

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAIBA
CENTRO DE CIENCIAS E TECNOLOGIA
CURSO DE POS-GRADUACAO EM ENGENHARIA AGRICOLA

**DETERMINAÇÃO DAS VAZÕES MÍNIMAS DE AR PARA SECAGEM DE MILHO
A BAIXAS TEMPERATURAS NO ESTADO DA PARAIBA**

CAMPINA GRANDE - PARAIBA

JUNHO - 1991



S586d Silva, Mozaniel Gomes da
Determinação das vazões mínimas de ar para secagem de milho a baixas temperaturas no Estado da Paraíba / Mozaniel Gomes da Silva. - Campina Grande, 1991.
90 f.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal da Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia.

1. Milho - 2. Secagem - 3. Cultura de Milho - 4. Engenharia Agrícola 5. Dissertação I. Mata, Mario Eduardo R. M. Cavalcanti, M.Sc. II. Martins, Jose Helvecio, Dr. III. Universidade Federal da Paraíba - Campina Grande (PB)

CDU 633.15(043)

DETERMINAÇÃO DAS VAZÕES MÍNIMAS DE AR PARA SECAGEM DE MILHO
A BAIXAS TEMPERATURAS NO ESTADO DA PARAÍBA

Hozaniel Gomes da Silva

Dissertação Aprovada em 18 de Junho de 1991.

Mario E. M. Cavata

Prof. MARIO EDUARDO R. M. CAVALCANTI MATA

Orientador

Jose Helvecio Martins

Prof. JOSE HELVECIO MARTINS

Co-Orientador

Kepler Borges Franca

Prof. KEPLER BORGES FRANÇA

Examinador

CAMPINA GRANDE - PB

JUNHO - 1991

MOZANIEL GOMES DA SILVA

DETERMINAÇÃO DAS VAZÕES MÍNIMAS DE AR PARA SECAGEM DE MILHO
A BAIXAS TEMPERATURAS NO ESTADO DA PARAIBA

*Dissertação apresentada ao Curso
de Mestrado em Engenharia
Agrícola da Universidade Federal
da Paraíba, como parte das
exigências para obtenção do Grau
de Mestre.*

AREA DE CONCENTRAÇÃO: Processamento e Armazenamento de
Produtos Agrícolas.

ORIENTADOR: Prof. Mário Eduardo R. M. Cavalcanti Mata - Prof.
Adjunto - (M.Sc.)

CO-ORIENTADOR: Prof. José Helvecio Martins - Prof. Adjunto
- (Ph.D)

CAMPINA GRANDE - PB

JUNHO - 1991

DEDICATORIA

A

Meus pais

Minha esposa Olivia

Meus filhos Renale e Rafael

AGRADECIMENTOS

A Universidade Federal da Paraíba - UFPb, através do Departamento de Engenharia Agrícola, pela oportunidade oferecida para a realização do Curso de Mestrado em Engenharia Agrícola.

Ao Núcleo de Tecnologia em Armazenagem - NTÁ, que tornou possível a realização deste trabalho.

Ao III Distrito de Meteorologia do Nordeste, pela cessão dos dados climatológicos utilizados neste trabalho.

A Oficina Mecânica do Campus II da UFPb, pela construção do secador experimental.

Ao professor Mário Eduardo R. M. Calvalcanti Mata, pela orientação, ensinamento e amizade.

Ao professor José Helvecio Martins, pela orientação e pelas sugestões indispensáveis.

Aos colegas do curso de Pós-Graduação, pela convivência e amizade.

Aos funcionários do Núcleo de Tecnologia em Armazenagem, pelo auxílio durante a realização deste trabalho.

INDICE

| | PAGINA |
|---|--------|
| LISTA DE FIGURAS..... | v |
| LISTA DE TABELAS..... | vi |
| RESUMO..... | vii |
| SINOPSE..... | viii |
| 1. INTRODUÇÃO..... | 1 |
| 2. REVISÃO DE LITERATURA..... | 4 |
| 2.1. Secagem à Razão Constante..... | 7 |
| 2.2. Secagem à Razão Decrescente..... | 8 |
| 2.3. Secagem em Camada Fina..... | 9 |
| 2.4. Equações de Secagem em Camada Fina..... | 10 |
| 2.5. Unidade de Equilíbrio..... | 14 |
| 2.6. Equações de Secagem em Camada Espessa..... | 23 |
| 2.7. Vazões Mínimas para Secagem a Baixa Temperatura..... | 27 |
| 2.8. Classificação Climática do Estado R. Paraíba..... | 28 |
| 3. MATERIAIS E MÉTODOS..... | 31 |
| 3.1. Procedimento Experimental..... | 33 |
| 3.1.1. Matéria Prima..... | 35 |
| 3.1.2. Secador Experimental..... | 38 |
| 3.1.3. Secagem em Camada Espessa..... | 36 |
| 3.1.4. Simulação Computacional de Secagem em Camada Espessa..... | 39 |

| | PAGINA |
|---|--------|
| 3.1.5. Validação do Modelo Matemático..... | 44 |
| 3.1.6. Determinação das Vazões Mínimas..... | 45 |
| 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO..... | 49 |
| 5. RESUMO E CONCLUSÕES..... | 69 |
| 6. LITERATURA CITADA..... | 71 |
| APENDICE A..... | 75 |
| APENDICE B..... | 82 |

LISTA DE FIGURAS

| FIGURA | | PAGINA |
|--------|--|--------|
| 1 | Mapa Climatológico do Estado da Paraíba..... | 32 |
| 2 | Secador Experimental: Vista Superior (Topo) e Corte Longitudinal (Abaixo)..... | 34 |
| 3 | Secador Experimental (Perspectiva)..... | 35 |
| 4 | Comparação dos Dados Teóricos e Experimentais para Campina Grande - PB..... | 55 |
| 5 | Comparação dos Dados Teóricos e Experimentais para João Pessoa - PB..... | 56 |
| 6 | Valores Mínimos para Secagem de Milho a Baixas Temperaturas Determinadas em Campina Grande-PB no Período de 1975 a 1989..... | 64 |
| 7 | Valores Mínimos para Secagem de Milho a Baixas Temperaturas Determinadas em João Pessoa-PB no Período de 1976 a 1989..... | 65 |
| 8 | Valores Mínimos para Secagem de Milho a Baixas Temperaturas Determinadas em Patos-PB no Período de 1976 a 1989..... | 66 |

LISTA DE TABELAS

| TABELA | PAGINA | |
|--------|--|----|
| 1 | Condições de secagem para Campina Grande e João Pessoa-PB..... | 50 |
| 2 | Teores de umidade experimentais e simulados para Campina Grande-PB..... | 51 |
| 3 | Teores de umidade experimentais e simulados para João Pessoa-PB..... | 53 |
| 4 | Condições para determinação das vazões mínimas de ar para secagem em Campina Grande, João Pessoa e Patos-PB..... | 55 |
| 5 | Vazões mínimas para secagem em Campina Grande-PB (1975 - 1989)..... | 59 |
| 6 | Vazões mínimas para secagem em João Pessoa-PB (1976 - 1989)..... | 60 |
| 7 | Vazões mínimas para secagem em Patos-PB (1976 - 1989)..... | 61 |
| 8 | Vazões mínimas indicadas para secagem em Campina Grande, João Pessoa e Patos-PB..... | 67 |

RESUMO

Baseado na classificação climática de C.W. THORNTHWAITTE (1948) estabeleceu-se as cidades de Campina Grande e João Pessoa-Pb, para a realização dos testes de secagem de milho híbrido (Zea mays L.) a baixas temperaturas, para validação do modelo original de THOMPSON (1967), modificado com a introdução da equação de camada fina proposta por MISRA e BROOKER (1980). Simulou-se a secagem de milho para as condições médias registradas nos testes de campo e compararam-se os resultados teóricos e experimentais.

A comparação dos dados experimentais com os simulados, através do teste de qui-quadrado, demonstrou a validade do modelo de THOMPSON (1967), modificado com a inserção da equação de camada fina proposta por MISRA e BROOKER (1980), para a simulação de secagem de milho híbrido a baixas temperaturas.

Sendo o modelo de MOREY et alii (1976) um aperfeiçoamento do modelo de THOMPSON (1967), introduziu-se ao primeiro a equação de camada fina proposta por MISRA e BROOKER (1980), para determinação das vazões mínimas de ar para secagem de milho a baixas temperaturas no Estado da Paraíba.

Os resultados mostraram que as vazões mínimas médias indicadas para o Estado da Paraíba variam de 4,42 a 12,88 m³/min por tonelada de grãos, exceto para a região Árida.

ABSTRACT

Based on THORNTWAITE climatic classification (1948), were established Campina Grande and Joao Pessoa cities in Paraiba State, to take place the drying processes hibrid corn (Zea mays L.), using low-temperature flow air. The model drying developed by THOMPSON (1967), modified with thin-layer drying equation proposed by MISRA & BROOKER (1980), is used as a basis for simulation the deep-bed drying process. The average input conditions (plenum temperature, relative humidity air) were used as data to the model for simulating moisture changes in the drying tests. The comparison of the computed and measured results showed the suitability of the model.

The model developed by MOREY et alii (1976) modified with thin-layer equation proposed by MISRA & BROOKER (1980), is used for determination of the minimum air flow to drying hibrid corn with low-temperature air.

Results showed the indicated air flows to hibrid corn drying in Paraiba State vary an range of 4,42 to 12,88 $m^3/min.t$, except to the arid region.

1. INTRODUÇÃO

Com uma produção em torno de 21,3 milhões de toneladas em 1990 a cultura do milho no Brasil está definitivamente consolidada, colocando o país em posição de destaque no cenário mundial como terceiro produtor, com cerca de 5% da produção total.

A secagem de grande parte da produção de milho no estado da Paraíba é processada de forma natural, ou seja, na própria planta ou no terreiro, enquanto aguarda a debulha. O elevado índice de infestação de pragas decorrente da aplicação deste método de secagem pode causar grandes perdas e danos ao produto durante o armazenamento.

A secagem artificial a baixas temperaturas é um método de secagem de grãos que utiliza como agente desumidificante o ar à temperatura ambiente ou levemente aquecido (1 a 5°C). Tem como objetivo fundamental a redução do teor de umidade do produto a um nível adequado à sua estocagem por um período determinado.

O sucesso da operação de secagem a baixas temperaturas depende, em grande parte, da determinação das vazões mínimas de ar adequadas, a serem aplicadas ao sistema de secagem. A utilização de vazões de ar abaixo do valor conveniente provoca demora no processo de secagem, podendo comprometer a qualidade do produto. Já a utilização de fluxo

de ar acima do valor adequado, apesar de reduzir o tempo de secagem, resulta num aumento do consumo de energia para acionamento do motor, onerando, portanto, os custos de operação do sistema (QUEIROZ *et al.*, 1987).

Para a determinação das vazões mínimas, adequadas à secagem de milho a baixas temperaturas, é indispensável o uso de um modelo de simulação matemática de secagem e sua posterior validação, mediante comparação dos resultados simulados com os experimentais, além de uma série de dados climáticos da região com um mínimo de dez anos de registro (QUEIROZ *et al.*, 1987).

Ao modelo matemático de secagem devem ser incorporadas equações para prever a perda de matéria seca dos grãos (deterioração), como função do tempo de exposição do produto a determinadas condições de secagem (QUEIROZ *et al.*, 1987).

O presente trabalho teve, especificamente, os seguintes objetivos:

- 1 - A partir da classificação climática proposta por C.W. THORNTON (1948), selecionar cidades climaticamente representativas das regiões do Estado da Paraíba, para realização das secagens experimentais.
- 2 - Realizar secagens experimentais em camada espessa nas cidades selecionadas visando à

validação do modelo desenvolvido por THOMPSON (1967), modificado com a introdução da equação de camada fina proposta por MISRA e BROOKER (1980) para secagem de milho.

- 3 - Determinar vazões mínimas de ar para secagem de milho a baixas temperaturas no Estado da Paraíba utilizando o modelo proposto por MONEY et alii (1976), com a inserção da equação de camada fina proposta por MISRA e BROOKER (1980).

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
Prof. Heltoni Paiva - Departamento de Física
Coordenador Setorial de Engenharia
Rua Américo Veloso, 882 - Tel. (833) 321-7222-R 355
68.100 - Campina Grande - Paraíba

2. REVISAO DE LITERATURA

A operação unitária de secagem é uma importante etapa na produção e processamento de grãos, envolvendo, simultaneamente, fenômenos de transferência de calor e massa entre o grão e o agente desumidificador, e tem por finalidade reduzir o teor de umidade dos produtos a níveis adequados de estocagem por um período prolongado.

Segundo BROOKER et alii (1974); Fortes & Okos (1980), Keey (1982) e Luikov (1964), citados por NEVES (1984), os mecanismos propostos para o movimento de umidade em sólidos são:

- a) difusão de líquido devido ao gradiente de concentração;
- b) difusão de vapor devido ao gradiente de pressão;
- c) movimento de água devido a forças capilares;
- d) fluxo de líquido e vapor, devido a diferenças de pressão total, causado pela pressão externa, contração, alta temperatura e capilaridade;
- e) escoamento por efusão (escoamento de Knudsen), que ocorre quando o caminho livre das moléculas de vapor é da ordem do diâmetro dos poros do material;

f) movimento de líquido devido à força gravitacional, sempre negligenciada, desde que não influencie significativamente na secagem de alimentos;

g) difusão superficial, praticamente desprezível.

De acordo com MARTINS e MATA (1984), vários produtos biológicos, quando estão sendo secos individualmente ou em camada fina, apresentam uma perda de umidade a uma taxa constante durante o período inicial de secagem, seguido por um período de secagem a uma taxa decrescente. Todavia, a secagem de grãos e cereais, geralmente, ocorre inteiramente no período com taxa decrescente.

Outros produtos biológicos, inclusive os grãos e cereais, quando submetidos a secagem em lotes, ao invés de em partículas individuais ou camada fina, apresentam, inicialmente, um período de secagem a uma taxa constante. Isto é devido a diferença entre o comportamento de um grão individualmente e uma camada espessa de grãos (BROOKER *et alii*, 1974).

2.1. Secagem a Taxa Constante

Durante o período de secagem a taxa constante, a umidade do grão é suficiente para manter a água na superfície do produto, de maneira semelhante a uma área de água livre, constantemente exposta às mesmas condições ambientais (SHERWOOD, 1975).

De acordo com MARTINS e MATA (1984), a taxa de secagem de produtos biológicos com teor de umidade inicial acima de 70 a 75% durante o primeiro período de secagem é função de três parâmetros externos: (1) velocidade do ar, (2) temperatura do ar e (3) umidade relativa do ar. Se as condições ambientais forem constantes a taxa de secagem também será.

Henderson e Ferry, citados por MARTINS e MATA (1984), a partir dos balanços de calor e massa do termómetro de bulbo úmido, derivaram uma expressão que descreve a taxa de secagem durante o período de razão constante.

$$\frac{du}{dt} = \frac{h_a A}{K_v T_{wb}} (P_s - P_a) = \frac{h_a A}{h_{rg}} (T_a - T_{wb}) \quad (1)$$

onde,

du/dt = taxa de secagem, kg de água.h⁻¹

A = área da superfície exposta, m²

T_{wb} = temperatura da água superficial -
temperatura do bulbo úmido, K

T_a = temperatura do ar, K

P_s = pressão de saturação do vapor d'água na
temperatura do bulbo úmido, Pa

P_a = pressão do vapor d'água existente no ar, Pa

t = tempo, h

h_m = coeficiente de transferência de massa por convecção, $\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$

R_v = constante específica do gás (vapor d'água)
($288 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)

T_{amb} = temperatura absoluta do ar, K

h = coeficiente de transferência de calor,
 $\text{J}\cdot\text{m}^{-2}\cdot^\circ\text{C}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$

h_{fg} = calor latente de vaporização, $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$

De acordo com HALL (1971), o ponto final do período de secagem a razão constante ocorre quando a taxa de difusão de unidade dentro do produto decresce abaixo do necessário para reabastecer a superfície do produto.

A determinação da taxa de secagem constante pela equação (1) é possível se a área superficial A e os coeficientes h_m e h forem conhecidos. Algumas vezes é difícil obter valores precisos para h_m , h e A , por causa da heterogeneidade da forma dos produtos biológicos (BROOKER *et alii*, 1974).

MELDMAN (1975) sugere uma aproximação comumente usada envolvendo o número de Lewis (Le), para a determinação do coeficiente de transferência de massa por convecção (h_m) durante a secagem a razão constante.

$$\text{Le} = \frac{h}{h_m c_p} \quad (2)$$

em que,

Le = número de Lewis

c_p = calor específico, $\text{cal.g}^{-1}\text{°C}^{-1}$

h_m = coeficiente de transferência de massa,
 $\text{g moles . h}^{-1} . \text{cm}^{-2}$

h = coeficiente de transferência de calor,
 $\text{cal.h}^{-1} . \text{cm}^{-2} . \text{K}^{-1}$

Na secagem a razão constante o número de Lewis é aproximadamente igual a unidade.

2.2 - Secagem a Taxa Decrescente

Alcançado o teor de umidade crítico, a secagem procede-se à razão decrescente. Neste período, a superfície do produto não se encontra coberta por uma fina camada d'água como no caso da secagem a razão constante, porque a resistência interna ao transporte de água se torna maior que a resistência externa para a evaporação. À medida que o teor de umidade vai decrescendo abaixo do teor de umidade crítico, o potencial motriz do processo de secagem $P_v - P_{v_s}$, decresce junto com a taxa de secagem. Aparece também um gradiente de umidade no interior do produto e sua temperatura se eleva acima da temperatura de bulbo úmido (BROOKER *et alii*, 1974).

De acordo com HELDMAN (1975) a taxa de transporte de umidade através de um sólido é dada pela expressão:

$$N_A = -K A \left(\frac{dP}{dx} \right) \quad (3)$$

em que,

N_e = fluxo de massa, kg moles.hr⁻¹

K = constante de transporte de unidade para líquido ou vapor

A = área da seção transversal do poro, cm² ou m²

dp/dx = direção da força motriz do movimento de unidade

O coeficiente K na Equação (3) pode tomar várias formas dependendo do mecanismo de movimento de unidade (HELDMAN, 1975).

2.3. Secagem em Camada Fina

A descrição do processo de secagem para camada fina é de suma importância uma vez que na maioria dos casos a secagem de grãos ocorre em período à razão decrescente. Isto quer dizer que o teor de unidade encontra-se a um nível em que a resistência ao movimento de unidade no interior do grão determina a taxa a qual o produto perde unidade (MUREY *et alii*, 1978).

De acordo com Thompson (1967) e Bakker-Arkema *et alii* (1974), citados por MARTINS (1989), o estudo das taxas de secagem em camada fina é de grande relevância na modelagem de secagem em camada espessa. Durante muitos anos vários pesquisadores coletaram dados de secagem de milho em camada fina sob diferentes condições (LI e MUREY, 1984; MISRA e BROOKER, 1980). Na maioria dos casos estes dados têm sido

usados para ajustar equações, geralmente as empíricas, as quais tem sido usadas para descrever alguns modelos de secagem em camada fina usando algumas equações de umidade de equilíbrio encontradas na literatura (MARTINS, 1988).

2.4. Equações de Secagem em Camada Fina

A secagem é um processo contínuo onde ocorrem, simultaneamente, variações no teor de umidade e temperatura do grão, razão de umidade e temperatura do ar. THOMPSON (1967), dividiu o processo de secagem em etapas (incluindo temperatura de equilíbrio entre o ar e os grãos, umidade removida e resfriamento evaporativo do ar) a fim de facilitar a simulação do processo através de um modelo matemático. Para a secagem em camada fina THOMPSON, (1967) obteve a seguinte equação através de análise de regressão:

$$t = A \ln(MR) + B [\ln(MR)]^2 \quad (4)$$

em que,

t = tempo de secagem, h

A, B = constantes características do grão

MR = razão de umidade = $(M - M_e) / (M_0 - M_e)$

M = teor de umidade no tempo t , decimal b.s.

M_e = teor de umidade de equilíbrio, decimal b.s.

M_0 = teor de umidade inicial, decimal b.s.

Avaliando os parâmetros A e B na equação (4), utilizando dados de secagem em camada fina, obtidos em testes de laboratórios, THOMPSON (1967) encontrou que esses

parâmetros são funções da temperatura do ar de secagem. Através de análise de regressão ele obteve um bom ajuste desses parâmetros em função da temperatura do ar de secagem. As equações que forneceram melhor ajuste para o milho foram:

$$A = a_1 + a_2 T \quad (5)$$

$$B = b_1 + \exp(b_2 T) \quad (6)$$

em que,

$$a_1 = -1,86173$$

$$a_2 = 0,004894$$

$$b_1 = 427,324$$

$$b_2 = -0,03301$$

T = temperatura do ar de secagem, °F

MISRA e BROOKER (1980) realizaram testes experimentais para obtenção de dados de secagem e reumedecimento de milho nas faixas de temperatura e razão de umidade do ar para as quais havia, na literatura, limitações ou inexistência de dados. Baseados nos dados disponíveis na literatura e por eles obtidos, desenvolveram a equação de camada fina descrita a seguir:

$$M = (M_0 - M_\infty) \exp(-Kt^n) + M_\infty \quad (7)$$

em que,

$$K = \exp(-7,1735 + 1,2793 \ln(1,8T + 32) + 0,1378V)$$

unidades SI

$$K = \exp (-7,1735 + 1,2793 \ln (T) + 0,0007v)$$

Sistema inglês de unidades.

$$n = 0,811 \ln(H) + 0,0078 M_0$$

v = velocidade do ar, m/s

H = umidade relativa do ar de secagem, %

As variáveis independentes usadas no desenvolvimento da equação acima são:

- Temperatura de secagem: 2,2 °C a 71,1 °C
- Umidade relativa do ar de secagem: 3 a 83%
- Teor de umidade inicial do milho: 18 a 40% (b.s.)
- Velocidade do ar de secagem: 0,025 a 2,33 m.s⁻¹

Os autores mostraram que de todas as variáveis independentes consideradas, a temperatura do ar de secagem e a velocidade do ar afetam significativamente o parâmetro K na equação de secagem em camada fina. O parâmetro n na Equação (7) é função da umidade relativa do ar e do teor de umidade inicial do milho. Finalmente, concluíram que devido a heterogeneidade dos dados, era necessário estabelecer um método padrão para conduzir testes de secagem em camada fina.

TROEGER e HUKILL (1971) propuseram um modelo de secagem em camada fina na forma:

$$\frac{dM}{dt} = -K(M - M_0)^n \quad (8)$$

em que,

M = teor de umidade no tempo t , decimal b.s.

M_{∞} = teor de umidade de equilíbrio, decimal b.s.

t = tempo de secagem

K = constante de secagem t^{-1}

n = constante característica do milho

Hamdy e Barre, citados por MARTINS (1982), propuseram o seguinte modelo de secagem em camada fina:

$$\dot{Q}_a(c_a + c_v W) \frac{\partial T}{\partial y} = -\rho_p [(c_p + c_v W) \frac{\partial \theta}{\partial t} - [\lambda + c_v(T - \theta)] \frac{\partial \theta}{\partial t}] \quad (9)$$

em que,

\dot{Q}_a = fluxo de massa do ar de secagem, $\text{kg.s}^{-1}.\text{m}^{-2}$

c_a = calor específico do ar seco, $\text{J.kg}^{-1}\text{K}^{-1}$

c_v = calor específico do vapor d'água, $\text{J.kg}^{-1}\text{K}^{-1}$

ρ_p = massa específica do produto, kg.m^{-3}

W = razão de umidade do ar, adimensional

θ = temperatura do produto, K

Estudando equações para secagem em camada fina, com ar natural, Sabbah citado por MARTINS (1982), trabalhou com milho em espessura de um grão, em condições controladas de temperatura (2 a 21 °C) e umidade relativa (70 a 80%), e desenvolveu a expressão:

$$MR = \exp(-Kt^{0.664}) \quad (10)$$

em que,

$$MR = \text{razão de unidade do produto, } BR = \frac{M - M_{\infty}}{M_0 - M_{\infty}}$$

decimal, adimensional.

M = unidade do produto no tempo t , base seca

M_0 = unidade inicial do produto ($t=0$), base seca

M_{∞} = unidade de equilíbrio do grão, base seca

$$K = \exp(-xt^y)$$

t = tempo, h

$$x = (6,0142 + 0,0001 R^2)^* - 0,01 T(3,353 + 0,001 R^2)^*$$

$$y = 0,1245 - 0,0022R + 2,3 \cdot 10^{-6} RT - 5,8 \cdot 10^{-8} T$$

R = unidade relativa do ar, decimal

T = temperatura do ar de secagem, °F

DEL GIUDICE (1959) desenvolveu uma equação de reumedecimento em camada fina para as condições de temperaturas de 15 a 40 °C e unidade relativa de 60 a 100%, com vazões de ar de 10 pés³/min:

$$MR = \exp[-0,625(P_{\infty})^{0,466R} (R^2)t] \quad (11)$$

em que,

P_{∞} = pressão de vapor de saturação à temperatura de bulbo seco, Pa.

R = unidade relativa, %

t = tempo

FLOOD et alii (1969), analisando os resultados obtidos da simulação de secagem de milho a baixa temperatura (2 a 21 °C), utilizando as equações de SABRAH (1966) e DEL GIUDICE (1959) concluíram que:

1. Para as condições de temperatura e umidade estudadas, os grãos poderiam secar a menos de 18% de umidade (base úmida) sem perda de qualidade, no período de 1952-1961, exceto para o ano de 1958.
2. O baixo teor de umidade dos grãos melhorou os resultados em termos de aumento do teor de umidade médio do grão, diminuindo os custos de energia de secagem.
3. Diminuindo-se a quantidade de grãos colocados em silos nos anos excepcionalmente úmidos, permitiria maior sucesso na secagem onde a operação normal resultasse em insucesso.

Page, (1949) citado por MARTINS (1988), sugeriu a seguinte expressão para o modelo de secagem em camada fina:

$$MR = \exp(-Kt^n) \quad (12)$$

em que,

$$MR = \text{razão de umidade} = (M - M_e) / (M_0 - M_e)$$

M = teor de umidade no tempo t, decimal, base seca

M_e = teor de umidade de equilíbrio, base seca

M₀ = teor de umidade inicial do produto, base seca

t = tempo de secagem, minuto

K, n = constantes características do grão

Os parâmetros K e n na Equação (12) são funções da temperatura do ar de secagem e do teor de umidade inicial. A forma matemática para esta expressão depende do tipo de grão e da variedade do grão em consideração. Em geral são expressas como:

$$K = f(T, M_0) \quad (13)$$

$$n = g(T, M_0) \quad (14)$$

em que,

T = temperatura de secagem, °C

M_0 = teor de umidade inicial, base seca

LI e MOREY (1984) utilizaram o modelo de PAGE Equação (12) para descrever a secagem em camada fina de grãos de milho oriundos das safras de 1981 e 1982 com temperaturas de secagem variando na faixa de 27 a 116 °C e teor de umidade inicial de 23 a 36%, base seca.

Inicialmente mostraram que o uso da Equação (12) deve ser procedido com a unidade de tempo em minuto para uma maior exatidão dos dados a serem obtidos.

Determinaram o efeito da temperatura do ar de secagem sobre os parâmetros K e n , separadamente, para as duas safras. As equações para estes parâmetros são:

Para a colheita de 1981:

$$K = 2,216 \times 10^{-2} + 1,113 \times 10^{-4}T + 3,435 \times 10^{-6}T^2$$

com um R^2 ajustado de 0,997.

$$n = 0,5409 + 1,498 \times 10^{-3}T + 2,561 \times 10^{-6}T^2$$

com um R^2 ajustado de 0,987.

Para a colheita de 1982:

$$K = 1,026 \times 10^{-2} + 2,551 \times 10^{-4}T + 2,820 \times 10^{-6}T^2$$

com um R^2 ajustado de 0,993.

$$n = 0,6057 + 1,368 \times 10^{-4}T + 9,60 \times 10^{-6}T^2$$

com um R^2 ajustado de 0,991.

LI e MOREY (1984), a partir de dados da safra de 1982, determinaram os parâmetros K e n como função da temperatura do ar de secagem e umidade inicial do milho, através de regressão:

$$K = 1,091 \cdot 10^{-2} + 2,767 \cdot 10^{-6}T^2 + 7,286 \times 10^{-6}T Mo$$

com R^2 ajustado de 0,996

$$n = 0,5375 + 1,141 \times 10^{-3} Mo^2 + 5,183 \times 10^{-3}T^2$$

com um R^2 ajustado de 0,975

Finalmente concluíram que:

1. A temperatura do ar de secagem tem maior efeito significativo sobre a taxa de secagem entre as

variáveis estudadas em suas respectivas faixas: temperatura 27 a 116 °C ; fluxo de ar 0,1 a 0,5 $m^3 \cdot s^{-1} \cdot m^{-2}$, teor de umidade inicial de 23 a 36% base seca; umidade relativa de 5 a 40%.

2. As taxas de fluxo de ar na faixa de 0,1 a 0,5 $m^3 \cdot s^{-1} \cdot m^{-2}$ tem pouco efeito na taxa de secagem.
3. O teor de umidade inicial afeta significativamente a razão de umidade.
4. A umidade relativa afeta a razão de umidade, mas o efeito é relativamente menor a razões de umidade mais altas e pode provavelmente ser desprezada no desenvolvimento de modelos de simulação de secagem em camada espessa.
5. A baixas temperaturas, as diferenças entre as taxas de secagem, para a mesma variedade cultivada em anos diferentes, parece ser maior do que as diferenças, devido a taxas de fluxos de ar, umidade relativa, e, em alguns casos, teor de umidade inicial.
6. O modelo baseado na equação de PAGE (Equação (12)) é apropriado para descrever as taxas de secagem para milho nas faixas de temperatura e umidade relativa estudadas.

2.5. Umidade de Equilíbrio

O conceito de teor de umidade de equilíbrio está diretamente ligado a secagem e armazenamento de produtos agrícolas. O teor de umidade de equilíbrio determina a taxa de adsorção ou dessorção do produto em condições estabelecidas de temperatura e umidade relativa. De acordo com BROOKER *et alii* (1974), a umidade de equilíbrio é ainda dependente da espécie, variedade e estágio de maturação do grão. Termodinamicamente, o equilíbrio é alcançado quando a variação de energia livre do produto é zero. (HALL, 1966).

Diversos pesquisadores, estudando as relações entre umidade de equilíbrio do produto, umidade relativa e temperatura do ar, têm proposto diversas equações matemáticas e, segundo BROOKER *et alii* (1974), nenhuma equação teórica é ainda capaz de prever com exatidão, a umidade de equilíbrio para uma faixa ampla de umidade relativa e temperatura.

Henderson (1952), citado por MATA *et alii* (1985), propôs uma equação empírica, utilizando a equação de Gibbs, para as isotermas de equilíbrio higroscópico de materiais biológicos, cuja forma é a seguinte:

$$1-UR = \exp(-cTU_{\infty}^n) \quad (15)$$

em que,

UR = umidade relativa, decimal

T = temperatura do ambiente, °C

U_e = unidade de equilíbrio, % base seca

c e n = constantes características do produto

THOMPSON (1967) modificou a Equação (15) proposta por Henderson (1952) para milho, introduzindo uma constante ao termo de temperatura e propôs novos valores para os coeficientes já existentes no modelo. O modelo assim modificado tem a forma:

$$M_e = 0,01 \left[\frac{\ln(1-\phi)}{-C_1(T+C_2)} \right]^{1/02} \quad (16)$$

em que,

M_e = teor de unidade de equilíbrio, decimal, base seca

ϕ = unidade relativa de equilíbrio, decimal

T_e = temperatura de equilíbrio, °F

$C_1 = 3,919 \times 10^{-5}$

$C_2 = 2$

$C_3 = 50$

De acordo com MARTINS (1988), o modelo modificado de HENDERSON (1952) tem sido ajustado a dados de teores de unidade de equilíbrio de milho e outros grãos coletados por outros investigadores. A American Society of Agricultural Engineers (1988) recomenda para previsão do teor de unidade de equilíbrio do milho, quando a temperatura é dada em °C, a utilização dos seguintes coeficientes:

$$C_1 = 8,6541 \times 10^{-5}$$

$$C_2 = 1,8634$$

$$C_3 = 49,810$$

Chung e Pfost (1967), citados por MARTINS (1988), propuseram uma equação conspente usada na previsão do teor de umidade de equilíbrio.

$$\phi = \exp \left[\frac{-C_1}{RT} \exp(-C_2 M_w) \right] \quad (17)$$

em que,

ϕ = umidade relativa de equilíbrio, decimal

M_w = teor de umidade de equilíbrio, decimal b.s.

T = temperatura, °C

C_1, C_2 = constantes empíricas

R = constante universal dos gases,

$$\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{kgmol}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$$

Pfost et alii (1976), citado por MARTINS (1988), modificaram a Equação (17) adicionando um novo parâmetro ao termo de temperatura e combinaram a constante universal dos gases, R , com o novo parâmetro, de modo a obter melhor ajuste. A nova equação foi escrita como:

$$M_w = C_1 - C_2 \ln[-(T + C_3) \ln \phi] \quad (18)$$

em que,

C_1 são novas constantes empíricas.

Os valores para os coeficientes C_1 na Equação (18) são encontrados no Standard D245.4 (American Society of Agricultural Engineers, 1988). Para o milho esses valores são:

$$C_1 = 0,33872$$

$$C_2 = 0,058970$$

$$C_3 = 30,205$$

SILVA (1978), de acordo com KALCHIK et alii (1979), desenvolveu as seguintes equações para determinação da umidade de equilíbrio para milhos:

$$M_w = \frac{C_1 \varphi^{C_2}}{\ln(1,8T + 32,0) - C_1 \varphi^{C_2}} \quad (19)$$

$$\text{para } 0 \leq \varphi \leq 0,52$$

em que,

M_w = teor de umidade de equilíbrio, decimal, base seca

φ = umidade relativa de equilíbrio, decimal

T = temperatura, °C

$$C_1 = 0,6174$$

$$C_2 =$$

e

$$M_w = \frac{C_1 \exp(C_2 \varphi)}{\ln(1,8T + 32,0) - C_1 \exp(C_2 \varphi)} \quad (20)$$

$$\text{para } 0,52 < \varphi \leq 0,999$$

em que,

$$C_1 = 0,212198$$

$$C_2 = 1,46$$

2.6. Modelos de Secagem em Camada Espessa

Os modelos de secagem em camada fina não são adequados para o estudo da performance de secagem de grãos em camadas espessas. Neste caso, os parâmetros envolvidos sofrem alterações contínuas durante o processo de secagem, sendo necessária uma análise acurada de tais variações, tornando-se um problema de difícil solução analítica (MOREY et alii, 1978). De acordo com VILELA (1977), um modelo matemático completo que possa simular o processo de secagem em camada espessa deve conter equações que determinem as variações de temperatura e umidade tanto para o produto como para o ar.

No entanto, o estudo da secagem de grãos em camada fina é um importante componente no desenvolvimento de modelos de secagem de grãos em camada espessa (THOMPSON et alii, 1968).

Diversos autores (ALAN & SHOVE, 1973; BARRETT, et alii; CHIEN et alii. "Dimensional Analysis of Moisture Movement in Deep-Bed Drying"); (FLOOD, C.A.; SABBAN, M.A.; PEART, R.M. "Simulation of Natural Air Corn Drying Systems"); (MOREY, R.V.; KEENER, H.M.; THOMPSON, T.L.; WHITE, G.H.; BAKKER-ARKEBA, F.W. "The Present Status of Grain Drying Simulation". (THOMPSON, T.L.; PEART, R.M.; FOSTER, G.H.

"Mathematical Simulation of Corn Drying - A New Model), propuseram modelos matemáticos para simulação de secagem de grãos em camadas espessas. No entanto, nenhum dos modelos prediz as variações temporais das derivadas parciais da temperatura e da umidade do ar.

Spencer, citado por SINICIO (1983), após analisar os resultados experimentais de WOODFORD e LAWTON, concluiu que as diferenciais temporais da temperatura e umidade do ar correspondem a 2% das diferenciais espaciais, para secagem de milho a altas temperaturas (93,3 °C). Logo, considerando um regime quase estacionário, negligenciou as diferenciais temporais, em comparação com as diferenciais espaciais.

2.6.1. Modelo da Universidade Estadual de Michigan (MSU)

Os modelos de secagem desenvolvidos na Universidade Estadual de Michigan (E.U.A.) são baseados nas leis de transferência de calor e massa, que conduzem a sistemas de equações mais complicados e só podem ser resolvidos com a ajuda de computador (BROOKER *et alii*, 1974).

No desenvolvimento dos modelos de secagem de grãos da MSU foram assumidas as seguintes pressuposições (BROOKER *et alii*, 1974):

- a. o gradiente de temperatura dentro dos grãos, individualmente, é desprezível.
- b. a transferência de calor por condução é desprezível.

- c. o escoamento é em bloco (tipo "plug-flow").
- d. as paredes do silo são adiabáticas, com capacidades caloríficas desprezíveis.
- e. as capacidades caloríficas do ar e do grão são constantes em pequeno intervalo.
- f. uma equação fidedigna de secagem em camada fina e de umidade de equilíbrio é conhecida.
- g. a contração volumétrica dos grãos é desprezível.
- h. as variações da temperatura do ar e da razão de umidade do ar com o tempo são desprezíveis.

O modelo da MSU para secagem em camada estacionária é apresentado a seguir.

Modelo de Secagem em Camada Estacionária

O modelo de secagem em camada estacionária aqui mostrado está descrito com detalhes em MARTINS (1982).

Os balanços de massa e de energia são escritos para um volume diferencial (Sdy), em uma posição arbitrária da camada de grãos.

Balanco de Energia do ar:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = - \frac{h a (T - \theta)}{\epsilon \rho_a (c_a + c_w W)} - \frac{v_a}{\epsilon} \frac{\partial T}{\partial y} \quad (21)$$

em que,

h = coeficiente de transferência de calor por convecção, $W.m^{-2}.K^{-1}$

a = área específica, $m^2.m^{-3}$

T = temperatura do ar, K

θ = temperatura do grão, K

ϵ = porosidade da massa de grãos, decimal

ρ = massa específica, $kg.m^{-3}$

c = calor específico, $J.kg^{-1}.K^{-1}$

U = razão de umidade do ar, adimensional

v = velocidade, $m.s^{-1}$

y = profundidade da camada de grãos, m

t = tempo, s

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

Balanco de Energia do Grão

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{h a (T - \theta)}{\rho_p (c_p + c_w U)} - \frac{h r_w + c_v (T - \theta)}{\rho_p (c_p + c_w U)} - Q_w \frac{\partial w}{\partial y} \quad (22)$$

em que,

U = teor de umidade do produto, decimal h.s.

Q = fluxo de massa, $kg.s^{-1}.m^{-2}$

$h r_w$ = calor latente de vaporização de água no produto, $J.kg^{-1}$

Balanco de Massa do Ar

$$\frac{\partial W}{\partial t} = - \frac{1}{\epsilon \rho_a} \left[Q_a \frac{\partial W}{\partial y} + \rho_p \frac{\partial U}{\partial t} \right] \quad (23)$$

Balanco de Massa do Produto

O balanço de massa do produto é dado pela equação de secagem em camada fina. Portanto, pode-se escrever:

$$\frac{\partial U}{\partial t} = \text{uma equação de secagem em camada fina apropriada}$$

2.7. Vazões Mínimas para Secagem a Baixa Temperatura

A determinação de fluxos mínimos de ar para a secagem de um produto em determinada região é realizada mediante a utilização de um modelo matemático de simulação de secagem, implementado em computador (QUEIROZ *et alii*, 1987).

As vazões mínimas de ar, geralmente expressas em vazão de ar por unidade de volume do produto, dependem dos seguintes fatores:

- a) tipo de grão;
- b) potencial de secagem da região;
- c) teor de umidade inicial do produto.

O modelo matemático escolhido deve ser validado para a secagem do produto em questão, por meio de comparação entre os resultados simulados e experimentais de secagem do produto (QUEIROZ, *et alii*, 1987).

É necessário ter, também, um modelo matemático que expresse a decomposição de matéria seca em função do teor de umidade e temperatura do produto, para que seja incorporado ao modelo matemático de secagem (QUEIROZ et alii, 1987).

A região para a qual se quer determinar o fluxo de ar de secagem precisa ter uma estação meteorológica em que os dados de temperatura tenham sido coletados durante dez anos (QUEIROZ et alii, 1987).

O fluxo de ar mínimo é estabelecido como o maior ou como o segundo maior fluxo de ar determinado para os anos cujos dados meteorológicos foram coletados. O segundo maior fluxo tem sido o mais usado em sistemas de secagem a baixas temperaturas, uma vez que nesse caso, o sistema já apresenta uma probabilidade de sucesso de 90%. O dimensionamento do sistema utilizando o pior ano acarreta necessidade de potência mais elevada para acionar o ventilador. (QUEIROZ et alii, 1987).

2.8. Classificação Climática do Estado da Paraíba

Uma classificação climática implica na seleção de variáveis mais apropriadas (parâmetros climatológicos) e na subdivisão de suas respectivas amplitudes de variações em faixas, com o objetivo de discriminar diferentes situações de estudo prevalescente do tempo (SILVA, 1987).

De acordo com SILVA (1987), C.W. Thornthwaite (1948) estabeleceu bases de uma classificação climática -

também em escala mundial - utilizando a média do total mensal de precipitação e a temperatura média mensal do ar. Esta última para estimar a evapotranspiração potencial, necessária à elaboração do balanço hídrico.

A classificação climática de C.W. Thornthwaite prevê um número muito grande de tipos climáticos, conforme se conclui da análise dos critérios envolvidos.

1) Critério de Umidade, baseado no índice de umidade (I_m) definido no Atlas Climatológico do Estado da Paraíba:

| | | | |
|---------------|------------------|--------------------|---------------------|
| A Super-Úmido | $I_m > 100$; | C2 úmido sub-úmido | $20 > I_m > 0$; |
| B4 úmido | $100 > I_m > 80$ | C1 seco sub-úmido | $0 > I_m > -20$; |
| B3 úmido | $80 > I_m > 60$ | D semi-árido | $-20 > I_m > -40$; |
| B2 úmido | $60 > I_m > 40$ | E árido | $-40 > I_m$ |
| B1 úmido | $40 > I_m > 20$ | | |

2) Critério Térmico, baseado na evapotranspiração potencial anual (EP), definida no Atlas Climatológico do Estado da Paraíba,

| | | | |
|----------------|-------------------|-----------------|------------------|
| A Megatérmico | $Ep > 1440$ mm | C1 Microtérmico | $570 > EP > 427$ |
| B4 Mesotérmico | $1440 > EP > 997$ | C2 Microtérmico | $427 > EP > 285$ |
| B3 Mesotérmico | $997 > EP > 885$ | D Tundra | $285 > EP > 142$ |
| B2 Mesotérmico | $885 > EP > 712$ | E Gelo Perpétuo | $142 > EP$ |
| B1 Mesotérmico | $712 > EP > 570$ | | |

SILVA et alii (1987) analisando o resultado da aplicação da classificação climática proposta por C.W.

Thornthwaite para o Estado da Paraíba mostrou que, exceto nas regiões de maior amplitude, classificadas como mesotérmicas (B4 e B3), a maior parte do Estado encontra-se na faixa megatérmica (A). No tocante à umidade, porém, o Estado da Paraíba possui uma ampla faixa de categorias: do árido (E) ao "Ligeiramente" úmido (B1).

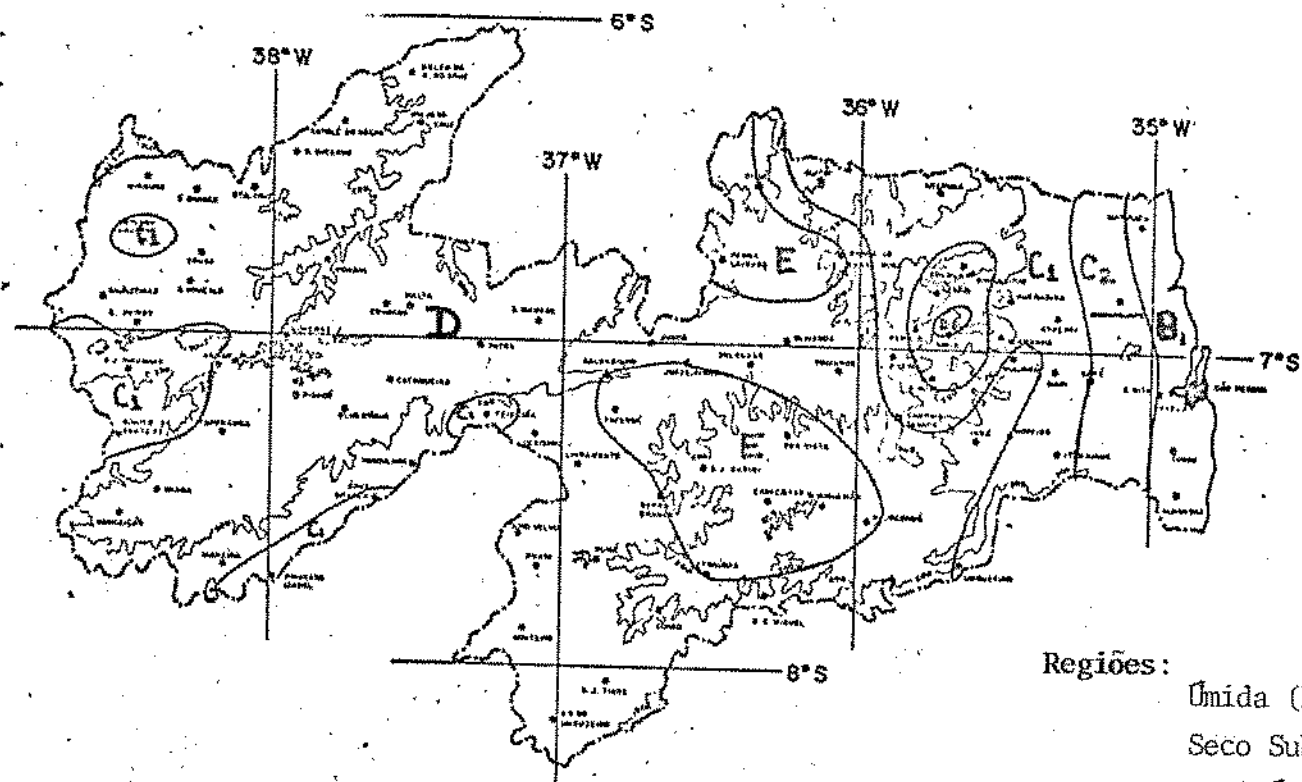
3. MATERIAIS E METODOS

Nas seções seguintes descrever-se os procedimentos utilizados nos testes experimentais de secagem de milho em camada espessa, simulação computacional e determinação das vazões mínimas de ar.

Este trabalho foi conduzido nos campi I e II da Universidade Federal da Paraíba localizados, respectivamente, nas cidades de João Pessoa e Campina Grande.

Inicialmente, de acordo com a classificação climática proposta por Thornthwaite, de acordo com SILVA (1987), procedeu-se a escolha das cidades de João Pessoa, Campina Grande e Patos para a realização dos testes de secagem em camada espessa, tendo em vista as mesmas apresentarem características climáticas representativas das regiões onde encontram-se encravadas, quais sejam: úmida, seco sub-úmida e semi-árida, respectivamente, abrangendo uma área física de aproximadamente 80% de todo o território paraibano (56.372 Km²), conforme mostrado na carta geográfica constante da Figura 1.

Salienta-se ainda que, segundo dados da EMATER-PB, as principais cidades produtoras de milho do Estado da Paraíba situam-se na faixa geográfica delimitada climatologicamente pelas três regiões.



- Regiões:
- Úmida (B₁)
 - Seco Sub-Úmida (C₁)
 - Semi-Árida (D)
 - Úmida Sub-Úmida (C₂)
 - Árida (E)

Figura 1. Mapa climatológico do estado da Paraíba delimitado pelo critério de umidade proposto por Thornthwaite.

3.1. Procedimento Experimental

3.1.1. Matéria-Prima

Nos testes de secagem em camada espessa foram utilizados grãos de milho híbrido (Zea mays L.) oriundos do Distrito de São José da Mata-PB, colhidos durante o mês de agosto de 1989. Após debulha manual os grãos foram submetidos a um processo de limpeza, apresentando um grau de impureza da ordem de 3,45%. Posteriormente foram acondicionados em sacos plásticos duplos e armazenados em câmara frigorífica a uma temperatura aproximada de 4 °C, com o objetivo de preservar suas características durante os testes experimentais.

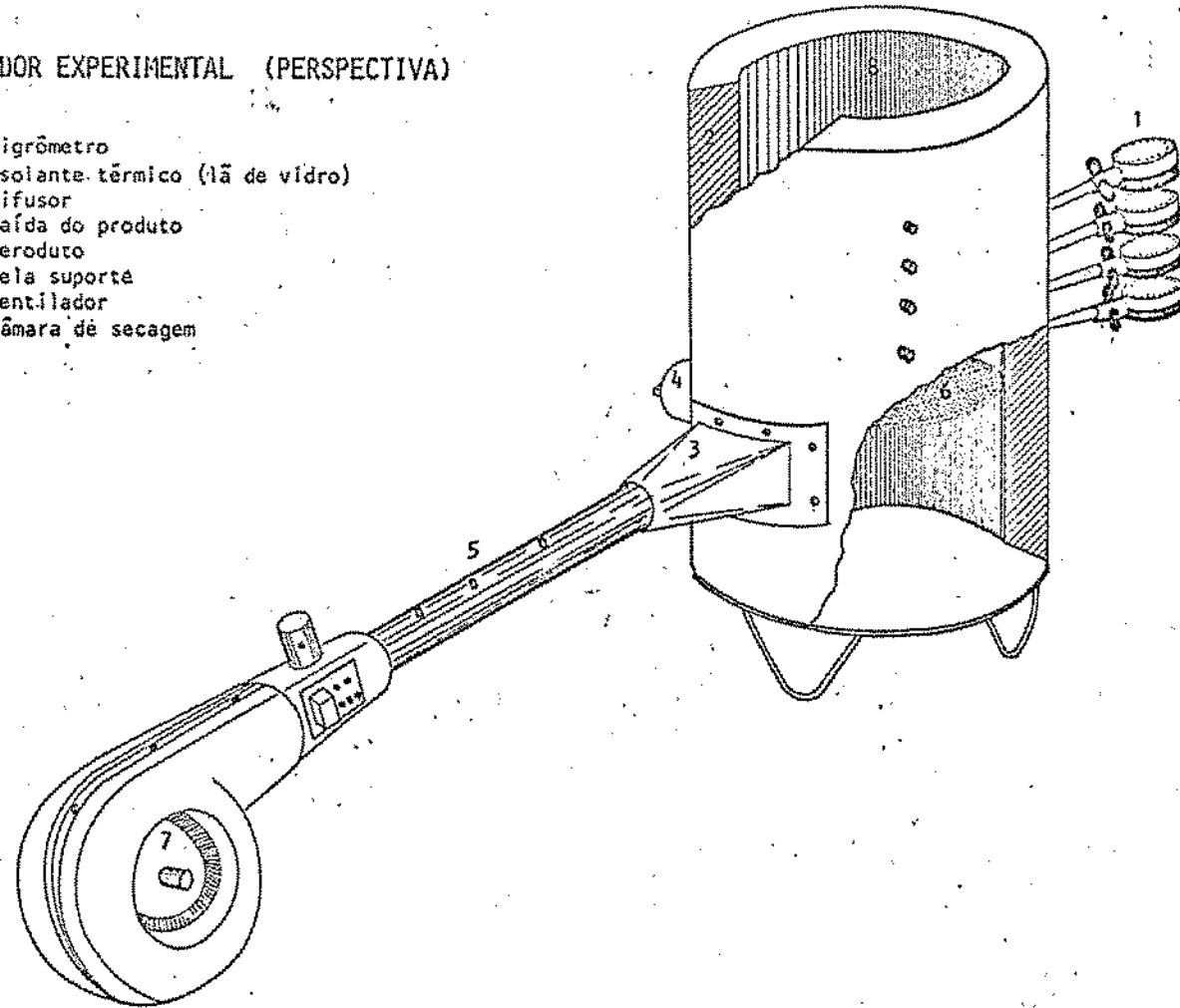
3.1.2. Secador Experimental

Construiu-se um secador experimental de leito fixo dotado de câmara de secagem constituída de dois cilindros metálicos com altura, diâmetros interno e externo medindo 0,70; 0,37 e 0,57 metros, respectivamente, isolados termicamente por uma camada de lã de vidro com espessura de 0,10 metros, além de tela suporte com área perfurada suficiente, necessária a distribuição uniforme do ar, plenum, aeroduto, ventilador centrifugo para impelir o agente desumidificante que atravessa a massa de grãos, e um motor de 0,5 CV.

Nesse protótipo, de seção única, comportando 4 camadas de grãos com espessura de 0,14m, foram instalados termopares na parte superior de cada camada e na entrada do

FIGURA 3 -- SECADOR EXPERIMENTAL (PERSPECTIVA)

- 1 Higrômetro
- 2 Isolante térmico (lã de vidro)
- 3 Difusor
- 4 Saída do produto
- 5 Aeroduto
- 6 Tela suporte
- 7 Ventilador
- 8 Câmara de secagem



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAIBA
Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos
Condomínio Saneatel da Fes-Condutação
Rua Aprígio Veloso, 882 - Tel. (083) 321-7222-R 355
58.100 - Campina Grande - Paraíba

planum, todos conectados a um registrador de temperatura de 10 canais do tipo Electro-Term HS-800, com precisão de leitura de $\pm 0,5$ °C. A umidade relativa do ar de secagem intergranular foi observada ao final de cada camada através de higrômetros do tipo René Graf (MAENI) ao longo da câmara de secagem.

3.1.3. Secagem em Camada Espessa

Os testes de secagem em camada espessa foram conduzidos em duas etapas, sendo realizados nas cidades de Campina Grande e João Pessoa-PB., nos períodos de Setembro de 1989 e Janeiro de 1990, respectivamente, tendo em vista essas cidades apresentarem as condições climáticas médias mais adversas à secagem de milho a baixas temperaturas.

Analisando-se os dados climatológicos relativos à cidade de Patos-PB., concluiu-se tratar da região com potencial de secagem mais elevado comparativamente com as demais cidades selecionadas, tornando-se desnecessário a realização de testes experimentais naquela região para fins de validação do modelo matemático de secagem utilizado neste trabalho.

Para cada teste de secagem determinou-se o teor de umidade inicial do produto, utilizando-se estufa com circulação de ar tipo Fanen 330, à temperatura de 130 °C durante o período de duas horas.

O secador experimental com capacidade

volumétrica de $0,07m^3$, comportando aproximadamente 50 quilogramas de milho, foi completamente cheio com o produto, sendo em seguida acionado o motor do ventilador, obtendo-se um fluxo uniforme de ar da ordem de $47,1 m^3/min.m^2$, medido continuamente durante os experimentos através de um anemometro de palhetas tipo VEB DRESDEN.

Nos testes de secagem com ar natural utilizou-se apenas o potencial de secagem de cada região, função da temperatura e umidade relativa do ar ambiente, suficiente para atingir o teor de umidade médio de 15% base seca, recomendável para a armazenagem de milho.

Estipulou-se, previamente, intervalos de tempo de três horas para retirada das amostras do produto através de furos laterais distribuídos ao longo da câmara de secagem, sendo imediatamente determinados teores de umidade de cada amostra, utilizando-se o método de estufa à $130 \pm 1^\circ C$ durante duas horas.

As condições ambientais de temperatura de bulbo seco e umidade relativa do ar foram registradas continuamente por um termohigrógrafo do tipo IH, devidamente instalado nos locais onde ocorreram os testes de secagem.

O registro de temperatura na entrada do plenum revelou que o ar de secagem foi levemente aquecido (1 a $4^\circ C$), em decorrência da transformação de energia cinética em energia térmica ocorrida pela ação do ventilador.

3.1.4. Simulação Computacional de Secagem em Camada Espessa.

A simulação de secagem em camada espessa estacionária foi realizada utilizando-se o modelo original de THOMPSON (1967) para secagem de milho, implementado em computador, nas mesmas condições para as quais foram obtidos os dados experimentais relativos às regiões de Campina Grande e João Pessoa-PB (Tabela 1). Para melhor simular o comportamento da secagem de milho a baixas temperaturas introduziu-se ao modelo de THOMPSON a equação de camada fina proposta por MISRA e BROOKER (1980), desenvolvida a partir de dados experimentais de temperatura, umidade relativa, velocidade do ar de secagem e teor de umidade inicial do milho.

De acordo com QUEIROZ *et alii* (1986), no desenvolvimento do modelo de THOMPSON (1967), consideram-se as seguintes pressuposições:

- a) a secagem em camada delgada do produto pode ser descrita por uma equação de camada fina. Neste caso, proposta por MISRA e BROOKER (1980) da forma:

$$RU = \exp(-Kt^n)$$

em que,

$$RU = \text{razão de umidade, } U - U_e / U_0 - U_e$$

U = teor de unidade, % b.s.

U_e = teor de unidade de equilíbrio, % b.s.

U_0 = teor de unidade inicial, % b.s.

t = tempo de secagem, h

$K = \exp(-7,1735 + 1,2793 \ln(1,8T + 32) + 0,1378 v)$

$N = 0,0811 \ln (UR) + 0,0078 U_0$

T = temperatura do ar, °C

v = velocidade do ar, m.s⁻¹

UR = unidade relativa do ar, %

b) a temperatura do grão é igual à temperatura do ar que o envolve, após os balanços de energia que levam em conta o resfriamento proveniente da evaporação da água do produto e das temperaturas iniciais do ar e do grão.

c) o teor de unidade de equilíbrio depende da temperatura e da unidade relativa do ar nas vizinhanças do grão. A equação proposta para ser utilizada no modelo é a seguinte:

$$U_e = 120,6 \left[\frac{\ln(1-UR)}{T_{eq} + 45,6} \right]^{0,8} \quad (24)$$

em que,

U_e = unidade de equilíbrio, % b.s.

UR = unidade relativa, decimal

T_{eq} = temperatura de equilíbrio do ar, °C

d) o calor latente de vaporização da água no grão de milho depende da sua temperatura e do seu teor de umidade e pode ser obtido pela equação:

$$h_{v_g} = (606 - 0,57 T_g)[1 + 4,35 \exp(-0,2825U)], \quad (25)$$

em que,

h_{v_g} = calor latente de vaporização da água no milho, Kcal/kg

T = temperatura do ar, °C

U = teor de umidade no tempo t , % b.s.

e) o calor específico do milho depende do seu teor de umidade:

$$c_p = 0,35 + \frac{0,951 U}{1 + U} \quad (26)$$

em que,

c_p = calor específico do milho, kcal.kg⁻¹.°C⁻¹

Visando simplificar a simulação, a secagem foi dividida em subprocessos, para que fossem determinadas as variações que ocorrem em uma camada delgada, tais como temperatura de equilíbrio entre o grão e o ar, umidade removida e resfriamento evaporativo do ar e do grão (QUEIROZ et alii, 1986).

Para determinação da temperatura de equilíbrio

T_a , entre o ar e o produto, considerando somente a troca de calor sensível, torna-se necessário solucionar um conjunto de equações que envolvem os seguintes balanços:

$$0,24 T_a + W_a (587,9 + 0,45 T_a) + c_p R (1+U) \theta_a =$$

$$0,24 T_a + W_a (587,9 + 0,45 T_a) + c_p R (1+U) \theta_a \quad (27)$$

em que,

T_a = temperatura do ar na entrada da camada fina, °C

W_a = razão de umidade do ar na entrada da camada fina, kg.kg⁻¹

θ_a = temperatura do grão no instante t, °C

T_a = temperatura de equilíbrio entre o ar e o grão, °C

U = teor de umidade do produto no tempo t, decimal b.s.

R = razão entre massa de matéria seca da camada e massa de ar seco que passa no intervalo de tempo t, kg.kg⁻¹.

$$\theta_a = T_a$$

A razão entre as massas de matéria seca e de ar seco deve ser determinada no início da simulação por meio da equação:

$$R = \frac{\rho V_a A \Delta x}{60 U t (1+U_a)} \quad (28)$$

em que,

U_a = teor de umidade inicial, decimal, b.s.

V_a = volume específico do ar, $m^3.kg^{-1}$

A = área da seção transversal, m^2

Δx = espessura da camada fina, m

Q = vazão de ar, $m^3.min^{-1}$

t = incremento de tempo, n

ρ = massa específica do produto, $kg.m^{-3}$

O teor de umidade de equilíbrio, U_e , é calculado pela Equação (24), utilizando a temperatura de equilíbrio, T_e , obtida pela Equação (27).

A umidade relativa do ar nas condições de equilíbrio é determinada por:

$$UR = \frac{100 \quad P_{atm} \quad W_a}{(0,622+W_a) P_{v_a}} \quad (29)$$

em que,

P_{atm} = pressão atmosférica, mmHg ou Pa

P_{v_a} = pressão de vapor de saturação, à temperatura T_e , mmHg ou Pa

A pressão de vapor de saturação pode ser determinada pela equação apresentada por BROOKER et alii (1979):

$$P_{v_a} = 51,715 \cdot \exp\left(31,594 - \frac{6834}{T_e + 273,15} - 5,169 \cdot \ln(T_e + 273,16)\right) \quad (30)$$

A quantidade de água perdida pelo produto no intervalo de tempo Δt é calculada pela equação de camada fina.

A unidade do produto, U_T , no tempo $t + \Delta t$ é dada por:

$$U_T = R U_T (U_D - U_m) + U_m \quad (31)$$

A razão de unidade do ar consistente com a perda de unidade do produto é determinada pelo balanço de massa:

$$W_T = W_D + R (U - U_T)$$

em que,

W_T = razão de unidade do ar no topo da camada fina de grãos, $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$

As temperaturas finais do ar e do produto são determinadas por meio de um balanço de energia que leva em conta a perda de unidade dos grãos:

$$\begin{aligned} 0,24T_m + W_D(588 + 0,45T_m) + c_p R(1 + U)\theta_m + (W_T - W_D)\theta_m = \\ 0,24T_T + W_T(588 + 0,45T_T) + c_p R(1 + U)\theta_T + L(W_T - W_D) \end{aligned} \quad (32)$$

em que,

$$\theta_T = T_T$$

$$hfg = (606 - 0,57T_m) - 4,35 \exp(-28,25 U)$$

Após utilizar cada um dos balanços de energia verifica-se se a unidade relativa determinada matematicamente é superior a 100%. Em caso afirmativo, novos balanços de energia devem ser feitos simulando a condensação de água no milho.

Nesses novos balanços o ponto de estado T_r e W_r , não consistentes, será corrigido para o ponto de estado T'_r e W'_r .

$$0,24 T_r + W_r (588 + 0,45 T_r) + (W'_r - W_r) T_r + c_p R (1 + U) T_r = 0,24 T'_r + W'_r (588 + 0,45 T'_r) + c_p R (1 + U) T'_r \quad (33)$$

Nessa equação, há duas variáveis a serem determinadas T'_r e W'_r . A outra condição usada para tornar possível a determinação dessas variáveis é que a unidade relativa determinada matematicamente seja igual a 100%.

A quantidade de água condensada no produto faz com que sua unidade passe a ser U'_r , sendo:

$$U'_r = U_r - \frac{(W'_r - W_r)}{R} \quad (34)$$

3.1.5. Validação do Modelo Matemático

Os testes de simulação computacional para a comprovação do modelo matemático desenvolvido por THOMPSON

(1967) modificado com a introdução da equação de camada fina proposta por MISRA e BROOKER (1980), e sua consequente aplicabilidade, foram realizados utilizando-se como variáveis de entrada as condições empregadas na obtenção dos dados experimentais coletados nas cidades de Campina Grande e João Pessoa-PB. Na obtenção dos dados experimentais considerou-se o processo de secagem de uma única camada espessa única, permitindo determinar as variações ocorridas nas condições médias de temperatura de equilíbrio entre o ar e o grão, quantidade de umidade removida e resfriamento evaporativo entre o ar e o produto, em intervalos de três horas. Os valores simulados foram comparados com os dados experimentais através de teste de qui-quadrado ao nível de 1% de probabilidade, determinando-se, em seguida, os desvios entre os resultados obtidos.

3.1.6. Determinação das Vazões Mínimas

Na determinação das vazões mínimas de ar para secagem de milho baixas temperaturas para as condições estabelecidas, empregou-se o modelo matemático de simulação proposto por MOREY et alii (1976), com a introdução da equação de camada fina proposta por MISRA e BROOKER (1980), implementado em computador e já validado para outras regiões do país.

De acordo com QUEIROZ (1986), o modelo proposto por MOREY et alii (1976) nada mais é do que o aprimoramento do modelo de THOMPSON para secagem a baixas

temperaturas.

MOREY et alii (1976) acrescentaram ao modelo de secagem equações para prever a deterioração do milho, baseadas no trabalho desenvolvido por STEELE (1967, 1969). Este modelo prevê a perda de matéria seca do milho conforme o tempo que o produto permanece em determinadas condições de temperatura, teor de umidade e danos mecânicos. As equações que compõem o modelo de deterioração são as seguintes:

$$FMS = 0,00883 [\exp(0,006t) - 1] + 0,00102t \quad (35)$$

em que,

FMS = perda de matéria seca, em percentagem de milho com 25% de umidade, base úmida, 15,6 °C de temperatura e 30% de danos.

t = tempo de exposição, nas condições supracitadas, h.

Para as condições diferentes das citadas, deve-se calcular um tempo equivalente (t_{eq}) às condições de referência:

$$t_{eq} = \frac{t}{M_u M_m M_d} \quad (36)$$

em que,

M_u = multiplicador de umidade

M_a = multiplicador de temperatura

B_a = multiplicador de danos mecânicos

t = período de tempo de exposição, h

MOREY *et alii* introduziram a seguinte equação para unidade relativa de equilíbrio no processo de adsorção de umidade para o milho:

$$URE_{eq} = 100(1 - \exp[-0,519(\theta + 45,6) U^{1,72}]) \quad (37)$$

em que,

URE_{eq} = unidade relativa de equilíbrio para o produto no reumedecimento, % b.s.

Os dados climatológicos de umidade relativa e temperatura de bulbo seco do ar ambiente, correspondentes ao período de 1975 a 1989, foram aplicados como variáveis de entrada ao modelo de simulação desenvolvido por MOREY *et alii* (1976). Os registros climatológicos diários coletados às 12, 18 e 24 horas, relativos às cidades de Campina Grande, João Pessoa e Patos-PB foram providos ao programa computacional para incrementos de tempo de 3 horas de secagem. Considerou-se que o ar de secagem era aquecido de 1 a 4 °C ao passar pelo ventilador que insuflava ar no secador.

As condições dos parâmetros de entrada aplicados ao modelo de MOREY (1976), modificado para determinação das vazões mínimas de ar para secagem de milho

nas cidades de Campina Grande, João Pessoa e Patos-PB, encontram-se descritas na Tabela 4.

As variáveis de entrada relativas a Patos-PB, observadas na Tabela 4, foram estabelecidas com base em médias climatológicas registradas no período (1976 a 1989) e condições de colheita e armazenamento de milho naquela região.

Especificamente, os critérios adotados para a determinação das vazões mínimas adequadas foram que o produto atingiria o teor de umidade máximo de 15% base seca com um índice de deterioração nunca superior a 0,5%.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção são apresentados e discutidos os resultados obtidos nos testes experimentais de secagem em camada espessa a baixas temperaturas realizados nas cidades de Campina Grande e João Pessoa-PB, assim como as vazões mínimas determinadas para o Estado da Paraíba.

4.1. Secagem Experimental em Camada Espessa

Os teores de umidade inicial e final do produto, as propriedades psicrométricas do ar ambiente (temperatura de bulbo seco e umidade relativa) e os parâmetros de operação do secador experimental são apresentados na Tabela 1.

4.1.1. Campina Grande-PB

A Tabela 2 mostra os resultados dos testes de secagem em camada espessa realizados em Campina Grande.

Durante a secagem em camada espessa as condições de temperatura de bulbo seco e umidade relativa do ar de secagem variaram de acordo com as oscilações diárias destes parâmetros meteorológicos, uma vez que não foi utilizada qualquer fonte de aquecimento suplementar no decorrer do experimento. A temperatura média do ar no plenum sofreu um incremento de temperatura da ordem de 3,7 °C em decorrência da movimentação do ventilador. Os valores mínimos de umidade relativa foram alcançados aproximadamente às 14:00

TABELA 1 - Condições para Secagem de Milho Híbrido em Câmara Espessa Campine Grande e João Pessoa - PB.

| Local do Experimento | Temperatura de Bulbo Úmido (C) | Temperatura de Unidade (C) | Teor de Umidade Médio (C.b.s.) | Fluxo de Ar (litros/min) | Incremento de Tempo (h) | Temperatura Inicial do Produto (C) | Temperatura Final do Produto (C) | Tempo de Secagem (h) | Umidade Residual (C) | |
|----------------------|--------------------------------|----------------------------|--------------------------------|--------------------------|-------------------------|------------------------------------|----------------------------------|----------------------|----------------------|----|
| C. Grande | 21,5 | 74 | 22,9 | 15 | 47,1 | 0,64 | 3 | 21,5 | 25,2 | 72 |
| J. Pessoa | 24,4 | 67 | 25,8 | 15 | 47,1 | 0,64 | 3 | 24,4 | 27,6 | 48 |

BIBLIOTECA UNIVAL

TABELA 2 - Teores Médios de Umidade Experimentais e Simulados para as Condições de Campina Grande - PB.

| Tempo de Secagem (h) | Simulado (% b.s.) | Experimental (% b.s.) | Desvios de Umidade | Desvios (%) |
|----------------------|-------------------|-----------------------|--------------------|-------------|
| 0 | 22.9 | 22.9 | 0.0 | 0.0 |
| 3 | 20.4 | 20.5 | 0.1 | 0.5 |
| 6 | 19.3 | 20.2 | 0.9 | 4.4 |
| 9 | 18.6 | 20.0 | 1.4 | 7.0 |
| 12 | 18.1 | 19.8 | 1.7 | 8.6 |
| 15 | 17.7 | 19.6 | 1.9 | 9.6 |
| 18 | 17.4 | 19.0 | 1.6 | 8.4 |
| 21 | 17.1 | 18.7 | 1.6 | 8.6 |
| 24 | 16.8 | 18.1 | 1.3 | 7.2 |
| 27 | 16.6 | 17.8 | 1.2 | 6.7 |
| 30 | 16.4 | 17.6 | 1.2 | 6.7 |
| 33 | 16.2 | 17.4 | 1.2 | 6.7 |
| 36 | 16.1 | 17.1 | 1.0 | 6.7 |
| 39 | 15.9 | 17.0 | 1.1 | 6.5 |
| 42 | 15.8 | 16.7 | 0.9 | 5.4 |
| 45 | 15.7 | 16.4 | 0.7 | 4.3 |
| 48 | 15.6 | 16.2 | 0.6 | 3.7 |
| 51 | 15.5 | 16.0 | 0.5 | 3.1 |
| 54 | 15.4 | 15.7 | 0.3 | 1.9 |
| 57 | 15.3 | 15.6 | 0.3 | 1.9 |
| 60 | 15.2 | 15.3 | 0.1 | 0.7 |
| 63 | 15.1 | 14.8 | 0.3 | - 2.0 |
| 66 | 15.0 | 14.6 | 0.4 | - 2.7 |
| 69 | 15.0 | 14.4 | 0.6 | - 4.2 |
| 72 | 14.9 | 14.3 | 0.6 | - 4.2 |

horas, instante em que a temperatura do ar atingia seu valor máximo diário. Um fluxo de ar de $47,1 \text{ m}^3/\text{min.m}^2$, uniformemente distribuído e sem flutuações foi aplicado à massa de grãos conseguindo-se taxas uniformes de deslocamento da frente de secagem no interior do secador experimental. Apresentando um teor de umidade inicial de 22,9% base seca, o produto alcançou umidade média final de 14,9% base seca, no período de 72 horas de secagem nas condições ambientes.

4.1.2. João Pessoa-PB

Os resultados dos testes de secagem realizados em João Pessoa encontram-se na Tabela 3.

A temperatura de bulbo seco e a umidade relativa do ar de secagem flutuaram conforme as variações diárias destes parâmetros. A temperatura média do ar no plenum do secador sofreu aquecimento de $3,2 \text{ }^\circ\text{C}$. Um fluxo de ar de $47,1 \text{ m}^3/\text{min.m}^2$ uniformemente distribuído foi insuflado na massa de grãos que inicialmente possuía um teor de umidade em base seca de 25,8%, atingindo após 48 horas um teor de umidade final de 14,9% base seca.

4.3. Validação do Modelo

As simulações matemáticas de secagem em camada espessa foram processadas aplicando-se o modelo de THOMPSON (1967), constante do Apêndice A, com a inserção da equação de camada fina proposta por MISRA e BROOKER (1980), nas mesmas condições de obtenção dos dados experimentais. Para tanto,

TABELA 3 - Teores Médios de Umidade Experimentais e Simulados para as Condições de João Pessoa - PB.

| Tempo de Secagem (h) | Simulado (% b.s.) | Experimental (% b.s.) | Desvios de Umidade | Desvios (%) |
|----------------------|-------------------|-----------------------|--------------------|-------------|
| 0 | 25,8 | 25,8 | 0,0 | 0,0 |
| 3 | 21,9 | 22,4 | 0,5 | 2,2 |
| 6 | 20,4 | 21,5 | 1,1 | 5,1 |
| 9 | 19,3 | 20,7 | 1,4 | 6,8 |
| 12 | 18,6 | 20,4 | 1,8 | 8,8 |
| 15 | 18,0 | 19,8 | 1,8 | 9,1 |
| 18 | 17,4 | 19,0 | 1,6 | 8,4 |
| 21 | 17,0 | 18,2 | 1,2 | 6,6 |
| 24 | 16,6 | 17,4 | 0,8 | 4,6 |
| 27 | 16,3 | 16,8 | 0,5 | 3,0 |
| 30 | 16,1 | 16,3 | 0,2 | 1,2 |
| 33 | 15,8 | 16,0 | 0,2 | 1,2 |
| 36 | 15,6 | 15,6 | 0,0 | 0,0 |
| 39 | 15,4 | 15,2 | 0,2 | - 1,3 |
| 42 | 15,2 | 14,7 | 0,5 | - 3,4 |
| 45 | 15,0 | 14,1 | 0,9 | - 6,4 |
| 48 | 14,9 | 13,5 | 1,4 | - 10,3 |

foram fornecidos valores médios de temperatura de bulbo seco e umidade relativa do ar registrados no período de secagem.

Para os mesmos incrementos de tempo considerados na fase experimental, os valores médios simulados dos teores de umidade (% b.s.) para Campina Grande e João Pessoa-PB, constam das Tabelas 2 e 3, respectivamente.

Constata-se nessas Tabelas que o desvio máximo entre os valores simulados e experimentais é da ordem de 1,9 pontos por cento de umidade (Tabela 2). O desvio máximo percentual foi de 10,3% e ocorreu uma única vez (Tabela 3). Tais desvios encontram-se na faixa de erro citado na literatura para aplicações de modelos matemáticos de simulação para secagem de grãos.

Provavelmente os desvios observados entre os valores teóricos e experimentais decorreram do uso de equações de camada fina e umidade de equilíbrio determinadas para outra variedade de milho, erros experimentais ocorridos nas medições dos parâmetros de entrada do modelo, assim como da hipótese de que a secagem verificou-se nas condições médias de temperatura e umidade relativa do ar assumidas como variáveis de entrada no processo de simulação computacional.

As Figuras 4 e 5 apresentam as curvas simuladas e experimentais relativas às cidades de Campina Grande e João Pessoa-PB, respectivamente. Observa-se que o modelo de THOMPSON (1967) modificado, subestimou os dados experimentais para Campina Grande até 60 horas de secagem, enquanto que

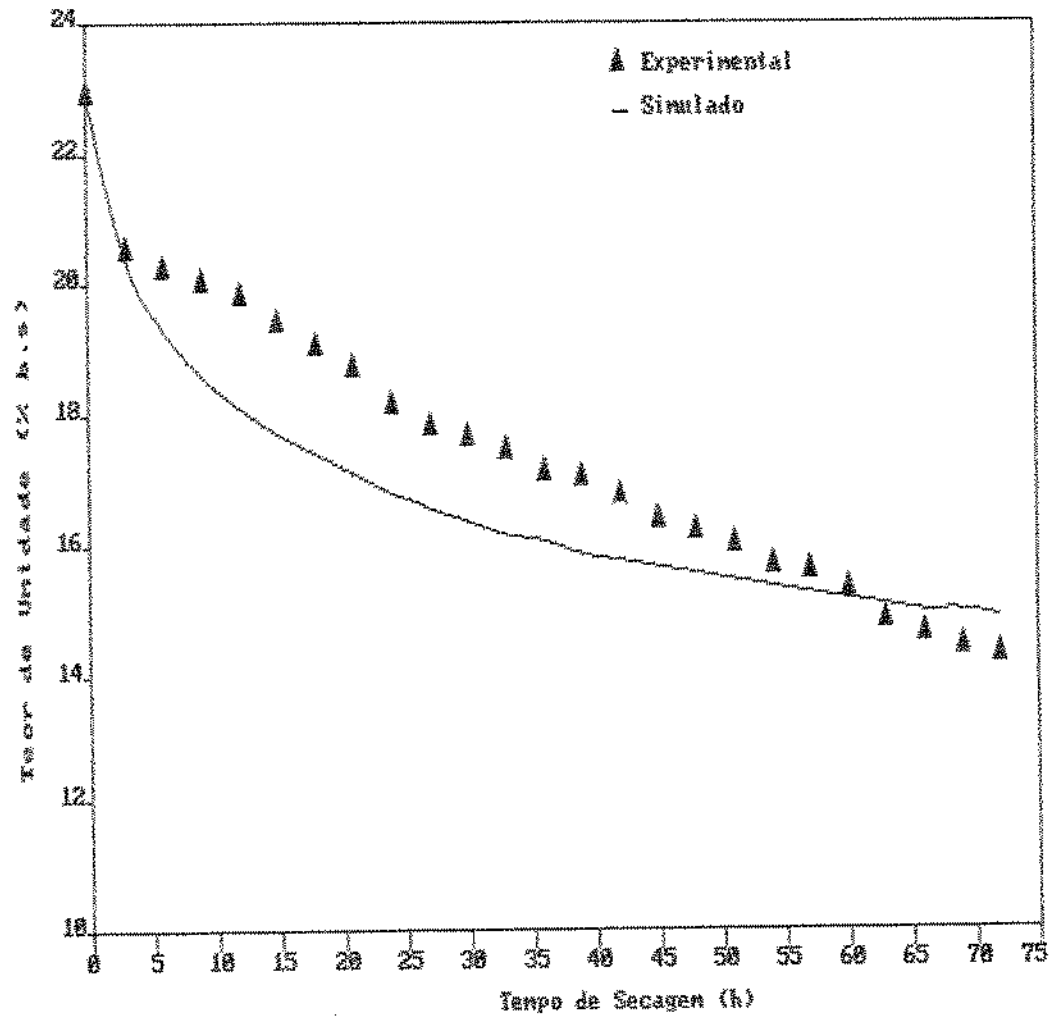


Figura 4. Comparação dos dados teóricos e experimentais para Campina Grande - PB.

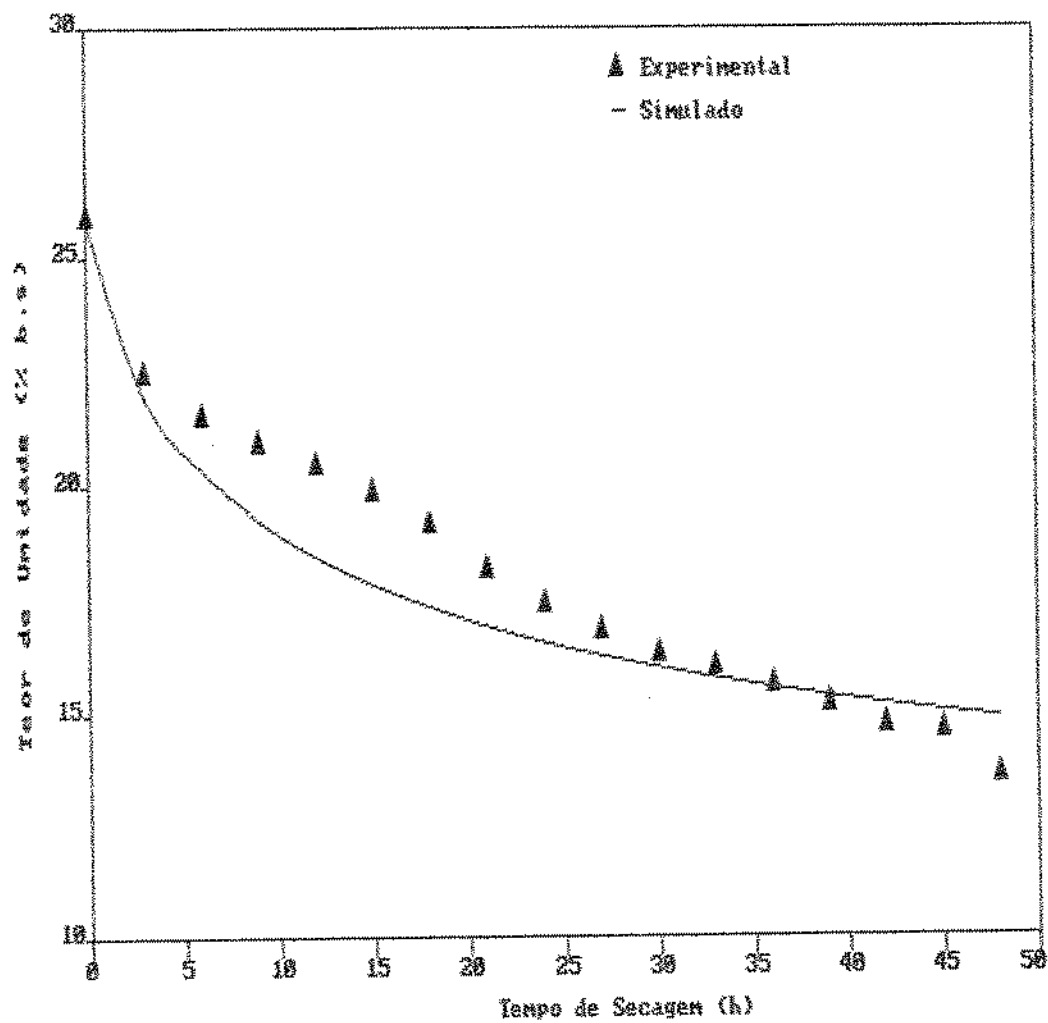


Figura 5. Comparação dos dados teóricos e experimentais para João Pessoa - PB.

para João Pessoa, a tendência de subestimação verificou-se até 33 horas de secagem. Em seguida, para ambos os casos, o modelo empregado passou a superestimar os valores experimentais. Entretanto, a análise estatística de qui-quadrado demonstrou que não havia diferença significativa entre os valores simulados e experimentais, ao nível de 1% de probabilidade.

4.4. Determinação das Vazões Mínimas

A partir do modelo de MOREY et alii (1976) com a introdução da equação de camada fina proposta por MISRA e BROOKER (1980), constante do Apêndice B, foram determinadas as vazões mínimas de ar para secagem de milho a baixas temperaturas nas cidades de Campina Grande, João Pessoa e Patos-PB, baseado no critério de 0,5% de perda máxima de matéria seca. Foram utilizados como parâmetros de entrada ao modelo as condições apresentadas na Tabela 4. Os dados diários de temperatura e umidade relativa do ar referentes as 3 cidades foram coletados às 12, 18 e 24 horas durante o período de 1975 a 1989.

As Tabelas 5, 6, e 7 apresentam, respectivamente, as vazões mínimas obtidas para secagem de milho a baixas temperaturas nas cidades de Campina Grande, João Pessoa e Patos-PB. Os níveis de umidade inicial e final de 25 e 13%, base úmida, respectivamente, foram estabelecidos com base nos teores de umidade adotados para colheita e armazenamento de milho no Estado da Paraíba.

TABELA 4 - Condições para Determinação das Vazões Máximas de Ar para Secagem de Milho e Baixas Temperaturas nas Cidades de Campina Grande, João Pessoa e Patos - PB

| Local do Experimento | Teor da Umidade (Z b.u.) | Altura do Silo Secador (m) | Incremento de Tempo (h) | Área do Silo Secador (m ²) | Temperatura Inicial do Produto (°C) | Temperatura do Ar (°C) | Resfriamento do Ar (°C) | No. de Madas do Silo | No. de Dados Climatológico Disponíveis |
|----------------------|--------------------------|----------------------------|-------------------------|--|-------------------------------------|------------------------|-------------------------|----------------------|--|
| C Grande | 13 | 3 | 3 | 3,14 | 21,5 | 3,0 | 6 | 31.236 | |
| J Pessoa | 13 | 3 | 3 | 3,14 | 24,4 | 4,0 | 6 | 29.560 | |
| Patos | 13 | 3 | 3 | 3,14 | 26 | 4,5 | 6 | 30.510 | |

TABELA 5 - Vazões mínimas de ar para secagem de milho a baixas temperaturas determinadas em Campina Grande - PB, no período de 1976 a 1989.

| ANO | JAN | FEV | MAR | ABR | MAI | JUN | JUL | AGO | SET | OUT | NOV | DEZ |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|------|------|
| 75 | 6.54 | 6.54 | 9.46 | 6.85 | 10.27 | 11.58 | 12.88 | 7.15 | 7.65 | 6.54 | 6.04 | 8.65 |
| 76 | 6.54 | 8.65 | 7.34 | 10.27 | 6.54 | - | 6.54 | 6.04 | 6.04 | 6.54 | 6.04 | 7.35 |
| 77 | 6.84 | 8.15 | 7.35 | 9.46 | 10.27 | 10.27 | 13.69 | 7.35 | 8.15 | 8.15 | 9.46 | 9.46 |
| 78 | 11.58 | 6.54 | 10.77 | 7.35 | 10.27 | 8.65 | 8.65 | 9.46 | 8.15 | 8.65 | 6.85 | 9.46 |
| 79 | 8.65 | 10.27 | 7.65 | 7.35 | 10.77 | 10.27 | 9.46 | 6.85 | 9.46 | 6.85 | 6.54 | 6.54 |
| 80 | 7.34 | 6.54 | 9.46 | 8.65 | 7.65 | 7.65 | 7.35 | 6.04 | 6.54 | 7.35 | 6.04 | 6.54 |
| 81 | 6.04 | - | 6.54 | 10.27 | 7.34 | 8.15 | 6.54 | 6.54 | 9.23 | 6.04 | - | 6.54 |
| 82 | 6.85 | 6.04 | 7.65 | 7.35 | 7.34 | (*) | 8.65 | 8.65 | 6.85 | 6.54 | 6.04 | 7.35 |
| 83 | 6.85 | 7.35 | 6.85 | 8.65 | - | 10.27 | 8.15 | 9.46 | 8.15 | 7.65 | 6.54 | 6.04 |
| 84 | 6.54 | 6.54 | 6.54 | 8.65 | 8.65 | 10.77 | 9.46 | 7.35 | 9.46 | 6.54 | 7.35 | 6.54 |
| 85 | 6.85 | 6.04 | 9.46 | 10.27 | 9.46 | 9.46 | 8.65 | 7.65 | 6.04 | 6.04 | 6.04 | 6.54 |
| 86 | 6.04 | 6.65 | 8.65 | 10.27 | 9.46 | 9.46 | 9.46 | 7.34 | 7.34 | 7.65 | 6.54 | 9.46 |
| 87 | 6.54 | 6.54 | - | 10.27 | 9.56 | 7.34 | 9.46 | 6.85 | 6.85 | - | 9.23 | 6.04 |
| 88 | 6.54 | 6.54 | 6.85 | 9.46 | 10.77 | 7.35 | 8.15 | 7.35 | 6.54 | 6.54 | 6.54 | 6.04 |
| 89 | 6.54 | 6.54 | 6.04 | 6.04 | 9.46 | 8.65 | 8.65 | 6.85 | 7.35 | - | - | - |
| 00 | 7.08 | 7.21 | 7.90 | 8.74 | 9.12 | 9.22 | 9.05 | 7.39 | 7.32 | 6.93 | 6.36 | 7.11 |

(*) Não foi encontrada solução utilizando fluxos de ar até 15m³/min/t.

TABELA 6 - Vazões mínimas de ar para secagem de milho a baixas temperaturas determinadas em João Pessoa - PB no período de 1976 a 1990.

| ANO | JAN | FEV | MAR | ABR | MAI | JUN | JUL | AGO | SET | OCT | NOV | DEZ |
|-----|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|
| 76 | 7.66 | 9.46 | 6.89 | 10.27 | 8.15 | 8.15 | 7.35 | 7.35 | 8.15 | 8.15 | 7.35 | 8.65 |
| 77 | 7.35 | 9.46 | 8.15 | 8.65 | 10.27 | 10.77 | 10.27 | 8.65 | 7.35 | 8.15 | 8.15 | 7.66 |
| 78 | 7.66 | 7.66 | 9.46 | 8.65 | 9.46 | 9.46 | 9.46 | 10.27 | 8.65 | 8.65 | 8.15 | 9.46 |
| 79 | 8.65 | 8.65 | 8.15 | 8.15 | 10.77 | 9.46 | 10.27 | 7.35 | 10.27 | 7.66 | 8.15 | 6.54 |
| 80 | 8.15 | 7.66 | 9.46 | 9.46 | 10.27 | 9.46 | 8.65 | 7.66 | 8.15 | 7.66 | 8.15 | 8.15 |
| 81 | 8.15 | 9.46 | 8.15 | 9.46 | 9.46 | 9.46 | 8.15 | 7.66 | 6.55 | 7.66 | 7.35 | 8.15 |
| 82 | 8.15 | 7.35 | 8.15 | 9.46 | 8.65 | 8.15 | 8.15 | 7.66 | 7.66 | 6.55 | 7.35 | 8.15 |
| 83 | 9.46 | 10.27 | 10.77 | 10.27 | 10.27 | 10.77 | 9.46 | 9.46 | 9.46 | 7.66 | 7.35 | 6.85 |
| 84 | 7.35 | 8.15 | 8.15 | 9.46 | 10.27 | 9.46 | 10.27 | 8.65 | 7.66 | 6.54 | 8.15 | 7.35 |
| 85 | 8.15 | 7.35 | 9.46 | 10.27 | 9.46 | 9.46 | 10.27 | 7.35 | 7.35 | 7.35 | 7.35 | 8.15 |
| 86 | 8.15 | 8.15 | 9.46 | 10.27 | 9.46 | 10.27 | 9.46 | 8.15 | 8.15 | 7.66 | 7.35 | 8.46 |
| 87 | 8.65 | 7.66 | 9.46 | 9.46 | 9.46 | 8.65 | 9.46 | 8.15 | 8.15 | 8.15 | 7.66 | 7.66 |
| 88 | 8.65 | 7.35 | 8.15 | 10.27 | 10.27 | 8.15 | 9.46 | 8.65 | 7.66 | 7.66 | 8.15 | 7.66 |
| 89 | 7.66 | 7.66 | - | 10.27 | 11.58 | - | - | - | - | - | - | - |
| 90 | 8.15 | 7.66 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 6m | 8.15 | 8.26 | 8.75 | 9.59 | 9.84 | 9.36 | 9.28 | 8.23 | 8.12 | 7.68 | 7.74 | 7.99 |

TABLE 7 - Variações mínimas de ar para secagem de milho e baixas temperaturas determinadas em Patos - PB no período de 1976 a 1989.

| ANO | JAN | FEB | MAR | ABR | MAI | JUN | JUL | AGO | SET | OUT | NOV | DEZ |
|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 76 | 4.42 | 7.35 | 5.54 | 7.35 | 5.23 | 4.23 | 3.61 | 3.92 | 4.73 | 4.23 | 4.23 | 6.04 |
| 77 | 5.23 | 7.34 | 6.54 | 6.63 | 9.46 | 6.84 | 4.92 | 4.23 | 3.92 | 4.42 | 3.92 | 3.92 |
| 78 | 4.23 | 3.92 | 7.66 | 6.54 | 8.65 | 6.85 | 4.92 | 4.23 | 4.23 | 3.92 | 3.92 | 4.73 |
| 79 | 4.23 | 5.23 | 6.54 | 6.04 | 7.66 | 5.54 | 5.23 | 3.92 | 5.23 | 3.92 | 4.23 | 3.61 |
| 80 | 6.04 | 5.23 | 7.35 | 5.54 | 5.23 | 4.23 | 4.73 | 3.92 | 4.23 | 4.73 | 4.23 | 4.23 |
| 81 | - | 4.73 | 3.92 | 7.66 | 4.92 | 4.73 | 3.92 | 4.23 | 5.61 | 4.23 | 3.92 | 4.42 |
| 82 | 4.73 | 4.73 | 4.92 | 4.92 | 4.73 | 5.23 | 4.42 | 4.73 | 4.23 | 3.92 | 3.92 | 4.73 |
| 83 | 4.23 | 5.54 | 4.92 | 4.92 | 6.54 | 4.73 | 4.23 | 6.04 | 4.23 | 4.73 | 4.23 | 4.42 |
| 84 | 4.42 | 4.23 | 5.23 | 6.85 | 6.54 | 6.54 | 5.23 | 4.42 | 5.23 | 3.92 | 4.23 | 3.92 |
| 85 | 5.23 | 7.35 | 7.65 | 8.65 | 8.15 | 6.54 | 5.54 | 4.73 | 4.73 | 4.23 | 4.42 | 4.23 |
| 86 | 6.04 | 8.15 | 8.65 | 8.15 | 6.04 | 6.54 | 4.73 | 4.73 | 4.23 | 4.23 | 4.23 | 4.92 |
| 87 | 4.42 | 4.42 | 6.54 | 6.54 | 6.54 | 7.65 | 5.23 | 4.92 | 4.23 | 4.73 | 4.42 | 4.23 |
| 88 | 4.23 | 3.92 | 7.35 | 6.54 | 8.15 | 6.04 | 4.73 | 4.23 | 4.23 | 4.23 | 3.92 | 4.73 |
| 89 | 4.92 | 4.73 | 4.92 | 8.15 | 8.15 | 6.04 | 5.54 | 4.73 | 4.73 | 4.73 | 5.23 | 5.23 |
| 90 | 4.80 | 5.49 | 6.18 | 7.20 | 6.88 | 5.85 | 4.46 | 4.48 | 4.50 | 4.33 | 4.22 | 4.52 |

Verifica-se nas Tabelas 5 e 6, para Campina Grande e João Pessoa, respectivamente, a ocorrência de vazões mínimas médias de ar mais elevadas durante os meses de março a julho. Tal período coincide com a estação chuvosa nas duas regiões, quando o potencial de secagem atinge seu nível mais baixo.

Constata-se ainda na Tabela 5 que durante o mês de junho de 1982 tornou-se impossível a determinação das vazões mínimas com fluxo de ar abaixo de $15\text{m}^3/\text{min.l}$ de grãos, observando-se o critério de deterioração assumido no modelo. Os dados climatológicos relativos a Campina Grande mostraram que durante o mês de junho citado, foram registradas as temperaturas médias mais baixas e umidades relativas médias mais altas do período em estudo (1975 a 1989), provavelmente ocasionando a necessidade de vazões mais elevadas para secagem de milho a baixas temperaturas.

Observa-se na Tabela 7, durante os meses de março a junho, a ocorrência de vazões mínimas acima dos valores médios verificados nos demais meses do período em Patos-PB. A tendência de decréscimo no potencial de secagem acontece exatamente no período de maior incidência pluviométrica da região.

Comparando-se as vazões médias apresentadas nas Tabelas 5, 6 e 7, relativas a Campina Grande, João Pessoa e Patos-PB, respectivamente, observa-se que entre as duas primeiras cidades não ocorreram diferenças significativas

entre os valores de vazões médias mínimas calculados. No entanto, com relação a cidade de Patos-PB, constata-se diferenças significativas entre as vazões médias mínimas registradas no período de 1976 a 1989 comparados com as vazões determinadas para as cidades de Campina Grande e João Pessoa-PB.

As diferenças ocorridas entre as vazões médias mínimas determinadas para Campina Grande, João Pessoa e Patos-PB, apresentadas nas Tabelas 5, 6 e 7, decorrem, provavelmente, das diferenças climáticas existentes entre as regiões úmida, seco-sub-úmida e semi-árida do estado da Paraíba.

As Figuras 6, 7 e 8 apresentam as vazões mínimas médias determinadas para Campina Grande, João Pessoa e Patos-PB, respectivamente, durante o período de 1975 a 1989, bem como os intervalos de confiança calculados ao nível de 5% de probabilidade.

A Tabela 8 apresenta as vazões mínimas indicadas para secagem de milho a baixas temperaturas para as regiões úmida, seco-sub-úmida e semi-árida do estado da Paraíba, representadas climaticamente por Campina Grande, João Pessoa e Patos, respectivamente. Tais vazões foram estabelecidas com base no segundo pior ano do período estudado, para realização de secagem com ar natural.

As vazões mínimas de ar a serem aplicadas para secagem de milho a baixa temperatura na região úmida sub-

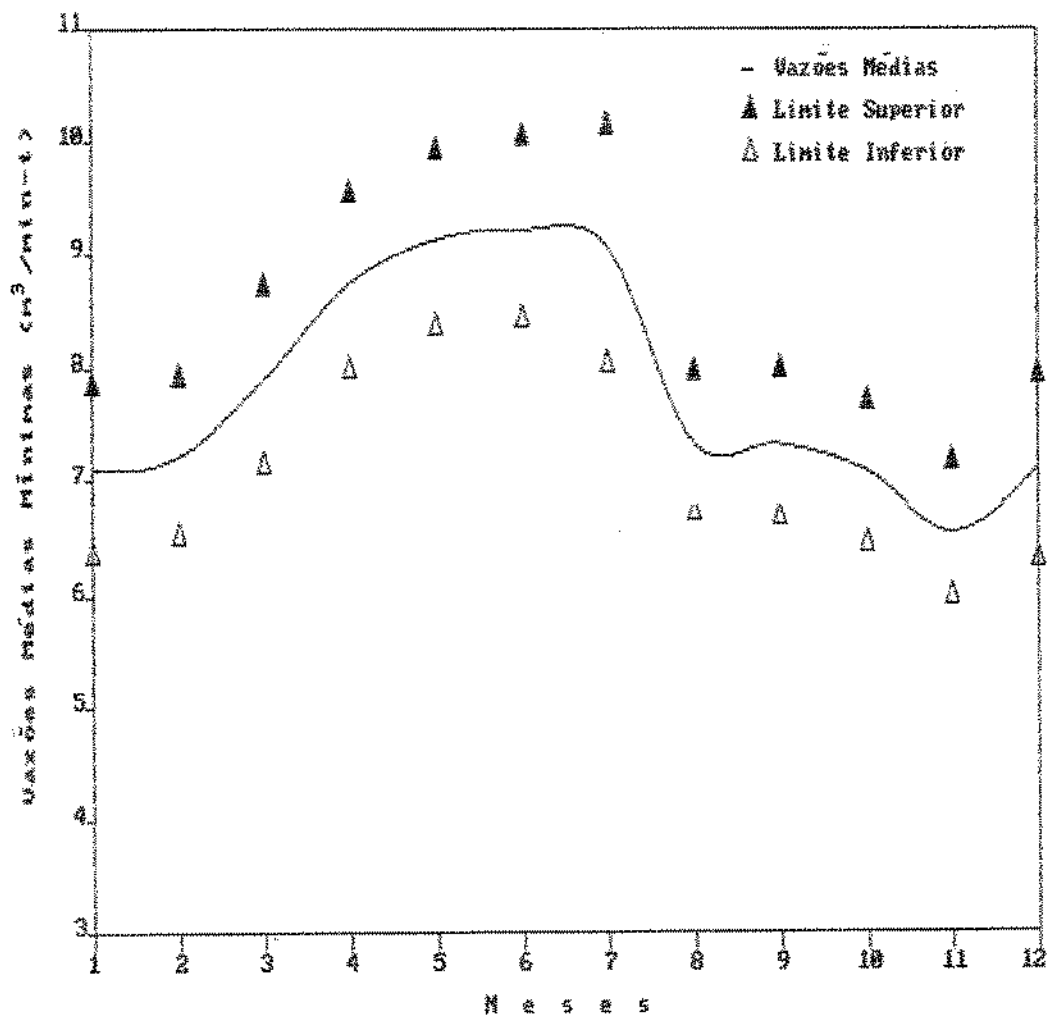


Figura 6. Vazões mínimas médias e respectivos intervalos de confiança ao nível de 5% de probabilidade determinados para Campina Grande no período de 1975 a 1989.

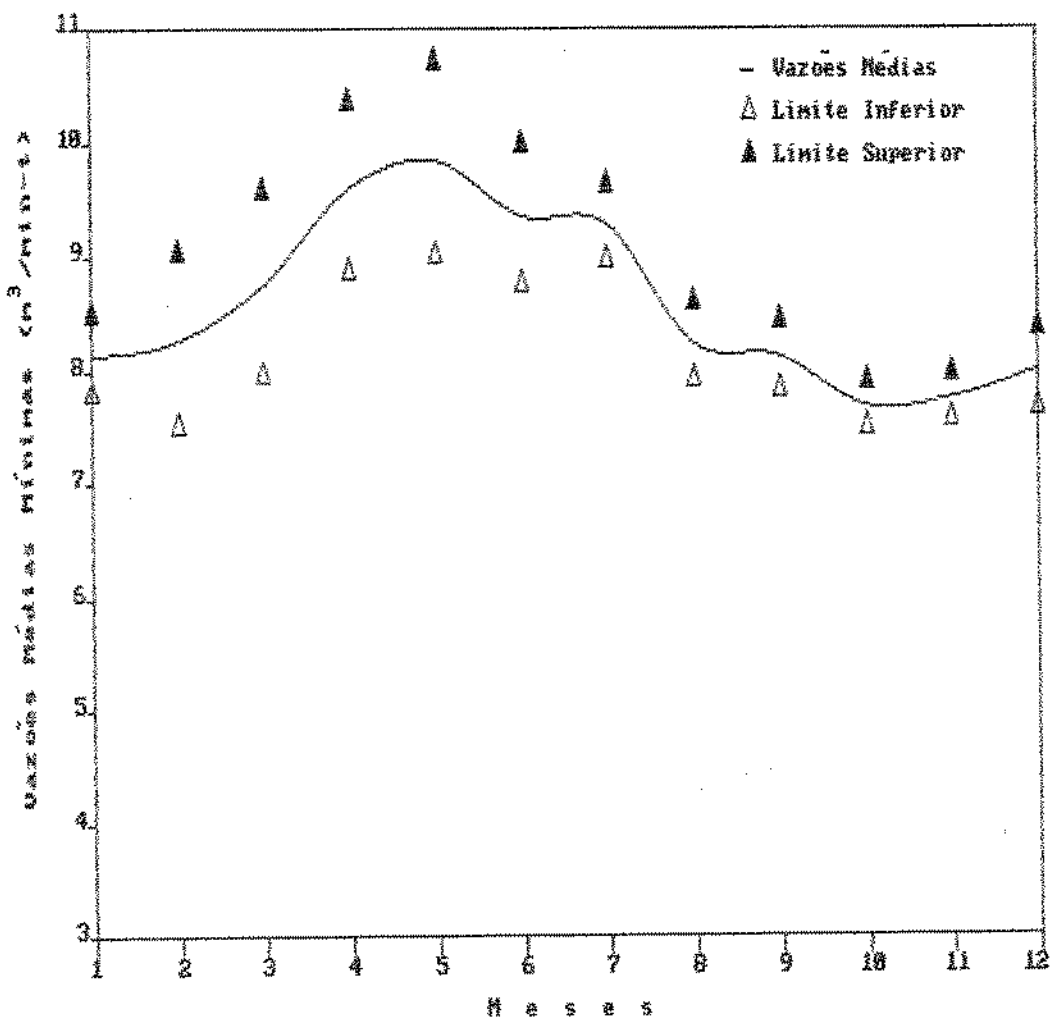


Figura 7. Vazões mínimas médias e respectivos intervalos de confiança ao nível de 5% de probabilidade determinados para João Pessoa no período de 1976 a 1989.

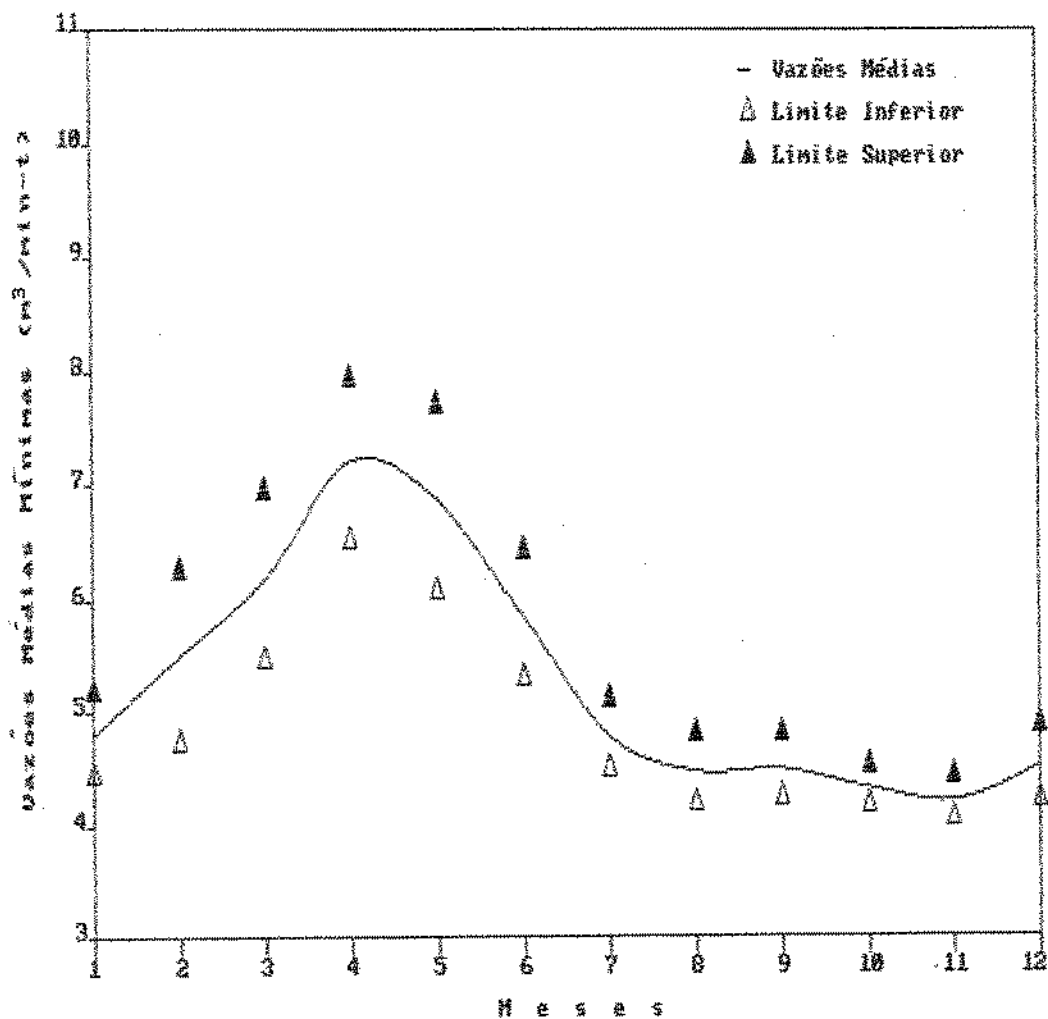


Figura 8. Vazões mínimas médias e respectivos intervalos de confiança ao nível de 5% de probabilidade determinados em Patos no período de 1976 a 1989.

TABELA 9 - Variações Mínimas de Ar (m^3/min) indicadas para Secagem de Milho a Baixas Temperaturas no Estado da Paraíba.

| CIDADES | JAN | FEV | MAR | ABR | MAI | JUN | JUL | AGO | SET | OUT | NOV | DEZ |
|----------------|------|------|------|------|-------|-------|-------|------|------|------|------|------|
| Campina Grande | 8,65 | 8,65 | 9,46 | 9,46 | 10,27 | 10,77 | 12,88 | 8,65 | 8,15 | 6,15 | 6,85 | 7,35 |
| João Pessoa | 8,65 | 9,46 | 9,46 | 9,46 | 10,77 | 10,27 | 9,46 | 9,46 | 9,46 | 8,15 | 7,65 | 8,65 |
| Patos | 5,23 | 7,34 | 7,65 | 8,65 | 8,65 | 6,85 | 5,23 | 4,92 | 5,23 | 4,42 | 4,42 | 5,23 |

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAIBA
 Pró-Reitoria Para Assuntos do Interior
 Coordenação Setorial de Vis. Socioeconômica
 Rua Aprígio Veloso, 882 - Tel. (083) 321-7222 a 355
 58.100 - Campina Grande - Paraíba

Umida do Estado da Paraíba, provavelmente variam entre as vazões determinadas para as regiões úmida e seco sub-úmida tendo em vista encontrar-se em faixa climaticamente intermediária a essas duas regiões, de acordo com a classificação de Thornthwaite (1948).

Devido a inexistência de registros climáticos para a região árida, reconhecidamente de baixa umidade atmosférica e abrangendo aproximadamente 10% do território paraibano, deixou-se de determinar as vazões mínimas para aquela região.

5. RESUMO E CONCLUSOES

De acordo com os resultados teóricos e experimentais obtidos nas condições de realização deste trabalho, concluiu-se o seguinte:

1. A análise estatística de qui-quadrado mostrou que, ao nível de 1% de probabilidade, os valores simulados não diferiram significativamente dos valores experimentais obtidos durante a secagem de milho híbrido (Zea mays L.) realizadas nas cidades de João Pessoa e Campina Grande-PB, climaticamente representativas das regiões úmida e seco sub-úmida, respectivamente. A partir desta análise estatística pôde-se confirmar a validade do modelo original de THOMPSON (1967), modificado com a introdução da equação de camada delgada proposta por MISRA e BROOKER (1980), para a simulação de secagem de milho híbrido (Zea mays L.) a baixas temperaturas.
2. Tratando-se de um aprimoramento do modelo de THOMPSON (1967), o modelo proposto por MOREY et alii (1976) com a inserção da equação de camada fina proposta por MISRA e BROOKER (1980), pode ser utilizado para a determinação das vazões mínimas de ar para secagem de milho a baixas temperaturas no Estado da Paraíba.
3. Pelo teste de Tukey as vazões médias mínimas de João Pessoa e Campina Grande não diferiram significativamen-

te ao nível de 1% de probabilidade. Entretanto, as vazões médias mínimas para Patos diferiu significativamente das de João Pessoa e Campina Grande para o mesmo nível de probabilidade pelo teste de Tukey.

4. As vazões mínimas de ar para secagem do milho a baixas temperaturas para as regiões úmida, seco sub-úmida e semi-árida do Estado da Paraíba variaram respectivamente de 7,66 a 10,77, 6,85 a 12,88 e 4,42 a 8,65 m^3/min por tonelada de grãos.
5. As vazões mínimas de ar indicadas para o Estado da Paraíba estão compreendidas entre 4,42 a 12,88 m^3/min por tonelada de grãos, com exceção da região árida que representa aproximadamente 10% do território paraibano.

LITERATURA CITADA

- ALAN, A. e SHOVE, G.C. - **Simulation of Soybean Drying.** Transactions of The ASAE, St. Joseph, MI 49085, 16 (1): 134-136, 1973.
- BAUDMAN, G.R.; MANDY, M.Y. & BARRE, H.J. **Analog Computer Simulation of Deep-Bed Drying of Grain.** Transactions of The ASAE, St. Joseph, MI 49085, 14(6): 1058-1060, 1971.
- BARRET, J.R.Jr., OKOS, R.R.; STEVENS, J.B. **Simulation of Low Temperature Wheat Drying.** Transactions of the ASAE, St. Joseph, Mich, 24(4): 1042-6, 1981.
- BROOKER, D.E.; BAKKER,--ARKEMA, F.W. & HALL, C.W. **Drying Cereal Grains.** Westport, Connecticut, AVI Publising Co., 1974. 265p.
- CHIEN, K.S.; MATHES, R.K.; VERMA, B.P. **Dimensional Analysis of Seed-Moisture Movement in Deep-Bed Drying.** Transactions of the ASAE, St. Joseph, MI 49085, 14(2): 277-281, 1971.
- FLOOD, C.A.Jr.; SABBAN, M.A.; KEENER, D.; PEART, R.N. **Simulation of a Natural-Air Corn Drying System.** St. Joseph, MI 49085, 1969. 4p (ASAE paper 69.331)
- GOMES, F.P. **Curso de Estatística Experimental,** Piracicaba - SP, 1982.

- HALL, C.W. **Drying Farm Crops.** Washington State University, Pullman, Washington. 1971.
- HELDMAN, D.R. **Food Process Engineering.** Michigan State University. 1975.
- LI, H. e MOREY, R.V. **Thin-Layer Drying of Yellow Dent Corn.** Transactions of the ASAE 27(2): 581-585. 1984.
- MARTINS, J.H. **Simulação de Secagem de Milho em Camada Estacionária.** Viçosa/MG. 1982.97 p. (Tese de Mestrado).
- MARTINS, J.H.; MATA, M.E.R.M.C. **Introdução à Teoria e Simulação Matemática de Secagem de Grãos.** Núcleo de Tecnologia em Armazenagem, Campina Grande - PB, UFPB. 1984.
- MARTINS, J.H. **Thin-Layer Drying Rates of Corn Hybrids Related to Performance of High-Speed, High Temperature Batch Dryer.** Purdue University. West Lafayette, IN. 1988. 340 p. Tese de Ph.D.
- MATA, M.E.R.M.C. **Estudo Experimental de Seca-Aeração de Amêndoas de Cacau em Camadas Finas.** Viçosa, Universidade Federal de Viçosa. 64p. (Tese de Mestrado).
- MATA, M.E.R.M.C.; ALMEIDA, F.A.C. e MARTINS, J.H. **Curvas de Equilíbrio Higroscópico em Sementes de Algodão.** Revista Nordestina de Armazenagem. 1985.
- MISRA, M.K.; BROOKER, D.P. **Thin-Layer Drying and Reweting Equations for Shelled Corn.** Transactions of the ASAE. 23(5): 1254-1260. 1980.

- MOREY, R.V.; KEENER, H.M.; THOMPSON, T.L.; WHITE, G.N.;
BAKKER-ARKEMA, F.W. **The Present Status of Grain Drying
Simulation.** St. Joseph, MI 49085. ASAE. Paper No. 78-3009,
1978
- NEVES, M.J.B. **Modelagem Físico-Matemática do Processo de
Seca-Aeração.** Universidade Federal de Viçosa, 1982. 55p.
(Tese de Mestrado).
- PINHEIRO FILHO, J.B. **Estudo da Curva de Secamento de Cacau.**
Viçosa, Universidade Federal de Viçosa. Imprensa
Universitária, 1972. 40p. (Tese de Mestrado).
- DUEIROZ, D.M.; SILVA, J.S.; MELO, E.C. **Práticas de Simulação
de Secagem em Calculadoras Programáveis.** Centro Nacional
de Treinamento em Armazenagem. Viçosa - MG, 1982. 83p.
(série Centrear nº 3).
- SHERWOOD, T.K.; PIGFORD, R.L.; WILKE, C. R. **Mass Transfer.**
1975.
- SILVA, M.A.V.; BRAGA, C.C.; AGUIAR, M.J.N.; NIETZCHE, M.H.;
SILVA, S.B. **Atlas Climatológico do Estado da Paraíba.**
Núcleo de Meteorologia Aplicada, UFPB, Campina Grande-PB,
1987.
- SINICIO, R. **Simulação de Secagem de Milho em Camadas Espessas
e Baixas Temperaturas.** Viçosa - MG, UFV, 1985. (Tese de
Mestrado).

THOMPSON, T.L. Predicted Performance and Optimal Design of Convection Grain Dryers. Tese Ph.D. Purdue University, West Lafayette, IN 47907. 1967 (Tese de Ph.D.).

THOMPSON, T.L.; PEART, R.N. e FOSTER, G.H. Mathematical Simulation of Corn Drying - A New Model. Transactions of the ASAE, 11(4): 582-586, 1968.

TROEBER, J.M.; HUKILL, W.V. Mathematical Description of the Drying Rate of Fully Exposed Corn. Transactions of the ASAE, 14(6): 1153-1156. 1971.

APENDICE A

PROGRAMA PARA DETERMINAÇÃO DE VAZDES MÍNIMAS DE AR PARA SECAGEM DE GRÃOS

Daniel Marçal de Queiroz

```

DIMENSION A(30),U(30),E(30),D(30),T(30),W(30),
10UT(15,100),UUR(15,100),TUF(30),GUF(30),AUF(30)
FVS(TABS)=EXP(-7511.52/TABS+89.63121+.02379297*TABS+2.0998405E-11#
1TABS**4.-12.150799*ALOG(TABS)-1.1454551E-5*TABS*TABS-1.2810334E-8*
2TABS*TABS*TABS)/.133322
C
OPEN(1,FILE='ENTRA')
OPEN(3,FILE='SAI')
C
READ(1,1)U1,G1,S1,XL1
READ(1,81)U8,U9,DD
H2=3.
WRITE(3,1456)U1,G1,S1,XL1
1456 FORMAT(/,20X,'Teor de umidade inicial (Forc. BU) ****',F5.2,/,
1      20X,'Temperatura inicial do produto (C) ****',F5.2,/,
2      20X,'Area do silo-secador (M2) ****',F6.2,/,
3      20X,'Altura do silo secador (M) ****',F4.1)
READ(1,82)L2,ND1
WRITE(3,2095)H2,U8,U9,DD
2095 FORMAT( 20X,'INCREMENTO DE TEMPO DE SIMULACAO (H) ****',F4.1,/,
1      20X,'TEOR DE UNIDADE FINAL MEDIA (FORC. BU) **',F5.2,/,
2      20X,'TEOR DE UNIDADE FINAL MAXIMA (FORC. BU) *',F5.2,/,
3      20X,'AQUECIMENTO DO AR (C) ****',F4.1)
WRITE(3,2082)L2,ND1
2082 FORMAT( 20X,'Numero de camadas no silo ****',I2,/,
1      20X,'Numero de dias de dados climaticos dispo.',I3)
WRITE(3,2083)
2083 FORMAT(/,30X,'DADOS METEOROLOGICOS',/,2X,'BDMKAA',6X,'T9',7X,
1'T15',7X,'T21',7X,'UR9',6X,'UR13',6X,'UR31')
1 FORMAT(4F10.5)
81 FORMAT(3F10.5)
82 FORMAT(3I10)
DO 300 I5=1,ND1
READ(1,322)IDIA,IMES,IANO,(UUT(IJK,I5),IJK=1,3),(UUR(IJK,I5),IJK=
11,3)
WRITE(3,333)IDIA,IMES,IANO,(UUT(IJK,I5),IJK=1,3),(UUR(IJK,I5),IJK=
11,3)
322 FORMAT(3I2,4X,6F10.5)
333 FORMAT(2X,3I2,4X,6F10.5)
300 CONTINUE
U1=U1/(100.-U1)
U8=U8/(100.-U8)
U9=U9/(100.-U9)
5145 WRITE(3,2324)
2324 FORMAT(///)
IDMQ=0
JJ=0
1010 QMIN=.5*S1*XL1*.75
QMAX=15.*S1*XL1*.75

```



```

308 Q1=QMAX- (QMAX-QMIN)*.618
QMAX2=QMAX/(S1*XL1*.75)
QMIN2=QMIN/(S1*XL1*.75)
Q2=Q1/(S1*XL1*.75)
DO 2 I1 = 1,L2
A(I1)=0.
U(I1)=U1
G(I1)=G1
3 CONTINUE
I3=0
H5=0.
II=0
IDIA=JJ
5858 IDIA=IDIA+1
MHC=0
II = II +1
HORA1=0.
58 MHC=MHC+1
IF (MHC.GT.8) GO TO 5858
H5 =H5+H2
HORA1=HORA1+H2
GO TO (61,61,61,62,62,63,63,63),MHC
61 T1=OUT(1, IDIA)
TABS=T1+273.16
PV1=PVS(TABS)*UUR(1, IDIA)/100.
W2=.622*PV1/(760.-PV1)
GO TO 64
62 T1 =OUT (2, IDIA)
TABS=T1+273.16
PV1=PVS(TABS)*UUR(2, IDIA)/100.
W2=.622*PV1/(760.-PV1)
GO TO 64
63 T1=OUT (3, IDIA)
TABS=T1+273.16
PV1=PVS(TABS)*UUR(3, IDIA)/100.
W2=.622*PV1/(760.-PV1)
64 TABS=T1 +DD+273.16
R1=(760.*W2/(W2+.622))/PVS(TABS)*100.
T1=T1+DD
T2=T1
R2=R1/100.
P1=W2*760./(W2+.622)
Q1=287.*(T2+273.16)/(133.322*(760.-P1))
X1=600.*V1*XL1*S1/(Q1*60.*HS*FLOAT(L2))
T(1)=T2
W(1)=W2
IF(R2.GE.1.) R2= .99
DO 10 J1=1,L2
J2=J1+1
C1=(.35+.851*W(J1)/(1.+W(J1)))*X1/(1.-W(J1)/(1.+W(J1)))
C2=(606.-.57*G(J1))*4.35*EXP(-28.25*W(J1))
L4=0
TABS=T (J1)+273.16
R2=(760.*W(J1)/(W(J1)+.622))/PVS(TABS)
IF (R2.GE.1.) R2= .99

```

```

R3=1.-EXP(-3.82E-5*(1.8*U(J1)+82.)*(U(J1)*100.)*.2.)
IF(R2.LT.R3) GO TO 11
R4=1.-EXP(-1.045E-4*(1.8*U(J1)+82.)*(U(J1)*100.)*.1.72)
IF(R2.GT.R4) GO TO 12
U4=U(J1)
W4=W(J1)
L4=2
GO TO 13
12 L4=1
WMAX=W(J1)
TABS=T(J1)+273.16
P1=PVS(TABS)
WMIN=.622*P1*.4/(760.-P1*.4)
DU=(WMAX-WMIN)/X1
IF(DU.GT..05) WMIN=WMAX-.05*X1
GO TO 357
11 WMIN=W(J1)
TABS=T(J1)+273.16
P1=PVS(TABS)
WMAX=.622*P1/(760.-P1)
UMIN=U(J1)-(WMAX-WMIN)/X1
IF(UMIN.LT..05) WMAX=WMIN+(U(J1)-.05)*X1
357 W4=WMAX-(WMAX-WMIN)*.612
V8=(U(J1)-(W4-W(J1))/X1)*100.
V7=(C1*G(J1)+.24*U(J1)+.45*W(J1)*T(J1)-(W4-W(J1))*
1(587.-G(J1)+C2))/(.24+.45*W4+C1)
V6=1.-EXP(-3.82E-5*(1.8*U7+82.)*V8*.2.)
IF(L4.EQ.1) V6=1.-EXP(-1.045E-4*(1.8*U7+82.)*V8*.1.72)
TABS=V7+273.16
R2=(760.*W4/(W4+.622))/PVS(TABS)
V5=V6-R2
IF((WMAX-WMIN).LT.1.E-7) GO TO 24
IF(V5.GT..001) GO TO 358
IF(V5.GT.-.001) GO TO 24
WMAX=W4
GO TO 357
358 WMIN=W4
GO TO 357
24 CONTINUE
U4=(U(J1)-(W4-W(J1))/X1)
T(J2)=(C1*G(J1)+.24*U(J1)+.45*W(J1)*T(J1)-(W4-W(J1))*
1(587.-G(J1)+C2))/(.24+.45*W4+C1)
IF(L4.EQ.1) GO TO 14
X2=U(J1)-U4
IF(X2.LT..0001) GO TO 14
U3=U(J1)
TABS=T(J1)+273.16
R2=(760.*W(J1)/(W(J1)+.622))/PVS(TABS)
IF(T(J1).LE.21.) CALL DELGA(U3,U1,T(J1),R2,W2)
IF(T(J1).LE.21.) GO TO 36
XK1=-.0821+1.3E-2*T(J1)-1.31E-4*T(J1)*T(J1)
XK2=.375+8.76E-2*ALOG(R2*100.)
XK3=1.206*(-ALOG(1.-R2)/(T(J1)+45.6))*.5
IF(XK3.GT.U1) GO TO 24
XK4=(U(J1)-XK3)/(U1-XK3)

```

```

IF(XK4.GT.1.) XK4=1.
IF(XK4.LT.0.) GO TO 26
XK4=ALOG(XK4)
XK5=(-XK4/XK1)**(1./XK2)+H2
U3=EXP(-XK1*(XK5**XK2))*(U1-XK3)+XK3
26 CONTINUE
X3=U(J1)-U3
IF(X3.LT.0.) GO TO 14
IF(X2.L1.X3) GO TO 14
W4=W(J1)+X1*(U(J1)-U3)
U4=U3
13 T(J2)=(C1*B(J1)+.24*T(J1)+.45*W(J1)*T(J1)-((W4-W(J1))*S87.-G(J1)
1+C2))/(.24+.45*W4+C1)
14 U(J1)=U4
G(J1)=T(J2)
W(J2)=W4
D8=U(J1)*100.
D7=D8/(100.+D8)
D6=.103*(EXP(495./D6**1.53)-.00845*D8+1.558)
D5=G(J1)
IF(D5.GE.15.6) GO TO 30
D6=D6*128.76*EXP(-.1458*D5-2.592)
GO TO 31
30 IF(D7.LE..19) D7=.19
IF(D7.GE..28) D7=.28
D6=D6*(32.3*EXP(-.1044*D5-1.856)+(D7-.19)*EXP(.61*(1.8*D5-38.)
1/60.))
31 D2=D6
A(J1)=A(J1)+H2/D2
X(J1)=.0884*(EXP(.006*A(J1))-1.)+.00103*A(J1)
10 CONTINUE
U7=0.
GZ7=0.
GZ6=0.
U6=0.
D1=0.
DO 50 I5=1,L2
GZ7=GZ7+G(I5)/FLOAT(L2)
IF(G(I5).GT.GZ6) GZ6=G(I5)
U7=U7+U(I5)/FLOAT(L2)
IF(D1.LT.D(I5)) D1=D(I5)
IF(U(I5).GT.U6) U6=U(I5)
50 CONTINUE
UZ7=U7*100./(1.+U7)
UZ6=U6*100./(1.+U6)
IF(I1.GE.(ND1-JJ)) GO TO 578
IF(ABS((QMIN2-QMAX2)/Q2).LT..1) GO TO 311
IF(D1.GT..42) GO TO 578
IF(D1.GT..38.AND.U7.LE.U8.AND.U6.LE.U9) GO TO 55
IF(U7.GT.U8.OR.U6.GT.U9) GO TO 58
QMAX=Q1
IDMQ=1
QF2=Q2
UZF7=UZ7
GZF7=GZ7

```

```

    UZF6=UZ6
    GZF6=GZ6
    DF1=D1
    DO 4791 JAKI=1,L2
    TUF(JAKI)=U(JAKI)
    GUF(JAKI)=G(JAKI)
    AUF(JAKI)=A(JAKI)
4791 CONTINUE
    HFS=HS
    GO TO 303
579 QMIN=Q1
    GO TO 303
55 CONTINUE
    WRITE(3,310)Q2
310 FORMAT(30X,'A VAZAO MINIMA E ',F10.5,' M3/MIN/T')
    WRITE(3,54) UZ7,UZ6,GZ7,GZ6-D1,HS
54 FORMAT(15X,'UMIDADE MEDIA      = ',F6.2,/,
1      15X,'UMIDADE MAXIMA      = ',F6.2,/,
A      15X,'TEMPERATURA MEDIA   = ',F6.2,/,
B      15X,'TEMPERATURA MAXIMA  = ',F6.2,/,
2      15X,'DETERIORACAO MAXIMA= ',F6.5,/,
3      15X,'TEMPO DE SECAGEM    = ',F6.1)
    GO TO 2007
311 IF(IDMQ.EQ.0) GO TO 1570
    WRITE(3,310)QF2
    WRITE(3,54) UZF7,UZF6-GZF7,GZF6,DF1,HFS
    DO 5023 JAKI=1,L2
    U(JAKI)=TUF(JAKI)
    G(JAKI)=GUF(JAKI)
    A(JAKI)=AUF(JAKI)
5023 CONTINUE
    GO TO 2007
1570 WRITE(3,1580)
1580 FORMAT(15X,'NAO FOI ENCONTRADA SOLUCAO UTILIZANDO FLUXOS DE
    IAR DE ATE 15 M3/MIN/T')
    GO TO 1005
2007 DO 567 J1=1,L2
    D8=U(J1)*100.
    D7=D8/(100.+D8)
    D6=.102*(EXP(455./D8**1.53)-.00845*D8+1.558)
    D5=G(J1)
    IF(D5 .GE. 15.6) GO TO 1030
    D6=D6*133.76*EXP(-.1458*D5-2.592)
    GO TO 1031
1030 IF(D7 .LE. .19) D7 = .19
    IF(D7 .GE. .28) D7 = .28
    D6=D6*(32.9*EXP(-.1044*D5-1.856)+(D7-.19)*EXP(.61*(1.8*D5-29.)
    1/60.))
1031 D2=D6
    A(J1)=A(J1)+30.*D2/D8
    D(J1)=.0884*(EXP(.006*A(J1))-1.)+.00103*A(J1)
567 CONTINUE
    D1=0.
    DO 738 I5=1,L2
    IF(D1.LT.D(I5)) D1=D(I5)

```

```

738  CONTINUE
      WRITE(3,360) D1
360  FORMAT(15X,'DETERIORACAO MAXIMA APDS 30 DIAS DE ARMAZENAMENTO=',
1P6.5)
1005 CONTINUE
      STOP
      END
      SUBROUTINE DELGA(UATUAL,UINIC,TAR,UR,DELTT)
      UE=1.206*(-ALOG(1.-UR)/(TAR+45.6))**.5
      IF(UE.LT.UATUAL) GO TO 12
      WRITE(3,309)
309  FORMAT('PAREI PORQUE UE MAIOR DO QUE UATUAL')
      STOP
12   IF(UINIC.LT.UATUAL) GO TO 13
      UINIC=UINIC
      GO TO 15
13   UINIC=UATUAL
15   DU=UINIC-UE
      XRU=(UATUAL-UE)/DU
101  RSQ=UR*UR
      X=SQRT(4.0142+1.453*RSQ)-.01*(TAR*1.8+32.)*SQRT(3.353+3.*RSQ)
      Y=.1245-.22*UR+.0023*UR*(1.8*TAR+32.)-.00058*(1.8*TAR+32.)
      K=0
      T1=1.
      IF(XRU.LT..999) GO TO 102
      T2=0.
      GO TO 104
102  U=ALOG(-ALOG(XRU))
103  Z1=X*T1**Y-.664*ALOG(T1)+U
      Z2= X*Y*T1***(Y-1.)-.664/T1
      T2=T1-Z1/Z2
      K=K+1
      EPS=ABS(T2-T1)
      IF(T2.LT.0.) T2=.001
      T1=T2
      IF(K.LT.30) GO TO 300
      WRITE(3,609)
609  FORMAT('PAREI PORQUE NAO CONVERGIU')
      STOP
300  CONTINUE
      IF (EPS .GT. .01 .OR. Z1 .GT. .01) GO TO 103
104  T2 = T2 + DELTT
      UATUAL = DU*EXP(-EXP(-X*T2**Y)*T2**.664)+UE
      RETURN
      END

```

APENDICE B

SOFTWARE DE SECAGEM DE MILHO UTILIZANDO O MODELO DE THOMPSON (1967) MODIFICADO DESENVOLVIDO NO NÚCLEO DE TECNOLOGIA EM ARMAZENAGEM EM DBASE III.

```

SET DEVICE TO SCREEN
SET TALK OFF
STORE SPACE(77) TO limpa
STORE 4 TO lin
STORE 0 TO passo
DO WHILE (lin < 22)
    @ lin,2 SAY limpa
    STORE (lin + 1) TO lin
ENDDO
@ 2,2 SAY limpa
@ 2,10 SAY "Modelo de THOMPSON: SECAGEM EM LEITO FIXO"
STORE " " TO cond
@ 23,2 SAY limpa
@ 6,5 SAY "Teor de Umidade Inicial do Produto .....[X b.s.]:"
@ 7,5 SAY "Temperatura Inicial do Produto .....
    [ "+CHR(248)+"C]:"
@ 8,5 SAY "Temperatura do AR na Entrada do Secador .....
    [ "+CHR(248)+"C]:"
@ 9,5 SAY "Razao da Mistura do AR de Secagem .....
    [Kg(H2O/Kg(ar))]:"
@ 10,5 SAY "Fluxo de AR de Secagem .....
    [m3/min/m2]:"
@ 11,5 SAY "Teor de Umidade Final .....[X b.s.]:"
@ 12,5 SAY "Altura Total da Camada de Grãos .....[ m ]:"
@ 13,5 SAY "Incremento de Tempo .....[ h ]:"
@ 14,5 SAY "Volume Especifico do AR .....[m3/Kg(ar)]:"
@ 20,10 SAY "TECLE: (C) para CANCELAR (ENTER) para CONTINUAR"
    GET cond PICTURE "!"
READ
IF ((cond = "C") .OR. (cond = "I"))
    STORE "X" TO cond
ELSE
    STORE 1 TO x-cont
    STORE 000.0000000000 TO mo,go,to,ho,gar,mf,l,dt,uesp,m1,m2,m3,
        m4,g1,g2,g3,g4,mfinal
    STORE 000.0000000000 TO r,t1,m,g,t,h,tf,med,cp,ur,urel,me,mc,
        e,b,teq,dh,hf,dhfg,tabs,pv,pvzf
    @ 4,5 SAY "Entre com os dados abaixo:"
    @ 6,5 SAY "Teor de Umidade Inicial do Produto .....[X b.s.]:"
        " GET mo PICTURE "999.9999"
    @ 7,5 SAY "Temperatura Inicial do Produto .....
        [ "+CHR(248)+"C]:" GET go PICTURE "999.9999"
    @ 8,5 SAY "Temperatura do AR na Entrada do Secador .....
        [ "+CHR(248)+"C]:" GET to PICTURE "999.9999"
    @ 9,5 SAY "Razao da Mistura do AR de Secagem[Kg(H2O/Kg(ar))]:"
        " GET ho PICTURE "999.9999"
    @ 10,5 SAY "Fluxo de AR de Secagem .....[m3/min/m2]:"
        " GET gar PICTURE "999.9999"
    @ 11,5 SAY "Teor de Umidade Final .....[X b.s.]:"
        " GET mfinal PICTURE "999.9999"

```

```

@ 12,5 SAY "Altura Total da Camada de Graos .....C m 3:
" GET 1 PICTURE "999.9999"
@ 13,5 SAY "Incremento de Tempo .....C h 3:
" GET dt PICTURE "999.9999"
@ 14,5 SAY "Volume Especifico do AR .....Em3/Kg(ar)3:
" GET vesp PICTURE "999.9999"

READ
IF ((vesp = 0.0000) .OR. (dt = 0.0000) .OR. (l = 0.0000) .OR.
(mfinal = 0.0000) .OR. (gar = 0.0000))
STORE "Dados Incorretos! Tenha mais ATENCAO " TO msg
@ 18,20 SAY "-----"
@ 19,21 GET msg
@ 20,20 SAY "-----"
@ 23,2 SAY limpa
@ 23,20 SAY " Aperte a TECLA << ENTER >>"
READ
RETURN
ENDIF
IF ((ho = 0.0000) .OR. (to = 0.0000) .OR. (go = 0.0000) .OR.
(mo = 0.0000))
STORE "Dados Incorretos! Tenha mais ATENCAO " TO msg
@ 18,20 SAY "-----"
@ 19,21 GET msg
@ 20,20 SAY "-----"
@ 23,2 SAY limpa
@ 23,20 SAY " Aperte a TECLA << ENTER >>"
READ
RETURN
ENDIF
STORE 4 TO lin
DO WHILE (lin < 22)
@ lin,2 SAY limpa
STORE (lin + 1) TO lin
ENDDO
IF (camada > 5)
IF (camada >= 7)
@ 6,10 SAY "Os RESULTADOS serao apresentados na
IMPRESSORA."
@ 8,10 SAY "-----"
@ 9,10 SAY "!"
@ 10,10 SAY "!"Para este RELATORIO, o papel na Impres
@ 11,10 SAY "!"sora deve ser o de << 132 COLUNAS >>.
@ 12,10 SAY "!"
@ 13,10 SAY "-----"
STORE "I" TO cond
ELSE
@ 6,10 SAY "Os RESULTADOS serao apresentados na IMPRES
SORA."
STORE "I" TO cond
ENDIF
ELSE
STORE " " TO cond
@ 8,10 SAY "Para a SAIDA dos resultados temos dois MODOS:"
@ 10,10 SAY "C V ] - VIDE0;"
@ 11,10 SAY "C I ] - IMPRESSORA."

```



```

@ 13,10 SAY "ESCOLHA O SEU MODO:" GET cond PICTURE "!"
READ
ENDIF
STORE "M" TO eme
STORE "6" TO ge
STORE 1 TO cont
IF (cond = "V")
  STORE 4 TO lin
  DO WHILE (lin < 22)
    @ lin,2 SAY limpa
    STORE (lin + 1) TO lin
  ENDDO
  STORE 4 TO lin
  STORE 19 TO col
  STORE "1" TO cont
  DO WHILE (VAL(cont) <= camada)
    STORE (eme + cont) TO eme
    STORE (ge + cont) TO ge
    STORE 0 TO &eme,&ge
    STORE mo TO &eme
    STORE go TO &ge
    STORE (VAL(cont)) TO cont
    cont = cont + 1
    STORE (STR(cont,1)) TO cont
    eme = "M"
    ge = "6"
  ENDDO
  STORE (580#1#uesp)/(gar#di#240) TO r
  STORE 000.0000000000 TO t1
  DO WHILE (x = 1)
    STORE to TO t
    STORE ho TO h
    STORE (t1+dt) TO t1
    @ lin,3 SAY "Hora -----)"
    @ lin,col SAY t1 PICTURE "999.99"
    STORE "M" TO eme
    STORE "6" TO ge
    STORE "1" TO cont
    DO WHILE (VAL(cont) <= camada)
      eme = eme + cont
      ge = ge + cont
      STORE &eme TO m
      STORE &ge TO g
      DO srp3
        STORE mf TO &eme
        STORE t TO &ge
        eme = "M"
        ge = "6"
      STORE (VAL(cont)) TO cont
      cont = cont + 1
      STORE (STR(cont,1)) TO cont
      passo = 0
    ENDDO
    med = 0.0000
    cont = "1"
  ENDDO

```

```

eme = "M"
DO WHILE (VAL(cont) <= camada)
  eme = eme + cont
  med = 3*eme + med
  cont = VAL(cont)
  cont = cont + 1
  cont = STR(cont,1)
  eme = "M"
ENDDO
med = med/camada
STORE (lin + 2) TO lin
@ lin,3 SAY "Media UZ b.s.]"
@ lin,col SAY med PICTURE "999.99"
IF (med >= mfinal)
  STORE 4 TO lin
  STORE (col + 10) TO col
  IF (col > 70)
    STORE " " TO cond
    @ 23,2 SAY limpa
    @ 23,10 SAY "Aperte Q.Q. TECLA" GET cond
    READ
    STORE 4 TO lin
    DO WHILE (lin < 22)
      @ lin,2 SAY limpa
      STORE (lin + 1) TO lin
    ENDDO
    STORE 4 TO lin
    STORE 19 TO col
  ENDIF
  LOOP
ELSE
  EXIT
ENDIF
ENDDO
ENDIF
IF (cond = "I")
  STORE " " TO imp
  @ 17,10 SAY "TECLE: <<ENTER>> SE A IMPRESSORA
    ESTIVER OK." GET imp PICTURE "!"
  READ
  SET DEVICE TO PRINT
  STORE "NUCLEO DE TECNOLOGIA EM ARMAZENAGEM" TO cabec1
  STORE "SOFTWARE APLICATIVO A SECAGEM DE GRAOS" TO cabec2
  STORE "Modelo de THOMPSON: SECAGEM EM LEITO FIXO" TO cabec3
  IF (camada = 3)
    STORE "-----" TO linha
    STORE "| 1. Cam. | 2. Cam. | 3. Cam. | Media |" TO linha
    STORE "| Hora |-----|-----|-----| UZ |" TO linha2
    STORE "| | UZ |Tem|UZ |Tem|UZ |Tem| b.s. |" TO linha3
    STORE "|-----|-----|-----|-----|" TO linha4
  ENDIF
  IF (camada = 4)

```

```

STORE "-----" TO linha
STORE " |1.Cam.|2.Cam.|3.Cam.|4.Cam.| Media |" TO linha1
STORE " |Hora|-----|-----|-----|-----| UZ |" TO linha2
STORE " | |UZ| T |UZ| T |UZ| T |UZ| T | b.z. |" TO linha3
STORE " |-----|-----|-----|-----|-----|-----|" TO linha4
ENDIF
IF (camada >= 7)
  @ 1,1 SAY CHR(15)+CHR(14)+cabec1
  @ 3,1 SAY cabec2
  @ 5,1 SAY cabec3+CHR(10)
  @ 7,1 SAY CHR(15)+linha
  @ 8,1 SAY linha1
  @ 9,1 SAY linha2
  @ 10,1 SAY linha3
  @ 11,1 SAY linha4
ELSE
  @ 1,1 SAY cabec1
  @ 3,1 SAY cabec2
  @ 5,1 SAY cabec3
  @ 7,1 SAY linha
  @ 8,1 SAY linha1
  @ 9,1 SAY linha2
  @ 10,1 SAY linha3
  @ 11,1 SAY linha4
ENDIF
STORE 10 TO barra
STORE 11 TO col
STORE 12 TO lin
eme = "M"
ge = "G"
STORE "1" TO cont
DO WHILE (VAL(cont) <= camada)
  STORE 0 TO %eme,%ge
  STORE no TO %eme
  STORE go TO %ge
  STORE (VAL(cont)) TO cont
  cont = cont + 1
  STORE (STR(cont-1)) TO cont
  eme = "M"
  ge = "G"
ENDDO
STORE (580*1%veap)/(gar*dt*camada*60) TO r
STORE 000.0000000000 TO t1
DO WHILE (x = 1)
  STORE to TO t
  STORE ho TO h
  STORE (t1+dt) TO t1
  @ lin,1 SAY ";"
  @ lin,3 SAY t1 PICTURE "999.99"
  STORE "M" TO eme
  STORE "G" TO ge
  STORE "1" TO cont
  DO WHILE (VAL(cont) <= camada)
    eme = eme + cont
    ge = ge + cont
  
```

```

STORE &eme TO m
STORE &ge TO g
DO srp&i
STORE mf TO &eme
STORE t TO &ge
eme = "M"
ge = "G"
cont = VAL(cont)
cont = cont + 1
cont = STR(cont,1)
passo = 0
ENDDO
med = 0.0000
cont = "1"
eme = "M"
DO WHILE (VAL(cont) <= camada)
  eme = eme + cont
  med = &eme + med
  cont = VAL(cont)
  cont = cont + 1
  cont = STR(cont,1)
  eme = "M"
ENDDO
med = med/camada
@ lin,barra SAY ";"
@ lin,col SAY med PICTURE "999.99"
STORE (barra + 8) TO barra
@ lin,barra SAY ";"
IF (med) >= mfins1)
  STORE (lin + 1) TO lin
  IF (lin > 58)
    IF (camada >= 7)
      @ lin,1 SAY linha+CHR(15)
      EJECT
      @ 1,1 SAY CHR(15)+CHR(14)+cabec1
      @ 3,1 SAY cabec2
      @ 5,1 SAY cabec3+CHR(10)
      @ 7,1 SAY CHR(15)+linha
      @ 8,1 SAY linha1
      @ 9,1 SAY linha2
      @ 10,1 SAY linha3
      @ 11,1 SAY linha4
    ELSE
      @ 1,1 SAY cabec1
      @ 3,1 SAY cabec2
      @ 5,1 SAY cabec3
      @ 7,1 SAY linha
      @ 8,1 SAY linha1
      @ 9,1 SAY linha2
      @ 10,1 SAY linha3
      @ 11,1 SAY linha4
    ENDIF
  STORE 13 TO lin
  STORE 10 TO barra
  STORE 12 TO col

```

```

ELSE
  @ lin,1 SAY linha4
  STORE (lin + 1) TO lin
  STORE 10 TO barra
  STORE 11 TO col
ENDIF
LOOP
ELSE
  STORE (lin + 1) TO lin
  @ lin,1 SAY linha
  EJECT
  SET DEVICE TO SCREEN
  EXIT
ENDIF
ENDDO
ENDIF
ENDIF
STORE " " TO qualquer
@ 23,2 SAY limpa
@ 23,10 SAY "Aperte QUALQUER tecla" GET qualquer
READ
RETURN

```

SUBROTINA PRINCIPAL DO SOFTWARE DE SECAGEM DE MILHO UTILIZANDO O MODELO DE THOMPSON (1967) MODIFICADO DESENVOLVIDO NO NÚCLEO DE TECNOLOGIA EM ARMAZENAGEM EM DBASE III.

```

SET DEVICE TO SCREEN
SET TALK OFF
chave2 = 0
STORE 0.0000000000 TO vel,al,bl,cl,k,n,z,mf1
cp = ((0.35+(0.851*(m/(100+m))))*r)*(1+(0.01*m))
t = (((0.24+(0.45*h))*t)+(cp*g))/(0.24+(0.45*h)+cp)
mf = m
DO ure13
ur = ure1
IF (ur )= 1.0)
  chave2 = 2
ELSE
  me = SQRT(-LOG(1-ur)/(0.0000382*(1.8*t + 82)))
  mr = LOG((m-me)/(mo-me))
  vel = gar/60
  k = EXP(-7.3735 + (1.2773*LOG((1.8*t) + 32)))+(0.1578*vel))
  n = 0.0811*(LOG(ur*100)) + (0.0078*mo)
  z = (i/n)
  teq = ((mr/(-k))*z) + dt)
  mfi = EXP((-k)*(teq*n))
  mf = (mf1*(mo-me)) + me
  dh = (r*(m-mf))/100
  hf = (h + dh)
  dhfg = (606 - (0.57*t))*4.35*(EXP(-0.2835*m))
  tf = (((0.24+(0.45*h))*t)-(dh*(587.9+dhfg-t))+(cp*t))/
    (0.24+(0.45*hf)+cp))
  h = hf
  t = tf

```

```

DO ure13
ur = ure1
IF (ur )= 1.0)
  chave2 = 2
ELSE
  lin = lin + 2
  @ lin,3 SAY "CUZ b.s. -)"
  @ lin,col SAY mf PICTURE "999.99"
  lin = lin + 1
  @ lin,3 SAY "Temp. ----)"
  @ lin,col SAY t PICTURE "999.99"
ENDIF
ENDIF
DO WHILE (chave2 = 2)
  tfo = t
  hfo = h
  chave3 = 3
  DO WHILE (chave3 = 3)
    t = t + 1
    h = ((0.24*(tfo-t))+(598-(0.55*tfo))*hfo)+(cp*(tfo-t))/
      (598+(0.45*t)-tfo)
    DO ure13
    ur = ure1
    IF (ur )= 1.0)
      LOOP
    ELSE
      mf = mf-((100*(h-hfo))/r)
      lin = lin + 2
      @ lin,3 SAY "CUZ b.s. -)"
      @ lin,col SAY mf PICTURE "999.99"
      lin = lin + 1
      @ lin,3 SAY "Temp. ----)"
      @ lin,col SAY t PICTURE "999.99"
      STORE 0 TO chave2,chave3
      EXIT
    ENDIF
  ENDDO
ENDDO
RETURN

```

SUBROTINA DE DETERMINAÇÃO DA UNIDADE RELATIVA DO SOFTWARE DE SECAGEM DE MILHO UTILIZANDO O MODELO DE THOMPSON (1967) MODIFICADO DESENVOLVIDO NO NÚCLEO DE TECNOLOGIA EM ARMAZENAGEM EM DRASE III.

```

SET TALK ON
STORE 0.0000000000 TO tabs,pv,pvs,ure1
tabs = (t + 273.16)
pv = (14.696*h)/(0.62194h)
pvs = EXP(51.594-(6834/tabs)-(5.16927*LOG(tabs)))
ure1 = pv/pvs
RETURN

```