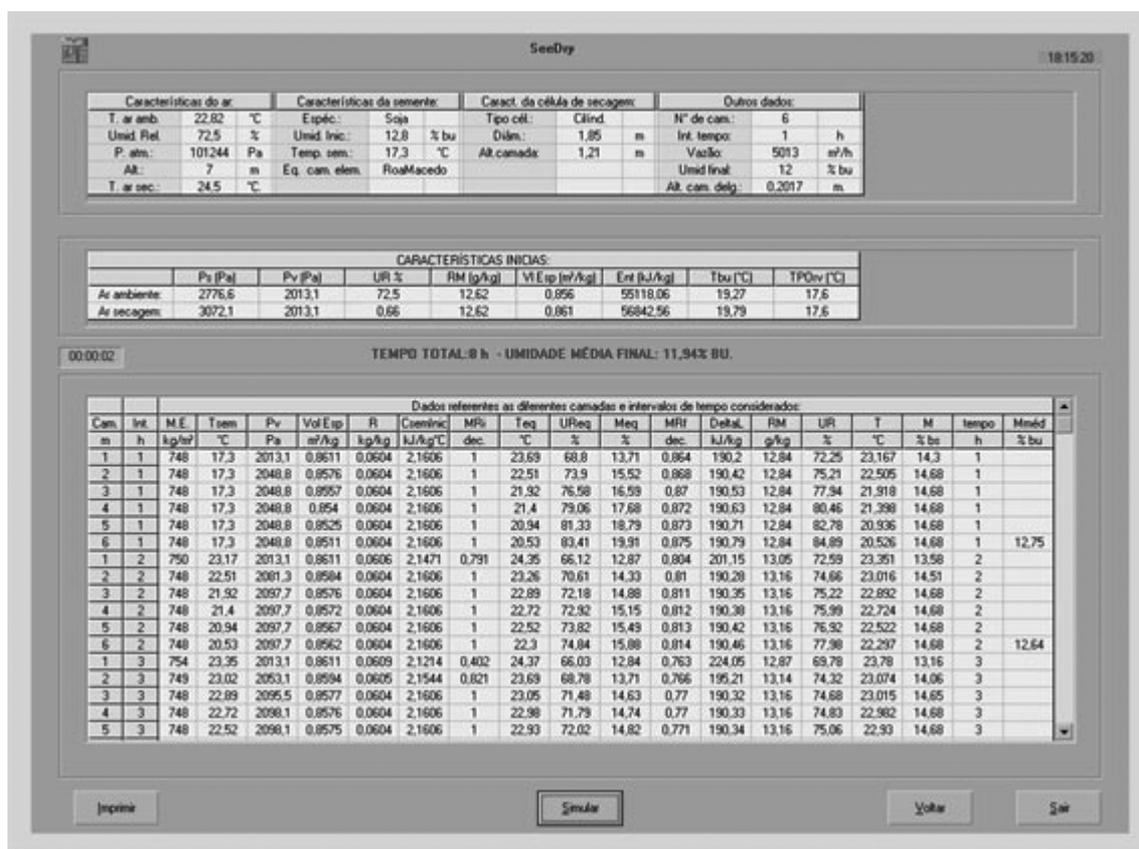


FIGURA 22 - Tela de resultados da simulação.

4.2.2. Procedimento de discretização

No desenvolvimento do programa foi considerado que a fonte de aquecimento encontra-se depois do ventilador, ou seja, o ventilador insufla o ar ambiente.

No processo de discretização do modelo utilizado foi seguido o esquema apresentado na FIGURA 23.

O processo é simulado de forma iterativa até ser alcançado o grau de umidade final estipulado inicialmente.

O principal objetivo da simulação pelo *SeeDry* é a determinação do tempo de secagem.

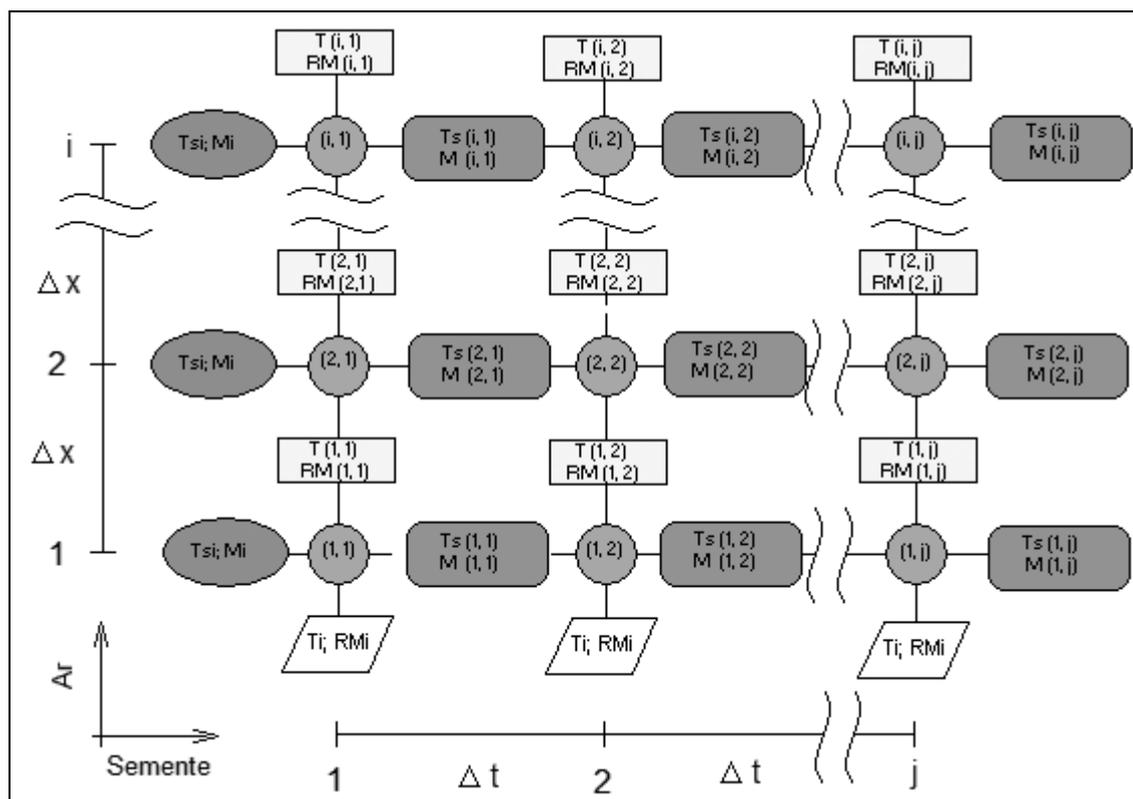


FIGURA 23 - Diagrama de discretização do modelo.

O número de camadas (i) é fixado no início do processo de simulação pela informação da altura da camada e do número de camadas desejado. Para cada etapa, considerando a “direção vertical” (FIGURA 23), as condições do ar vão se modificando enquanto que para cada etapa, na “direção horizontal” (FIGURA 23), a temperatura e o grau de umidade das sementes é que são alterados. As condições iniciais estão representadas na FIGURA 23 por paralelogramos para o ar de secagem e elipses para a semente; os círculos indicam a etapa onde ocorrem as transferências de energia e massa; os retângulos indicam as características finais do ar depois da i -ésima camada e iniciais para a i -ésima+1 camada. De forma análoga, os retângulos com borda arredondada representam as condições finais da semente para a j -ésima camada e iniciais para a j -ésima+1 camada.

4.2.3. Variação da massa específica

No processo de simulação a massa específica da semente foi considerada variável em função do grau de umidade da semente. Desta forma, conforme o processo de secagem avança, a massa específica da semente vai se alterando.

As seguintes expressões para a massa específica da semente foram utilizadas no *SeeDry* :

Para sementes de soja:

$$\gamma_{sem} = -7,69231 M_{bu} + 846,4615 \quad (228)$$

Para sementes de milho:

$$\gamma_{sem} = -0,16047 M_{bu}^2 - 0,5446 M_{bu} + 767,2773 \quad (229)$$

Para sementes de arroz:

$$\gamma_{sem} = 0,5006 M_{bu}^2 - 9,8113 M_{bu} + 630,7284 \quad (230)$$

Para sementes de trigo:

$$\gamma_{sem} = -0,5867 M_{bu}^2 + 7,9515 M_{bu} + 765,5686 \quad (231)$$

Sendo:

γ_{sem} – massa específica (kg.m⁻³);

M_{bu} – grau de umidade da semente (% base úmida).

A equação (228) foi estabelecida por regressão linear a partir de dados obtidos por *ROSSI & ROA (1980)*.

As equações (229), (230) e (231) foram estabelecidas por regressão polinomial a partir de dados obtidos por *BROOKER et al.(1973)*.

4.2.4. Comparativo entre as curvas de secagem obtidas por simulação e experimentalmente

Ao compararem-se as curvas obtidas na simulação através do *SeeDry*, utilizando a equação de camada delgada de *ROA & MACEDO (1976)* (equação 95) com coeficientes para o processo dinâmico e as obtidas experimentalmente, verifica-se a existência de uma diferença significativa para os graus de umidade nos períodos intermediários de secagem (FIGURA 24, FIGURA 25 e FIGURA 26). Isto se deve, possivelmente, a utilização de valores médios para as variáveis de entrada no modelo matemático (temperatura e umidade relativa do ar de secagem). Contudo, a principal incógnita a ser determinada é o tempo final. Não sendo os valores intermediários, para finalidades práticas, de grande importância, uma vez que não se podem antever as condições psicrométricas do ar de secagem. O tempo de secagem, por sua vez, é de fundamental importância, pois é a partir dele que os custos desta operação poderão ser estimados e, principalmente, efetuado o adequado dimensionamento dos equipamentos. Desta forma, evita-se que o processo seja longo a ponto de fazer com que as camadas mais distantes do ar de entrada sejam comprometidas pelo retardamento de secagem e/ou que as camadas mais próximas venham a sofrer secagem excessiva.

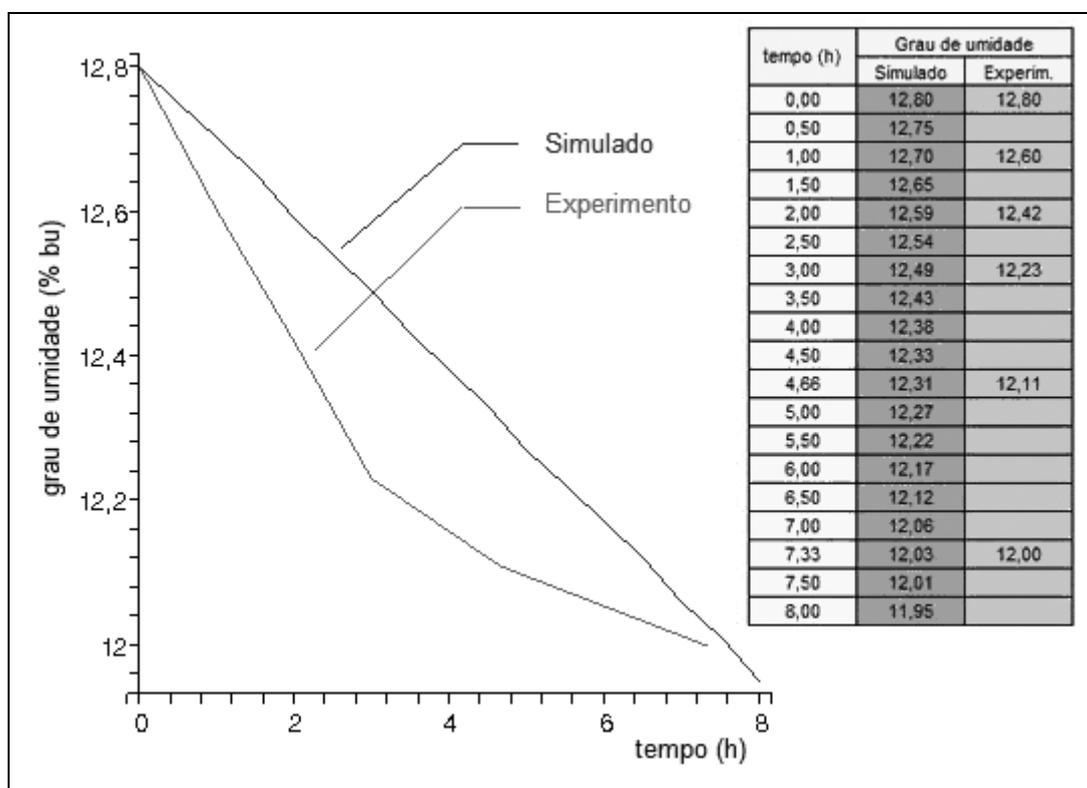


FIGURA 24 - Comparativo entre as curvas experimental e simulada - lote 1.

Na secagem do lote 1, verifica-se que o grau de umidade obtido na simulação, quando comparado com o obtido experimentalmente, apresentou maior diferença entre a terceira e quarta hora de secagem. Observando a sexta coluna da TABELA 17, verifica-se que este período coincide com a ocorrência de mais alta umidade relativa do ar de secagem.

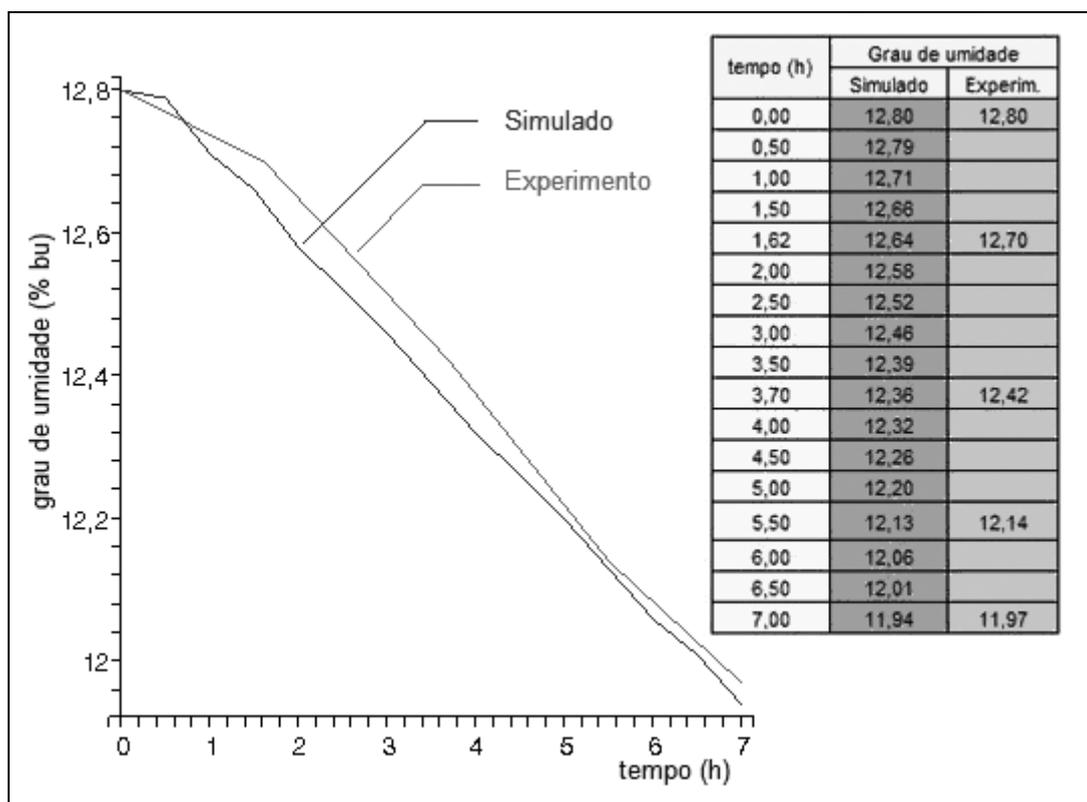


FIGURA 25 - Comparativo entre curvas experimental e simulada – lote 2.

Através da simulação se obteve um tempo de 8 horas para que o grau de umidade médio alcançasse a 12,0%bu enquanto que experimentalmente foram gastas 07h20min para atingir o mesmo grau de umidade médio. O intervalo de tempo utilizado na simulação foi de 0,5h e o processo foi dado por finalizado quando o grau de umidade médio foi igual ou inferior ao estipulado inicialmente (grau de umidade final desejado para a semente). A tabela constante da FIGURA 24 mostra que, para o tempo de 7,3h (7h20min) de secagem, o grau de umidade alcançado pela simulação foi de 12,0%bu e pelo experimento de 12,0%bu, não havendo diferença.

Os resultados obtidos para o lote 2 diferem consideravelmente dos obtidos para o lote 1. O resultado da simulação aproximou-se muito do obtido experimentalmente.

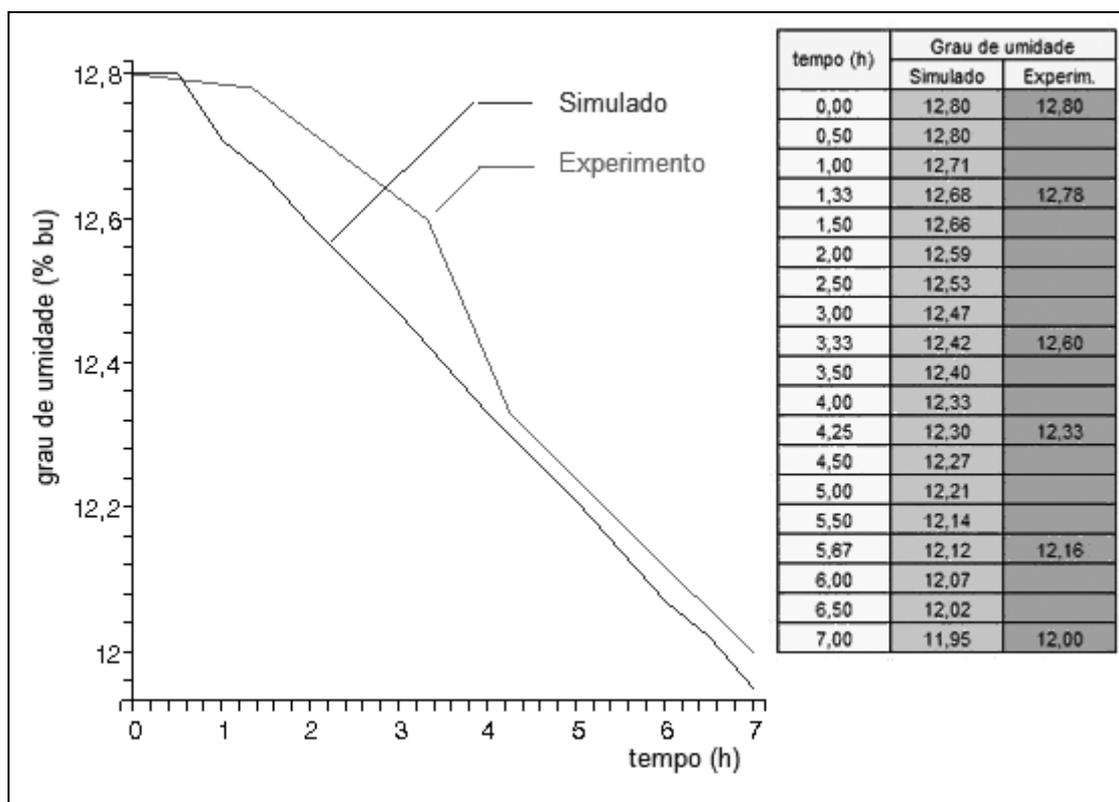


FIGURA 26 - Comparativo entre curvas experimental e simulada – lote 3.

O lote 3 apresentou valores intermediários, mas mais próximos do lote 2.

A razão para os lotes 2 e 3 apresentarem resultados simulados mais próximos dos experimentais pode estar na temperatura do ar de secagem mais alta. Para o lote 1 a temperatura média foi de 16,53°C, com um desvio padrão igual a 1,67 e umidade relativa média do ar de secagem de 64,47%, com desvio padrão igual a 5,22; para o lote 2 a temperatura média do ar de secagem foi de 20,78°C, com desvio padrão igual a 4,02 e umidade relativa média do ar de secagem de 65,05%, com desvio padrão igual a 10,92; para o lote 3 a temperatura média do ar de secagem foi de 24,48°C, com desvio padrão de 2,76 e a umidade relativa média do ar de secagem de 65,55%, com desvio padrão de 5,00. Verifica-se que a dispersão dos dados em torno da média não teve influência sobre as diferenças apresentadas entre os resultados experimentais e os simulados enquanto que as temperaturas médias de secagem dos lotes 2 e 3 foram sensivelmente maiores que a do lote 1.

4.3. Pressão Estática

As medidas das pressões estáticas para as diferentes alturas da camada de semente mostraram que, para as espessuras de camadas testadas, a variação é linear (FIGURA 13 e TABELA 23), o que está de acordo com *BERN (1984)* e *BAKKER et al. (1992)*.

TABELA 23 – Variação da pressão estática em relação à espessura da camada

		Δh	h	MEDIDA	AJUSTADA	MEDIDA	AJUSTADA
		mm	mm	mm de CA		Pascal	
(1)	Plenum	250	0	51,05	51,05	517,30	517,30
	Perd.plen.			6,53	44,52	66,18	451,13
(2)	P1	85	335	41,40	41,40	419,51	419,47
(3)	P2	228	563	33,02	33,02	334,58	334,53
(4)	P3	228	791	24,64	24,63	249,64	249,60
(5)	P4	228	1019	16,26	16,25	164,71	164,67
(6)	P5	228	1247	7,87	7,87	79,78	79,74
(7)	Superf.	214	1461	0,00	0,00	0,00	0,00
(8)	$h_{sem.}$	1.211					
(9)	(10)-(8)-(1)	287					
(10)	h_{Total}	1.748					

As vazões estabelecidas, pressões estática e dinâmica e as velocidades obtidas através das medições efetuadas com o anemômetro, manômetro e tubo de *Pitot*, ao serem plotados na curva do ventilador utilizado, comprovaram as medições efetuadas (TABELA 24 e FIGURA 27).

TABELA 24 - Vazões, fluxos de ar e pressões medidos

Na curva caract.	FREQ.	ROTA- ÇÕES	VELOC. ANEMÔMETRO		PRESSÃO DINÂMICA		VAZÃO		VELOC. APAR		PRESSÃO ESTÁTICA	
	Hz	rpm	km.h ⁻¹	m.s ⁻¹	Pa	m.s ⁻¹	m ³ .min ⁻¹	m ³ .h ⁻¹	m ³ .min ⁻¹ .m ⁻²	m ³ .s ⁻¹ .m ⁻²	Pa	Pa.m ⁻¹
(1)	20	573	11,00	3,06	5,88	3,13	23,04	1.382	8,57	0,143	69,74	58,12
(2)	25	717	14,50	4,03	9,81	4,04	30,37	1.822	11,30	0,188	104,61	87,18
(3)	30	860	18,42	5,12	15,73	5,12	38,58	2.315	14,35	0,239	149,44	124,54
(4)	40	1147	25,70	7,14	31,38	7,23	53,83	3.230	20,02	0,334	249,07	207,56
(5)	50	1433	33,24	9,23	51,97	9,30	69,62	4.177	25,90	0,432	373,61	311,34
(6)	60	1720	39,89	11,08	74,53	11,14	83,55	5.013	31,08	0,518	500,64	417,20
IV Pólos; D _{cél} = 1,85 m; D _{duto} = 0,40 m; A _{st} = 2,69 m ² ; A _{stduto} = 0,13 m ² ; A _{st} = 2,69												

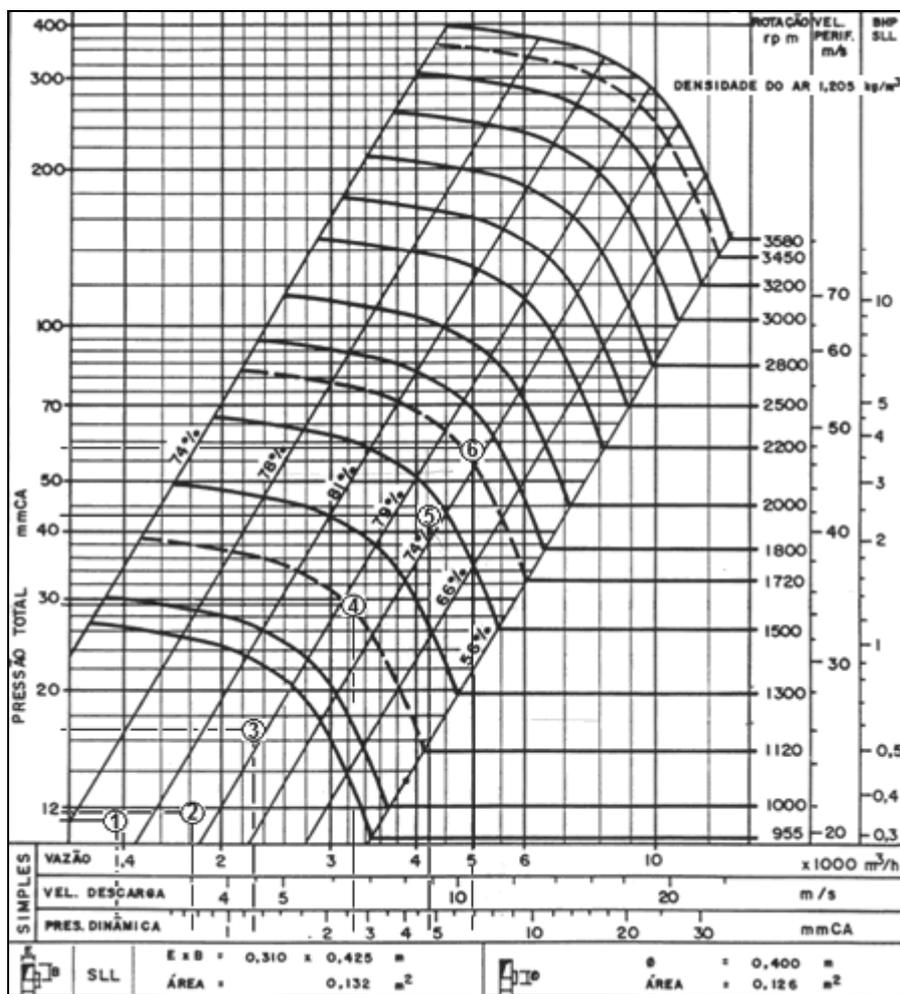


FIGURA 27 - Curva característica SLL – 400.

Comparando-se os dados obtidos experimentalmente com os dados obtidos através da equação de *SHEDD* e *ASAE D272.3 (1999) – SHEDD*, verifica-se a existência de uma relação de, aproximadamente, três para a perda de pressão (TABELA 25) e de, aproximadamente, dois para o fluxo de ar - velocidade aparente (TABELA 26). Resultados semelhantes foram obtidos quando comparados com os coeficientes estabelecidos por *ROA & VILLA (1980) – TABELA 27*. Os resultados obtidos coadunam com os encontrados para o sorgo por *GUNASEKARAN & JACKSON (1987)*.

TABELA 25 – Comparativo pressões estáticas, ASAE D272.3

FLUXO DE AR	ΔPe		A/B
	A	B	
$m^3.s^{-1}.m^{-2}$	EXPER ^{TO} Pa.m ⁻¹	<i>SHEDD</i> Pa.m ⁻¹	
0,143	60,05	174,97	0,34
0,188	90,08	260,28	0,35
0,239	128,68	370,72	0,35
0,334	214,47	615,15	0,35
0,432	321,71	919,15	0,35
0,518	431,09	1228,05	0,35

TABELA 26 – Comparativo entre os fluxos de ar

ΔPe	FLUXO DE AR		C/D
	C	D	
Pa.m ⁻¹	EXPER ^{TO} $m^3.s^{-1}.m^{-2}$	<i>SHEDD</i> $m^3.s^{-1}.m^{-2}$	
60,05	0,143	0,065	2,18
90,08	0,188	0,090	2,10
128,68	0,239	0,117	2,05
214,47	0,334	0,169	1,98
321,71	0,432	0,223	1,94
431,09	0,518	0,270	1,92

TABELA 27 – Comparativo pressões estáticas, ROA

ΔP_e			
A1		B1	
FLUXO DE AR	EXPER ^{TO}	ROA	A1/ B1
$m^3.s^{-1}.m^{-2}$	$Pa.m^{-1}$	$Pa.m^{-1}$	
0,143	60,05	188,11	0,32
0,188	90,08	281,36	0,32
0,239	128,68	402,55	0,32
0,334	214,47	671,84	0,32
0,432	321,71	1007,96	0,32
0,518	431,09	1350,31	0,32

BROOKER et al. (1973), citam duas formas de obtenção do fluxo de ar em instalações a campo. Em ambas as formas é utilizada a curva de *SHEDD*. Os resultados deste estudo demonstraram que este tipo de procedimento deve ser utilizado como uma primeira avaliação. Para casos em que o rigor científico se impõe, é necessário que a vazão seja obtida de forma mais precisa e, de preferência, que os resultados possam ser conferidos através de mais de uma forma de medida. No presente trabalho, foi destacada a importância da utilização de um ventilador com curva característica conhecida o que permitiu que os dados obtidos pudessem ser conferidos.

Na curva da FIGURA 27, os pontos 1 e 2, devido à rotação imposta através do variador de frequência, apresentaram vazões e pressões totais baixas não permitindo a verificação de todos os parâmetros através da curva. Contudo, os demais valores conferiram com os obtidos através das medições com anemômetro e manômetro e tubo de *Pitot*.

A FIGURA 28 apresenta os resultados da regressão não linear efetuada para a determinação dos parâmetros γ_0 e γ_1 da equação (222) e intervalos de confiança de 99%. Estes resultados permitem afirmar que o ajuste obtido foi representativo, o que pode ser verificado pela curva da FIGURA 29.

A TABELA 28 mostra os parâmetros obtidos no presente estudo e os valores citados por *ROA E ROSSI (1980)* e *ASAE D272.3 (1999) – SHEDD*. Comparando-se os valores dos parâmetros, verificou-se que os valores de γ_0 apresentaram maior discrepância, enquanto que os valores de γ_1 tiveram menor variação. Possivelmente, estas diferenças possam ser atribuídas à utilização por *HUKILL & SHEDD (1955)* e *ROA & ROSSI (1980)* de coeficientes de segurança, não considerados no presente trabalho. Na equação de *HUKILL & SHEDD (1955)*, o parâmetro γ_0 da equação obtido ($3,74 \times 10^3$) foi significativamente menor que o adotado pela *ASAE D272.3- 1999* ($1,02 \times 10^4$), enquanto que o parâmetro γ_1 obtido (17,9336) apresentou uma discrepância menor (16,002);

TABELA 28 – Valores de γ_0 e γ_1 .

	γ_0	γ_1	γ_0	γ_1
	Pa.s ² .m ⁻³	m ² .s.m ⁻³	mm.min ² .m ⁻³	m ² .min/m ³
<i>PRESENTE ESTUDO</i>	$3,74 \times 10^3$	17,9336	0,1026	0,2988
<i>ROA E ROSSI</i>	$1,18 \times 10^4$	18,108	0,3228	0,3018
<i>ASAE (SHEDD)</i>	$1,02 \times 10^4$	16,002	0,2796	0,2667

Determinação dos coeficientes "a" (γ_0) e "b" (γ_1) de Shedd para a soja

i	X_i	Y_i	$f(X_i \gamma)$	$Y_i - f(x, \gamma)$	SQD	$D_{10}^{(k)}$	$[D_{10}^{(k)}]^2$	$D_{11}^{(k)}$	$[D_{11}^{(k)}]^2$
1	8,57	5,93	5,9367	-0,00999	0,00010	57,84	3345,64	-11,25	126,60
2	11,30	8,89	8,8755	0,01452	0,00021	86,47	7477,89	-15,53	241,05
3	14,35	12,70	12,6912	0,00885	0,00008	123,65	15289,66	-20,68	427,75
4	20,02	21,17	21,1759	-0,00926	0,00009	206,32	42567,72	-31,25	976,29
5	25,90	31,75	31,7612	-0,01116	0,00012	309,45	95760,89	-43,43	1885,88
6	31,08	42,55	42,5363	0,00867	0,00008	414,44	171757,46	-55,14	3040,68
			122,9767	0,00163	0,00067	1198,18	336199,26	-177,27	6698,25

Sistema Internacional

$g_0^{(6)}$ =	0,10264	mm.min ² /m ²	$g_0^{(5)}$ =	3744,4023	Pa.s ² /m ²
$g_1^{(6)}$ =	0,29878	m ² .min/m ²	$g_1^{(5)}$ =	17,9336	m ² .s/m ²

k	SQD ^(k)	$g_0^{(k)}$	$g_1^{(k)}$	$D_{10}^{(k)}$
1	6.177,866	0,20000	0,20000	
2	5,0233504	0,10110	0,263873	6172,84
3	0,0774437	0,10248	0,294325	4,94590667
4	0,0006957	0,10263	0,298708	0,07674802
5	0,0006743	0,10264	0,298781	0,00002138
6	0,0006743	0,102637	0,298781	1,6402E-12

$\Delta =$	1,57E+07
$\Delta(\gamma_0 - g_0^{(6)}) =$	7,1149E-06
$\Delta(\gamma_1 - g_1^{(6)}) =$	5,06119E-05
$\gamma_0 - g_0^{(6)} =$	4,52884E-13
$\gamma_1 - g_1^{(6)} =$	3,22159E-12
$\gamma_0 =$	0,102636597
$\gamma_1 =$	0,298781318

$s\{g_0\} =$	0,00026809
$s\{g_1\} =$	0,00189932
$t(0,995;4) =$	4,6040

$\gamma_{0\ inf} =$	0,10140231
$\gamma_{0\ sup} =$	0,10387088

$\gamma_{1\ inf} =$	0,29003687
$\gamma_{1\ sup} =$	0,30752577

$$f(X_i|\gamma) \cong f(X_i|\gamma^{(0)}) + \sum_{k=0}^{p-1} \left[\frac{\partial f(X_i|\gamma)}{\partial \gamma_k} \right]_{\gamma=\gamma^{(0)}} (\gamma_k - g_k^{(0)}) \dots \text{(a)}$$

$$f(X_i|\gamma) = \frac{\gamma_0 X_i}{\ln(1 + \gamma_1 X_i)} \dots \text{(b)} \quad D_{10}^{(k)} = - \frac{g_0^{(k)} X_i^3}{[\ln(1 + g_1^{(k)} X_i)]^2 (1 + g_1^{(k)})} \dots \text{(c)}$$

$$D_{10}^{(k)} = \frac{X_i^2}{\ln(1 + g_1^{(k)} X_i)} \dots \text{(d)}$$

$\frac{g_k - \gamma_k}{s(g_k)} \sim t(n-p) \quad k=0,1,2,\dots,p-1 \dots \text{(e)}$ $g_k \pm t(1-\alpha/2, n-p) s(g_k) \dots \text{(f)}$

FIGURA 28 - Regressão não linear para a estimativa dos parâmetros γ_0 e γ_1 .

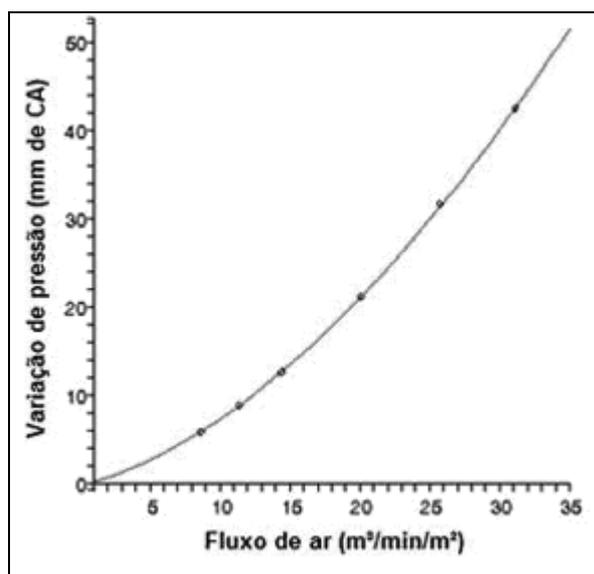


FIGURA 29 - Dados experimentais e ajustados.

Na FIGURA 30, é apresentado gráfico comparativo entre os resultados obtidos no presente trabalho – linha cheia - e os obtidos por *SHEDD (1955)* e adotados na *ASAE D272.3 (1999)* – linha tracejada. Foi utilizada na FIGURA 30 escala logarítmica para o eixo das abscissas e das ordenadas fazendo com que as curvas plotadas se tornassem, aproximadamente, retilíneas.

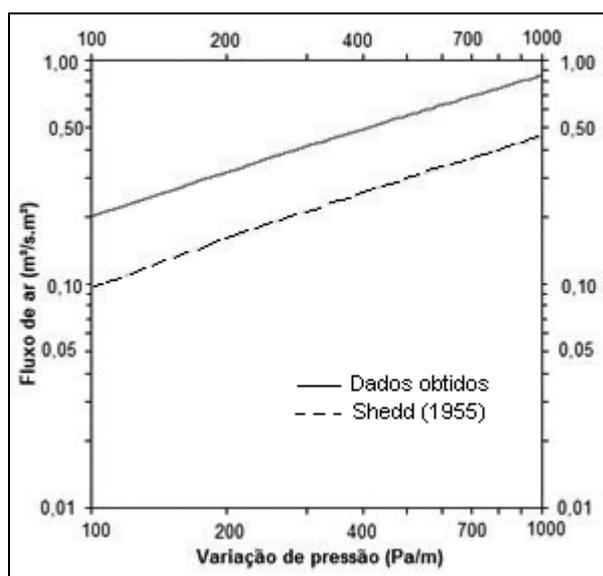


FIGURA 30 - Dados obtidos x *SHEDD (1955)*.

Na FIGURA 31 e TABELA 29, são apresentados os resultados da regressão não linear, obtido por anamorfose, para a determinação dos parâmetros A , B e C da equação (223). O gráfico da FIGURA 30 foi traçado baseado nestes parâmetros.

TABELA 29 - Valores dos parâmetros A , B e C

	A	B	C
<i>PRESENTE ESTUDO</i>	-5,0880	0,8438	$-1,87 \times 10^{-2}$
<i>BAKKER et al.</i>	-6,5300	1,0700	$-3,45 \times 10^{-2}$

	X_{1i}	Y_i	$X_{2i}=X_{1i}^2$	$X_{2i}X_{1i}$	X_2^2	X_1Y	X_2Y		
i	x_1	y_i	$\ln(x_1)$	$\ln(y_1)$	$[\ln(X_i)]^2$	$[\ln(X_i)]^3$	X_1^4	x_1y	X_i4
1	60,05	0,14	4,10	-1,95	16,77	68,68	281,26	-8,0	-32,6
2	90,08	0,19	4,50	-1,67	20,26	91,17	410,31	-7,5	-33,8
3	128,68	0,24	4,86	-1,43	23,59	114,60	556,67	-6,9	-33,7
4	214,47	0,33	5,37	-1,10	28,82	154,70	830,44	-5,9	-31,6
5	321,71	0,43	5,77	-0,84	33,33	192,46	1111,22	-4,9	-28,0
6	431,09	0,52	6,07	-0,66	36,80	223,24	1354,25	-4,0	-24,2
Soma:	1.246,08	1,85	30,66	-7,64	159,57	844,85	4.544,14	-37,16	-184,04
Média:	207,68	0,31							

$$AX=B \quad X=A^{-1}B$$

$$\begin{bmatrix} 6,0000 & 30,6614 & 159,5730 \\ 30,6614 & 159,5730 & 844,8506 \\ 159,5730 & 844,8506 & 4544,1401 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{b}_0 \\ \hat{b}_1 \\ \hat{b}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -7,6415 \\ -37,1642 \\ -184,0433 \end{bmatrix}$$

$$\begin{cases} n \hat{b}_0 + \left(\sum_{i=1}^n x_{1i} \right) \hat{b}_1 + \left(\sum_{i=1}^n x_{2i} \right) \hat{b}_2 = \sum_{i=1}^n y_i \\ \left(\sum_{i=1}^n x_{1i} \right) \hat{b}_0 + \left(\sum_{i=1}^n x_{1i}^2 \right) \hat{b}_1 + \left(\sum_{i=1}^n x_{1i} x_{2i} \right) \hat{b}_2 = \sum_{i=1}^n x_{1i} y_i \\ \left(\sum_{i=1}^n x_{2i} \right) \hat{b}_0 + \left(\sum_{i=1}^n x_{2i} x_{1i} \right) \hat{b}_1 + \left(\sum_{i=1}^n x_{2i}^2 \right) \hat{b}_2 = \sum_{i=1}^n x_{2i} y_i \end{cases}$$

$A = -5,088E+00$
$B = 8,438E-01$
$C = -1,871E-02$

FIGURA 31 - Regressão por anamorfose para a determinação dos parâmetros A , B e C .

5. CONCLUSÕES

O modelo de *THOMPSON et al. (1968)* e o conjunto de equações utilizadas são válidos para a simulação de secagem de sementes de soja em camada fixa;

A equação de *HUKILL & SHEDD (1955)* e adotada pela *ASAE D272.3 (1999)* mostra-se adequada para a determinação da redução de pressão sofrida pelo ar ao atravessar a camada de sementes, porém os parâmetros γ_0 e γ_1 podem ser significativamente menores;

As vazões obtidas são, aproximadamente, duas vezes maiores e as pressões estáticas, aproximadamente, três vezes menores que as obtidas pela *ASAE D272.3 – 1999*;

O uso de microcomputadores e programas específicos torna possível a simulação de secagem sem a necessidade de conhecimentos específicos dos fenômenos envolvidos e sua modelagem matemática.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASAE STANDARDS - **D245.4**. 1980. Moisture relationships of grains. St. Joseph, Michigan. p. 324-328.

ASAE STANDARDS - **D245.5**. 1999. Moisture Relationships of Plant-based Agricultural. p. 512 – 528.

ASAE STANDARDS - **D272.3**. 1999. Resistance to Airflow of Grains, Seeds, Other Agricultural Products, and Perforated Metal Sheets. St. Joseph, Michigan. p. 544 – 550.

ASAE STANDARDS - **S448**. 1998. Thin-Layer Drying of Grains and Crops. p.581 – 583.

ASAE STANDARDS. **D271.2**. 1980. Psychrometric data in SI units. St. Joseph, Michigan. p. 338 – 339, 344 -345.

BENNET, C.O. & MYERS, J.E. **Fenômenos de transporte**. São Paulo, SP. MacGraw-Hill do Brasil, 1978. 812 p.

BERN C. J. **Fans and airflow**. In: BERN et al., Managing grain after harvest. Ames, Iowa: Agricultural Engineering Department, Iowa State University, capítulo 10. p. 1 – 22. 1985. 263 p.

BERN C. J., BOILY R. **Computer simulation of grain drying –Simulation of corn drying**. In: BERN et al., Managing grain after harvest. Ames, Iowa:

Agricultural Engineering Department, Iowa State University, capítulo 10. p. 1 - 22. 1985. 263 p.

BRANDENBURG, N. R.; SIMONS, J. W.; SMITH, L. L. Why and how seeds are dried. In: The United States Department of Agriculture. **Seeds the Yearbook of Agriculture**. Washington. The U.S. Government Printing Office, 1961, p. 295 – 306.

BRASIL. Ministério da Agricultura e Reforma Agrária. Secretaria Nacional de Defesa Agropecuária. Departamento Nacional de Defesa Vegetal. Coordenação de Laboratório Vegetal. **Regras para análise de sementes**. Brasília, DF. 1992.

BROOKER, D. B.; BAKKER-ARKEMA, F. W.; HALL, C. W. **Drying cereal grains**. Westport, Connecticut. AVI Book, 1973. 265 p.

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

CONTE, S. D. **Análise numérica elementar**. In: Manual do Engenheiro. Porto Alegre. Editora Globo S.A. Tomo 1, vol 2, 1977. 330 p.

CORRÊA DA SILVA, J. G. **Estatística experimental - planejamento de experimentos**. Pelotas, RS. UFPEL.1999. 263 p.

COSTA E. **Termodinâmica**. In: Manual do Engenheiro. Porto Alegre, RS. Editora Globo S.A., Tomo I, vol.3, 1977. 259 p.

COURTOIS, F. Dynamic modelling of drying to improve processing quality of corn. ENSIA, Massy, France. 1991.103p.

FORTES M. A non-equilibrium thermodynamics approach to transport phenomena in capillary-porous media with special reference to drying of grains and foods. West Lafayette, Indiana. 1978. 226f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola). Purdue University, 1978.

FORTES, M.; OKOS M. R. A non-equilibrium thermodynamics approach to transport phenomena in capillary porous media. **Transaction of the ASAE** 00001-2351/81/2403. p. 756 - 760.1981.

GALLANT, A. R. Nonlinear Regression. Washington, DC. **The American Statistician**. Vol. 23, n° 2. p. 73-81. 1975.

GOMES S. **Métodos Numéricos - Teoria e programação**. Rio Grande, RS. Editora da FURG.1999.190 p.

GUIMARÃES, D. S. **Desenvolvimento de “software” para a simulação de secagem a baixas temperaturas**. Pelotas, RS. Tese (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Sementes). Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, UFPEL, 2001. 168p.

GUIMARÃES, D.; BAUDET, L. **Simulação de secagem de grãos e sementes**. Pelotas, RS. Editora e Gráfica da Universidade Federal de Pelotas, 2002. 216 p.

GUNASEKARAN, S.; JACKSON, C. Y. Resistance to airflow of grain sorghum. **Transaction of the ASAE**. 31(4). p. 1237-1240. 1988.

HALL, C. W. **Drying and storage of agricultural crops**. Westport, Connecticut. The AVI Publishing Company, Inc. 1980. 381p.

HALL, C.W. **Drying farm crops**. Michigan. Department of Agricultural Engineering. Michigan State University. Agricultural Consulting Associates, Inc.1957. 336 p.

LEVIEN, A. M. Secagem de sementes de soja (*glycine max* L. Merrill) em secador com distribuição radial do fluxo de ar, utilizando variações na umidade relativa do ar de secagem. Pelotas, RS. Tese (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Sementes). Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, UFPEL, 2005. 45 p.

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

MIRANDA, T. R. **Secagem intermitente lenta de sementes de soja (*glycine max* (L.) Merrill)**. Pelotas, RS. Tese (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Sementes). UFPEL. 1978. 93p.

NEVES, E. **Fluxo de ar no processo de secagem de sementes de milho em espiga**. Pelotas, RS. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia de Sementes). Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, UFPEL, 2001. 68p.

PESKE, S., ROSENTHAL, M., ROTA, G. R. **Sementes: fundamentos científicos e tecnológicos**. Pelotas, RS. UFPEL – Editora e Gráfica Universitária, 2003. 418p.

PESKE, S.,BAUDET, L. **Secagem de sementes em secadores comerciais**. In: PESKE *et al.*,Curso sobre beneficiamento de sementes para encarregados de UBS. Pelotas: Cetreisem – UFPEL. 1983, capítulo 5, p. 120 - 140.

RESNIK R., HALLIDAY D. **Física I - vol 2**. Tradução para o português de Luz et al. Rio de Janeiro. Livros Técnicos e Científicos Ltda. 1974. 759.

ROA, G.; VILLA, L. G. **Secagem e armazenamento de grãos e sementes em silos, mediante a utilização de ar ambiente e com auxílio de coletores solares**. Viçosa, MG. Centro Nacional de Treinamento em Armazenagem - Universidade Federal de Viçosa,1980. 42 p.

ROSSI, S.J.; ROA, G. **Secagem e armazenamento de produtos agropecuários com o uso de energia solar e ar natural**. São Paulo, SP. Secretaria da Indústria e Comércio e Tecnologia, 1980. 295p.

RUGGIERO M. A., LOPES V. L. **Cálculo numérico - aspectos teóricos e computacionais**. São Paulo, SP. McGraw-Hill, Ltda. 1988. 295 p.

SILVA, J.S. **Secagem e armazenagem de produtos agrícolas**. Viçosa, MG. Editora Aprenda Fácil, 2000. 502f.

SINÍCIO, R.; ROA, G. **Curso de simulação de secagem**. Viçosa: Centro Nacional de Treinamento em Armazenagem. 1979. 20 p.

SOHDA, M. S., BANSAL, N. K., KUMAR, A., BANSAL, P., MALIK, M. A. **Solar crop drying – vol I**. Boca Raton, Florida. CRC Press, Inc. 1987. 141p.

SPIEGEL M. **Estatística**. 4^a ed. Tradução para o português de P. Cosentino. São Paulo, SP. McGraw-Hill do Brasil. 1972. 580 p.

VILLELA, F. A.; PESKE, S. T. Secagem de sementes. In: PESKE, S., ROSENTHAL, M., ROTA, G. R. (Ed.). **Sementes: fundamentos científicos e tecnológicos**. Pelotas, RS. UFPEL – Editora e Gráfica Universitária, 2003. p.283-322.

ZIMMER, G. J.; VILLELA, F.A.; TILLMANN, M.A.A.; ZONTA, E. Seca-aeração para sementes de arroz. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília v27, m.9, p.1371-1378, 1992.

7. APÊNDICES



SeeDry v.01 - 2005

developed by Daniel Guimarães

Referência:

Lotel

Data:

25-mai-05

Local:

UBS-FAEM

Responsável:

Daniel

	Ar ambiente:	Ar secagem
Temperatura (°C):	12,28	16,53
Umidade relativa (%):	84,83	0,64
Pressão atmosférica (Pa):	101.240,24	101.240,24
Razão de mistura (kg/kg):	0,01	0,01
Pressão parcial de vapor saturado (Pa):	1.427,80	1.879,28
Pressão parcial de vapor (Pa):	1.211,20	1.211,20
Volume específico (m ³ /kg):	0,82	0,83
Entalpia (J/kg):	31.425,32	35.754,33
Temperatura de bulbo úmido (°C):	10,86	12,61
Temperatura ponto de orvalho (°C):	9,79	9,79

Espécie:	Soja
Grau de umidade inicial (%bu):	12,80
Temperatura da semente (°C):	14,50
Altitude do local (m):	7,03
Equação da camada delgada:	RoaMacedo
Tipo de célula:	Cilíndrica
Diâmetro (m):	1,85
Largura (m):	0,00
Comprimento (m):	0,00
Grau de umidade final (%bu):	12,00

Altura da camada de sementes (m):	1,21	Espessura da camada delgada (m):	0,20
Número de camadas delgadas:	6	Intervalo de tempo (h):	0,50
Vazão do ventilador (m ³ /h):	5.013,00		

Resultado simulação: lote 1, tela 1.



SeeDry v.01 - 2005

developed by Daniel Guimarães

Comod	Int	ME	Tsem	Pv	VolEsp	R	Csem	MRI	Teq	UReq	Meq	MRf	DeltaL	RM	UR	T	M	tempo	Mmed
1	1	748	14,50	1,211	0,83	0,12	2,16	1,00	16,13	66,11	13,44	0,92	191,6	7,94	73,67	15,26	14,32	0,50	-
2	1	748	14,50	1,277	0,83	0,12	2,16	1,00	15,11	70,56	14,95	0,92	191,8	7,94	74,38	15,11	14,68	0,50	-
3	1	748	14,50	1,277	0,83	0,12	2,16	1,00	14,99	71,11	15,15	0,93	191,8	7,94	74,96	14,99	14,68	0,50	-
4	1	748	14,50	1,277	0,83	0,12	2,16	1,00	14,90	71,56	15,31	0,93	191,8	7,94	75,43	14,90	14,68	0,50	-
5	1	748	14,50	1,277	0,83	0,12	2,16	1,00	14,82	71,92	15,44	0,93	191,9	7,94	75,81	14,82	14,68	0,50	-
6	1	748	14,50	1,277	0,83	0,12	2,16	1,00	14,76	72,21	15,55	0,93	191,9	7,94	76,12	14,76	14,68	0,50	12,75
1	2	750	15,26	1,211	0,83	0,12	2,15	0,75	16,28	65,48	13,24	0,89	202,1	8,00	74,06	15,29	13,92	1,00	-
2	2	748	15,11	1,286	0,83	0,12	2,16	1,00	15,26	69,92	14,72	0,89	191,8	8,00	74,23	15,26	14,68	1,00	-
3	2	748	14,99	1,286	0,83	0,12	2,16	1,00	15,20	70,15	14,80	0,89	191,8	8,00	74,48	15,20	14,68	1,00	-
4	2	748	14,90	1,286	0,83	0,12	2,16	1,00	15,14	70,43	14,90	0,89	191,8	8,00	74,77	15,14	14,68	1,00	-
5	2	748	14,82	1,286	0,83	0,12	2,16	1,00	15,08	70,72	15,00	0,89	191,8	8,00	75,08	15,08	14,68	1,00	-
6	2	748	14,76	1,286	0,83	0,12	2,16	1,00	15,02	71,01	15,11	0,89	191,8	8,00	75,39	15,02	14,68	1,00	12,70
1	3	752	15,29	1,211	0,83	0,12	2,13	0,47	16,29	65,45	13,23	0,86	214,8	7,87	71,66	15,56	13,62	1,50	-
2	3	748	15,26	1,266	0,83	0,12	2,16	1,00	15,50	68,83	14,34	0,86	191,7	8,04	75,10	15,15	14,53	1,50	-
3	3	748	15,20	1,292	0,83	0,12	2,16	1,00	15,16	70,35	14,87	0,87	191,8	8,04	75,10	15,16	14,68	1,50	-
4	3	748	15,14	1,292	0,83	0,12	2,16	1,00	15,16	70,36	14,87	0,87	191,8	8,04	75,10	15,16	14,68	1,50	-
5	3	748	15,08	1,292	0,83	0,12	2,16	1,00	15,14	70,43	14,90	0,87	191,8	8,04	75,14	15,14	14,68	1,50	-
6	3	748	15,02	1,292	0,83	0,12	2,16	1,00	15,12	70,54	14,94	0,87	191,8	8,04	75,26	15,12	14,68	1,50	12,65
1	4	754	15,56	1,211	0,83	0,12	2,12	0,30	16,34	65,23	13,16	0,84	224,5	7,78	69,77	15,80	13,40	2,00	-
2	4	749	15,15	1,252	0,83	0,12	2,16	0,76	15,67	68,07	14,08	0,84	195,9	8,03	74,98	15,16	14,32	2,00	-
3	4	748	15,16	1,291	0,83	0,12	2,16	1,00	15,16	70,37	14,88	0,85	191,8	8,03	74,98	15,16	14,68	2,00	-
4	4	748	15,16	1,291	0,83	0,12	2,16	1,00	15,16	70,36	14,88	0,85	191,8	8,03	74,98	15,16	14,68	2,00	-
5	4	748	15,14	1,291	0,83	0,12	2,16	1,00	15,15	70,38	14,88	0,85	191,8	8,03	74,99	15,15	14,68	2,00	-
6	4	748	15,12	1,291	0,83	0,12	2,16	1,00	15,15	70,41	14,89	0,85	191,8	8,03	75,02	15,15	14,68	2,00	12,59
1	5	756	15,80	1,211	0,83	0,12	2,12	0,19	16,39	65,04	13,10	0,82	231,9	7,71	68,21	16,00	13,25	2,50	-
2	5	750	15,16	1,240	0,83	0,12	2,15	0,57	15,84	67,36	13,85	0,82	202,2	7,99	74,18	15,25	14,08	2,50	-

Resultado simulação: lote 1, tela 2.



SeeDry v.01 - 2005

developed by Daniel Guimarães

Comod	Int	ME	Tsem	Pv	VelEsp	R	Csem	MRi	Teq	UReq	Meq	MRf	DeltaL	RM	UR	T	M	tempo	Mmed
3	5	748	15,16	1,284	0,83	0,12	2,16	1,00	15,23	70,04	14,76	0,83	191,8	7,99	74,27	15,23	14,68	2,50	-
4	5	748	15,16	1,284	0,83	0,12	2,16	1,00	15,21	70,10	14,78	0,83	191,8	7,99	74,33	15,21	14,68	2,50	-
5	5	748	15,15	1,284	0,83	0,12	2,16	1,00	15,20	70,16	14,80	0,83	191,8	7,99	74,39	15,20	14,68	2,50	-
6	5	748	15,15	1,284	0,83	0,12	2,16	1,00	15,19	70,21	14,82	0,83	191,8	7,99	74,44	15,19	14,68	2,50	12,94
1	6	756	16,00	1,211	0,83	0,12	2,11	0,12	16,43	64,87	13,05	0,81	237,3	7,66	67,07	16,16	13,14	3,00	-
2	6	752	15,25	1,231	0,83	0,12	2,14	0,42	15,98	66,75	13,65	0,81	209,6	7,93	72,86	15,41	13,85	3,00	-
3	6	748	15,23	1,274	0,83	0,12	2,16	1,00	15,37	69,40	14,54	0,81	191,8	8,01	74,68	15,19	14,60	3,00	-
4	6	748	15,21	1,288	0,83	0,12	2,16	1,00	15,19	70,20	14,82	0,81	191,8	8,01	74,68	15,19	14,68	3,00	-
5	6	748	15,20	1,288	0,83	0,12	2,16	1,00	15,19	70,19	14,81	0,81	191,8	8,01	74,68	15,20	14,68	3,00	-
6	6	748	15,19	1,288	0,83	0,12	2,16	1,00	15,19	70,19	14,82	0,81	191,8	8,01	74,68	15,19	14,68	3,00	12,49
1	7	757	16,16	1,211	0,83	0,12	2,11	0,08	16,46	64,75	13,01	0,79	241,1	7,62	66,24	16,27	13,07	3,50	-
2	7	753	15,41	1,225	0,83	0,12	2,13	0,31	16,10	66,22	13,48	0,79	217,1	7,86	71,39	15,59	13,64	3,50	-
3	7	748	15,19	1,263	0,83	0,12	2,16	0,79	15,51	68,79	14,32	0,80	193,9	8,04	75,19	15,13	14,45	3,50	-
4	7	748	15,19	1,292	0,83	0,12	2,16	1,00	15,14	70,43	14,90	0,80	191,8	8,04	75,19	15,14	14,68	3,50	-
5	7	748	15,19	1,292	0,83	0,12	2,16	1,00	15,15	70,38	14,88	0,80	191,8	8,04	75,19	15,15	14,68	3,50	-
6	7	748	15,19	1,292	0,83	0,12	2,16	1,00	15,16	70,34	14,87	0,80	191,8	8,04	75,19	15,16	14,68	3,50	12,43
1	8	758	16,27	1,211	0,83	0,12	2,10	0,05	16,48	64,65	12,99	0,78	243,7	7,59	65,67	16,36	13,02	4,00	-
2	8	754	15,59	1,220	0,83	0,12	2,12	0,22	16,21	65,79	13,34	0,78	223,9	7,79	69,96	15,77	13,46	4,00	-
3	8	749	15,13	1,253	0,83	0,12	2,15	0,59	15,65	68,19	14,12	0,78	198,5	8,01	74,69	15,18	14,26	4,00	-
4	8	748	15,14	1,288	0,83	0,12	2,16	1,00	15,17	70,28	14,85	0,78	191,8	8,01	74,72	15,18	14,68	4,00	-
5	8	748	15,15	1,288	0,83	0,12	2,16	1,00	15,17	70,30	14,85	0,78	191,8	8,01	74,74	15,17	14,68	4,00	-
6	8	748	15,16	1,288	0,83	0,12	2,16	1,00	15,17	70,31	14,86	0,78	191,8	8,01	74,75	15,17	14,68	4,00	12,38
1	9	758	16,36	1,211	0,83	0,12	2,10	0,03	16,50	64,59	12,97	0,76	245,6	7,57	65,26	16,41	12,99	4,50	-
2	9	755	15,77	1,217	0,83	0,12	2,12	0,16	16,29	65,45	13,23	0,77	229,8	7,73	68,70	15,94	13,32	4,50	-
3	9	750	15,18	1,243	0,83	0,12	2,15	0,45	15,79	67,56	13,91	0,77	204,2	7,97	73,87	15,28	14,05	4,50	-
4	9	748	15,17	1,282	0,83	0,12	2,16	1,00	15,26	69,90	14,71	0,77	191,8	7,97	73,97	15,26	14,68	4,50	-

Resultado simulação: lote 1, tela 3.



SeeDry v.01 - 2005

developed by Daniel Guimarães

Camad	Int	ME	Tsem	Pv	VolEsp	R	Csem	MRi	Teq	UReq	Meq	MRf	DeltaL	RM	UR	T	M	tempo	Mmed
5	9	748	15.17	1.282	0.83	0.12	2.16	1.00	15.24	69.98	14.74	0.77	191.8	7.97	74.05	15.24	14.68	4.50	-
6	9	748	15.17	1.282	0.83	0.12	2.16	1.00	15.23	70.04	14.76	0.77	191.8	7.97	74.12	15.23	14.68	4.50	12.33
1	10	758	16.41	1.211	0.83	0.12	2.10	0.02	16.51	64.54	12.95	0.75	246.8	7.56	64.99	16.45	12.96	5.00	-
2	10	756	15.94	1.215	0.83	0.12	2.11	0.11	16.35	65.19	13.15	0.75	234.7	7.68	67.65	16.08	13.21	5.00	-
3	10	752	15.28	1.236	0.83	0.12	2.14	0.34	15.92	66.99	13.72	0.76	210.6	7.92	72.67	15.43	13.85	5.00	-
4	10	748	15.26	1.273	0.83	0.12	2.16	1.00	15.39	69.30	14.50	0.76	191.7	8.04	75.25	15.13	14.57	5.00	-
5	10	748	15.24	1.293	0.83	0.12	2.16	1.00	15.15	70.39	14.89	0.76	191.8	8.04	75.25	15.15	14.68	5.00	-
6	10	748	15.23	1.293	0.83	0.12	2.16	1.00	15.17	70.32	14.86	0.76	191.8	8.04	75.25	15.17	14.68	5.00	12.27
1	11	758	16.45	1.211	0.83	0.12	2.10	0.01	16.51	64.51	12.94	0.74	247.6	7.55	64.81	16.48	12.95	5.50	-
2	11	757	16.08	1.214	0.83	0.12	2.11	0.08	16.40	64.98	13.09	0.74	238.5	7.64	66.82	16.20	13.13	5.50	-
3	11	753	15.43	1.229	0.83	0.12	2.13	0.26	16.04	66.47	13.56	0.74	217.0	7.86	71.40	15.59	13.66	5.50	-
4	11	749	15.13	1.263	0.83	0.12	2.16	0.67	15.50	68.84	14.34	0.75	194.9	8.02	74.96	15.15	14.43	5.50	-
5	11	748	15.15	1.290	0.83	0.12	2.16	1.00	15.15	70.40	14.89	0.75	191.8	8.02	74.96	15.15	14.68	5.50	-
6	11	748	15.17	1.290	0.83	0.12	2.16	1.00	15.15	70.38	14.88	0.75	191.8	8.02	74.96	15.15	14.68	5.50	12.22
1	12	758	16.48	1.211	0.83	0.12	2.10	0.01	16.52	64.49	12.94	0.73	248.1	7.54	64.69	16.50	12.94	6.00	-
2	12	757	16.20	1.213	0.83	0.12	2.11	0.06	16.44	64.83	13.04	0.73	241.5	7.61	66.17	16.29	13.07	6.00	-
3	12	754	15.59	1.224	0.83	0.12	2.12	0.19	16.15	66.04	13.42	0.73	223.1	7.80	70.13	15.75	13.50	6.00	-
4	12	749	15.15	1.254	0.83	0.12	2.15	0.53	15.63	68.25	14.14	0.74	199.1	8.01	74.71	15.18	14.24	6.00	-
5	12	748	15.15	1.288	0.83	0.12	2.16	1.00	15.17	70.28	14.85	0.74	191.8	8.01	74.74	15.18	14.68	6.00	-
6	12	748	15.15	1.288	0.83	0.12	2.16	1.00	15.17	70.30	14.85	0.74	191.8	8.01	74.76	15.17	14.68	6.00	12.17
1	13	758	16.50	1.211	0.83	0.12	2.10	0.01	16.52	64.48	12.93	0.72	248.5	7.54	64.60	16.51	12.93	6.50	-
2	13	758	16.28	1.212	0.83	0.12	2.10	0.04	16.46	64.72	13.01	0.72	243.7	7.59	65.69	16.35	13.03	6.50	-
3	13	755	15.75	1.221	0.83	0.12	2.12	0.15	16.24	65.67	13.30	0.72	228.5	7.75	68.98	15.90	13.37	6.50	-
4	13	751	15.18	1.245	0.83	0.12	2.15	0.40	15.76	67.69	13.96	0.73	204.7	7.97	73.73	15.30	14.05	6.50	-
5	13	748	15.17	1.281	0.83	0.12	2.16	1.00	15.27	69.85	14.69	0.73	191.8	7.97	73.84	15.27	14.68	6.50	-
6	13	748	15.17	1.281	0.83	0.12	2.16	1.00	15.25	69.94	14.72	0.73	191.8	7.97	73.94	15.25	14.68	6.50	12.12

Resultado simulação: lote 1, tela 4.



SeeDry v.01 - 2005

developed by Daniel Guimarães

Comad	Int	ME	Tsem	Pv	VolEsp	R	Csem	MRi	Teq	UReq	Meq	MRf	DeltaL	RM	UR	T	M	tempo	Mmed
1	14	758	16.51	1.211	0.83	0.12	2.10	0.00	16.53	64.47	12.93	0.71	248.7	7.54	64.55	16.52	12.93	7.00	-
2	14	758	16.35	1.212	0.83	0.12	2.10	0.03	16.48	64.64	12.98	0.71	245.3	7.57	65.33	16.40	13.00	7.00	-
3	14	756	15.90	1.218	0.83	0.12	2.11	0.11	16.31	65.38	13.21	0.71	235.1	7.70	67.98	16.04	13.26	7.00	-
4	14	752	15.29	1.238	0.83	0.12	2.14	0.31	15.89	67.13	13.77	0.72	210.5	7.92	72.71	15.42	13.86	7.00	-
5	14	748	15.27	1.273	0.83	0.12	2.16	1.00	15.39	69.31	14.50	0.72	191.7	8.06	75.48	15.11	14.56	7.00	-
6	14	748	15.25	1.295	0.83	0.12	2.16	1.00	15.13	70.47	14.91	0.72	191.8	8.06	75.48	15.13	14.68	7.00	12.06
1	15	758	16.52	1.211	0.83	0.12	2.10	0.00	16.53	64.46	12.93	0.70	248.9	7.53	64.52	16.52	12.93	7.50	-
2	15	758	16.40	1.212	0.83	0.12	2.10	0.02	16.50	64.58	12.96	0.70	246.4	7.56	65.07	16.44	12.97	7.50	-
3	15	756	16.04	1.216	0.83	0.12	2.11	0.08	16.36	65.14	13.14	0.70	236.9	7.66	67.16	16.15	13.17	7.50	-
4	15	753	15.42	1.232	0.83	0.12	2.13	0.23	16.01	66.64	13.61	0.71	216.6	7.86	71.46	15.58	13.69	7.50	-
5	15	749	15.10	1.264	0.83	0.12	2.16	0.63	15.49	68.90	14.36	0.71	195.2	8.02	74.89	15.15	14.42	7.50	-
6	15	748	15.13	1.289	0.83	0.12	2.16	1.00	15.15	70.39	14.89	0.71	191.8	8.02	74.91	15.15	14.68	7.50	12.01
1	16	758	16.52	1.211	0.83	0.12	2.10	0.00	16.53	64.46	12.92	0.70	249.0	7.53	64.49	16.52	12.93	8.00	-
2	16	758	16.44	1.212	0.83	0.12	2.10	0.01	16.51	64.54	12.95	0.70	247.3	7.55	64.88	16.47	12.96	8.00	-
3	16	757	16.15	1.215	0.83	0.12	2.11	0.06	16.41	64.96	13.08	0.70	240.0	7.63	66.49	16.24	13.11	8.00	-
4	16	754	15.58	1.227	0.83	0.12	2.13	0.18	16.11	66.19	13.47	0.70	222.3	7.81	70.30	15.73	13.53	8.00	-
5	16	749	15.15	1.255	0.83	0.12	2.15	0.50	15.62	68.32	14.17	0.70	199.2	8.02	74.75	15.18	14.24	8.00	-
6	16	748	15.15	1.288	0.83	0.12	2.16	1.00	15.17	70.30	14.85	0.71	191.8	8.02	74.77	15.17	14.68	8.00	11.95

Resultado simulação: lote 1, tela 5



SeeDry v.01 - 2005

developed by Daniel Guimarães

Referências:

Lote2

Data:

27-mai-05

Local:

UBS-FAEM

Responsável:

Daniel

	Ar ambiente:	Ar secagem
Temperatura (°C):	18,30	20,78
Umidade relativa (%):	75,20	0,64
Pressão atmosférica (Pa):	101.242,22	101.242,22
Razão de mistura (kg/kg):	0,01	0,01
Pressão parcial de vapor saturado (Pa):	2.101,50	2.451,50
Pressão parcial de vapor (Pa):	1.580,33	1.580,33
Volume específico (m ³ /kg):	0,84	0,85
Entalpia (J/kg):	43.479,59	46.014,67
Temperatura de bulbo úmido (°C):	15,48	16,35
Temperatura ponto de orvalho (°C):	13,82	13,82

Espécie:	Soja
Grau de umidade inicial (%bu):	12,80
Temperatura da semente (°C):	13,90
Altitude do local (m):	7,01
Equação da camada delgada:	RoaMacedo
Tipo de célula:	Cilíndrica
Diâmetro (m):	1,85
Largura (m):	0,00
Comprimento (m):	0,00
Grau de umidade final (%bu):	11,97

Altura da camada de sementes (m):	1,21	Espessura da camada delgada (m):	0,20
Número de camadas delgadas:	6	Intervalo de tempo (h):	0,50
Vazão do ventilador (m ³ /h):	5.013,00		

Resultado simulação: lote 2, tela 1.



SeeDry v.01 - 2005

developed by Daniel Guimarães

Camad	Int	ME	Tsem	Pv	VolEsp	R	Csem	MRI	Teq	UReq	Meq	MRF	DeltaL	RM	UR	T	M	tempo	Mmed
1	1	748	13,90	1,580	0,85	0,12	2,16	1,00	19,40	70,20	14,48	0,92	191,0	9,93	71,30	19,26	14,62	0,50	-
2	1	748	13,90	1,591	0,84	0,12	2,16	1,00	18,19	75,74	16,58	0,92	191,2	9,93	76,25	18,19	14,68	0,50	-
3	1	748	13,90	1,591	0,84	0,12	2,16	1,00	17,33	79,94	18,48	0,92	191,4	9,93	80,49	17,33	14,68	0,50	-
4	1	748	13,90	1,591	0,84	0,12	2,16	1,00	16,64	83,50	20,38	0,92	191,5	9,93	84,07	16,64	14,68	0,50	-
5	1	748	13,90	1,591	0,83	0,12	2,16	1,00	16,09	86,47	22,28	0,92	191,6	9,93	87,06	16,09	14,68	0,50	-
6	1	748	13,90	1,591	0,83	0,12	2,16	1,00	15,65	88,93	24,16	0,92	191,7	9,93	89,53	15,65	14,68	0,50	12,79
1	2	748	19,26	1,580	0,85	0,12	2,16	0,97	20,48	65,68	13,00	0,88	192,4	10,60	77,62	18,94	13,99	1,00	-
2	2	748	18,19	1,697	0,84	0,12	2,16	1,00	18,79	72,95	15,48	0,88	191,1	10,60	78,35	18,79	14,68	1,00	-
3	2	748	17,33	1,697	0,84	0,12	2,16	1,00	18,49	74,29	16,00	0,88	191,2	10,60	79,80	18,49	14,68	1,00	-
4	2	748	16,64	1,697	0,84	0,12	2,16	1,00	18,12	76,04	16,71	0,88	191,2	10,60	81,67	18,12	14,68	1,00	-
5	2	748	16,09	1,697	0,84	0,12	2,16	1,00	17,72	78,01	17,57	0,88	191,3	10,60	83,79	17,72	14,68	1,00	-
6	2	748	15,65	1,697	0,84	0,12	2,16	1,00	17,30	80,07	18,54	0,88	191,4	10,60	86,00	17,30	14,68	1,00	12,71
1	3	752	18,94	1,580	0,85	0,12	2,14	0,57	20,41	65,94	13,08	0,85	211,4	10,34	73,58	19,40	13,59	1,50	-
2	3	748	18,79	1,657	0,84	0,12	2,16	1,00	19,28	70,74	14,67	0,85	191,0	10,35	74,21	19,27	14,68	1,50	-
3	3	748	18,49	1,657	0,84	0,12	2,16	1,00	19,12	71,46	14,93	0,85	191,1	10,35	74,94	19,12	14,68	1,50	-
4	3	748	18,12	1,657	0,84	0,12	2,16	1,00	18,92	72,35	15,26	0,85	191,1	10,35	75,87	18,92	14,68	1,50	-
5	3	748	17,72	1,657	0,84	0,12	2,16	1,00	18,68	73,45	15,67	0,85	191,1	10,35	77,02	18,68	14,68	1,50	-
6	3	748	17,30	1,657	0,84	0,12	2,16	1,00	18,40	74,72	16,17	0,85	191,2	10,35	78,35	18,40	14,68	1,50	12,66
1	4	754	19,40	1,580	0,85	0,12	2,12	0,36	20,51	65,56	12,97	0,82	224,6	10,23	71,25	19,74	13,28	2,00	-
2	4	748	19,27	1,638	0,84	0,12	2,16	0,99	19,64	69,15	14,12	0,83	191,0	10,54	76,92	18,99	14,41	2,00	-
3	4	748	19,12	1,688	0,84	0,12	2,16	1,00	19,01	71,91	15,09	0,83	191,1	10,54	76,92	19,01	14,68	2,00	-
4	4	748	18,92	1,688	0,84	0,12	2,16	1,00	18,99	72,00	15,13	0,83	191,1	10,54	76,92	19,00	14,68	2,00	-
5	4	748	18,68	1,688	0,84	0,12	2,16	1,00	18,93	72,29	15,23	0,83	191,1	10,54	77,20	18,93	14,68	2,00	-
6	4	748	18,40	1,688	0,84	0,12	2,16	1,00	18,83	72,77	15,41	0,83	191,1	10,54	77,71	18,83	14,68	2,00	12,59
1	5	756	19,74	1,580	0,85	0,12	2,11	0,22	20,57	65,29	12,88	0,80	235,1	10,11	69,18	20,04	13,07	2,50	-
2	5	750	18,99	1,620	0,84	0,12	2,15	0,67	19,83	68,36	13,86	0,81	198,8	10,45	75,64	19,12	14,12	2,50	-

Resultado simulação: lote 2, tela 2



SeeDry v.01 - 2005

developed by Daniel Guimarães

Camod	Int	ME	Tsem	Pv	VolEsp	R	Csem	MRi	Taq	UReq	Meq	MRf	DeltaL	RM	UR	T	M	tempo	Mmed
3	5	748	19.01	1.674	0.84	0.12	2.16	1.00	19.10	71.52	14.95	0.81	191.1	10.45	75.75	19.10	14.68	2.50	-
4	5	748	18.99	1.674	0.84	0.12	2.16	1.00	19.08	71.62	14.99	0.81	191.1	10.45	75.85	19.08	14.68	2.50	-
5	5	748	18.93	1.674	0.84	0.12	2.16	1.00	19.05	71.75	15.03	0.81	191.1	10.45	75.99	19.05	14.68	2.50	-
6	5	748	18.83	1.674	0.84	0.12	2.16	1.00	19.01	71.95	15.11	0.81	191.1	10.45	76.20	19.01	14.68	2.50	12.53
1	6	758	20.04	1.580	0.85	0.12	2.10	0.14	20.63	65.05	12.81	0.78	242.6	10.04	67.73	20.26	12.93	3.00	-
2	6	751	19.12	1.608	0.85	0.12	2.14	0.50	20.03	67.50	13.58	0.79	207.4	10.40	74.47	19.29	13.82	3.00	-
3	6	748	19.10	1.665	0.84	0.12	2.16	1.00	19.25	70.87	14.72	0.79	191.0	10.40	74.64	19.25	14.68	3.00	-
4	6	748	19.08	1.665	0.84	0.12	2.16	1.00	19.22	71.02	14.77	0.79	191.0	10.40	74.80	19.22	14.68	3.00	-
5	6	748	19.05	1.665	0.84	0.12	2.16	1.00	19.18	71.16	14.82	0.79	191.0	10.40	74.95	19.18	14.68	3.00	-
6	6	748	19.01	1.665	0.84	0.12	2.16	1.00	19.15	71.32	14.88	0.79	191.0	10.40	75.12	19.15	14.68	3.00	12.47
1	7	758	20.26	1.580	0.85	0.12	2.10	0.09	20.68	64.87	12.76	0.77	248.0	9.98	66.67	20.43	12.83	3.50	-
2	7	753	19.29	1.599	0.85	0.12	2.13	0.35	20.20	66.82	13.36	0.77	217.0	10.30	72.70	19.53	13.55	3.50	-
3	7	748	19.25	1.650	0.84	0.12	2.16	1.00	19.47	69.89	14.38	0.77	191.0	10.51	76.38	19.05	14.51	3.50	-
4	7	748	19.22	1.682	0.84	0.12	2.16	1.00	19.08	71.62	14.99	0.78	191.1	10.51	76.38	19.08	14.68	3.50	-
5	7	748	19.18	1.682	0.84	0.12	2.16	1.00	19.10	71.53	14.95	0.78	191.1	10.51	76.38	19.10	14.68	3.50	-
6	7	748	19.15	1.682	0.84	0.12	2.16	1.00	19.11	71.48	14.94	0.78	191.1	10.51	76.38	19.11	14.68	3.50	12.40
1	8	759	20.43	1.580	0.85	0.12	2.09	0.06	20.71	64.74	12.72	0.75	251.7	9.94	65.95	20.54	12.76	4.00	-
2	8	755	19.53	1.593	0.85	0.12	2.12	0.25	20.34	66.24	13.18	0.75	225.8	10.21	71.03	19.77	13.33	4.00	-
3	8	749	19.05	1.636	0.84	0.12	2.15	0.67	19.62	69.24	14.15	0.76	196.0	10.46	75.79	19.11	14.30	4.00	-
4	8	748	19.08	1.675	0.84	0.12	2.16	1.00	19.10	71.53	14.95	0.76	191.1	10.46	75.81	19.10	14.68	4.00	-
5	8	748	19.10	1.675	0.84	0.12	2.16	1.00	19.10	71.53	14.95	0.76	191.1	10.46	75.81	19.10	14.68	4.00	-
6	8	748	19.11	1.675	0.84	0.12	2.16	1.00	19.10	71.52	14.95	0.76	191.1	10.46	75.81	19.10	14.68	4.00	12.33
1	9	759	20.54	1.580	0.85	0.12	2.09	0.04	20.73	64.65	12.69	0.74	254.2	9.91	65.45	20.62	12.72	4.50	-
2	9	756	19.77	1.589	0.85	0.12	2.11	0.18	20.45	65.79	13.04	0.74	233.6	10.13	69.51	19.99	13.15	4.50	-
3	9	750	19.11	1.623	0.84	0.12	2.15	0.52	19.81	68.42	13.88	0.74	202.2	10.44	75.26	19.18	14.04	4.50	-
4	9	748	19.10	1.671	0.84	0.12	2.16	1.00	19.16	71.25	14.85	0.75	191.0	10.44	75.34	19.16	14.68	4.50	-

Resultado simulação: lote 2, tela 3.



SeeDry v.01 - 2005

developed by Daniel Guimarães

Comod	Int	ME	Tsem	Pv	VolEsp	R	Csem	MRI	Teq	UReq	Meq	MRF	DeltaL	RM	UR	T	M	Tempo	Mmed
5	9	748	19,10	1,671	0,84	0,12	2,16	1,00	19,15	71,30	14,87	0,75	191,0	10,44	75,40	19,15	14,68	4,50	-
6	9	748	19,10	1,671	0,84	0,12	2,16	1,00	19,14	71,35	14,89	0,75	191,1	10,44	75,44	19,14	14,68	4,50	12,27
1	10	760	20,62	1,580	0,85	0,12	2,09	0,02	20,75	64,59	12,67	0,73	255,9	9,90	65,11	20,67	12,69	5,00	-
2	10	757	19,99	1,586	0,85	0,12	2,11	0,13	20,54	65,43	12,93	0,73	240,0	10,07	68,25	20,18	13,00	5,00	-
3	10	752	19,18	1,613	0,85	0,12	2,14	0,38	19,98	67,72	13,65	0,73	210,1	10,36	73,88	19,36	13,79	5,00	-
4	10	748	19,16	1,659	0,84	0,12	2,16	1,00	19,32	70,54	14,60	0,74	191,0	10,42	75,01	19,21	14,63	5,00	-
5	10	748	19,15	1,668	0,84	0,12	2,16	1,00	19,19	71,11	14,80	0,74	191,0	10,42	75,06	19,19	14,68	5,00	-
6	10	748	19,14	1,668	0,84	0,12	2,16	1,00	19,18	71,16	14,82	0,74	191,0	10,42	75,11	19,18	14,68	5,00	12,21
1	11	760	20,67	1,580	0,85	0,12	2,09	0,01	20,76	64,55	12,66	0,71	257,0	9,88	64,89	20,71	12,67	5,50	-
2	11	758	20,18	1,584	0,85	0,12	2,10	0,09	20,61	65,16	12,84	0,71	245,1	10,01	67,24	20,34	12,90	5,50	-
3	11	753	19,36	1,604	0,85	0,12	2,13	0,29	20,14	67,05	13,43	0,72	218,0	10,29	72,50	19,56	13,56	5,50	-
4	11	748	19,21	1,648	0,84	0,12	2,16	0,85	19,49	69,83	14,35	0,72	192,4	10,50	76,35	19,05	14,45	5,50	-
5	11	748	19,19	1,681	0,84	0,12	2,16	1,00	19,08	71,64	14,99	0,73	191,1	10,50	76,35	19,08	14,68	5,50	-
6	11	748	19,18	1,681	0,84	0,12	2,16	1,00	19,10	71,54	14,96	0,73	191,1	10,50	76,35	19,10	14,68	5,50	12,14
1	12	760	20,71	1,580	0,85	0,12	2,09	0,01	20,77	64,52	12,65	0,70	257,7	9,88	64,74	20,73	12,66	6,00	-
2	12	759	20,34	1,583	0,85	0,12	2,10	0,06	20,66	64,96	12,78	0,70	249,0	9,97	66,47	20,46	12,82	6,00	-
3	12	755	19,56	1,598	0,85	0,12	2,12	0,21	20,28	66,49	13,26	0,71	225,7	10,21	71,00	19,77	13,36	6,00	-
4	12	749	19,05	1,636	0,84	0,12	2,15	0,57	19,63	69,23	14,15	0,71	197,5	10,45	75,59	19,13	14,25	6,00	-
5	12	748	19,08	1,673	0,84	0,12	2,16	1,00	19,12	71,45	14,92	0,71	191,1	10,45	75,64	19,12	14,68	6,00	-
6	12	748	19,10	1,673	0,84	0,12	2,16	1,00	19,11	71,47	14,93	0,71	191,1	10,45	75,66	19,12	14,68	6,00	12,08
1	13	760	20,73	1,580	0,85	0,12	2,09	0,01	20,77	64,50	12,64	0,69	258,2	9,87	64,64	20,75	12,65	6,50	-
2	13	759	20,46	1,582	0,85	0,12	2,09	0,04	20,69	64,81	12,74	0,69	251,9	9,94	65,90	20,55	12,76	6,50	-
3	13	756	19,77	1,593	0,85	0,12	2,11	0,16	20,39	66,02	13,11	0,69	232,6	10,14	69,69	19,97	13,19	6,50	-
4	13	751	19,13	1,625	0,84	0,12	2,15	0,45	19,80	68,49	13,90	0,70	203,6	10,42	75,02	19,21	14,01	6,50	-
5	13	748	19,12	1,669	0,84	0,12	2,16	1,00	19,19	71,12	14,81	0,70	191,0	10,42	75,10	19,19	14,68	6,50	-
6	13	748	19,11	1,669	0,84	0,12	2,16	1,00	19,18	71,19	14,83	0,70	191,0	10,42	75,18	19,18	14,68	6,50	12,02

Resultado simulação: lote 2, tela 4.



SeeDry v.01 - 2005

developed by Daniel Guimarães

Canal	Int	ME	Tsem	Pv	VolEsp	R	Csem	MRi	Teq	UReq	Meq	MRf	DeltaL	RM	UR	T	M	tempo	Mmed
1	14	760	20,75	1.580	0,85	0,12	2,09	0,00	20,77	64,49	12,64	0,68	258,5	9,87	64,58	20,76	12,64	7,00	-
2	14	759	20,55	1.581	0,85	0,12	2,09	0,03	20,72	64,71	12,71	0,68	254,1	9,92	65,47	20,62	12,72	7,00	-
3	14	757	19,97	1.589	0,85	0,12	2,11	0,12	20,49	65,64	12,99	0,68	238,6	10,08	68,51	20,14	13,05	7,00	-
4	14	752	19,21	1.615	0,85	0,12	2,14	0,33	19,96	67,83	13,68	0,69	210,9	10,35	73,72	19,39	13,79	7,00	-
5	14	748	19,19	1.658	0,84	0,12	2,16	1,00	19,35	70,44	14,57	0,69	191,0	10,44	75,42	19,16	14,60	7,00	-
6	14	748	19,18	1.672	0,84	0,12	2,16	1,00	19,16	71,26	14,86	0,69	191,0	10,44	75,42	19,16	14,68	7,00	11,96

Resultado simulação: lote 2, tela 5.



SeeDry v.01 - 2005

developed by Daniel Guimarães

Referência:

Lote3

Data:

28-mai-05

Local:

UBS-FAEM

Responsável:

Daniel

	Ar ambiente:	Ar secagem
Temperatura (°C):	22,82	24,50
Umidade relativa (%):	72,50	0,66
Pressão atmosférica (Pa):	101.244,00	101.244,00
Razão de mistura (kg/kg):	0,01	0,01
Pressão parcial de vapor saturado (Pa):	2.776,62	3.072,06
Pressão parcial de vapor (Pa):	2.013,05	2.013,05
Volume específico (m ³ /kg):	0,86	0,86
Entalpia (J/kg):	55.117,93	56.842,43
Temperatura de bulbo úmido (°C):	19,27	19,79
Temperatura ponto de orvalho (°C):	17,60	17,60

Espécie:	Soja
Grau de umidade inicial (%bu):	12,80
Temperatura da semente (°C):	17,30
Altitude do local (m):	6,97
Equação da camada delgada:	RoaMacedo
Tipo de célula:	Cilíndrica
Diâmetro (m):	1,85
Largura (m):	0,00
Comprimento (m):	0,00
Grau de umidade final (%bu):	12,00

Altura da camada de sementes (m):	1,21	Espessura da camada delgada (m):	0,20
Número de camadas delgadas:	6	Intervalo de tempo (h):	0,50
Vazão do ventilador (m ³ /h):	5.013,00		

Resultado simulação: lote 3, tela 1.



SeeDry v.01 - 2005

developed by Daniel Guimarães

Comod	Int	ME	Tsem	Pv	VolEsp	R	Csem	MRi	Teq	UReq	Meq	MRf	DeltaL	RM	UR	T	M	tempo	Mmed
1	1	748	17,30	2.013	0,86	0,12	2,16	1,00	23,04	71,54	14,65	0,91	190,3	12,63	71,70	23,02	14,67	0,50	-
2	1	748	17,30	2.015	0,86	0,12	2,16	1,00	21,86	76,87	16,71	0,91	190,5	12,63	76,93	21,86	14,68	0,50	-
3	1	748	17,30	2.015	0,85	0,12	2,16	1,00	20,93	81,34	18,80	0,91	190,7	12,63	81,41	20,93	14,68	0,50	-
4	1	748	17,30	2.015	0,85	0,12	2,16	1,00	20,20	85,12	20,94	0,91	190,9	12,63	85,19	20,20	14,68	0,50	-
5	1	748	17,30	2.015	0,85	0,12	2,16	1,00	19,61	88,28	23,14	0,92	191,0	12,63	88,35	19,61	14,68	0,50	-
6	1	748	17,30	2.015	0,85	0,12	2,16	1,00	19,14	90,89	25,42	0,92	191,1	12,63	90,96	19,14	14,68	0,50	12,80
1	2	748	23,02	2.013	0,86	0,12	2,16	1,00	24,20	66,72	13,05	0,86	190,4	13,39	77,86	22,61	14,03	1,00	-
2	2	748	21,86	2.134	0,86	0,12	2,16	1,00	22,46	74,11	15,60	0,87	190,4	13,39	78,58	22,46	14,68	1,00	-
3	2	748	20,93	2.134	0,86	0,12	2,16	1,00	22,15	75,52	16,15	0,87	190,5	13,39	80,07	22,15	14,68	1,00	-
4	2	748	20,20	2.134	0,86	0,12	2,16	1,00	21,75	77,36	16,92	0,87	190,6	13,39	82,02	21,75	14,68	1,00	-
5	2	748	19,61	2.134	0,85	0,12	2,16	1,00	21,32	79,45	17,86	0,87	190,6	13,39	84,23	21,32	14,68	1,00	-
6	2	748	19,14	2.134	0,85	0,12	2,16	1,00	20,88	81,63	18,94	0,87	190,7	13,39	86,55	20,88	14,68	1,00	12,72
1	3	752	22,61	2.013	0,86	0,12	2,14	0,57	24,12	67,04	13,15	0,83	209,6	13,10	73,88	23,12	13,63	1,50	-
2	3	748	22,46	2.089	0,86	0,12	2,16	1,00	22,98	71,78	14,73	0,84	190,3	13,10	74,48	22,98	14,68	1,50	-
3	3	748	22,15	2.089	0,86	0,12	2,16	1,00	22,81	72,52	15,00	0,84	190,4	13,10	75,25	22,82	14,68	1,50	-
4	3	748	21,75	2.089	0,86	0,12	2,16	1,00	22,60	73,48	15,36	0,84	190,4	13,10	76,24	22,60	14,68	1,50	-
5	3	748	21,32	2.089	0,86	0,12	2,16	1,00	22,34	74,64	15,80	0,84	190,5	13,10	77,45	22,34	14,68	1,50	-
6	3	748	20,88	2.089	0,86	0,12	2,16	1,00	22,04	76,00	16,35	0,84	190,5	13,10	78,86	22,04	14,68	1,50	12,67
1	4	754	23,12	2.013	0,86	0,12	2,12	0,37	24,22	66,63	13,02	0,81	222,4	12,99	71,78	23,45	13,33	2,00	-
2	4	748	22,98	2.071	0,86	0,12	2,16	1,00	23,36	70,18	14,18	0,81	190,3	13,29	76,62	22,74	14,43	2,00	-
3	4	748	22,81	2.118	0,86	0,12	2,16	1,00	22,76	72,77	15,09	0,81	190,4	13,29	76,62	22,76	14,68	2,00	-
4	4	748	22,60	2.118	0,86	0,12	2,16	1,00	22,73	72,91	15,15	0,81	190,4	13,29	76,70	22,73	14,68	2,00	-
5	4	748	22,34	2.118	0,86	0,12	2,16	1,00	22,65	73,26	15,27	0,81	190,4	13,29	77,07	22,65	14,68	2,00	-
6	4	748	22,04	2.118	0,86	0,12	2,16	1,00	22,53	73,81	15,48	0,81	190,4	13,29	77,64	22,53	14,68	2,00	12,60
1	5	756	23,45	2.013	0,86	0,12	2,11	0,22	24,29	66,36	12,94	0,78	232,8	12,87	69,84	23,76	13,12	2,50	-
2	5	749	22,74	2.053	0,86	0,12	2,15	0,68	23,56	69,35	13,90	0,79	197,4	13,21	75,72	22,85	14,15	2,50	-

Resultado simulação: lote 3, tela 2



SeeDry v.01 - 2005

developed by Daniel Guimarães

Camad	Int	ME	Tsem	Pv	VolEsp	R	Csem	MRI	Teq	UReq	Meq	MRf	DeltaL	RM	UR	T	M	tempo	Mmed
3	5	748	22,76	2.106	0,86	0,12	2,16	1,00	22,83	72,45	14,98	0,79	190,4	13,21	75,81	22,83	14,68	2,50	-
4	5	748	22,73	2.106	0,86	0,12	2,16	1,00	22,81	72,54	15,01	0,79	190,4	13,21	75,90	22,81	14,68	2,50	-
5	5	748	22,65	2.106	0,86	0,12	2,16	1,00	22,78	72,69	15,06	0,79	190,4	13,21	76,05	22,78	14,68	2,50	-
6	5	748	22,53	2.106	0,86	0,12	2,16	1,00	22,73	72,91	15,15	0,79	190,4	13,21	76,29	22,73	14,68	2,50	12,53
1	6	757	23,76	2.013	0,86	0,12	2,10	0,14	24,35	66,11	12,87	0,76	240,1	12,79	68,52	23,98	12,97	3,00	-
2	6	751	22,85	2.041	0,86	0,12	2,14	0,50	23,75	68,53	13,63	0,77	205,9	13,15	74,59	23,02	13,85	3,00	-
3	6	748	22,83	2.096	0,86	0,12	2,16	1,00	22,98	71,80	14,74	0,77	190,3	13,15	74,77	22,98	14,68	3,00	-
4	6	748	22,81	2.096	0,86	0,12	2,16	1,00	22,95	71,95	14,79	0,77	190,3	13,15	74,92	22,95	14,68	3,00	-
5	6	748	22,78	2.096	0,86	0,12	2,16	1,00	22,91	72,10	14,85	0,77	190,4	13,15	75,08	22,91	14,68	3,00	-
6	6	748	22,73	2.096	0,86	0,12	2,16	1,00	22,87	72,26	14,91	0,77	190,4	13,15	75,25	22,87	14,68	3,00	12,48
1	7	758	23,98	2.013	0,86	0,12	2,10	0,09	24,40	65,94	12,81	0,75	245,3	12,73	67,54	24,15	12,88	3,50	-
2	7	753	23,02	2.032	0,86	0,12	2,13	0,35	23,92	67,85	13,41	0,75	215,2	13,06	73,03	23,26	13,59	3,50	-
3	7	748	22,98	2.082	0,86	0,12	2,16	1,00	23,20	70,86	14,41	0,75	190,3	13,25	76,09	22,81	14,52	3,50	-
4	7	748	22,95	2.112	0,86	0,12	2,16	1,00	22,84	72,43	14,97	0,75	190,4	13,25	76,09	22,84	14,68	3,50	-
5	7	748	22,91	2.112	0,86	0,12	2,16	1,00	22,85	72,36	14,94	0,75	190,4	13,25	76,09	22,85	14,68	3,50	-
6	7	748	22,87	2.112	0,86	0,12	2,16	1,00	22,86	72,34	14,94	0,75	190,4	13,25	76,09	22,86	14,68	3,50	12,41
1	8	759	24,15	2.013	0,86	0,12	2,10	0,06	24,43	65,81	12,77	0,73	248,9	12,70	66,88	24,26	12,81	4,00	-
2	8	754	23,25	2.026	0,86	0,12	2,12	0,25	24,06	67,28	13,23	0,73	223,8	12,97	71,50	23,50	13,37	4,00	-
3	8	749	22,81	2.068	0,86	0,12	2,16	0,69	23,36	70,19	14,18	0,74	194,8	13,22	75,80	22,84	14,31	4,00	-
4	8	748	22,84	2.107	0,86	0,12	2,16	1,00	22,84	72,42	14,96	0,74	190,4	13,22	75,81	22,84	14,68	4,00	-
5	8	748	22,85	2.107	0,86	0,12	2,16	1,00	22,84	72,41	14,96	0,74	190,4	13,22	75,81	22,84	14,68	4,00	-
6	8	748	22,86	2.107	0,86	0,12	2,16	1,00	22,84	72,39	14,95	0,74	190,4	13,22	75,81	22,85	14,68	4,00	12,35
1	9	759	24,26	2.013	0,86	0,12	2,09	0,04	24,45	65,72	12,75	0,71	251,3	12,67	66,43	24,34	12,77	4,50	-
2	9	756	23,50	2.021	0,86	0,12	2,11	0,18	24,17	66,83	13,09	0,72	231,3	12,89	70,12	23,72	13,19	4,50	-
3	9	750	22,84	2.055	0,86	0,12	2,15	0,52	23,54	69,42	13,92	0,72	200,9	13,19	75,25	22,92	14,07	4,50	-
4	9	748	22,84	2.102	0,86	0,12	2,16	1,00	22,90	72,13	14,86	0,72	190,4	13,19	75,33	22,90	14,68	4,50	-

Resultado simulação: lote 3, tela 3.



SeeDry v.01 - 2005

developed by Daniel Guimarães

Comod	Int	ME	Tsem	Pv	VolEsp	R	Csem	MRI	Teq	UReq	Meq	MRf	DeltaL	RM	UR	T	M	tempo	Mmed
5	9	748	22.84	2.102	0.86	0.12	2.16	1.00	22.89	72.19	14.88	0.72	190.4	13.19	75.39	22.89	14.68	4.50	-
6	9	748	22.84	2.102	0.86	0.12	2.16	1.00	22.88	72.23	14.89	0.72	190.4	13.19	75.43	22.88	14.68	4.50	12.29
1	10	759	24.34	2.013	0.86	0.12	2.09	0.02	24.47	65.65	12.73	0.70	252.9	12.65	66.12	24.40	12.74	5.00	-
2	10	757	23.72	2.019	0.86	0.12	2.11	0.12	24.26	66.48	12.98	0.70	237.6	12.82	68.97	23.91	13.05	5.00	-
3	10	752	22.92	2.045	0.86	0.12	2.14	0.38	23.71	68.72	13.69	0.71	208.5	13.12	74.08	23.09	13.82	5.00	-
4	10	748	22.90	2.091	0.86	0.12	2.16	1.00	23.06	71.47	14.62	0.71	190.3	13.16	74.87	22.97	14.64	5.00	-
5	10	748	22.89	2.098	0.86	0.12	2.16	1.00	22.95	71.91	14.78	0.71	190.3	13.16	74.94	22.95	14.68	5.00	-
6	10	748	22.88	2.098	0.86	0.12	2.16	1.00	22.94	71.98	14.80	0.71	190.3	13.16	75.01	22.94	14.68	5.00	12.23
1	11	760	24.39	2.013	0.86	0.12	2.09	0.01	24.48	65.61	12.71	0.69	254.0	12.64	65.92	24.43	12.72	5.50	-
2	11	758	23.91	2.017	0.86	0.12	2.10	0.09	24.33	66.21	12.90	0.69	242.5	12.77	68.06	24.06	12.95	5.50	-
3	11	753	23.09	2.037	0.86	0.12	2.13	0.29	23.86	68.07	13.48	0.69	216.2	13.04	72.81	23.29	13.59	5.50	-
4	11	748	22.97	2.080	0.86	0.12	2.16	0.89	23.22	70.75	14.37	0.70	191.3	13.26	76.33	22.78	14.46	5.50	-
5	11	748	22.95	2.114	0.86	0.12	2.16	1.00	22.81	72.53	15.00	0.70	190.4	13.26	76.33	22.81	14.68	5.50	-
6	11	748	22.94	2.114	0.86	0.12	2.16	1.00	22.84	72.42	14.96	0.70	190.4	13.26	76.33	22.84	14.68	5.50	12.16
1	12	760	24.43	2.013	0.86	0.12	2.09	0.01	24.49	65.58	12.70	0.68	254.7	12.63	65.78	24.46	12.71	6.00	-
2	12	758	24.06	2.015	0.86	0.12	2.10	0.06	24.38	66.02	12.84	0.68	246.3	12.72	67.36	24.18	12.87	6.00	-
3	12	754	23.29	2.030	0.86	0.12	2.12	0.21	24.00	67.52	13.30	0.68	223.7	12.97	71.48	23.50	13.40	6.00	-
4	12	749	22.78	2.068	0.86	0.12	2.15	0.57	23.35	70.20	14.18	0.68	196.5	13.19	75.47	22.88	14.27	6.00	-
5	12	748	22.81	2.104	0.86	0.12	2.16	1.00	22.87	72.29	14.92	0.69	190.4	13.19	75.54	22.87	14.68	6.00	-
6	12	748	22.84	2.104	0.86	0.12	2.16	1.00	22.86	72.31	14.93	0.69	190.4	13.19	75.56	22.86	14.68	6.00	12.10
1	13	760	24.45	2.013	0.86	0.12	2.09	0.01	24.49	65.56	12.70	0.66	255.2	12.63	65.69	24.47	12.70	6.50	-
2	13	759	24.18	2.015	0.86	0.12	2.10	0.04	24.41	65.87	12.79	0.66	249.1	12.69	66.84	24.27	12.82	6.50	-
3	13	756	23.50	2.025	0.86	0.12	2.11	0.16	24.11	67.06	13.16	0.67	230.4	12.90	70.27	23.69	13.23	6.50	-
4	13	750	22.88	2.057	0.86	0.12	2.15	0.46	23.53	69.46	13.93	0.67	202.1	13.18	75.14	22.94	14.04	6.50	-
5	13	748	22.87	2.101	0.86	0.12	2.16	1.00	22.93	72.04	14.83	0.68	190.3	13.18	75.20	22.93	14.68	6.50	-
6	13	748	22.86	2.101	0.86	0.12	2.16	1.00	22.91	72.09	14.85	0.68	190.3	13.18	75.26	22.91	14.68	6.50	12.04

Resultado simulação: lote 3, tela 4.



SeeDry v.01 - 2005

developed by Daniel Guimarães

Camad	Int	ME	Tsem	Pv	VolEsp	R	Csem	MRI	Teq	UReq	Meq	MRf	DeltaL	RM	UR	T	M	tempo	Mmed
1	14	760	24,47	2.013	0,86	0,12	2,09	0,00	24,49	65,55	12,70	0,65	255,5	12,62	65,63	24,48	12,70	7,00	-
2	14	759	24,27	2.014	0,86	0,12	2,09	0,03	24,44	65,77	12,76	0,65	251,2	12,67	66,45	24,34	12,78	7,00	-
3	14	757	23,69	2.022	0,86	0,12	2,11	0,12	24,21	66,68	13,04	0,66	236,2	12,83	69,22	23,87	13,10	7,00	-
4	14	752	22,94	2.047	0,86	0,12	2,14	0,33	23,68	68,83	13,73	0,66	209,3	13,10	73,85	23,13	13,82	7,00	-
5	14	748	22,93	2.089	0,86	0,12	2,16	1,00	23,09	71,34	14,58	0,66	190,3	13,19	75,28	22,91	14,61	7,00	-
6	14	748	22,91	2.102	0,86	0,12	2,16	1,00	22,91	72,09	14,85	0,67	190,3	13,19	75,28	22,91	14,68	7,00	11,98

Resultado simulação: lote 3, tela 5.

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)