

# ARMAZENAMENTO DE ENERGIA SOLAR EM MATERIAL HIGROSCÓPICO NÃO CONVENCIONAL E SUA UTILIZAÇÃO NA SECAGEM DE MILHO.

Por:

Elias Fatturi  
Engenheiro Químico

Prof. Orientador:

Dr. Herbert G. Wirth

Tese apresentada para  
obtenção do título de  
Mestre em Engenharia  
de Alimentos.

FACULDADE DE ENGENHARIA DE ALIMENTOS E AGRÍCOLA  
UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

- 1981 -

UNICAMP  
BIBLIOTECA CENTRAL

À Raquel, minha esposa, e  
às minhas filhas Clarissa,  
Letícia e Camila.

AGRADECIMENTOS

Ao professor Dr. Herbert G. Wirth pela sua orientação e amizade.

Ao professor Dr. Theo G. Kieckbush pela sua contribuição no desenvolvimento deste trabalho.

Ao professor Dr. Gonzalo Roa pelo seu envolvimento e contribuição que me levaram a iniciar este trabalho.

A Faculdade de Engenharia de Alimentos e Agrícola da Unicamp, especialmente ao Departamento de Engenharia de Alimentos, pelas facilidades oferecidas.

À Fundação de Ciência e Tecnologia - CIENTEC, pela oportunidade que me concedeu para obter esta formação.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul - FAPERGS, pela bolsa de estudos concedida através do processo nº 036/78.

Aos professores do Departamento de Engenharia de Alimentos pela amizade que me dedicaram.

Aos amigos que contribuíram para a realização deste trabalho, em especial ao Kil, Margareth, Manoel e Elizabeth.

## ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS .....	III
ÍNDICE GERAL .....	IV
LISTA DE TABELAS .....	VII
LISTA DE FIGURAS .....	XI
SIMBOLOGIA .....	XIII
RESUMO .....	XV
SUMMARY .....	XVII
1. - INTRODUÇÃO .....	1
2. - OBJETIVOS .....	3
3. - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	4
3.1 - Secagem de Grãos em Silos .....	4
3.2 - Influência das Condições Climáticas na secagem ...	8
3.3 - Armazenamento da Energia Solar .....	9
3.3.1 - Armazenamento na Forma de Calor Sensível .....	11
3.3.2 - Armazenamento na Forma de Calor Latente .....	13
3.3.3 - Armazenamento através de Material Higroscópico ..	16
3.4. - Utilização de Energia Solar Armazenada na Secagem de Grãos em Silo .....	20
4. - MATERIAIS E MÉTODOS .....	22
4.1 - Modelo Matemático de Transferência Simultânea de Calor e Massa entre o Ar e o Duto de Madeira .....	22
4.2 - Propriedades Físicas Próprias da Madeira Exigidas pelo Modelo Matemático .....	25
4.2.1 - Isotermas de Unidade de Equilíbrio .....	25
4.2.2 - Densidade .....	26
4.2.3 - Calor Específico .....	27
4.2.4 - Calor Latente e Vaporização da Umidade .....	27
4.3 - Propriedades Físicas Dependentes do Arranjo Geomê- trico do Sistema de Dutos de Madeira Necessárias para a solução do Modelo Matemático .....	29
4.3.1 - Curvas de Secagem e Umidificação da Madeira em Tábuas .....	29
4.3.2 - Diâmetro Circular Equivalente .....	31
4.3.3 - Área Transversal do Volume de Controle .....	34
4.3.4 - Densidade Aparente .....	34
4.3.5 - Vazão Mássica do Ar .....	34
4.3.6 - Área Específica .....	34
4.3.7 - Coeficiente Convectivo de Transferência de Calor.	35



4.4	-	Modelo Matemático de Secagem do Milho em Silos .....	35
4.5	-	Propriedades Físicas do Milho Exigidas pelo Modelo Matemático de Secagem .....	39
4.5.1-		Equações de Secagem e Umidificação .....	40
4.5.2-		Isotermas de Umidade de Equilíbrio.....	40
4.5.3-		Calor Latente de Vaporização da Umidade .....	40
4.5.4-		Capacidade Calorífica .....	40
4.5.5-		Densidade Aparente .....	41
4.6	-	Propriedades Físicas do Ar .....	41
4.6.1-		Viscosidade .....	41
4.6.2-		Capacidade Calorífica .....	41
4.6.3-		Condutividade Térmica .....	42
4.7	-	Equações Psicrométricas .....	42
4.7.1-		Pressão de Saturação do Vapor de Água .....	42
4.7.2-		Volume Específico .....	43
4.7.3-		Umidade Absoluta .....	43
4.8	-	Equações de Previsão da Deterioração do Milho .....	44
4.9	-	Condições Climáticas .....	46
4.10	-	Aquecimento do Ar pelo Coletor Solar .....	47
4.11	-	Aquecimento do Ar pelo Ventilador .....	47
4.12	-	Comprovação do Modelo Matemático de Secagem e umidificação dos Dutos de Madeira .....	48
4.13	-	Comprovação do Modelo Matemático de Secagem e umidificação do milho em Silo .....	48
4.14	-	Teste Estatístico na Comprovação dos Modelos Matemáticos .....	49
4.15	-	Solução Numérica das Equações Diferenciais .....	49
4.16	-	Avaliação do Uso da Energia Solar Armazenada no Processo de secagem do Milho em Silo .....	49
5.	-	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	54
5.1	-	Isotermas de Umidade de Equilíbrio da Madeira .....	54
5.2	-	Densidade de Madeira Seca .....	55
5.3	-	Calor Latente de Vaporização da Umidade da Madeira...	56
5.4	-	Curvas de secagem e Umidificação da Madeira em Tábuas .....	58
5.5	-	Propriedades Físicas do Ar .....	67
5.5.1-		Viscosidade .....	67

5.5.2	-	Condutividade Térmica .....	67
5.6	-	Comprovação do Modelo Matemático de Transferência Simultânea de Calor e Massa entre o Ar e o Duto de Madeira .....	68
5.7	-	Comprovação do Modelo Matemático de Secagem e Umidificação do Milho em Silo .....	71
5.8	-	Avaliação do Sistema de Armazenamento de Energia Solar .....	72
5.8.1	-	O Ciclo de Armazenamento .....	72
5.8.1.1	-	Condições do ar .....	72
5.8.1.2	-	Resposta do Sistema Frente a um Ciclo de Armazenamento .....	73
5.8.2	-	O Ciclo de Entrega .....	75
5.8.2.1	-	Condições do Ar .....	75
5.8.2.2	-	Resposta do Sistema Frente a um Ciclo de Entrega da Energia Armazenada .....	75
5.8.3	-	Características do Sistema .....	86
5.8.3.1	-	Capacidade de Retenção da Água .....	86
5.8.3.2	-	Capacidade de Armazenamento de Energia .....	86
5.9	-	Influência do Uso da Energia Solar Armazenada no Processo de Secagem do Milho em Silo .....	88
6.	-	CONCLUSÕES .....	108
7.	-	BIBLIOGRAFIA .....	110
		APÊNDICE A .....	116
		APÊNDICE B .....	123
		APÊNDICE C .....	132
		APÊNDICE D .....	135
		APÊNDICE E .....	138
		APÊNDICE F .....	151
		APÊNDICE G .....	154
		APÊNDICE H .....	159
		APÊNDICE I .....	162
		APÊNDICE J .....	165
		APÊNDICE K .....	168

## LISTA DE TABELAS

TABELA I	: Valores para as equações de temperatura e umidade relativa do dia típico do período, para a região de Campinas -SP .....	47
TABELA II	: Condições do ar dos dutos de madeira durante o processo de secagem .....	50
TABELA III	: Condições do ar na entrada dos dutos de madeira durante o processo de umidificação.....	51
TABELA IV	: Velocidade do ar (m/h) em escoamento nos dutos .....	51
TABELA V	: Teor de umidade inicial dos dutos de madeira no processo de secagem .....	52
TABELA VI	: Teor de umidade inicial dos dutos de madeira no processo de umidificação .....	52
TABELA VII	: Umidade de equilíbrio de sorção para a madeira : valores experimentais e calculados ....	54
TABELA VIII	: Resultados experimentais da determinação da densidade da madeira seca .....	56
TABELA IX	: Valores da relação $\lambda_m/\lambda_w$ , para a madeira , determinados pelo método e calculados pela equação 4.8. ....	57
TABELA X	: Calor latente de vaporização da umidade da madeira (Kcal / Kg ) calculados pela equação 4.9 e comparados com o da água pura, nas respectivas temperaturas .....	58
TABELA XI	: Variação da umidade da madeira durante o processo de umidificação referente à amostra B1 .....	59
TABELA XII	: Variação da umidade da madeira durante o processo de umidificação referente à amostra C1 .....	60
TABELA XIII	: Variação da umidade da madeira durante o processo de secagem referente à amostra C1. ....	61
TABELA XIV	: Variação da umidade da madeira durante o processo de secagem referente à amostra C2.....	62
TABELA XV	: Valores da viscosidade do ar .....	67
TABELA XVI	: Valores da condutividade térmica do ar ....	68
TABELA XVII	: Resultado estatístico da avaliação do modelo matemático de transferência simultânea de calor e massa entre o ar e o duto de madeira para o processo de secagem .....	69

TABELA XVIII	: Resultado estatístico da avaliação do modelo matemático de transferência simultânea de calor e massa entre o ar e o duto de madeira para o processo de umidificação .....	70
TABELA XIX	: Resultado estatístico da avaliação do modelo matemático de secagem e umidificação do milho em silo, referente às condições experimentais descritas no item 4.13 .....	71
TABELA XX	: Condições do ar em que a umidade de equilíbrio é igual ao teor de umidade para a madeira .....	72
TABELA XXI	: Tempo máximo de operação, em horas, para sistemas de armazenamento de energia em dutos de madeira, em função da velocidade do ar em escoamento, nas condições do estudo simulado, para os quais a condição do ar é compatível com o teor de umidade de equilíbrio, não superior a 0,15 para o milho .....	76
TABELA XXIII	: Relação percentual entre quantidade de água retida pelo duto de madeira no tempo de operação e a quantidade total de água que poderia ser retida, nas condições operacionais num tempo suficiente para que as condições de equilíbrio fossem atingidas .....	85
TABELA XXIII	: Capacidade de retenção de água do sistema de armazenamento ( kg H <sub>2</sub> O/ kg madeira seca) em função das condições do ar e do teor de umidade inicial da madeira .....	87
TABELA XXIV	: Capacidade total de armazenamento de energia do sistema (kcal/kg madeira seca), para um processo isotérmico em função do teor inicial de umidade do sistema e das condições do ar que utiliza a energia armazenada .....	89
TABELA XXV	: Testes de uma média com desvio-padrão desconhecido .....	132
TABELA XXVI	: Valores experimentais e simulados para exemplo de aplicação do teste de hipótese..	134

TABELA XXVII	: Valor do resíduo $\varepsilon(\Delta t)$ , em função do $\Delta t$ utilizado, na solução numérica da equação diferencial da secagem .....	137
TABELA XXVIII	: Comparação entre os resultados experimentais e simulados, referentes à amostra $B_1$ , para o processo de umidificação nos dutos de madeira .....	139
TABELA XXIX	: Comparação entre os resultados experimentais e simulados referentes a amostra $B_2$ para o processo de umidificação nos dutos de madeira .....	140
TABELA XXX	: Comparação entre os resultados experimentais e simulados, referentes à amostra $B_3$ para o processo de umidificação dos dutos de madeira .....	141
TABELA XXXI	: Comparação entre os resultados experimentais e simulados, referentes à amostra $C_1$ para o processo de umidificação dos dutos de madeira .....	142
TABELA XXXII	: Comparação entre os resultados experimentais e simulados, referentes à amostra $C_2$ para o processo de umidificação dos dutos de madeira .....	143
TABELA XXXIII	: Comparação entre os resultados experimentais e simulados, referentes à amostra $C_3$ para o processo de umidificação dos dutos de madeira .....	144
TABELA XXXIV	: Comparação entre os resultados experimentais e simulados, referentes à amostra $B_1$ para o processo de secagem dos dutos de madeira .....	145
TABELA XXXV	: Comparação entre os resultados experimentais e simulados, referentes à amostra $B_2$ para o processo de secagem dos dutos de madeira .....	146
TABELA XXXVI	: Comparação entre os resultados experimentais e simulados, referentes à amostra $B_3$ para o processo de secagem dos dutos de madeira .....	147

TABELA XXXVII	: Comparação entre os resultados experimen - tais e simulados, referentes à amostra $C_1$ para o processo de secagem dos dutos de madeira .....	148
TABELA XXXVIII	: Comparação entre os resultados experimen - tais e simulados, referentes à amostra $C_2$ para o processo de secagem dos dutos de de madeira .....	149
TABELA XXXIX	: Comparação entre os resultados experimen - tais e simulados, referentes à amostra $C_3$ para o processo de secagem dos dutos de madeira .....	150
TABELA XL	: Comparação entre os resultados experimen - tais e simulados, para a temperatura do ar ao longo do silo, referentes às condições opera - cionais do Teste de secagem .....	152
TABELA XLI	: Comparação entre os resultados experimen - tais e simulados, para o teor de umidade do milho ao longo do silo, referente às condi - ções operacionais do teste de secagem ...	153

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1	: Volume de controle diferencial para o duto de madeira .....	23
FIGURA 2	: Esquema para a obtenção dos pontos das isóste - ras a partir das isotermas de umidade de equilí - brio .....	28
FIGURA 3	: Sistema de Armazenamento de Energia Solar em du - tos de madeira .....	30
FIGURA 4	: Posição das amostras ao longo do duto de madei - ra .....	32
FIGURA 5	: Localização das amostras no interior do sistema de armazenamento de energia solar .....	33
FIGURA 6	: Volume de controle diferencial do leito fixo pa - ra o milho .....	36
FIGURA 7	: Isotermas de umidade de equilíbrio de sorção pa - ra a madeira .....	55
FIGURA 8	: Variação do teor de umidade da amostra B <sub>1</sub> no pro - cesso de umidificação .....	63
FIGURA 9	: Variação do teor de umidade da amostra C <sub>1</sub> no pro - cesso de umidificação .....	64
FIGURA 10	: Variação do teor de umidade da amostra C1 no pro - cesso de secagem .....	65
FIGURA 11	: Variação do teor de umidade da amostra C2 no pro - cesso de secagem .....	66
FIGURA 12	: Variação do teor de umidade ao longo do duto de madeira, para um ciclo de armazenamento de ener - gia solar .....	74
FIGURA 13	: Temperatura do ar na saída do sistema de armaze - namento de energia .....	77
FIGURA 14	: Umidade relativa do ar na saída do sistema de armazenamento de energia .....	78
FIGURA 15	: Temperatura do ar na saída do sistema de armaze - namento de energia .....	79
FIGURA 16	: Umidade relativa do ar na saída do sistema de ar - mazenamento de energia .....	80
FIGURA 17	: Temperatura do ar na saída do sistema de armaze - namento de energia .....	81

FIGURA 18 : Umidade relativa do ar na saída do sistema de ar_	
mazenamento de energia .....	82
FIGURA 19 : Temperatura do ar na saída do sistema de armaze -	
namento de energia .....	83
FIGURA 20 : Umidade relativa do ar na saída do sistema de ar_	
mazenamento de energia .....	84
FIGURA 21 : Variação da umidade relativa ambiente do período	
de secagem. ....	95
FIGURA 22 : Variação da temperatura ambiente do período de se	
cagem. ....	96
FIGURA 23 : Variação do teor de umidade do grão ao longo do	
silo na SIMULAÇÃO A .....	97
FIGURA 24 : Variação do teor de umidade do grão ao longo do	
silo na SIMULAÇÃO B .....	98
FIGURA 25 : Variação do teor de umidade do grão ao longo do	
silo na SIMULAÇÃO C .....	99
FIGURA 26 : Variação do teor de umidade do grão ao longo do	
silo na SIMULAÇÃO D .....	100
FIGURA 27 : Temperatura do ar na entrada do ventilador para a	
SIMULAÇÃO D .....	101
FIGURA 28 : Umidade relativa do ar na entrada do ventilador	
na SIMULAÇÃO D .....	102
FIGURA 29 : Variação do teor de umidade do grão ao longo do	
silo na SIMULAÇÃO E .....	103
FIGURA 30 : Temperatura do ar na entrada do ventilador na	
SIMULAÇÃO E .....	104
FIGURA 31 : Umidade relativa na entrada do ventilador na	
SIMULAÇÃO E .....	105
FIGURA 32 : Gradiente de umidade do grão ao longo do silo para	
o teor de umidade média de 15,0% .....	106
FIGURA 33 : Gradiente de umidade do grão ao longo do silo no	
final do processo de secagem .....	107



## SIMBOLOGIA

a	- Área específica . . . . .	$m^2/m^3$
$c_a$	- Calor específico do ar seco, à pressão constante . . . . .	Kcal/Kg $^{\circ}$ C
$c_{au}$	- Calor específico do ar úmido, à pressão constante . . . . .	Kcal/kg $^{\circ}$ C
$c_{gu}$	- Calor específico do grão úmido . . . . .	Kcal/Kg $^{\circ}$ C
$c_m$	- Calor específico da madeira seca . . . . .	Kcal/Kg $^{\circ}$ C
$c_v$	- Calor específico do vapor de água, à pressão constante . . . . .	Kcal/Kg $^{\circ}$ C
$c_w$	- Calor específico da água, à pressão constante . . . . .	Kcal/Kg $^{\circ}$ C
$D_{eq}$	- Diâmetro equivalente . . . . .	m
e	- Espessura da parede do duto de madeira . . . . .	m
$E_{méd}$	- Valor médio do erro relativo, em valor absoluto percentual . . . . .	%
$G_a$	- Vazão mássica do ar . . . . .	Kg/hm $^2$
h	- Coeficiente convectivo de transferência de calor . . . . .	Kcal/hm $^2$ $^{\circ}$ C
H	- Umidade absoluta do ar . . . . .	Kg/kg ar seco
$H_o$	- Umidade absoluta do ar no instante inicial . . . . .	Kg/Kg ar seco
k	- Condutividade térmica do ar . . . . .	Kcal/h m $^{\circ}$ C
M	- Teor de umidade do sólido em base seca . . . . .	KgH $_2$ O/Kg mat.seca
$M_{bu}$	- Teor de umidade do sólido em base úmida . . . . .	KgH $_2$ O/Kg sól.úmido
$M_{eg}$	- Teor de umidade de equilíbrio do grão, em base seca . . . . .	KgH $_2$ O/Kg mat.seca
$M_e$	- Teor de umidade de equilíbrio da madeira em base seca . . . . .	KgH $_2$ O/Kg mat.seca
$M_o$	- Teor de umidade do sólido no instante inicial, em base seca . . . . .	KgH $_2$ O/Kg mat.seca
$N_u$	- Número de Nusselt . . . . .	h Deq/k
$N_{us}$	- Número de Nusselt limite . . . . .	h Deq/k
$P_{atm}$	- Pressão atmosférica . . . . .	N/m $^2$
$P_s$	- Pressão de saturação do vapor da água . . . . .	N/m $^2$
$P_v$	- Pressão de vapor da água nas condições do ar . . . . .	N/m $^2$
$P_e$	- Número de Peclet . . . . .	$c_{au} D_{eq} G_a/k$
$P_r$	- Número de Prandtl . . . . .	$c_{au} u/k$
Q	- Quantidade de calor . . . . .	Kcal

$R_e$	- Número de Reynolds . . . . .	$D_{eq} \text{ Ga}/\mu$
$S$	- Área da seção transversal do volume de controle diferencial . . . . .	$m^2$
$t$	- Tempo . . . . .	$h$
$T$	- Temperatura de bulbo seco do ar . . . . .	$^{\circ}C$
$T_{bu}$	- Temperatura de bulbo úmido do ar . . . . .	$^{\circ}C$
$T_e$	- Temperatura de bulbo seco do ar, em condição de equilíbrio . . . . .	$^{\circ}C$
$T_f$	- Temperatura de bulbo seco do ar no instante final . . . . .	$^{\circ}C$
$T_o$	- Temperatura de bulbo seco do ar no instante inicial . . . . .	$^{\circ}C$
$T_{abs}$	- Temperatura absoluta . . . . .	$^{\circ}K$
$v$	- Velocidade do ar . . . . .	$m/h$
$w$	- Hora do dia . . . . .	-
$x$	- Posição arbitrária . . . . .	$m$
$y$	- Largura do duto de madeira . . . . .	$m$
$z$	- Abertura do duto de madeira . . . . .	$m$
$\alpha$	- Nível de significância do teste estatístico . . . . .	-
$\theta$	- Temperatura do sólido . . . . .	$^{\circ}C$
$\theta_e$	- Temperatura do sólido em condições de equilíbrio . . . . .	$^{\circ}C$
$\theta_f$	- Temperatura do sólido no instante final . . . . .	$^{\circ}C$
$\theta_o$	- Temperatura do sólido no instante inicial . . . . .	$^{\circ}C$
$\theta_F$	- Temperatura do sólido . . . . .	$^{\circ}F$
$\rho_a$	- Densidade de ar . . . . .	$Kg \text{ ar seco} / m^3$
$\rho_{ad}$	- Densidade aparente do duto de madeira . . . . .	$Kg/m^3$
$\rho_{gs}$	- Densidade aparente do grão seco . . . . .	$Kg/m^3$
$\rho_{gu}$	- Densidade aparente do grão úmido . . . . .	$Kg/m^3$
$\rho_m$	- Densidade da madeira . . . . .	$Kg/m^3$
$\lambda_g$	- Calor latente de vaporização da umidade do grão . . . . .	$Kcal/Kg$
$\lambda_m$	- Calor latente de vaporização da umidade da madeira . . . . .	$Kcal/Kg$
$\lambda_w$	- Calor latente de vaporização da água pura . . . . .	$Kcal/Kg$
$\phi$	- Umidade relativa do ar . . . . .	DECIMAL
$v$	- Volume específico do ar em base seca . . . . .	$m^3/Kg \text{ ar seco}$
$\mu$	- Viscosidade do ar . . . . .	$Kg/h.m$

RESUMO

Este trabalho trata do estudo do armazenamento da energia solar em material higroscópico não convencional e de sua influência ao fazer parte de um sistema de secagem de milho em silos.

Utilizando madeira de pinho em tábuas, como material higroscópico, foram construídos dutos de secção retangular no interior dos quais escoava o ar de processamento.

Com esta configuração geométrica, proposta para constituir o sistema higroscópico de armazenamento de energia solar, estudou-se experimentalmente a secagem e a umidificação dos dutos em função das condições do ar em escoamento.

As demais propriedades características da madeira e da forma geométrica do sistema, que têm influência no seu processo de secagem e umidificação, foram também determinadas.

Foi adaptado um modelo matemático para a transferência simultânea de calor e massa entre as paredes do duto de madeira e o ar em escoamento em seu interior.

Estudou-se, por simulação, a resposta do sistema de armazenamento de energia frente a um ciclo de entrega, em função do comprimento dos dutos e da velocidade do ar em escoamento. O estudo revelou que, somente uma parte da energia total armazenada pode ser utilizada sendo que, para um mesmo comprimento dos dutos, quanto menor a velocidade do ar em escoamento, maior será a parcela de energia armazenada utilizável.

A capacidade de armazenamento de energia no sistema depende das condições operacionais e encontrou-se um valor de até 117 Kcal/Kg de madeira seca.

Através de um estudo simulado, foi avaliada a influência do uso da energia solar, assim armazenada, na secagem de milho em silos, comparando-se o tempo de operação e o gradiente de umidade do grão ao longo do silo, para os seguintes sistemas de secagem em silo: secagem com ar natural, secagem com ar aquecido por coletor solar e secagem utilizando a energia solar armazenada.

Nas condições do estudo simulado, para que o teor de umida

de da massa de grãos atingisse o valor médio de 15,0%, foram necessárias 198, 141 e 168 horas de operação, respectivamente, para os diferentes sistemas. Entretanto, o gradiente de umidade foi menos pronunciado naquele que utilizou energia armazenada.

Sob as mesmas condições, para que o teor de umidade da camada superior do silo atingisse o valor de 15,0%, foram necessárias 259, 206 e 252 horas de operação, respectivamente, para os diferentes sistemas, sendo que aquele que utilizou energia armazenada, praticamente não apresentou gradiente de umidade. Porém, os demais apresentaram, inclusive, sobre-secagem das camadas inferiores.

SUMMARY

The storage of solar energy in a non conventional hygroscopic material and its influence as part of an "in-bin" corn drying system was studied in this work.

Using pine boards as the hygroscopic material, rectangular ducts through which the processing air flowed were built.

With this geometrical arrangement, a hygroscopic solar storage system was experimentally used to study the drying and humidification as a function of air conditions.

The remaining characteristic properties of both the timber and the system geometrical configuration, on which drying and humidification processes also depend, were also found.

A mathematical model was used for the simultaneous heat and mass transfer between the wall of the wooden duct and the air flowing through it.

The answer of the energy storage system to a delivery cycle was studied through simulation in function of the duct length and the speed of the circulating air.

The study showed that only a part of the stored energy can be used, and that for the same length of the ducts, the lower the speed of the air, the larger the portion of useful stored energy that can be obtained.

Since the energy storage capacity of the system is a function of operational conditions, a maximum value of 117 Kcal/Kg dry wood was found.

The following three "in-bin" corn drying systems were considered: natural air, air heated by a solar collector and air conditioned by stored solar energy. The influence of storage system on the corn drying process was evaluated by a simulation study. The operation time and the grain moisture gradient through the bin, were compared for each of the above corn drying systems.

Under simulation conditions 198, 141 and 168 hours of operation were necessary to attain the average grain moisture content of 15,0% in each of the above drying systems, respectively. The stored solar energy system presented the best grain moisture gradient.

Under the same conditions to attain a grain moisture content of 15,0% in the top layer of the bin, 259, 206 and 252 hours of operation were necessary, respectively, for the three different systems. In the stored solar energy system the moisture gradient was insignificant. The other systems presented a considerable moisture gradient and the lower layers were overdried.

## 1. INTRODUÇÃO

Dependemos sempre, de certa maneira, da energia solar pois a energia obtida da madeira, do carvão, do petróleo, etc., derivam naturalmente da luz solar. O problema consiste em como fazer uso da energia solar diretamente sem ter que esperar que seja processada nestas formas convencionais (25).

Os estudiosos das fontes alternativas em todo o mundo, calculam que a energia solar poderá contribuir com o equivalente a dois milhões de barris diários de petróleo, até o final deste século, nos países industrializados. Seu potencial nos países em desenvolvimento também é grande, mas ainda não foi dimensionado (60).

Embora difícil de demonstrar, os Estados Unidos poderá encontrar no desenvolvimento da tecnologia solar, em meados do ano 2.000, um quarto de suas necessidades energéticas (11).

A secagem de grãos com energia solar é uma das maneiras mais imediatas para se fazer uso direto dessa energia. Praticada há muito tempo, no Brasil por exemplo, através da secagem na planta ou em terreiro, nas regiões produtoras onde as condições climáticas permitem que se tenha resultados econômicos favoráveis.

Para tornar mais efetivo o uso desta energia na secagem de grãos, estuda-se atualmente a adoção de técnicas apropriadas, tal como a secagem, em silos usando ou não coletor solar, para que se tenha um melhor controle e domínio da operação e que resulte num produto final com qualidade superior.

São conhecidas e comprovadas a viabilidade técnica e a econômica dos sistemas de secagem solar e natural em silos, entretanto, alguns problemas se apresentam: a alta vazão de ar necessária quando o teor de umidade inicial do produto é elevado, o efeito da sobressecação do produto quando se usa coletor solar e a ineficiência do sistema quando as condições climáticas são adversas no período de secagem.

As condições ambientais desfavoráveis para o processo de secagem ocorrem, naturalmente, pelo próprio ciclo dos dias e noites. São caprichos da natureza que fogem do controle do homem. O desafio é encontrar uma maneira adequada de utilizar a energia solar dos períodos em que ela está disponível naqueles em que ela está ausente.

O armazenamento desta energia aparece como sendo o meio de se conseguir atender a este desafio. Mesmo assim, deve-se encontrar a maneira adequada e econômica de realizar este intento, com o objetivo, para o caso, de manter a eficiência do processo de secagem solar sob condições climáticas desfavoráveis, dispensando o uso de outra energia, que não seja a própria solar, para o condicionamento do ar de serviço.

Para utilização direta no processo, entre as possibilidades de armazenar energia, o uso de materiais higroscópicos apresenta algumas características desejáveis, tem capacidade de armazenar grandes quantidades de energia por unidade de massa, o armazenamento pode ser feito para curtos ou longos períodos e não necessita isolamento térmico.

É, de certa forma, uma maneira indireta de armazenamento de energia como calor latente de troca de fase, isto é, não é o material higroscópico que sofre mudança de fase, mas sim o vapor de água contido no ar.

A utilização da madeira, neste estudo, como material higroscópico deve-se ao fato de ser facilmente disponível, seu custo é baixo quando comparado com a sílica-gel, apresenta um comportamento higroscópico satisfatório para o estudo, o armazenamento da energia (ou regeneração) é conseguido com condições do ar obtidas com o uso de coletor solar simples e com baixa vazão de ar e, também armazena e entrega a energia numa ampla faixa de temperatura.



## 2. OBJETIVOS

Como objetivos do presente trabalho, buscou-se:

- determinar as propriedades físicas da madeira que tem influência no seu processo de secagem e umidificação.
- determinar as propriedades físicas dependentes da forma geométrica do sistema proposto para armazenamento de energia, que influem no seu ciclo de armazenamento e entrega de energia.
- adaptar um modelo matemático para simular o comportamento do sistema de armazenamento de energia frente a diversas condições operacionais.
- determinar as características do sistema de armazenamento de energia.
- avaliar a influência do uso da energia solar armazenada na secagem de milho em silo.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 - Secagem de Grãos em Silos

A secagem na planta ou em terreiros é a prática mais rudimentar de secagem solar. Nela, os produtos recebem a energia solar diretamente, utilizam-na com baixa eficiência e, em geral, resulta numa qualidade não uniforme do produto final, além da incerteza de sucesso devido ao fato de estar sujeita aos caprichos da natureza.

Roa e Macedo (38) afirmam que a maioria dos grãos produzidos no Brasil são secos naturalmente na planta ou em terreiros, nas regiões onde as condições climáticas permitem que esta prática seja utilizada com resultados econômicos aceitáveis. Entretanto, a tendência atual é a utilização de sistemas de secagem a alta temperatura, através de secadores contínuos, os quais utilizam combustíveis derivados do petróleo, lenha e outros, para o aquecimento do ar.

Segundo Bakker-Arkema et alii (3), a utilização de coletor solar em conjunção com o sistema de secagem de grãos em silo, surgiu em 1957, nos Estados Unidos, para superar as desvantagens da secagem solar tradicional e, com a crise do petróleo de 1973, a pesquisa sobre o novo processo recebeu uma ênfase renovada.

Meyer et alii (30), estudando o consumo de energia para a secagem de produtos agropecuários, dizem que, de modo geral, os grãos produzidos no Brasil podem ser secos, na maioria dos centros produtores, com sistema de secagem em silo, usando ar natural ou aquecido com energia solar. Mas é necessário, para tal, que se disponha de tempo suficiente para a operação e que a vazão do ar seja adequada. Concluem os autores que a quantidade de energia gasta pelo ventilador é sempre menor do que a energia térmica necessária para a evaporação da umidade dos produtos e, portanto, este procedimento, diminui quase totalmente o consumo de energia na secagem das safras agrícolas.

Brooker et alii (5) fazem referência às seguintes vantagens da secagem de grãos em silos: a) o grão pode ser colhido em

qualquer quantidade desejada; b) o procedimento é relativamente simples; c) o manuseio do produto fica reduzido a um mínimo; d) a energia do ar de secagem é eficientemente utilizada.

Bakker-Arkema et alii (3) descrevem que os processos de secagem em silo com ar natural, baixa temperatura e energia solar são afins. A diferença entre eles diz respeito à adição de calor. Com ar natural, não existe adição de calor para aquecimento do ar (excetuando-se o aumento de temperatura dado pelo ventilador). Na utilização de baixa temperatura, há aumento da temperatura do ar, em alguns graus, pelo uso de resistência elétrica. No processo solar, a temperatura do ar é aumentada pelo coletor solar acoplado ao sistema.

Continuam os autores dizendo que o processo de secagem à baixa temperatura é baseado na premissa de que o milho, por exemplo, pode ser seco até um teor de umidade de 15,5 %, base úmida, enquanto a umidade relativa do ar de secagem for igual ou inferior a 75%. Assim, em dias úmidos, esta condição pode ser alcançada pelo aumento da temperatura do ar em alguns graus através de resistência elétrica.

Descrevem, ainda, que a secagem de milho à baixa temperatura é praticada com sucesso em muitas regiões do oeste central dos Estados Unidos, sendo que o tempo requerido no processo depende das condições climáticas do local.

Brooker et alii (5) constataram que, no processo de secagem com ar natural, o ventilador funcionando continuamente até que a zona de secagem tenha se movimentado através de todo o silo, faz com que o grão, aquecido pelo ar de secagem da operação diurna, funcione como uma fonte de calor para o ar frio da operação noturna.

Eno e Felderman (14) analisaram os dados experimentais da secagem de milho em silo, onde confirmaram que o grão atua como um meio de armazenamento de energia e o processo de secagem é continuado no período noturno.

Bakker-Arkema et alii (3) garantem delinear as seguintes conclusões, com base nas limitadas pesquisas sobre a secagem solar de milho em silos conduzidas até o momento: a) a secagem solar e a secagem com ar natural são igualmente possíveis quando praticadas sob idênticas condições; b) a secagem solar resulta numa grande economia de energia quando comparada com a secagem em alta temperatura; c) a secagem solar resulta numa pequena economia de energia quando comparada com a secagem com ar natural, devido à redução do tempo de operação do ventilador.

Fraser e Muir (20) previram, através de um estudo simulado, a possível economia de energia elétrica que poderia resultar pela adição de coletor solar na secagem de trigo e milho, em silo, para as principais regiões de colheita do Canadá. Concluíram que o uso de coletor solar reduziu, em média, de 19 a 35% da energia elétrica consumida, em relação à secagem natural, para as condições e localidades consideradas.

Feddes et alii (16) afirmam que a secagem de grãos com energia solar é uma alternativa possível para a secagem com ar natural, aumentando a taxa de secagem e reduzindo o tempo de operação.

Johnson e Otten (25) experimentaram que foram necessários 30 dias para secar 100 toneladas de milho em grão em cada um dos dois sistemas de secagem utilizados. Um deles utilizando ar natural e, o outro, ar aquecido com energia solar. Devido às condições ambientais ideais para a secagem, o consumo específico de energia foi praticamente igual em ambos. Concluem, pelos resultados, que o custo fixo do coletor fez com que a adição de energia solar suplementar tenha sido economicamente não atrativa.

Bunn et alii (7) comentam que a secagem de grão em silo com ar natural é atrativa para o fazendeiro devido ao custo inicial dos equipamentos ser relativamente baixo, além de ser mínimo o custo de energia, perigo de incêndio reduzido e uma reduzida gerência de operação do processo. Entretanto, a pequena taxa de secagem geralmente associada com este sistema, aumenta o risco de deterioração do

grão, sendo que o potencial para a deterioração, em alguns casos, excede todas as outras considerações econômicas.

Fraser e Muir (19) confirmam o menor consumo de energia resultante do uso de baixas vazões de ar no processo de secagem em silo. Porém, ressaltam que a vazão do ar tem que ser suficientemente alta para secar o grão antes que ocorra sua derioração.

Estes autores reportam que, em alguns casos, a adição de aquecimento solar, conforme fora observado no estudo, causou a necesidade de incrementar a vazão do ar ao invés de diminuir, pelo fato de que o ar aquecido causa uma super-secagem nas camadas inferiores sem reduzir, significativamente, o tempo requerido para secar o grão das camadas superiores, além de aumentar a temperatura do produto (condição em que o grão úmido deteriora mais rapidamente) e reduzindo o tempo disponível para a secagem.

Brooker et alii (5) descrevem que o ar de secagem, tendo sua temperatura aumentada, removerá maior quantidade de umidade do silo por hora. Isto fará com que a zona de secagem movimente-se com maior rapidez ao longo do silo. Entretanto, este procedimento introduz dois efeitos adversos: 1) o teor de umidade final dos grãos nas camadas mais inferiores será abaixo daqueles necessários (sofrem sobressecação); 2) o ar que sai da zona de secagem aumenta a temperatura do grão úmido, favorecendo o desenvolvimento de fungos com maior rapidez. Concluem, então, que o incremento da taxa de desenvolvimento dos fungos, em alguns casos, pode ser mais efetivo do que o incremento na taxa de secagem.

Pierce e Thompson (34) concluem, com base em seus resultados que, na maioria dos casos, quando a vazão do ar não é adequada, a adição de calor suplementar somente aumentará a quantidade de produto danificado. Dizem, ainda, que a excessiva sobressecação ( que ocorre com a adição de calor suplementar) e a alta vazão de ar ( necessária quando o teor de umidade inicial do produto é elevada) são problemas de suficiente magnitude para garantir estudos adicionais nesta área.

### 3.2 - Influência das Condições Climáticas na Secagem

Bakker-Arkema et alii (3) argumentam que, sob condições ambientais de temperatura e umidade relativa altas, os fungos desenvolvem-se rapidamente nos grãos e, portanto, a secagem deve ser realizada com alta vazão de ar e pequena altura da camada de grãos no silo, o que não é tão determinante sob condições mais favoráveis.

Thompson (55) demonstrou que, para uma dada vazão de ar e para uma mesma localidade, o tempo de secagem varia de ano para ano, sendo que, em alguns dos anos estudados, o produto está deteriorado no final do processo, devido às diferentes condições climáticas.

Nos sistemas de secagem de grãos em silo, a vazão do ar a ser utilizada é altamente dependente das condições climáticas locais, donde Pierce e Thompson (34) concluem que esta é a variável mais importante no dimensionamento de tais sistemas.

Com a premissa de que quanto menor a vazão do ar de secagem menor é a energia consumida pelo ventilador, Bakker-Arkema et alii (3) sugerem que, tendo por base as informações climáticas ocorridas num período de 10 anos para uma dada região, o valor da vazão mínima do ar recomendado para operar o sistema de secagem, é aquele encontrado para o pior ano entre estes.

A influência das condições climáticas sobre o processo de secagem de grãos em silo, torna-se um dos problemas desta técnica em virtude de que não permite uma generalização das condições de operação do sistema, exigindo que as variáveis operacionais sejam determinadas para cada caso em particular.

Alguns estudos tem sido realizados para definir a vazão mínima necessária para os sistemas de secagem de grãos em silos, com a intenção de, além de ser mínima, suficientemente alta para garantir a qualidade do produto processado.

Pierce e Thompson (34), continuando seus estudos realizados em 1976, determinaram as vazões mínimas para a secagem de milho em diversas regiões dos Estados Unidos. Para um mesmo teor de umidade inicial do produto, considerando o pior ano do período estudado, encontraram uma vazão mínima de  $10.35 \text{ m}^3/(\text{min})(\text{ton})$  para Cape Hatteras e de 3,40 para Midland, quando a secagem em silo foi realizada com ar natural. As vazões, para as mesmas localidades, quando foi utilizada a secagem solar, foram de 1,41 e 3,20 respectivamente. As vazões para a secagem com aquecimento elétrico (baixa temperatura) foram, para o mesmo período e localidade, de 7,14 e 3,10, respectivamente.

Villa et alii (56) realizaram um estudo simulado para determinar as vazões mínimas do ar na secagem natural de milho e soja, em silos, para a região de Campinas-SP. Com base nos dados meteorológicos de 20 anos, para o período considerado, encontraram, para o pior ano, uma vazão mínima de  $2,26 \text{ m}^3/(\text{min})(\text{ton})$  para o milho com teor de umidade inicial de 20% (base úmida), e 3,33 para a soja. No que diz respeito às condições médias do período, os valores encontrados foram 1,43 e 2,09, para o milho e para a soja, respectivamente.

### 3.3 - Armazenamento da Energia Solar

A energia solar é uma fonte dependente do tempo. Em geral, as necessidades de energia para uma grande variedade de aplicações é também dependente do tempo, porém, em diferentes formas do que a oferecida. Consequentemente, o armazenamento desta energia, ou um produto do processo solar, é necessário à medida que vem ao encontro das necessidades energéticas. (13)

A eficiência dos sistemas que utilizam a energia solar ficará aprimorada quando for possível o armazenamento desta energia a

curto prazo. Esta é a única maneira de suprir as flutuações causadas pelas condições meteorológicas e, evidentemente, pelo ciclo de dias e noites (47).

Duffie e Beckmann (13) descrevem que a energia solar pode ser armazenada na forma de calor sensível de um sólido ou líquido, como calor latente de troca de fase em um sistema de substâncias químicas, ou como energia química em produtos de uma reação reversível.

Segundo estes autores, o meio de armazenamento depende da natureza do processo. Isto é, para aquecimento de água a energia armazenada como calor sensível deste líquido é um processo lógico. Se usa-se coletor solar para o aquecimento do ar, o armazenamento como calor sensível ou latente em um leito trocador de calor é indicado. Se são usados processos fotovoltaicos ou fotoquímicos, o armazenamento na forma de energia química é provavelmente o mais lógico.

As principais características que um sistema térmico de armazenamento deve apresentar, ainda segundo os autores, são:

- a) a faixa de temperatura sob a qual opera, isto é, a temperatura na qual o calor é armazenado ou removido no sistema;
- b) a capacidade por unidade de volume ou peso;
- c) a maneira de adicionar ou remover calor, associada diretamente com as diferenças de temperatura;
- d) estratificação da temperatura na unidade de armazenamento;
- e) a potência requerida para adicionar ou remover calor;
- f) o recipiente, tanques ou outros elementos estruturais associados ao sistema de armazenamento;
- g) a maneira de controlar as perdas térmicas do sistema de armazenamento;
- h) o seu investimento.



### 3.3.1 - Armazenamento na Forma de Calor Sensível

A capacidade de armazenamento da energia solar na forma de calor sensível, em material líquido ou sólido, é dada pela equação usual de capacidade calorífica:

$$Q = m C_p (\tau_2 - \tau_1) \quad (3.1)$$

onde  $Q$  é a quantidade total para um ciclo de operação entre as temperaturas  $\tau_1$  e  $\tau_2$ ;  $m$  é massa total do material e  $C_p$  o seu calor específico à pressão constante.

Uma grande variedade de materiais pode ser utilizada para constituir uma unidade de armazenamento de energia, na forma de calor sensível, quer líquidos ou sólidos.

Segundo Duffie e Beckmann (13) e Wiman et alii (58), entre os líquidos, a água mostra-se como um dos melhores meios para tal finalidade, uma vez que não é caro e tem um elevado calor específico.

O armazenamento da energia térmica como calor sensível em sólidos necessita maior quantidade de material, em relação à água conforme explica Wiman et alii (58), porque a densidade de calor armazenado pelo sólido é normalmente menor do que pela água nas mesmas temperaturas de referência. Mas sendo o sólido pedras, o investimento por unidade de energia armazenada, embora não tão baixo quanto para a água, é aceitável.

Duffie e Beckmann (13), reportam que o armazenamento da energia como calor sensível em material sólido pode ser através de um leito compacto de material particulado pelo qual o fluido, geralmente o ar, é circulado para fornecer ou retirar calor.

Segundo estes autores, um sistema desta natureza, bem dimensionado, possui características desejáveis nas aplicações com energia solar: o coeficiente de transferência de calor entre o ar e o sólido é alto, o custo para o acondicionamento do material é baixo, a condutividade do leito é baixa quando não existe escoamento de ar.

Ismail e Reis (24) investigaram as possibilidades dos sistemas fluidizados como armazenadores de energia sob a forma de calor sensível, considerando que os sistemas convencionais têm se revelado de muita utilidade mas que, em virtude da baixa troca de calor entre fluidos e sólidos, tais sistemas desenvolvem-se às custas de altos investimentos tornando oneroso o processo de armazenagem.

Concluíram que a rápida homogeneização da temperatura ao longo do leito, devido à alta taxa de transferência de calor, bem como a pequena perda quando o sistema está desativado, notadas pelos valores encontrados, indicam as possibilidades de sucesso no emprego de leitos fluidizados como armazenador de calor sensível.

Yuan e Majdi (59) testaram um modelo, em escala reduzida, do sistema de armazenamento de energia solar na terra (solo), que é um novo conceito de armazenamento de energia térmica como calor sensível.

Walton et alii (57) estudaram o armazenamento da energia térmica em leito de pedras subterrâneo, onde puderam avaliar o sistema com e sem isolamento térmico bem como desenvolveram equações que servem para determinar a quantidade de isolamento térmico necessário para um leito horizontal.

Svec e Palmer (52) descrevem o uso do solo como meio de armazenamento de calor sensível e apresentam os resultados preliminares de uma instalação piloto que construíram, bem como referenciam alguns autores que estudaram as possibilidades de uso de tal sistema

Alguns autores propõem o armazenamento temporário da e-

nergia solar, como calor sensível, utilizando coletor solar plano recheado com sólido particulado, para aplicações de aquecimento do ar. Nestes sistemas, o armazenamento da energia solar se dá pela radiação solar que incide diretamente sobre o sólido, pintado de preto, que é a própria superfície de absorção do coletor. Por transferência, o sólido aquece o ar de processo que escoar no coletor, além de armazenar parte da energia solar incidente.

Santos et alii (45) construiu um coletor solar plano recheado com pedras pintadas de preto. Reporta que o armazenamento temporário de energia no sistema, foi responsável pelo aumento da temperatura do ar em  $5^{\circ}\text{C}$ , ao sair do coletor, em relação à temperatura de entrada, 30 minutos após o término da radiação solar.

Mishra e Sharma (32) realizaram um estudo para avaliar o desempenho de três coletores solares recheados com diferentes sólidos particulados, para o aquecimento de ar. Como recheio foram testadas aparas de ferro, alumínio e cascalho. Observaram que o desempenho de coletores planos é apreciavelmente melhorado pelo recheio com material metálico escurecido e, acima de tudo, que os coletores recheados também trabalham agradavelmente como sistema de armazenamento térmico. O melhor desempenho encontrado foi para o coletor plano recheado com aparas de ferro.

### 3.3.2 - Armazenamento na Forma de Calor Latente

Segundo Dufie e Beckmann (13), os materiais que apresentam troca de fase, numa faixa de temperatura adequada, podem ser usados para armazenar energia, desde que alguns critérios sejam atendidos:

- a) a troca de fase deve ser acompanhada por um considerável efeito térmico;

- b) deve ser reversível para um grande número de ciclos sem que ocorra uma degradação séria;
- c) o super-resfriamento deve ser limitado;
- d) deve-se ter uma maneira de conter o material de modo que permita a transferência de calor interna e externamente;
- e) o investimento em material e recipiente deve ser razoável.

Obedecidos estes critérios, os sistemas de armazenamento de energia através da troca de fase tem alta capacidade em relação ao armazenamento na forma de calor sensível. Quando operados na faixa de temperatura adequada, são observadas substanciais reduções de volume e peso para uma mesma quantidade de energia armazenada.

Kamimoto et alii (26) consideram adequado o armazenamento da energia solar nesta forma. Porém, ressaltam que não é tão fácil aplicá-lo a um dado sistema, tendo em conta algumas relações entre as condições operacionais e as características do material utilizado. Por exemplo, a temperatura de operação requerida deve ser compatível com a de fusão, ou transição, do material.

Estes autores, corentam, entretanto, que o fato dos materiais que apresentam troca de fase operarem numa temperatura praticamente constante, traz vantagem no que diz respeito ao controle do sistema.

Wyman et alii (58) descrevem que, como é essencial o armazenamento de energia com alta densidade, são praticáveis, entretanto, somente as transformações sólido-líquido, ou possivelmente sólido-sólido, acompanhadas por significantes variações de entalpia.

Telkes (53) sugere o uso de sais hidratados, que apresentam alto calor de fusão, existem em abundância e tem baixo preço. Faz referência aos sais baseados em compostos de Na, K, Ca, Mg, Al ou Fe e, provavelmente, na forma de cloretos, sulfatos, nitratos, fosfatos ou carbonatos. Entre estes, o autor ressalta o sulfato de sódio deca-hidratado, que atende às exigências e com temperatura de troca de fase de 32°C.

Duffie e Beckmann (13) descrevem que Telkes realizou um estudo experimental de armazenamento de energia solar para aquecimento doméstico, utilizando sulfato de sódio decahidratado.

Algumas dificuldades de ordem prática apresentaram-se com este sistema. Foi encontrada uma degradação do desempenho com as repetições do ciclo, originando uma redução da capacidade térmica do sistema. Ocorre que o sal decahidratado tem um ponto de fusão incongruente e, com o aumento da temperatura próxima ao ponto de fusão, há uma separação de fases, pois a densidade do sal (fase sólida) é maior do que a da solução (fase líquida). Isto impede recuperar todo o calor adicionado.

Alanís et alii (1) realizaram experimentos de armazenamento de energia utilizando o sulfato de sódio decahidratado, adicionado de uma substância espessante, com a finalidade de eliminar o comportamento irreversível pela troca de fase incongruente. Algumas amostras foram examinadas após mais de 200 ciclos e observou-se a não formação preferencial de cristais no fundo do recipiente.

Carlsson et alii (8), pela adição de compostos químicos adequados, tornaram congruente o ponto de fusão do cloreto de cálcio hexahidratado.

Segundo Duffie e Beckmann (13), uma gama de outras possibilidades existe, porém uma substância simples com ponto de fusão adequado evitaria o problema da incongruência. A parafina é um exemplo e tem sido considerada como um meio possível de armazenar energia solar. Compostos com ponto de fusão congruente, tal como o nitrato ferroso hexahidratado, fundem da mesma maneira como substância pura. Alguns eutéticos têm sido também considerados, como por exemplo, a mistura de  $\text{CaCl}_2$ - $\text{MgCl}_2$ - $\text{H}_2\text{O}$  na proporção percentual em peso de 41-10 - 49, respectivamente. Os autores ainda apresentam uma relação de outras possibilidades com misturas eutéticas.

Fouda et alii (17) fazem referência ao problema do crescimento do cristal durante a descarga da energia armazenada no material com troca de fase. A cristalização ocorre nos pontos de menor temperatura do sistema. Quando é usado trocador de calor convencional, a superfície de transferência de calor torna-se bloqueada pela camada cristalina, resultando numa transferência de calor pobre.

A transferência de calor pelo contato direto entre a solução salina cristalizante e um fluido imiscível com o meio, com menor densidade, tem sido proposta por alguns autores. O fluido imiscível é introduzido por difusores na base do vaso que contém a solução salina, causando um borbulhamento, cujas partículas elevam-se através da solução transferindo calor de ou para a referida solução.

Mills et alii (31) estudaram a transferência de calor, por contato direto, para diversos sais hidratados, bem como Fouda et alii (17) o fizeram para o sulfato de sódio decahidratado.

### 3.3.3 - Armazenamento através de Material Higroscópico

Os dessecantes sólidos, suas soluções e líquidos higroscópicos tem sido propostos, atualmente, tanto para condicionamento solar de ar quanto para o armazenamento de energia solar.

O armazenamento por adsorção é descrito por Shigeishi et alii (48) como sendo a adsorção de um gás por um sólido um processo espontâneo no qual a entropia do sistema decresce devido à diminuição do grau de liberdade das moléculas na fase adsorvida. Pela segunda lei da termodinâmica, a adsorção é acompanhada pela liberação do calor de adsorção. O processo reverso, desorção, é então endotérmico.

Shigeishi et alii (48) citam que Close e Dunkle propuseram a utilização do ciclo de adsorção/desorção como meio de armazenamento de energia solar em baixas temperaturas, usando vapor de água como adsorvato e sílica-gel como adsorvente. No seu sistema, o ar aquecido por coletor solar passava através do leito de adsorvente, elevando sua temperatura e retirando a água. Assim, o grau de secagem pode ser, então, uma medida da energia armazenada. Para extrair o calor do sistema, o ar ambiente úmido, escoando pelo leito aquecido, inicialmente retira o calor sensível. Quando o leito resfriou o suficiente, a adsorção do vapor de água da corrente de ar libera o calor de adsorção. Como resultados obtêm-se um ar aquecido e relativamente seco. Desconsiderando o calor sensível envolvido, que é uma pequena parte do calor total armazenado, a densidade energética do sistema é favoravelmente comparada com os sistemas de troca de fase, uma vez que o calor de adsorção é equivalente a um calor latente. O leito de adsorvente pode ser resfriado até a temperatura ambiente sem grande perda de eficiência para armazenar energia, indefinidamente, cuidando-se que o vapor de água possa ser excluído.

Os autores afirmam que esta é uma maneira que fornece uma vantagem decisiva sobre os materiais com troca de fase que requerem um isolamento térmico para manter a temperatura do sistema entre valores definidos.

Shigeishi et alii (48) salientam que a densidade de energia de um sistema de armazenamento em leito de material aquo-adsorvente, pode exceder os sistemas que usam armazenamento de calor latente. Esta vantagem desenvolve-se sem referência à vantagem adicional dos problemas de corrosão e a possibilidade de armazenamento por período prolongado sem isolamento térmico intensivo.

Também pode ser de grande importância o armazenamento por curto período para uso sazonal tal como secagem de produtos agrícolas. A vantagem final é específica para os processos de secagem, onde o calor é liberado no ar seco.

Segundo Shigeishi et alii (48), existem quatro classes

principais de adsorventes em uso atualmente: 1 - óxido de alumínio na forma de alumina-gel e alumina-ativada; 2 - carbono em forma variada de carvões e carvão ativado; 3 - sílica-gel; 4 - zeolites cristalina de silicato de alumínio. Todos estes são quimicamente inertes, resistentes à deterioração, comercialmente disponíveis em grandes quantidades e em várias granulometrias que atendem à desejada densidade de compactação do leito de armazenamento.

Robison (39) descreve as condições operacionais de bombas de calor para o condicionamento solar de ar, as quais utilizam desseccantes sólidos para desumidificar o ar. O autor faz referência ao uso de sílica-gel e peneira molecular em tais sistemas, como desseccante sólido (silicato de alumínio zeolite).

Robison e Houston (40) investigaram o uso de desseccantes sólidos no sistema de adsorção-desorção como meio de utilizar a energia solar no condicionamento de ar, utilizando cloreto de lítio.

Robison (39) e Shigeishi et alii (48) fazem referência ao fato de que a sílica-gel, e outros materiais correlatos, perde a sua capacidade de adsorção com o aumento da temperatura, sendo que para que ocorra substancial readsorção, é necessário manter a temperatura do leito em torno de 30°C. Isto representa um problema, que para vencê-lo, os sistemas requerem refrigeração para manter uma operação isotérmica, pois de outro modo, o próprio calor do processo de adsorção é suficiente para aquecer o leito consideravelmente.

Tal não ocorre com o uso de peneira molecular, devido que sua capacidade de adsorção é pouco afetada pela alta temperatura. Por outro lado, devido a esta característica desejável, a peneira molecular não pode ser regenerada em temperaturas obtidas com coletor solar plano, necessitando o uso de gás natural para completar a secagem (regeneração) do material (sorvente).

Robison e Houston (40) salientam que o cloreto de lítio não apresenta esta característica. Entretanto, por este fato, pode ser regenerado a baixas temperaturas.



Robison e Houston (41) usaram uma solução concentrada de cloreto de cálcio para armazenar energia solar, para ambos os ciclos de aquecimento e resfriamento, numa bomba de calor química. Um pequeno tanque, sem isolamento térmico, guardava a solução do dessecante. Desta maneira, a bomba de calor química pode operar à noite ou durante extensos períodos quando o sol está obscurecido. A reconcentração da solução é feita pela radiação solar direta. Trocadores de calor simples são utilizados para recuperar o calor absorvido pelo dessecante.

Conforme estes autores, os dessecantes líquidos tem como característica, a capacidade de armazenar energia na solução química concentrada. Isto torna possível armazenar grandes quantidades de energia em pequenos tanques, não isolados, mantidos à temperatura ambiente.

Robison (39) descreve as características que devem possuir as soluções higroscópicas usadas para armazenamento de energia solar nos processos solares de condicionamento de ar: soluções estáveis, não tóxicas, inodoras, não corrosivas, não inflamáveis, não viscosas, de baixo preço, de boas características de transferência de calor, não voláteis, não cristalizáveis, na faixa de temperatura de operação e regeneráveis em condições obtidas com coletor solar simples.

Segundo este autor, embora existam muitas soluções que apresentem estas características, somente é reportado o uso de solução de cloreto de cálcio, cloreto de lítio, brometo de lítio e trietileno glicol. Destas, a de cloreto de lítio é a mais efetiva como sorvente mas requer uma temperatura de regeneração difícil de ser conseguida com coletor solar simples. A solução de trietileno glicol altamente concentrada é quase tão efetiva quanto a de cloreto de lítio e requer uma temperatura de regeneração bem menor. Porém, esta é de alto custo e sofre perdas por vaporização.

Robison (39) descreve que Olson comparou a qualidade dos dessecantes sólidos e líquidos, concluindo que os sistemas apresentam as seguintes vantagens: (a) resfriamento contínuo durante a desorção;

(b) transferência de calor e massa na superfície líquida; (c) necessidade de pequena potência no ventilador; (d) utilização de trocador de calor líquido-para-líquido, regenerativo, para aumentar a eficiência.

Factor e Grossman (15) estudaram a aplicação de uma coluna recheada para desumidificação do ar e sua regeneração no condicionamento solar de ar com dessecantes líquidos. Segundo os autores, os dessecantes líquidos, via de regra, têm capacidade de condicionamento do ar menor do que os sólidos. Entretanto, os sistemas que utilizam dessecantes líquidos apresentam algumas vantagens, entre elas a fácil manipulação, pequena perda de pressão no sistema, possibilidade de troca de calor entre as correntes de ar exaurido e regenerado, além de outras.

Segundo os autores, estes sistemas requerem, em geral, menores temperaturas para regeneração. Em termos globais, os sistemas que utilizam dessecantes líquidos são promissores, particularmente para o uso com energia solar.

### 3.4 - Utilização de Energia Solar Armazenada na Secagem de Grãos em Silo

Rodda e Fode (42) estudaram o uso de dessecantes para secar sementes de soja. O sistema de secagem utilizava o ar desumidificado, a baixa temperatura, em um ciclo fechado. O dessecante era regenerado por uma corrente de ar externa ao sistema. Segundo os autores, as condições do ar de secagem que foram conseguidas, representam um potencial para o melhoramento da qualidade do grão processado (tensões pelo calor, rachaduras da casca do grão, associados com a perda de germinação). A taxa de secagem foi quase a mesma foi quase a mesma do que a obtida na secagem por alta temperatura e baixa umidade relativa. A eficiência do sistema foi, também, comparável com a da secagem em alta temperatura.

Aldis et alii (2) usaram energia solar armazenada com sílica-gel na secagem de milho e sorgo. Um lote de milho (1520 kg) com

teor de umidade inicial de 23,5% (base úmida) e numa altura da camada de grãos de 0,66 metros, foi seco até que o teor de umidade da camada superficial atingiu 15%, utilizando uma mistura de 40:60 de ar ambiente e ar desumidificado, respectivamente, como ar de secagem e foram necessárias 280 horas. Outro lote, com teor de umidade inicial de 24,2% foi seco, simultaneamente, somente com ar ambiente, requerendo 350 horas de operação. Com base nos resultados deste experimento, e de outros que também realizaram, os autores concluem que o uso do dessecante, regenerável com energia solar, para desumidificar o ar de secagem, reduz o tempo de operação consideravelmente. Por outro lado, a energia elétrica utilizada pelo ventilador na regeneração do leito armazenador de energia, foi maior do que a energia economizada pela redução do tempo de secagem. Entretanto, a qualidade do produto final é melhor do que a do produto seco com ar natural.

Danziger et alii (12) investigaram dois sistemas de secagem: um envolvendo uma mistura íntima de milho e sílica-gel em um recipiente, e o outro, empregando circulação de ar em leitos separados, de sílica-gel e milho.

A mistura íntima, na proporção de 0,33 g de sílica-gel por grama de milho úmido, secou o milho desde um teor de umidade de (b.u.) de 24,9% até 14,6% em 24 horas. No sistema com circulação de ar em circuito fechado, utilizaram uma vazão de ar de 1,13 m<sup>3</sup>/h, tendo sido possível secar a massa de grãos desde um teor de umidade (b.u.) de 25,6% até o valor médio de 14,3%, sendo a altura da camada de grãos de 0,30 m.

Santos et alii (45) realizaram a secagem, em silo, de 60 toneladas de soja. O sistema de secagem possuía um coletor solar, recheado com pedras, com 60m<sup>2</sup> de área (coletor solar, armazenador temporário de energia na forma de calor sensível) e ventilador de 7,5 HP com uma vazão do ar de 180 m<sup>3</sup>/min. O produto, com teor de umidade inicial de 17,0% (b.u.), foi seco até 11% em sete dias, com boa qualidade final do produto.

#### 4 - MATERIAIS E MÉTODOS

##### 4.1. Modelo Matemático de Transferência Simultânea de Calor e Massa entre o Ar e o Duto de Madeira:

Bakker-Arkema et alii (4) apresentam um modelo matemático<sup>(\*)</sup> para a secagem de grãos em leito fixo tal como ocorre no sistema de secagem em silo. Afirmam que o "Michigan State University Model", embora tenha sido originalmente experimentado no milho, tem obtido sucesso para aplicação em outros grãos.

Roa e Macedo (38) introduziram algumas simplificações no "MSU Model", com a finalidade de diminuir o tempo de execução no computador, e utilizaram esta versão simplificada na simulação da secagem de Feijão Carioca em silos. Reportam que os resultados obtidos foram ótimos quando comparados os valores simulados com os experimentais.

Algumas considerações iniciais foram feitas por Bakker-Arkema et alii (4) para o desenvolvimento do referido modelo. Tratando-se de uma adaptação do mesmo, para o caso da transferência simultânea de calor e massa entre o ar e as paredes do duto, tais simplificações passam a ser as seguintes:<sup>(\*)</sup>

1. A variação das dimensões do duto são desprezíveis durante o processo;
2. O gradiente de temperatura na parede do duto é considerado como não existente;
3. A condução de calor pela parede no sentido longitudinal é desprezível;
4. Não existe transferência de calor pela parte externa da parede do duto;
5. Os gradientes de temperatura e umidade absoluta do ar, com respeito ao tempo, são desprezíveis quando comparados com os respectivos gradientes com respeito à posição;

<sup>(\*)</sup> Os modelos matemáticos apresentados neste trabalho, referem-se ao período de secagem de taxa decrescente.

6. As capacidades caloríficas do ar úmido e da parede úmida, são constantes durante curtos períodos de tempo.

Para o desenvolvimento analítico, os balanços de massa e entalpia são feitos sobre um volume de controle diferencial, localizado em uma posição arbitrária ao longo do duto, conforme é mostrado na Figura 1.

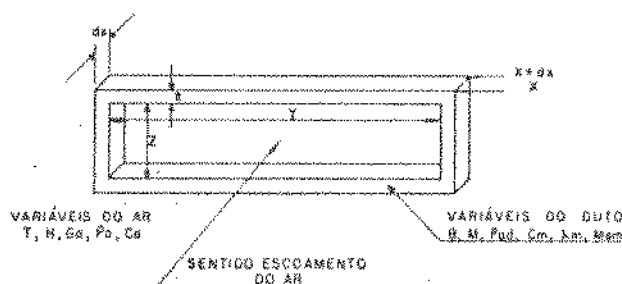


Figura 1: Volume de controle diferencial para o duto de madeira

Existem quatro variáveis envolvidas neste problema: a umidade absoluta do ar, a temperatura do ar, a umidade da parede do duto e a temperatura da parede do duto. Consequentemente, são feitos dois balanços de entalpia e dois de massa, resultando em quatro equações:

- a) Balanço entálpico para o ar:

$$\left| \begin{array}{c} \text{energia que sai} \\ \text{em } x + dx \end{array} \right| = \left| \begin{array}{c} \text{energia que} \\ \text{entra em } x \end{array} \right| - \left| \begin{array}{c} \text{energia transferida} \\ \text{por convecção} \end{array} \right|$$

$$(G_a c_a + G_a c_v H) \left( T + \frac{\partial T}{\partial x} dx \right) S dt = (G_a c_a + G_a c_v H) T S dt - h_a S dx (T - \theta) dt$$

Explicitando, vem:

$$\frac{\partial T}{\partial x} = - \frac{h_a}{G_a (c_a + c_v H)} (T - \theta) \quad (4.1)$$

- b) Balanço entálpico para o duto:

$$\left| \begin{array}{c} \text{energia} \\ \text{transfe} \\ \text{rida} \end{array} \right| = \left| \begin{array}{c} \text{variação da energia} \\ \text{interna da parede} \\ \text{do duto} \end{array} \right| + \left| \begin{array}{c} \text{energia para eva-} \\ \text{poração da umida-} \\ \text{de do duto} \end{array} \right|$$

$$h a S dx (T - \theta) dt = (\rho_{ad} c_m + \rho_{ad} c_w M) S dx \frac{\partial \theta}{\partial t} dt - (\lambda_m + c_v (T - \theta) \rho_{ad} \frac{\partial M}{\partial t}) S dx dt$$

Explicitando vem:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{h a (T - \theta)}{\rho_{ad} (c_m + c_w M)} + \frac{(\lambda_m + c_v (T - \theta))}{\rho_{ad} (c_m + c_w M)} \rho_{ad} \frac{\partial M}{\partial t} \quad (4.2)$$

c) Balanço de massa para o ar:

$$\left| \begin{array}{c} \text{umidade} \\ \text{transferida} \end{array} \right| = \left| \begin{array}{c} \text{umidade que} \\ \text{sai em } x+dx \end{array} \right| - \left| \begin{array}{c} \text{umidade que} \\ \text{entra em } x \end{array} \right|$$

$$\rho_{ad} S dx \frac{\partial M}{\partial t} dt = G_a S (H + \frac{\partial H}{\partial x} dx) dt - G_a S H dt$$

Explicitando vem:

$$\frac{\partial H}{\partial x} = - \frac{\rho_{ad}}{G_a} \cdot \frac{\partial M}{\partial t} \quad (4.3)$$

d) Balanço de massa para o duto:

Este balanço é feito por uma adequada equação que prediz a transferência de umidade entre o duto e o ar, em função das condições operacionais, utilizando, para este caso, uma equação empírica proposta por Roa e Macedo (58) que tem a seguinte expressão:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = - m q (M - M_e) (P_s - P_v)^n t^{(q-1)} \quad (4.4)$$

Estas quatro equações constituem o modelo matemático para

a simulação da transferência simultânea de calor e massa entre as paredes do duto e o ar em escoamento.

Sendo impossível uma solução analítica para este sistema de equações, recorre-se à solução numérica aplicando o método de diferenças finitas

As seguintes condições de contorno são aplicadas na solução do sistema:

$$T(0,t) = T \text{ (entrada)}$$

$$\theta(x,0) = \theta \text{ (inicial)}$$

$$H(0,t) = H \text{ (entrada)}$$

$$M(x,0) = M \text{ (inicial)}$$

A solução do modelo implica, também, no conhecimento de algumas propriedades físicas próprias da madeira e outras, próprias do arranjo geométrico do sistema utilizado.

#### 4.2. Propriedades Físicas Próprias da Madeira Exigidas pelo Modelo Matemático

##### 4.2.1. Isotermas de Umidade de Equilíbrio

Determinou-se as isotermas de umidade de equilíbrio de sorção pelo método estático, utilizando soluções salinas saturadas, apresentando por Hall (21).

Para as temperaturas de 10, 20 e 30 °C, foram utilizados cinco valores de umidade relativa.

As temperaturas foram mantidas constantes em estufas incubadoras marca FANEM, Modelo 347, providas de aquecimento e refrigeração e controladas por termostato.

As umidades relativas foram conseguidas no ambiente interior de frascos plásticos, que continham a solução saturada de um dos seguintes sais: cloreto de magnésio hexaidratado, cloreto de

cálcio hexaidratado, brometo de sódio, cloreto de sódio, brometo de potássio, sulfato neutro de potássio.

Estes frascos permitiam o fechamento hermético com o uso de vaselina "sólida" na junção da tampa com o corpo dos mesmos. Possuíam capacidade para três litros sendo que a solução saturada ocupava, aproximadamente, meio litro.

As amostras permaneciam no interior dos frascos, suspensas por tela de arame galvanizado, sobre a superfície da solução, e os frascos, nas incubadoras. As amostras foram assim mantidas até quando não mais apresentaram variação de peso. Esta constatação foi possível através da pesagem a determinados intervalos de tempo.

Neste momento, seu teor de umidade foi determinado pelo método ABNT nº 35243. Para tal, os seguintes equipamentos foram utilizados: *estufa de convecção forçada, marca FABBE*, com temperatura controlada por termostato; *balança analítica, marca SARTORIUS*, com capacidade de 200 gramas e escala com divisão de 0,0001 grama.

As amostras, previamente secas, aumentaram seu peso e, por este motivo, o teor de umidade de equilíbrio apresentado foi considerado o de sorção.

Estes valores foram utilizados para estimação dos parâmetros, por regressão, da equação para isotermas de umidade de equilíbrio proposta por Roa (37), que tem a seguinte expressão:

$$M_e = (p_1\phi + p_2\phi^2 + p_3\phi^3) \text{EXP}(q_0 + q_1\phi + q_2\phi^2 + q_3\phi^3 + q_4\phi^4)(T+q_5) \quad (4.5)$$

#### 4.2.2. Densidade

As amostras foram colocadas na estufa até atingirem o seu peso seco. O volume, de cada uma delas, foi determinado pela medida das suas dimensões.



Com estes resultados, determinou-se o peso específico de cada amostra, e consideramos a média aritmética destes valores como sendo o valor procurado.

#### 4.2.3. Calor Específico

Este valor foi tomado da literatura, de acordo com o apresentado por Ihne (23), para a madeira seca:

$$c_m = 0,324$$

#### 4.2.4. Calor Latente e Vaporização da Umidade

O calor latente de vaporização é definido como sendo a energia necessária para vaporizar uma quantidade unitária de umidade do produto. Em geral, seu valor aumenta com a diminuição do teor de umidade e da temperatura em que se dá a vaporização.

Othmer (33), desenvolveu a seguinte relação que permite calcular o calor latente de vaporização da umidade de um produto:

$$\ln P_v = \frac{\lambda_m}{\lambda_w} \ln P_s + C \quad (4.6)$$

onde  $P_v$  é a pressão de vapor da umidade do produto, em equilíbrio com as condições do ambiente;  $P_s$  é a pressão de vapor da saturação da água pura;  $\lambda_m$ , o calor latente de vaporização da umidade do produto;  $\lambda_w$ , o calor latente de vaporização da água pura e  $C$ , uma constante. Estes valores todos estão avaliados na temperatura e umidade de equilíbrio de referência.

Os pontos que permitem obter a linha reta representada pela Equação (4.6) são retirados das isotermas de umidade de equilíbrio. Estas retas são denominadas isósteras e seu coeficiente angular permite calcular  $\lambda_m$ , pois é conhecido  $\lambda_w$ .

Brooker (5) apresenta a seguinte equação para calcular  $\lambda_w$  em função da temperatura, entre 0 e 65,5°C:

$$\lambda_w = 587,723 - 0,569 T \quad (4.7)$$

Bakker-Arkema et alii (4) apresentam uma relação matemática que pode representar adequadamente os valores da relação  $\lambda_m / \lambda_w$ , em função do teor de umidade do produto:

$$\frac{\lambda_m}{\lambda_w} = 1,0 + C_1 e^{(C_2 M)} \quad (4.8)$$

onde  $C_1$  e  $C_2$  são parâmetros da equação.

Conforme mostra a figura 2, para um dado teor de umidade de equilíbrio da madeira encontra-se três pares de pontos  $P_v - P_s$  que, por regressão linear, permitem obter a melhor reta (Equação 4.6) e, conseqüentemente, o correspondente valor  $\lambda_m / \lambda_w$  para o referido teor de umidade de equilíbrio.

Assim, encontra-se o valor desta relação para os diversos teores de umidade de equilíbrio e, com eles, estima-se, por regressão, os parâmetros  $C_1$  e  $C_2$  da equação 4.8.

O calor latente de vaporização da umidade da madeira, em função da temperatura e do teor de umidade em que ocorre a vaporização, fica então definido pela equação:

$$\lambda_m = (587,723 - 0,569 T)(1,0 + C_1 e^{(C_2 M)}) \quad (4.9)$$

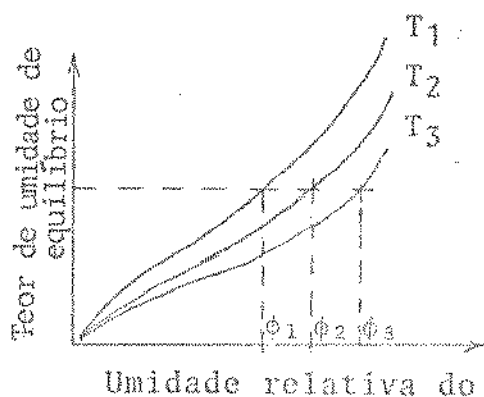


Fig. 2 - Esquema para a obtenção dos pontos das isósteras a partir das isotermas de umidade de equilíbrio

#### 4.3. Propriedades Físicas Dependentes do Arranjo Geométrico do Sistema de Dutos de Madeira Necessárias para a Solução do Modelo Matemático

##### 4.3.1. Curvas de Secagem e Umidificação da Madeira em Tábua

Foram adquiridas 60 tábuas de "pinho-do-paraná" (*Araucária angustifolia* (Bertoloni) Otto Kuntze), com dimensões médias de 0,027 de espessura, por 0,30 de largura e 4,20 metros de comprimento.

As tábuas foram dispostas de tal maneira que formaram igual número de dutos retangulares, com dimensões internas médias de 0,027 por 0,265 metros.

A Figura 3 mostra este arranjo geométrico proposto para constituir o sistema de armazenamento da energia solar. Mostra, ainda, equipamentos e acessórios que foram utilizados para a determinação das curvas de secagem e umidificação da madeira em função das condições do ar, baseado no método proposto por Roa et alii (36).

O condicionador de ar, marca AMINCO-AIRE, Modelo 4-5460 da AMERICAN INSTRUMENT COMPANY, controlava as condições do ar na entrada dos dutos.

Para garantir uma distribuição do ar, usou-se uma chapa de ferro galvanizado perfurada em 2% da sua área.

As condições do ar em escoamento eram determinadas com um psicrômetro de aspiração, tipo pistola, marca ATKINS THERMISTOR PSYCHROMETER, Modelo 3202B, da ATKINS TECHNICAL INC., nos pontos indicados na Figura 3.

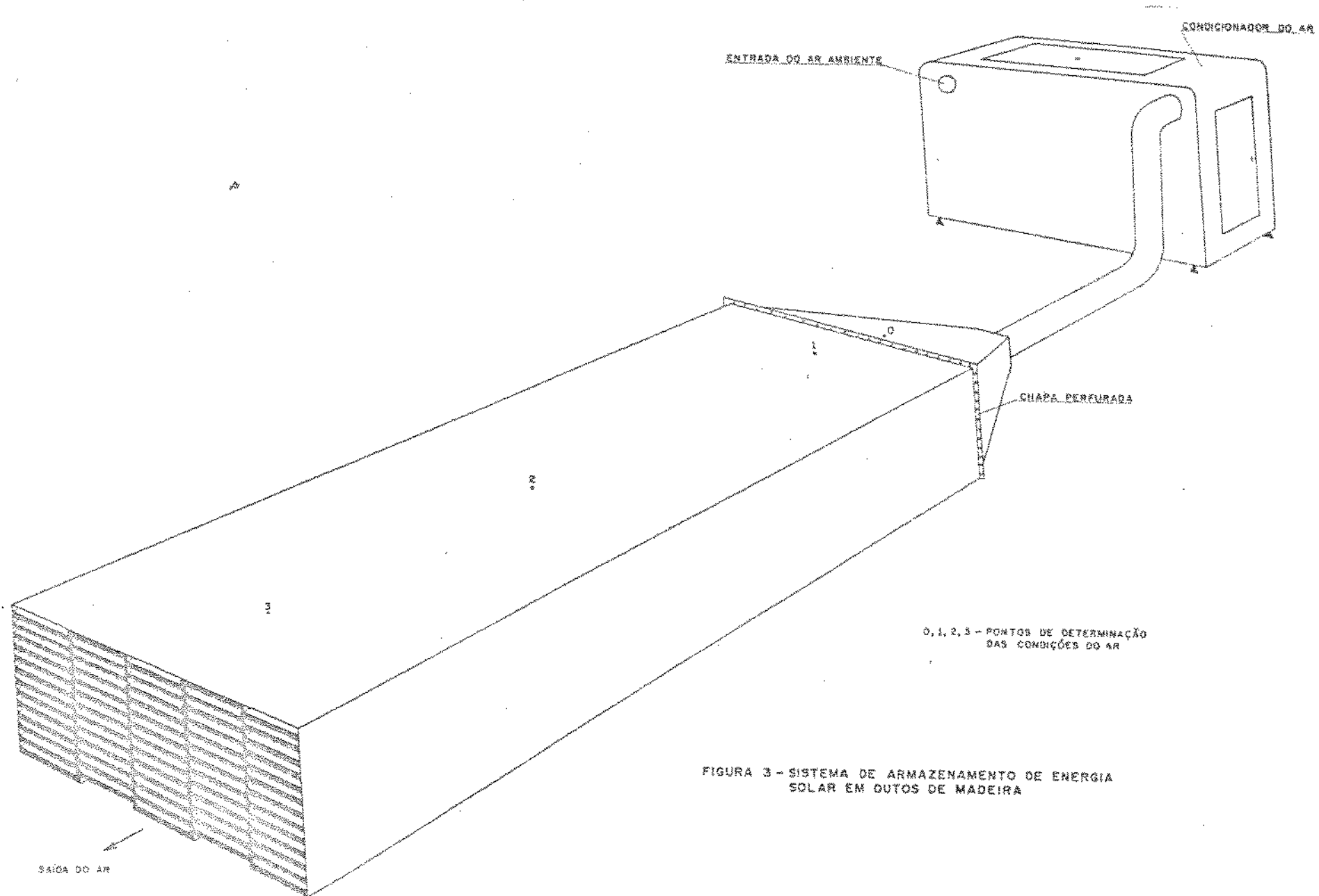


FIGURA 3 - SISTEMA DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA SOLAR EM CUSTOS DE MADEIRA

Este psicrômetro, provido de termopar, indicava as temperatura de bulbo seco e bulbo úmido em escala graduada em graus Fahrenheit com divisões de 0,1 grau. Devido ao seu formato, foi possível conectar um tubo de fibra de vidro para fazer as medidas no interior do sistema através dos furos nos referidos pontos de medida.

A Figura 4 dá as dimensões e a posição das amostras, ao longo do duto, que foram utilizadas na determinação da variação da umidade da madeira, em função das condições do ar em escoamento.

A Figura 5 mostra a posição das tábuas que podiam ser retiradas e recolocadas no sistema de dutos. Estas mantinham, cada uma três amostras, localizadas conforme mostra a figura 4.

Inicialmente, as condições do ar foram fixadas pelo Amínco-Aire para promover a secagem do sistema. Posteriormente, para promover a umidificação.

Durante estes processos, a determinados intervalos de tempo, eram medidas as condições do ar em escoamento na entrada e ao longo dos dutos. E, também, as amostras eram retiradas e pesadas numa balança eletrônica, marca STANTON, Modelo D42T, capacidade de até 1500 gramas e escala com divisões de 0,01 grama.

Com os resultados experimentais estimou-se os parâmetros m, n e q, da equação (4.4) na sua forma integral normalizada:

$$\frac{M - M_e}{M_o - M_e} = e^{-m (P_s - P_v)^n t^q} \quad (4.10)$$

por regressão linear e pelo método dos mínimos quadrados.

#### 4.3.2. Diâmetro Circular Equivalente

A expressão usual para calcular o diâmetro circular equivalente é dada por:

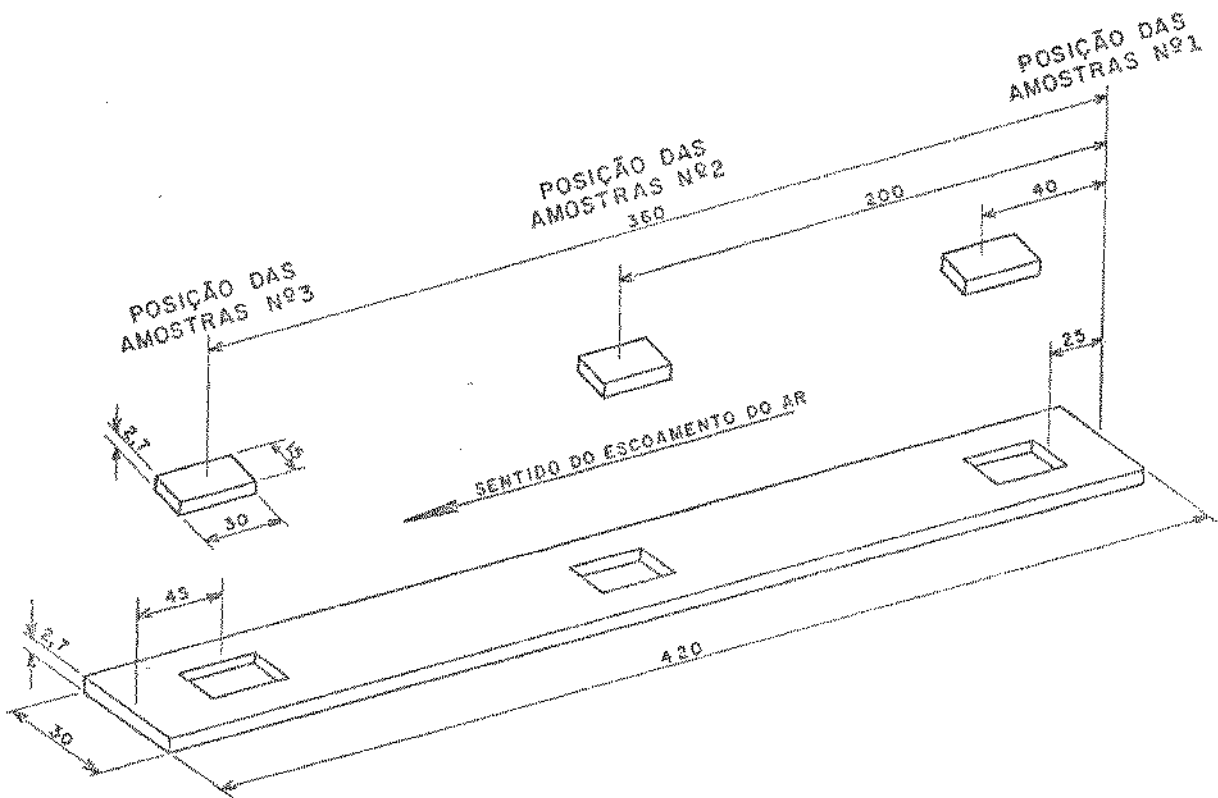


FIGURA 4 - POSIÇÃO DAS AMOSTRAS AO LONGO DO DUTO DE MADEIRA

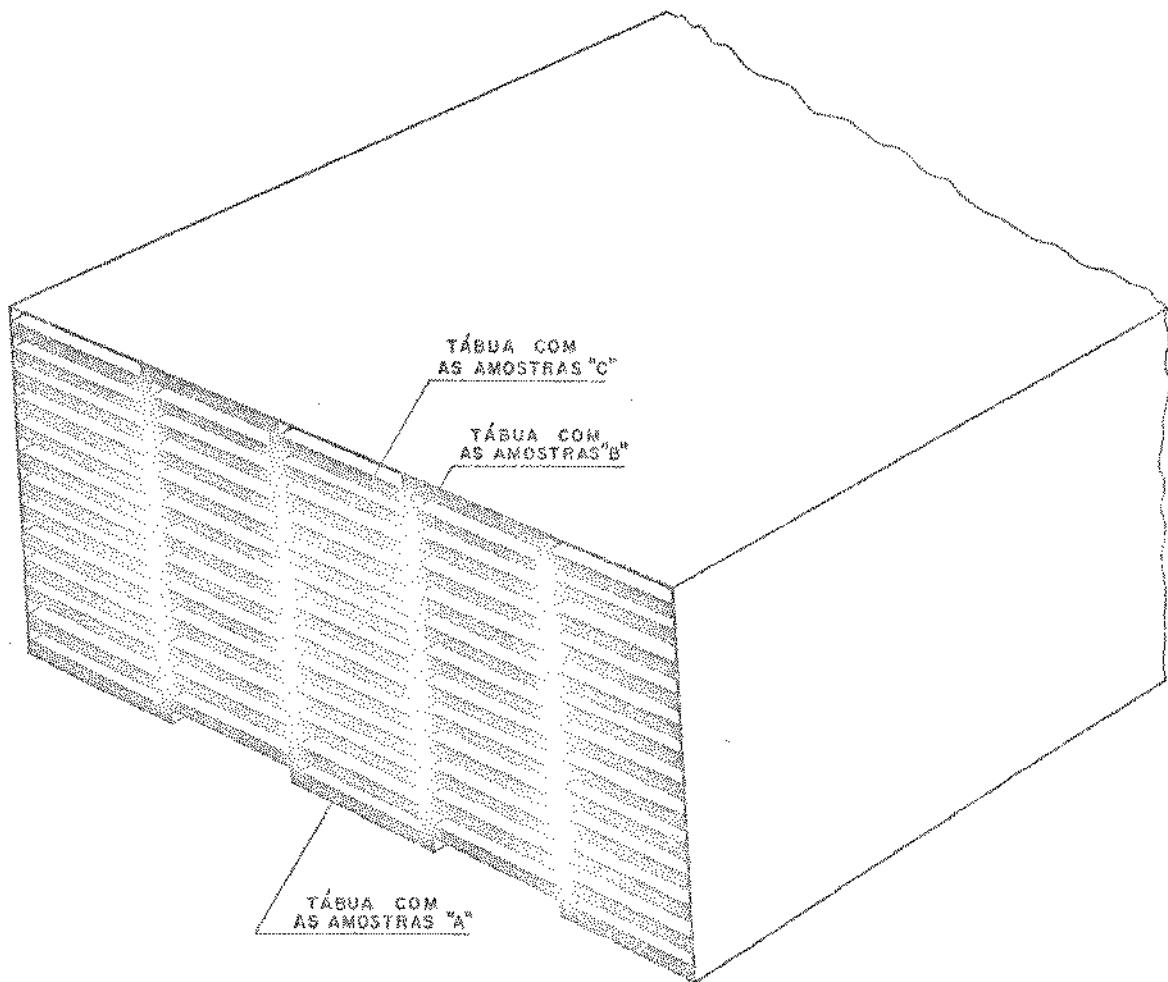


FIGURA 5 - LOCALIZAÇÃO DAS AMOSTRAS NO INTERIOR DO SISTEMA DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA SOLAR

$$D_{eq} = \frac{4 \text{ vezes a } \tilde{\text{área da secção transversal de escoamento}}}{\text{perímetro "molhado"}}$$

Para o duto retangular com dimensões características, conforme é mostrado na Figura 1, obtém-se, a partir desta expressão, a seguinte equação:

$$D_{eq} = \frac{2 \ y \ z}{(y+z)} \quad (4.11)$$

#### 4.3.3. Área Transversal do Volume de Controle

A área transversal do volume de controle diferencial para o duto de madeira, inclui também a área transversal ocupada pela parede do duto.

$$S = (y + 2e) (z + 2e) \quad (4.12)$$

#### 4.3.4. Densidade Aparente

A densidade aparente é uma função da densidade real da madeira:

$$\rho_{ad} = \rho_m \left( \frac{S - yz}{S} \right) \quad (4.13)$$

#### 4.3.5. Vazão Mássica do Ar

A vazão mássica do ar no volume de controle, é calculada em função da velocidade do ar no duto:

$$G_a = v \ \rho_a \left( \frac{y \ z}{S} \right) \quad (4.14)$$

#### 4.3.6. Área Específica

Esta é definida como sendo a área de transferência por uni



dade de volume:

$$a = \frac{2 (y + z)}{S} \quad (4.15)$$

#### 4.3.7. Coeficiente Convectivo de Transferência de Calor

Para perfil de velocidade e temperatura totalmente desenvolvidos em dutos retangulares, e para o caso de fluxo de calor e temperatura da parede constantes a uma dada posição axial, Rohsenow e Hartnett (43) apresentam uma tabela que se pode obter, por interpolação para o valor de 9,83 da relação  $y/z$ , o seguinte valor para o número de Nusselt limite:

$$Nu_{\infty} = 7,06$$

Knudsen e Katz (28) fornecem a seguinte relação que permite calcular o número de Nusselt, ao longo do duto, incluindo a região de "entrada":

$$\frac{Nu}{Nu_{\infty}} = 1,0 + (0,003 + 0,019 \frac{z}{y}) \frac{Pe}{x/D_{eq}} \quad (4.16)$$

Válida para  $Pr = 0,7$  e  $500 < Re < 2.000$ .

#### 4.4. Modelo Matemático de Secagem do Milho em Silos

Bakker-Arkema et alii (4), sobre o volume de controle diferencial mostrado na Figura 6, fazem o desenvolvimento analítico do modelo matemático de secagem de milho em silo.

Os autores fazem este desenvolvimento, tendo em conta as seguintes considerações iniciais:

1. A variação do volume do grão durante o processo é desprezível;

2. O gradiente de temperatura no grão, individualmente, não é considerado;
3. A transferência de calor por condução, de grão para grão, é desprezível;
4. Considera-se o escoamento do ar em fluxo pistão no interior do silo;
5. Considera-se as paredes do silo como sendo adiabáticas e com capacidade calorífica desprezível;
6. Os gradientes de temperatura e da umidade absoluta do ar, com respeito ao tempo, são desprezíveis, quando comparados aos gradientes com respeito a posição;
7. As capacidades caloríficas do ar úmido e do grão úmido são constantes durante curtos períodos de tempo.

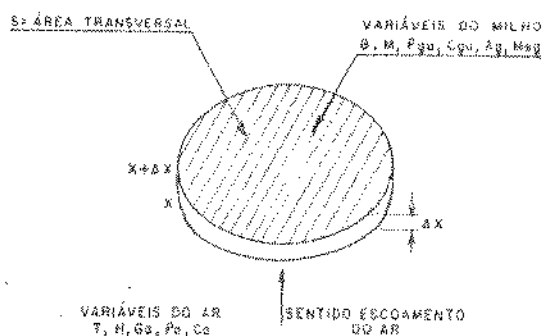


FIGURA 6 - VOLUME DE CONTROLE DIFERENCIAL DO LEITO FIXO PARA O MILHO

Como resultado, são obtidas as mesmas quatro equações já apresentadas, 4.1 a 4.4, que formam o modelo matemático buscado quando as propriedades físicas que influenciam a secagem do milho são utilizadas.

A simulação do processo é feita dividindo-se a altura total de grãos no silo em camadas de espessura  $\Delta x$ . Em cada uma das camadas resolve-se numericamente as equações do modelo, obtendo-se novas condições de ar e do grão após o intervalo de tempo  $\Delta t$ .

A condição final do ar, encontrada em uma camada, é a condição inicial para o cálculo na camada imediatamente seguinte e assim, sucessivamente, até que a última seja computada.

Repete-se este cálculo incrementando novo  $\Delta t$  ao tempo, tantas vezes quantas forem necessárias para se chegar ao tempo total

(resultado final), sempre partindo da primeira camada.

O modelo proposto por Bakker-Arkema et alii (4) exige na solução numérica, incrementos de posição ( $\Delta x$ ) muito pequenos para que não ocorra instabilidade matemática, o que provoca um tempo de computador muito elevado para simular o processo.

Este inconveniente pode ser resolvido assumindo-se o equilíbrio entre a temperatura do ar e do grão, após um intervalo de tempo em contato, conforme é apresentado por Thompson et alii (54).

Thompson et alii (54), com base nos resultados obtidos por Thompson e Foster e Henderson e Pabis, apresentam um modelo matemático de secagem de milho em silos, onde é assumido que a temperatura do grão é aproximadamente igual à temperatura do ar em contato, após ter sido considerado o efeito de resfriamento do grão pela evaporação da umidade e o das diferentes temperaturas iniciais do ar e do grão.

O modelo proposto por Thompson et alii (54), resolve, o balanço entálpico por uma equação algébrica de quantidade de calor. O balanço de massa é resolvido por outras duas equações, sendo uma delas de secagem, explícita no tempo, e usada para calcular um tempo equivalente de secagem, dado que as condições do ar ao longo do silo são variáveis. Entretanto, esta solução para o balanço de massa é um procedimento mais complicado comparativamente à solução das equações diferenciais de transferência de massa do modelo anterior.

Desenvolveu-se, então, um modelo matemático para a secagem de milho em silos, aproveitando as equações de um e de outro destes modelos apresentados.

O balanço entálpico é feito em duas etapas, através da equação algébrica de quantidade de calor proposta por Thompson et alii (54).

### Balanco Entálpico - 1ª. Etapa

$$(c_a + c_{vH_o})T_e + c_{gu} \rho_{gu} G_a \frac{\Delta x}{\Delta t} \theta_e = (c_a + c_{vH_o})T_o + c_{gu} \rho_{gu} G_a \frac{\Delta x}{\Delta t} \theta_o \quad (4.17)$$

Nesta equação, os termos à esquerda referem-se às condições de equilíbrio; os à direita, às iniciais. O primeiro termo de cada lado representa a quantidade de calor do ar, e o segundo, do grão.

Segundo os autores,  $T_e = \theta_e$ , donde pode se explicitar:

$$T_e = \frac{(c_a + c_{vH_o})T_o + c_{gu} \rho_{gu} G_a \frac{\Delta x}{\Delta t} \theta_o}{c_a + c_{vH_o} + c_{gu} \rho_{gu} G_a \frac{\Delta x}{\Delta t}} \quad (4.18)$$

Este valor é a temperatura de equilíbrio atingida pelo ar e pelo grão, considerando-se somente o efeito das diferentes temperaturas iniciais.

### Balanco de Massas

Sob estas condições é feito o balanço de massa de acordo com o modelo de Bakker-Arkema et alii (4).

A variação da umidade do grão é dada pelas equações 4.22 ou 4.23, conforme ocorra secagem ou umidificação do milho, respectivamente, e a variação da umidade do ar é dada pela equação 4.3.

Ficam, então, determinados os novos valores para a umidade do grão e do ar.

### Balanco Entálpico - 2ª. Etapa

A quantidade de calor envolvida nesta transferência de massa, é dada pela equação:

$$Q = \frac{\partial M}{\partial t} dt \lambda_g S \Delta x \rho_{gs} \quad (4.19)$$

Considera-se esta energia totalmente comprometida com o produto (cedida ou recebida pelo produto). Como consequência, o grão atinge uma nova temperatura que é dada por:

$$\theta = \theta_e + \frac{\partial M / \partial t}{\rho'_{gu}} \frac{\rho_{gs} \lambda_g}{c'_{gu}} \frac{dt}{dx} \quad (4.20)$$

onde  $\rho'_{gu}$  e  $c'_{gu}$  são valores calculados com o novo teor de umidade.

A equação (4.20) é obtida da equação conhecida de quantidade de calor sensível necessária para variar a temperatura de um material:

$$Q = m_{gu} c_{gu} (\theta - \theta_e)$$

onde o único termo desconhecido é  $\theta$ , e  $m_{gu}$  é a massa de grão úmido envolvida, isto é, existente na camada de espessura  $\Delta x$  e área  $S$  considerada. A quantidade  $Q$  é a mesma da equação (4.19).

Para completar esta segunda etapa do balanço entálpico, utiliza-se novamente a equação (4.17), porém com seus termos nos valores atuais. Assim, a temperatura final do ar e do produto fica dada por:

$$T_f = \theta_f = \frac{(c_a + c_v H_f) T_e + c'_{gu} \rho'_{gu} \frac{\Delta x}{G_a \Delta t} \theta}{c_a + c_v H_f + c'_{gu} \rho'_{gu} \frac{\Delta x}{G_a \Delta t}} \quad (4.21)$$

#### 4.5. Propriedades Físicas do Milho Exigidas Pelo Modelo

##### Matemático de Secagem

##### 4.5.1. Equações de Secagem e Umidificação

Tem-se a equação de secagem proposta por Misra e Brooker apresentada por Pierce e Thompson (35) :

$$\frac{\partial M}{\partial t} = -k r (M - M_{eg}) t^{r-1} \quad (4.22)$$

onde:

$$k = -0,0821 + 1,37 \times 10^{-2} T - 1,31 \times 10^{-4} T^2$$

$$r = 0,375 + 8,76 \times 10^{-2} \ln (100,0 \phi)$$

Para a umidificação, tem-se a equação proposta por Giudice, apresentada por Bakker-Arkema et alii (4):

$$\frac{\partial M}{\partial t} = -0,625 \left( \frac{P_s}{6894,8} \right)^{0,466} \phi \phi^3 (M - M_{eg}) \quad (4.23)$$

#### 4.5.2. Isotermas de Umidade de Equilíbrio

A equação das isotermas de umidade de equilíbrio de desorção é a (4.5), e seus parâmetros para o milho são apresentados por Sinicio e Roa (49):

$P_1 = 0,108154$	$q_0 = -0,0148616$	$q_3 = 0,0432168$
$P_2 = -0,0877078$	$q_1 = 0,0315231$	$q_4 = -0,0168228$
$P_3 = 0,0702264$	$q_2 = -0,0502257$	$q_5 = -154,553$

#### 4.5.3. Calor Latente de Vaporização da Umidade

O calor latente de vaporização da umidade do milho, em função da temperatura e do teor de umidade em que ocorre a vaporização, é dado pela equação (4.9), com os respectivos parâmetros característicos fornecidos por Bakker-Arkema et alii (4):

$$c_1 = 4,349$$

$$c_2 = -28,25$$

#### 4.5.4. Capacidade Calorífica

Thompson et alii (54) mostram a equação que dá o valor da capacidade calorífica em função do teor de umidade:

$$c_{gu} = 0,350 + 0,851 \left( \frac{M}{M + 1,0} \right) \quad (4.24)$$

#### 4.5.5. Densidade Aparente

A equação que dá o valor da densidade aparente do milho, em função do seu teor de umidade, não considerando a variação do volume, é:

$$\rho_{gu} = \rho_{gs} (1,0 + M) \quad (4.25)$$

onde  $\rho_{gs} = 584,1$ , de acordo com Mantovani (29).

#### 4.6. Propriedades Físicas do Ar

A representação matemática destas propriedades é necessária para simulação do processo de secagem.

##### 4.6.1. Viscosidade

Brown et alii (6) fornecem os valores da viscosidade do ar em função da temperatura. Estes valores são representados pela seguinte equação:

$$\mu = 1,4852 \cdot 10^{-3} T_{abs}^{2/3} \quad (4.26)$$

válida entre 273 e 373 °K, cujos parâmetros foram estimados por regressão linear.

##### 4.6.2. Capacidade Calorífica

A capacidade calorífica, à pressão constante, para o ar úmido é dada pela seguinte equação, de acordo com Foust et alii(18):

$$c_{au} = c_a + c_v H \quad (4.27)$$

sendo  $c_a = 0,242$  e  $c_v = 0,45$

#### 4.6.3. Condutividade Térmica

Os valores da condutividade térmica do ar em função da temperatura, são apresentados por Foust et alii (18) e a equação que os representa é:

$$k = 0,02084 + 0,64 \cdot 10^{-4} T \quad (4.28)$$

cujos parâmetros foram estimados por regressão linear.

#### 4.7. Equações Psicrométricas

Estas equações determinam o estado do ar durante o processo de secagem, e fazem parte do modelo matemático de secagem e umidificação dos dutos de madeira e do milho.

##### 4.7.1. Pressão de Saturação do Vapor de Água

Brooker (5) propõe uma equação empírica que representa a pressão de saturação do vapor de água em função da temperatura:

$$P_s = R e^{\frac{(A + B T_{abs} + C T_{abs}^2 + D T_{abs}^3 + E T_{abs}^4)}{(F T_{abs} - G T_{abs}^2)}} \quad (4.29)$$

onde os parâmetros tem os seguintes valores:

$$\begin{aligned} R &= 0,2210585 \cdot 10^7 \\ A &= -0,2740553 \cdot 10^5 \\ B &= 0,9754129 \cdot 10^2 \\ C &= -0,1462440 \\ D &= 0,1255753 \cdot 10^{-2} \\ E &= -0,4850171 \cdot 10^{-7} \\ F &= 0,4349029 \cdot 10^1 \\ G &= 0,3938107 \cdot 10^{-2} \end{aligned}$$



#### 4.7.2. Volume Específico

O volume específico do ar é calculado, em função da temperatura e da umidade absoluta, pela equação:

$$v = \frac{287,0 T_{abs} (0,6219 + H)}{0,6219 P_{atm}} \quad (4.30)$$

#### 4.7.3. Umidade Absoluta

É calculada, em função da pressão de vapor, pela equação:

$$H = \frac{0,6219 P_v}{(P_{atm} - P_v)} \quad (4.31)$$

#### 4.7.4. Pressão de Vapor

É calculada, em função da umidade absoluta, pela equação:

$$P_v = \frac{H P_{atm}}{(0,6219 + H)} \quad (4.32)$$

#### 4.7.5. Umidade Relativa

É dada pela relação:

$$\phi = \frac{P_v}{P_s} \quad (4.33)$$

#### 4.8. Equações de Previsão da Deterioração do Milho

Segundo Saul e Lind (46), a deterioração do milho é um processo cumulativo e irreversível, ou seja, se uma determinada percentagem do tempo disponível foi usada sob a determinada condição, o tempo disponível para uma outra condição ficará diminuído.

O processo de secagem em silos utiliza um tempo relativamente elevado e representará um período no qual o grão sofre de deterioração (51).

Thompson (55) apresenta as equações matemáticas, desenvolvidas por Steele, que possibilitam avaliar a qualidade do milho durante o processo de secagem.

Segundo este autor o milho poderá ser classificado no grau nº 2, ou pior, segundo os padrões oficiais de classificação dos Estados Unidos, se a perda de sua matéria seca for acima de 0,5%.

A perda de matéria seca - consequência da respiração do grão - é altamente dependente da temperatura, do teor de umidade e do percentual de grãos danificados.

A equação que calcula o valor da perda de matéria seca percentual em função do tempo, quando o grão está sob condições de referência (25% de umidade, base úmida; 60°F e 30% de danos mecânicos), é a seguinte:

$$PMS = 0,0883 (e^{0,006 t} - 1,0) + 0,00102 \quad (4.34)$$

Porém, quando o grão permanece um determinado tempo ( $\Delta t$ ) sob condições diferentes das referenciais, calcula-se o tempo ( $t_{eq}$ ) equivalente às condições de referência, pela equação:

$$t_{eq} = \frac{\Delta t}{N_M M_T M_D} \quad (4.35)$$

Com o valor obtido, é resolvida a equação 4,34. Os multiplicadores  $N_M$ ,  $M_T$  e  $M_D$ , respectivamente, levam em conta os diferentes teor de umidade, temperatura e o percentual de danos mecâ-

nicos e são definidos pelas seguintes equações:

$$M_M = 0,103 \left( e^{(455,0/(100,0 M)^{1,53}} - 0,845 M + 1,558 \right) \quad (4.36)$$

para  $.13 \leq M_{bu} \leq .35$

$$M_T = 128,76 e^{(-0,078 \Theta_F)} \quad (4.37)$$

para  $\Theta_F \leq 60$

$$M_T = 32,3 e^{(-0,058 \Theta_F)} \quad (4.38)$$

para  $\Theta_F > 60$  e  $M_{bu} \leq 0,19$

$$M_T = 32,3 e^{(-0,058 \Theta_F)} + (M_{bu} - 0,19) e^{\left(\frac{0,61(\Theta_F - 60,0)}{60,0}\right)} \quad (4.39)$$

para  $\Theta_F > 60$  e  $0,19 \leq M_{bu} \leq 0,28$

$$M_T = 32,3 e^{(-0,058 \Theta_F)} + 0,09 e^{\left(\frac{0,61(\Theta_F - 0,60)}{60,0}\right)} \quad (4.40)$$

para  $\Theta_F > 60$  e  $M_{bu} \leq 0,28$

$$M_D = 2,17 e^{(-0,0254 D)}$$

onde D éo percentual de grãos danificados.

(4.41)

#### 4.9 - Condições Climáticas

Na simulação matemática foram utilizadas as equações 4.42 e 4.43, com os respectivos valores da Tabela 1, como fonte de dados meteorológicos, tendo por base os estudos realizados por Villa et alii (56).

Estes autores compararam os resultados experimentais de secagem de soja em silos com os simulados que foram obtidos utilizando as seguintes informações meteorológicas:

- a) temperatura e umidade relativa medidas experimentalmente, a cada 15 minutos, durante os 25 dias de operação;
- b) o valor médio da temperatura e da umidade relativa, calculados com os dados do item a), durante o período;
- c) temperatura e umidade relativa, com suas variações, correspondentes a um dia típico do período experimentado.

Observaram uma boa previsão do avanço da frente de secagem e do teor de umidade final do grão, quando a simulação foi realizada com a última maneira de informação de dados meteorológicos, e foram utilizadas, neste caso, duas equações matemáticas com as seguintes expressões:

$$T = T_{\text{méd.}} + S_1 \cos(\pi/180(15w - A_1)) + S_2 \cos(\pi/180(30w - A_2)) \quad (4.42)$$

a qual fornece a variação da temperatura, em função da hora do dia, para o dia típico do período, onde  $T_{\text{méd}}$  é a temperatura média do período,  $w$  é a hora do dia e  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $S_1$  e  $S_2$ , são parâmetros obtidos por regressão em função dos dados experimentais.

A outra equação utilizada pelos autores:

$$\phi = \frac{P_{\text{atm}} H_{\text{méd}}}{P_s(0,6219 + H_{\text{méd}})} \quad (4.43)$$

a qual é uma equação psicrométrica que permite calcular a variação da umidade relativa do dia típico, onde  $H_{\text{méd}}$  é o valor médio da umidade absoluta do ar no período.

Em virtude dos resultados obtidos e em continuação do estudo, os autores apresentaram os valores da Tabela I., obtidos em função de dados experimentais correspondentes aos períodos especificados, para a região de Campinas-SP, e referentes ao ano de 1961 que, segundo

os autores, entre 1956 e 1976, foi o pior ano para a secagem.

Portanto, usando-se estes valores nas equações 4.41 e 4.42, estas representarão a variação da temperatura e da umidade relativa, respectivamente, do dia típico do período.

TABELA I

Valores para as equações de temperatura e umidade relativa do dia típico do período, para a região de Campinas - SP.

Período	T <sub>méd</sub>	S <sub>1</sub>	A <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	A <sub>2</sub>	H <sub>méd</sub>
01 a 30 de abril de 1961	21,59	5,7092	221,525	1,3070	53,111	0,0145
01 a 31 de maio de 1961	19,82	6,4373	220,995	2,7404	67,636	0,0120

#### 4.10 - Aquecimento do Ar pelo Coletor Solar

Calculou-se o aumento da temperatura do ar ambiente pelo coletor solar, em função da hora do dia, pela seguinte equação:

$$ATC = (-0,04w^2 + 1,04 w - 5,76) AMTC \quad (4.44)$$

A expressão entre-parenteses tem seu máximo (ATC=1,0) em  $w = 13,0$  (às 13 horas) e suas raízes em  $w = 8,0$  e  $w = 18,0$ . O coeficiente AMTC (aumento máximo da temperatura pelo coletor) tem o seu valor fixado previamente em função do valor máximo de ATC que se queira.

#### 4.11 - Aquecimento do Ar pelo Ventilador

Pierce e Thompson (34) em seu estudo simulado, consideram um aumento na temperatura do ar em  $1,1^{\circ}\text{C}$  ao passar o ar de secagem pelo ventilador.

Rossi (44) em seu experimento, mediu aumentos de temperatura do ar de secagem ao passar pelo ventilador com valores que variavam entre  $1,5$  a  $1,8^{\circ}\text{C}$ .

No presente estudo, as simulações são realizadas considerando um aumento de  $1,0^{\circ}\text{C}$  na temperatura do ar de secagem ao passar pelo ventilador.

#### 4.12 - Comprovação do modelo matemático de secagem e umidificação dos dutos de madeira.

O modelo matemático foi escrito em FORTRAN-IV conforme é apresentado no Apêndice A.

A sua comprovação consistiu em fornecer ao computador as condições experimentais utilizadas na secagem e umidificação dos dutos de madeira para comparar os resultados experimentais com os simulados, com base em um teste estatístico de hipótese.

As condições do ar, na entrada dos dutos, para a secagem, estão apresentadas na Tabela II e para a umidificação, na Tabela III.

Nos tempos intermediários aos que constam nestas Tabelas, as condições do ar foram calculadas com equações de uma reta que passa por dois pontos, que são os extremos do intervalo considerado.

A velocidade do ar em escoamento foi medida, na saída dos dutos, com um *anemômetro de hélice marca VEB*, com escala graduada entre 0 a 100 metros por minuto e divisões de 1,0 metro por minuto, com acionamento automático do cronômetro, e seus valores são apresentados na Tabela IV.

A temperatura inicial dos dutos, na secagem foi de 18,0 °C e, na umidificação, 25°C.

A Tabela V apresenta os valores determinados dos teores de umidade inicial dos dutos na secagem e a Tabela VI, os valores correspondentes à umidificação.

Nas posições intermediárias dos dutos, os teores de umidade foram estimados por equações de linha reta que passa por dois pontos, sendo estes os extremos do intervalo.

#### 4.13 - Comprovação do modelo matemático de secagem e umidificação do milho em silo.

O modelo matemático foi escrito em FORTRAN-IV conforme é apresentado no Apêndice B.

A sua comprovação consistiu em fornecer ao computador as condições experimentais de secagem de milho em silo para comparar os resultados experimentais com os simulados, com base em um teste estatístico de hipótese.

Os resultados experimentais de secagem de milho em silo foram obtidos no estudo de Mantovani (29), realizados nas seguintes condições:

Diâmetro do silo	0,60 m
Altura da camada de grãos	1,30 m
Teor de umidade inicial do grão	0,2035
Temperatura inicial do grão	23,2 °C
Peso específico aparente do grão	703,0 kg/m <sup>3</sup>
Temperatura do ar de secagem	30,0 °C
Umidade relativa do ar de secagem	45,0 %
Vazão do ar de secagem	264,6 m <sup>3</sup> /h

#### 4.14 - Teste Estatístico na Comprovação dos Modelos Matemáticos

Utilizou-se o teste estatístico do caso em que deseja-se testar hipóteses referentes à média de uma população cujo desvio-padrão é desconhecido, conforme é apresentado por Costa Neto (11), para avaliar os resultados simulados em relação aos experimentais.

No Apêndice C o teste estatístico está descrito e exemplificado.

#### 4.15 - Solução Numérica das Equações Diferenciais

A solução das equações diferenciais dos modelos matemáticos, foi baseada no método das diferenças finitas ascendentes, conforme é apresentada por Carnahan et alii (9).

No Apêndice D este método está descrito e exemplificado.

#### 4.16 - Avaliação do Uso da Energia Solar Armazenada no Processo de Secagem do Milho em Silo

Verificou-se a influência do uso da energia solar armazenada sobre o processo de secagem de milho em silo, por meio de estudos simulados, comparando-se os resultados obtidos nas seguintes condições operacionais, de gerência do processo e de características do sistema de secagem:

- Condições operacionais:

Em todas as simulações fixou-se os seguintes parâmetros:

Altura da camada de grãos no silo	3,0 m
Velocidade do ar no silo (considerando-o vazio)	360 m/h

TABELA II

Condições do ar na entrada dos dutos de  
madeira durante o processo de secagem.

TEMPO	T	T <sub>bu</sub>	H	$\phi$
0	41,1	23,9	0,0136	0,2557
4,0	44,2	25,4	0,0149	0,2379
7,0	41,9	24,2	0,0138	0,2476
17,0	43,1	24,3	0,0135	0,2294
45,5	47,4	26,6	0,0157	0,2117
53,0	47,0	26,0	0,0149	0,2053
68,5	43,6	26,3	0,0167	0,2748
90,5	45,1	25,9	0,0154	0,2341
116,0	48,1	27,6	0,0173	0,2261
139,5	49,2	28,1	0,0178	0,2193
162,5	46,4	27,5	0,0179	0,2536
197,0	44,4	26,4	0,0166	0,2602
215,5	44,8	26,7	0,0169	0,2603
241,0	44,4	26,4	0,0166	0,2602
282,5	44,4	26,4	0,0166	0,2602
315,5	44,6	26,7	0,0170	0,2658
338,0	44,4	25,0	0,0141	0,2224
385,5	44,7	26,1	0,0160	0,2472



TABELA III

Condições do ar na entrada dos dutos de madeira durante o processo de umidificação.

TEMPO	T	T <sub>bu</sub>	H	$\phi$
0	25,2	23,2	0,0188	0,8556
6,0	25,2	23,2	0,0188	0,8556
20,0	24,7	23,1	0,0187	0,8745
31,0	24,8	23,3	0,0191	0,8869
46,0	25,0	23,2	0,0189	0,8671
56,0	25,0	23,1	0,0187	0,8591
76,0	25,4	23,6	0,0193	0,8682
101,5	25,6	23,9	0,0198	0,8767
122,5	25,9	23,9	0,0196	0,8537
144,5	24,8	23,4	0,0193	0,8990
150,0	24,7	23,2	0,0190	0,8906
223,0	24,2	22,0	0,0172	0,8328
237,0	24,7	22,1	0,0172	0,8106
247,0	24,9	23,8	0,0199	0,9158
265,5	26,2	24,8	0,0210	0,8939
284,5	26,2	24,8	0,0210	0,8939

TABELA IV

Velocidade do ar (m/h) em escoamento nos dutos.

DUTO	SECAGEM	UMIDIFICAÇÃO
A	0	0
B	540,0	421,2
C	838,8	838,8

TABELA V

Teor de umidade inicial dos dutos de madeira  
no processo de secagem.

DUTO	Distância ao longo do duto, a partir da entrada		
	0,40 m	2,0 m	3,60 m
A	.3537	.3635	.4452
B	.2746	.3365	.3169
C	.2612	.3813	.2776

TABELA VI

Teor de umidade inicial dos dutos de madeira  
no processo de umidificação.

DUTO	Distância ao longo do duto, a partir da entrada		
	0,40 m	2,0 m	3,60 m
A	0,0849	0,0922	0,1057
B	0,0622	0,0621	0,0682
C	0,0615	0,0677	0,0701

Teor de umidade inicial do grão	0,2500
Temperatura inicial do grão	18,0 °C

- Características dos sistemas de secagem e gerência do processo:

Simulação A: Secagem com ar natural, continuamente, durante as 24 horas do dia.

Simulação B: Secagem com ar natural, intermitente, durante o período em que a umidade relativa do ar ambiente é igual ou menor do que 70 % considerando também, a deterioração do grão durante o repouso.

Simulação C: Secagem com ar aquecido pelo coletor solar, intermitente, durante o período em que a umidade relativa do ar ambiente é igual ou menor do que 70 % considerando, também, a deterioração do grão durante o repouso e o aumento máximo da temperatura do ar pelo coletor (às 13:00 horas) de 5,0 °C.

Simulação D: Secagem contínua, com ar natural durante o período em que a umidade relativa do ar ambiente é igual ou menor do que 70 %, e com o ar passando pelo armazenador de energia quando a umidade relativa do ar ambiente for superior a este valor.

Simulação E: Secagem contínua com ar aquecido pelo coletor solar entre as 8:00 e 18:00 horas do dia, com aumento máximo da temperatura em 5,0 °C ( às 13:00 horas) e passando continuamente pelo armazenador de energia.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 -Isotermas de Umidade de Equilíbrio da Madeira:

Na Tabela VII são apresentados os resultados obtidos em função das condições experimentais, com os quais foram estimados os parâmetros da equação 4.5, cujos valores são:

$$\begin{array}{lll} P_1 = 0,445420 & q_0 = -0,0302107 & q_3 = 0,391262 \\ P_2 = 0,0743762 & q_1 = 0,163220 & q_4 = 0,138940 \\ P_3 = 0,0583661 & q_2 = 0,390098 & q_5 = 80,5945 \end{array}$$

Também são apresentados os valores calculados com a referida equação e os parâmetros acima, correspondentes às condições experimentais, bem como o valor absoluto de erro percentual relativo entre estes valores.

TABELA VII

Umidade de equilíbrio de sorção para a madeira: valores experimentais e calculados.

TEMPERATURA	S A L	UMIDADE RELATIVA	UMIDADE DE EQUILIBRIO EXPERIMENTAL	UMIDADE DE EQUILIBRIO CALCULADA	VALOR ABSOLUTO ERRO PERCENTUAL RELATIVO
10	MgCl <sub>2</sub> .6H <sub>2</sub> O	33,1	.1010	.0768	23,96
10	NaBr	61,7	.1395	.1322	5,23
10	NaCl	75,4	.1532	.1544	0,78
10	KBr	85,9	.1742	.1766	1,38
10	K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	97,9	.2040	.2005	1,72
20	CaCl <sub>2</sub> .6H <sub>2</sub> O	32,3	.0909	.0696	23,43
20	NaBr	59,2	.1297	.1210	6,71
20	NaCl	75,5	.1463	.1455	0,55
20	KBr	84,0	.1581	.1629	3,04
20	K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	97,2	.1864	.1901	1,98
30	MgCl <sub>2</sub> .6H <sub>2</sub> O	32,8	.0810	.0667	17,65
30	NaBr	56,3	.1088	.1104	1,47
30	NaCl	75,6	.1376	.1370	0,44
30	KBr	82,2	.1439	.1501	4,31
30	K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	96,6	... *	-	-

\* Esta amostra foi desprezada por apresentar desenvolvimento de fungos.

A Figura 7 mostra as isotermas teóricas e os pontos experimentais:

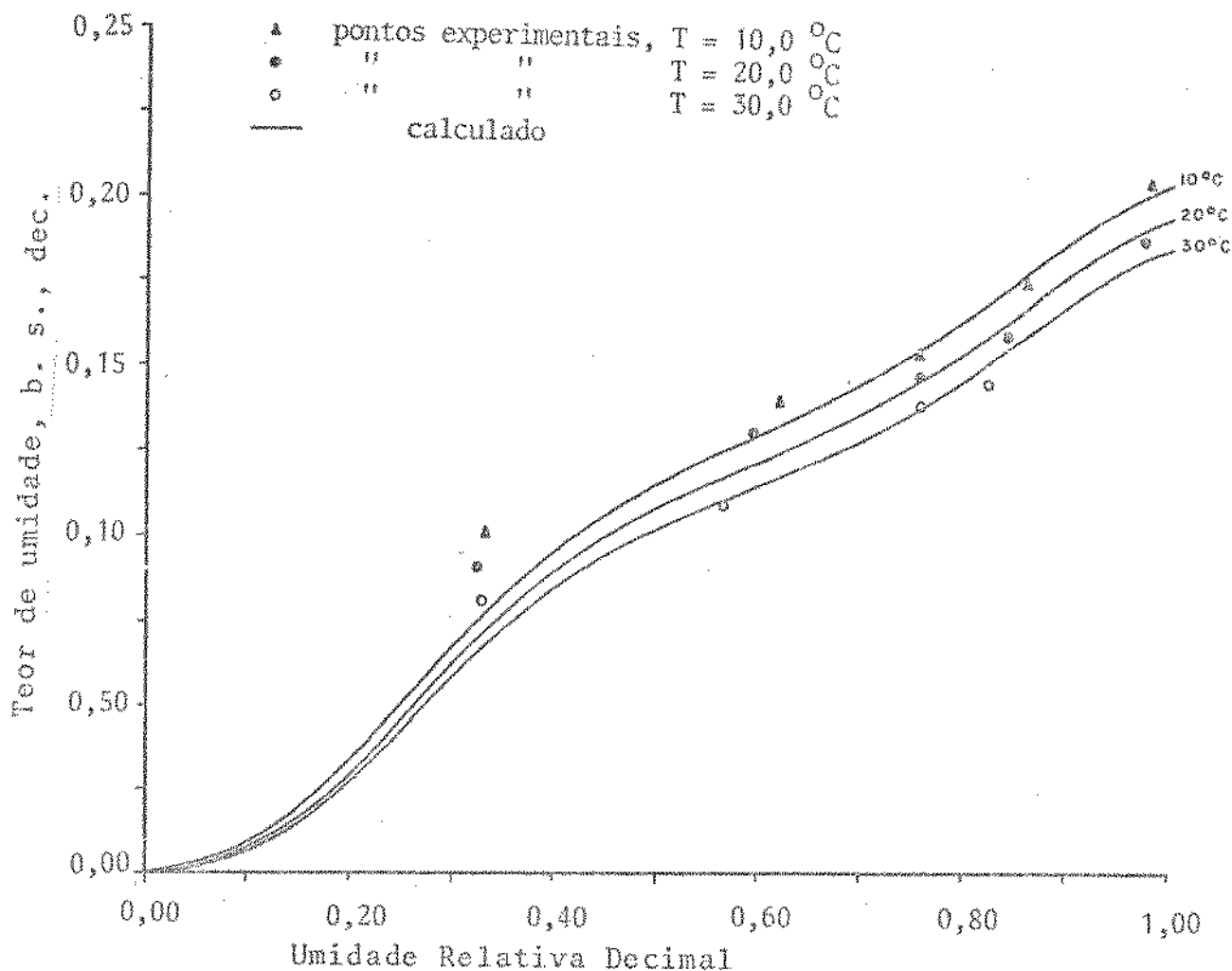


Fig. 7 - Isotermas de Umidade de Equilíbrio de Sorção para a Madeira.

Tendo-se em conta que a equação 4.5 é empírica, verifica-se a necessidade de um maior número de pontos experimentais na determinação das isotermas de umidade de equilíbrio, principalmente para os valores de baixa umidade relativa. Certamente, desta maneira, os valores estimados pela referida equação, na faixa de baixa umidade relativa, seriam mais próximos do real.

Entretanto, isto não foi possível em virtude da carência dos respectivos sais no laboratório onde se realizou tal experimento.

## 5.2 - Densidade da Madeira Seca

Na Tabela VIII são apresentados os resultados obtidos na de

terminação da densidade da madeira seca.

TABELA VIII

Resultados experimentais da determinação da densidade da madeira seca.

AMOSTRA	PESO SECO (g)	VOLUME (cm <sup>3</sup> )	PESO ESPECÍFICO ( g/cm <sup>3</sup> )
1	634,13	1.143,0	0,5548
2	603,25	1.112,0	0,5425
3	653,16	1.233,0	0,5297
4	628,22	1.233,0	0,5095
5	666,72	1.240,0	0,5377
6	652,57	1.215,0	0,5371
7	508,66	1.051,0	0,4840
8	580,85	1.174,0	0,4948
9	584,54	1.157,0	0,5052
MÉDIA ARITMÉTICA			0,5217

Consideramos a média aritmética dos valores como sendo a densidade da madeira seca:

$$\rho_m = 521,7 \text{ kg/m}^3$$

### 5.3 - Calor Latente de Vaporização da Umidade da Madeira

A Tabela IX apresenta os valores da relação  $\lambda_m/\lambda_w$  correspondes ao teor de umidade de equilíbrio, determinados em função das isotermas de umidade de equilíbrio de sorção da madeira. Com base nestes resultados, foram estimados os parâmetros da equação 4.8 cujos valores são:

$$C_1 = 0,58463$$

$$C_2 = -11,5708$$

Constam também, na Tabela IX, os respectivos valores da relação  $\lambda_m/\lambda_w$  calculados pela equação 4.8 com os parâmetros acima, bem como o valor absoluto do erro percentual relativo entre estes valores e os determinados pelo método.

TABELA IX

Valores da relação  $\lambda_m/\lambda_w$ , para a madeira, determinados pelo método e calculados pela equação 4.8.

UMIDADE DE EQUI LÍBRIO (Base seca, decimal)	$\lambda_m / \lambda_w$ Determinados	$\lambda_m / \lambda_w$ Calculados	VALOR ABSOLUTO DO ERRO PERCENTUAL RELATIVO
.05	1,0770	1,3278	23,29
.06	1,0768	1,2920	19,98
.07	1,0816	1,2601	16,50
.08	1,0803	1,2317	14,01
.09	1,1057	1,2064	9,10
.10	1,1360	1,1838	4,21
.11	1,1482	1,1637	1,35
.12	1,1446	1,1458	0,12
.13	1,1349	1,1299	0,44
.14	1,1154	1,1157	0,03
.15	1,0937	1,1031	0,86
.16	1,0842	1,0918	0,70
.17	1,0787	1,0818	0,28
.18	1,0831	1,0728	0,95

Observa-se um resultado não esperado para o valor da relação  $\lambda_m/\lambda_w$  determinado pelas isotermas de umidade de equilíbrio, quando o teor de umidade é inferior a .11, segundo o que normalmente ocorre (Brooker (5) e Kneule (27)).

Atribui-se às dificuldades da equação 4.5 em estimar os valores da umidade de equilíbrio na faixa de baixa umidade relativa, ocasionando tais resultados.

Entretanto, ficamos com os valores estimados pela equação 4.8, considerando-se o que é apresentado na Tabela X.

TABELA X

Calor latente de vaporização da umidade da madeira (Kcal / Kg)  
calculados pela equação 4.9 e comparados com o da água pura,  
nas respectivas temperaturas.

TEOR DE UMIDADE DA MADEIRA (b.s., dec.)	T E M P E R A T U R A (°C)				
	10	20	30	40	50
.05	772,8	765,3	757,7	750,2	742,6
.10	689,0	682,3	675,5	668,8	662,1
.15	642,0	635,7	629,5	623,2	616,9
.20	615,7	609,6	603,6	597,6	591,6
.25	600,9	595,0	589,1	583,3	577,4
.30	592,6	586,8	581,0	575,2	569,4
ÁGUA PURA	582,0	576,3	570,6	565,0	559,3

#### 5.4 - Curvas de Secagem e Umidificação da Madeira em Tábuas

Encontrou-se os seguintes valores para os parâmetros da equação de secagem e umidificação da madeira em tábuas:

$$m = .0011725$$

$$n = .32957$$

$$q = .96272$$

As Tabelas XI, XII, XIII e XIV apresentam as condições médias do ar incidentes sobre a amostra respectiva, a umidade de equilíbrio da madeira corresponde a estas condições, a variação com o tempo do teor de umidade experimental e o calculado pela equação 4.9 com os parâmetros acima e, ainda, o valor absoluto do erro percentual relativo entre estes dois últimos valores.

O método utilizado para estimação dos parâmetros exigiu condições constantes do ar nas amostras e, por este motivo, utilizou-se a média aritmética dos valores experimentais da temperatura de bulbo seco e da temperatura de bulbo úmido, incidentes sobre elas.

Nesta determinação utilizamos somente as amostras C1 e C2 da secagem e C1 e B1 da umidificação, porque foram as que apresen-



taram menor variação destas condições do ar. Os valores experimentais foram em conjunto, resultando nos valores dos parâmetros que são únicos tanto para o processo de secagem quanto para o de umidificação.

TABELA XI

Variação da umidade da madeira durante o processo de umidificação referente à amostra B1.

$T_a = 25,7^{\circ}\text{C}$ $T_{bu} = 23,6^{\circ}\text{C}$ $P_s - P_v = 509,7 \text{ N/m}^2$ $\phi = 84,5\%$ $M_e = 0,1590$			
TEMPO (horas)	$M_{exp}$	$M_{calc}$	VALOR ABSOLUTO DO ERRO RELATIVO PERCENTUAL
0	0,0622	0,0622	-
20,0	0,0780	0,0768	1,54
31,0	0,0846	0,0836	1,18
46,0	0,0915	0,0918	0,33
56,0	0,0956	0,0967	1,15
76,0	0,1033	0,1054	2,03
101,5	0,1116	0,1147	2,78
122,5	0,1175	0,1211	3,06
144,5	0,1246	0,1267	1,69
190,0	0,1337	0,1358	1,57
223,0	0,1375	0,1407	2,33
237,0	0,1390	0,1425	2,52
247,0	0,1422	0,1436	0,98
265,5	0,1489	0,1455	2,28
284,5	0,1549	0,1472	4,97

TABELA XII

Variação da umidade da madeira durante o processo de umidificação referente à amostra C1.

$T = 25,6^{\circ}\text{C}$ $T_{\text{bu}} = 23,6^{\circ}\text{C}$ $P_s - P_v = 481,8 \text{ N/m}^2$ $\phi = 85,28\%$ $M_e = 0,0519$			
TEMPO (horas)	$M_{\text{exp}}$	$M_{\text{calc}}$	VALOR ABSOLUTO DO ERRO RELATIVO PERCENTUAL
0	0,0615	0,0615	-
20,0	0,0783	0,0762	2,68
31,0	0,0849	0,0831	2,12
46,0	0,0920	0,0914	0,65
56,0	0,0967	0,0964	0,31
76,0	0,1038	0,1065	2,60
101,5	0,1109	0,1147	3,43
122,5	0,1171	0,1212	3,50
144,5	0,1245	0,1270	2,01
190,0	0,1339	0,1364	1,87
223,0	0,1375	0,1415	2,91
237,0	0,1392	0,1433	2,95
247,0	0,1428	0,1445	1,19
265,5	0,1504	0,1465	2,59
284,5	0,1575	0,1483	5,84

TABELA XIII

Variação da umidade da madeira durante o processo de secagem referente à amostra C1.

$T = 42,3^{\circ}\text{C}$ $T_{\text{bu}} = 26,0^{\circ}\text{C}$ $P_s - P_v = 5887,2 \text{ N/m}^2$ $\phi = 29,4\%$ $M_e = 0,0519$			
TEMPO (horas)	$M_{\text{exp}}$	$M_{\text{calc}}$	VALOR ABSOLUTO DO ERRO RELATIVO PERCENTUAL
0	0,2612	0,2612	-
17,0	0,1881	0,2049	8,93
45,5	0,1253	0,1451	15,80
53,0	0,1130	0,1339	18,50
68,5	0,1001	0,1150	14,89
90,5	0,0882	0,0955	8,28
139,5	0,0674	0,0713	5,79
162,5	0,0610	0,0652	6,89
197,0	0,0569	0,0595	4,57
215,5	0,0563	0,0575	2,13
241,0	0,0551	0,0556	0,91
282,5	0,0531	0,0538	1,32

TABELA XIV

Variação da umidade da madeira durante o processo de secagem referente à amostra C2.

$T = 39,3^{\circ}\text{C}$ $T_{\text{bu}} = 25,5^{\circ}\text{C}$ $P_s - P_v = 4609,3 \text{ N/m}^2$ $\phi = 35,1 \%$ $M_e = 0,0690$			
TEMPO (horas)	$M_{\text{exp}}$	$M_{\text{calc}}$	VALOR ABSOLUTO DO ERRO RELATIVO PERCENTUAL
0	.3813	.3813	-
17,0			
45,5	0,2558	0,2171	15,13
53,0	0,2381	0,2006	15,75
68,5	0,2092	0,1723	17,64
90,5	0,1792	0,1425	20,48
116,0	0,1473	0,1188	19,35
139,5	0,1230	0,1038	15,61
162,5	0,1044	0,0936	10,34
197,0	0,0877	0,0837	4,56
215,5	0,0774	0,0801	3,49
241,0	0,0733	0,0766	4,50

As figuras 8, 9, 10 e 11, mostram o gráfico dos resultados experimentais e calculados para as curvas de secagem e umidificação da madeira, referentes aos valores das Tabelas XI, XII, XIII, e XIV, respectivamente.

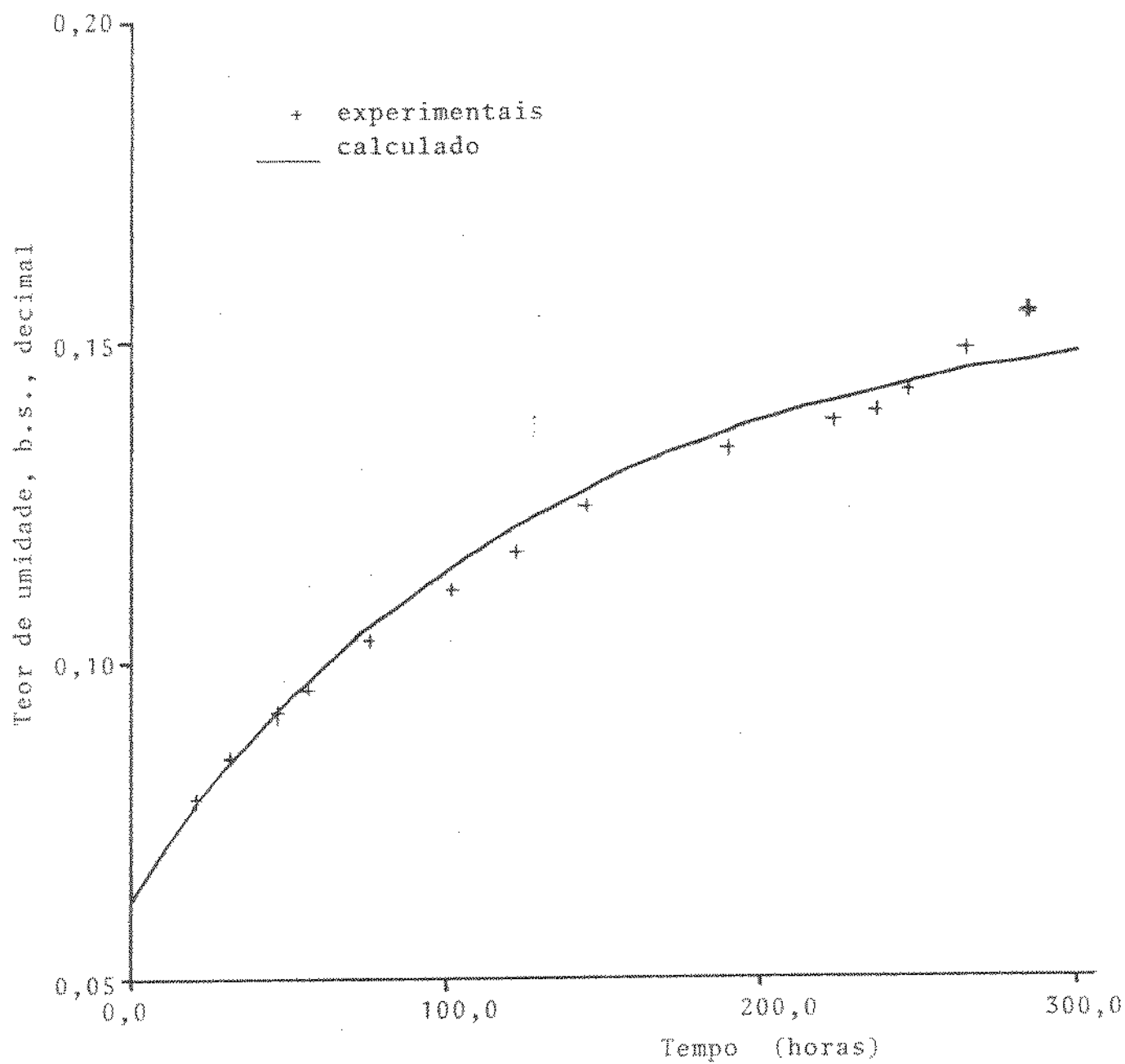


Fig- 8 — Variação do teor de umidade da amostra B1 no processo de umidificação.

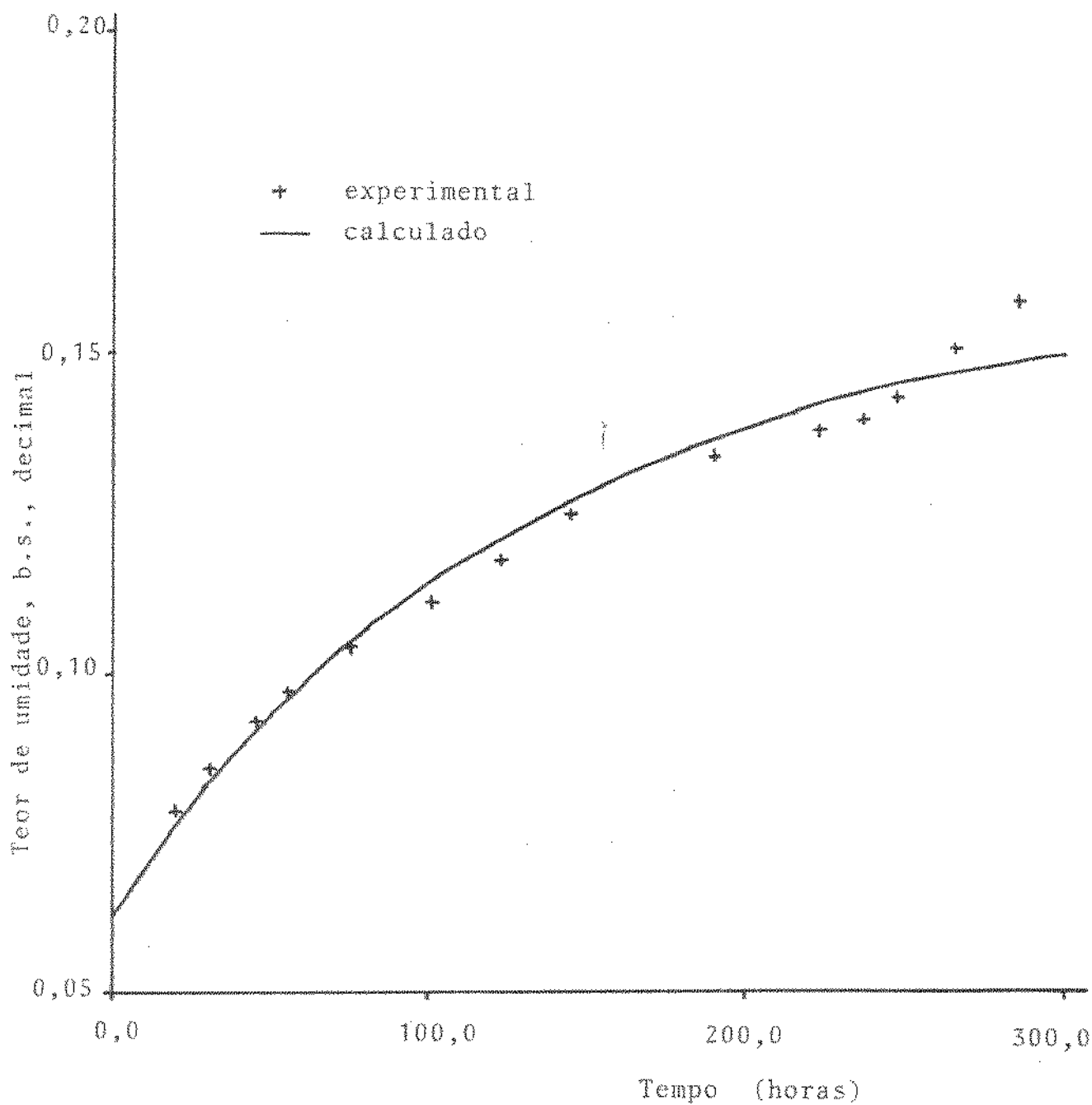


Fig. 9 — Variação do teor de umidade da amostra C1 no processo de umidificação.

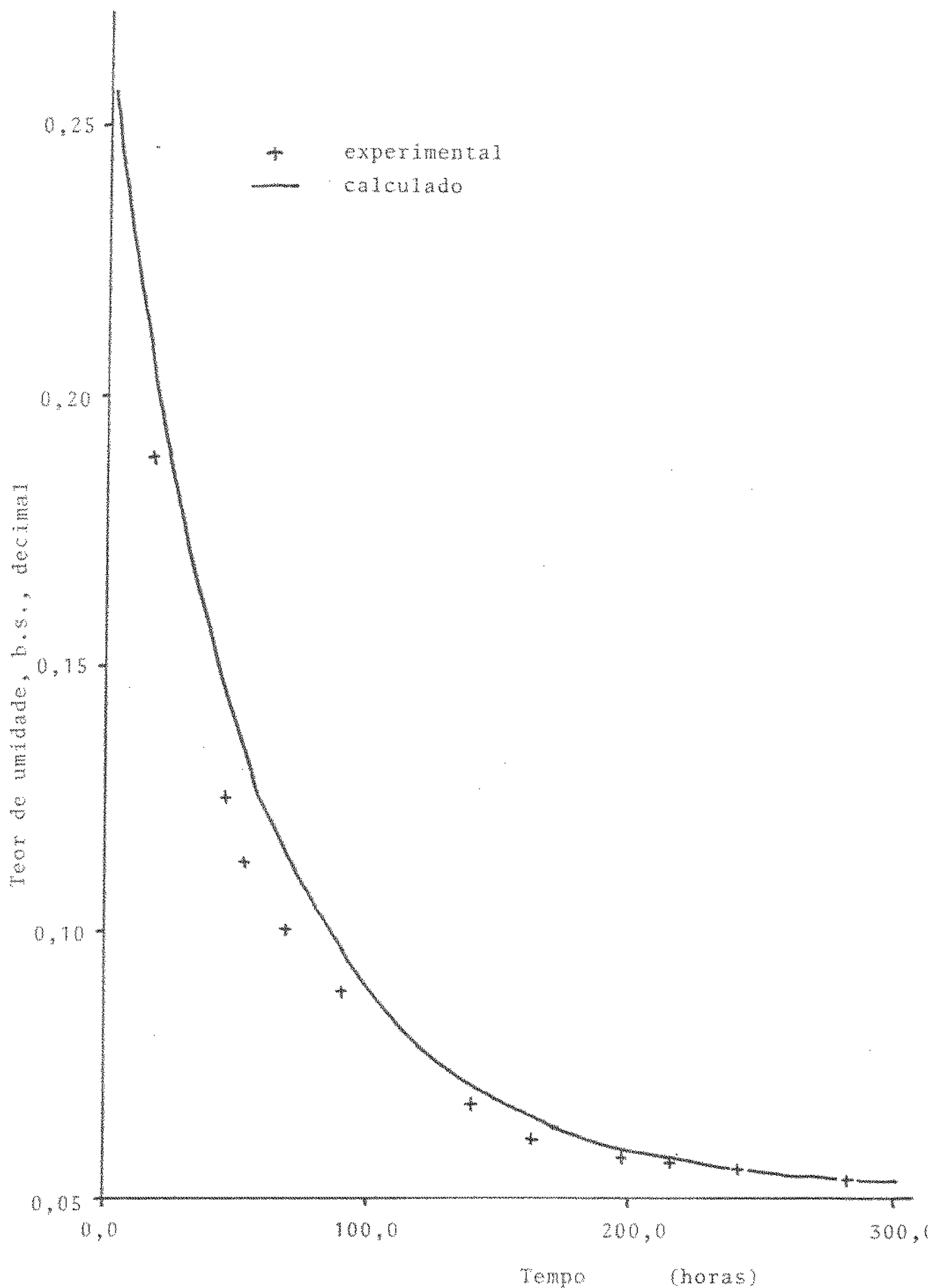


Fig. 10 — Variação do teor de umidade da amostra C1 no processo de secagem.

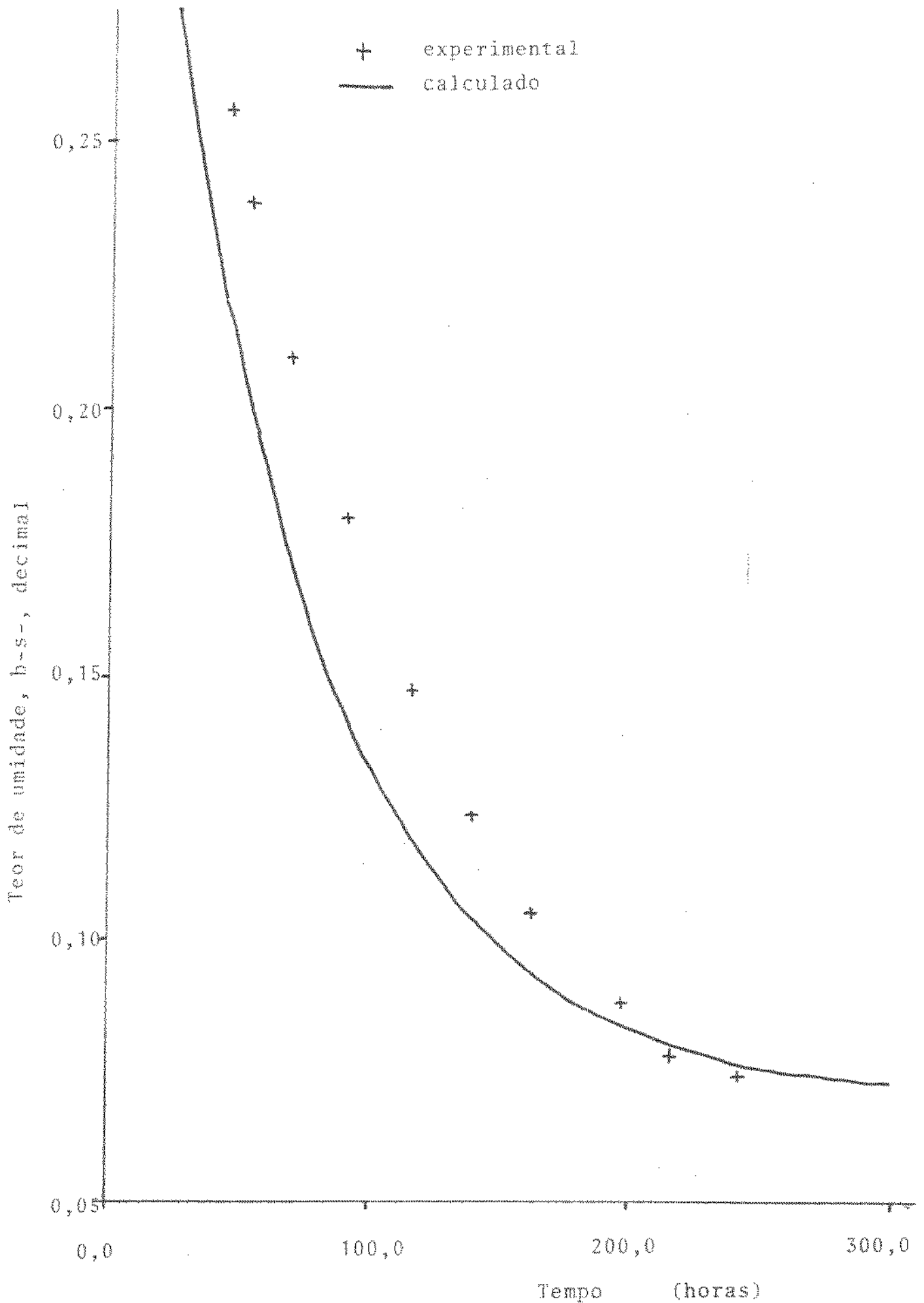


Fig. 11 — Variação do teor de umidade da amostra C2 no processo de secagem.



## 5.5 - Propriedades Físicas do Ar

### 5.5.1 - Viscosidade

Os valores para a viscosidade do ar calculados pela Equação 4.26 são comparados, com os respectivos valores apresentados em Brown et alii (6), na Tabela XV :

TABELA XV

Valores da viscosidade do ar

T (°C)	Brown et alii (26) (kg/(m) (h))	Calculado pela Equação 4.26 (kg/(m) (h))
0	0,06300	0,06253
20	0,06552	0,06554
50	0,07020	0,06994
100	0,07848	0,07698
500	0,12960	0,12511

Verifica-se pelos valores da Tabela XV, que a Equação 4.26 apresenta um erro relativo máximo de 0,74% entre 0 e 50°C e de 3,46% entre 0 e 500°C.

### 5.5.2 - Condutividade Térmica

Os valores para a condutividade térmica do ar calculados pela Equação 4.28 são comparados, com os respectivos valores apresentados em Foust et alii (18), na Tabela XVI :

TABELA XVI

Valores da condutividade térmica do ar.

T (°C)	Foust et alii (34) (kcal/h m <sup>2</sup> (°C/m))	Calculados pela Equação 4.28 (kcal/h m <sup>2</sup> (°C/m))
0	0,02084	0,02084
10	0,02148	0,02148
20	0,02212	0,02212
30	0,02276	0,02276
40	0,02340	0,02340
50	0,02404	0,02404
100	0,02724	0,02724

Verifica-se que os valores da condutividade térmica do ar, apresentados em Foust et alii (18), estão sobre a linha reta apresentada pela Equação 4.28.

#### 5.6 - Comprovação do modelo matemático de transferência simultânea de calor e massa entre o ar e o duto de madeira

Foram desprezadas as amostras relativas ao duto A, tanto na secagem como na umidificação devido a que não se conseguiu uma distribuição uniforme da velocidade do ar com a placa perfurada, não tendo sido possível medir esta variável para o referido duto, por ser muito próxima de zero.

No Apêndice E, são apresentadas as tabelas com os valores experimentais e simulados, referentes aos processos de secagem e umidificação dos dutos de madeira.

Aqui são apresentados, nas Tabelas XVII e XVIII, os resultados da análise estatística utilizada na comprovação do modelo, realizada sobre os valores acima referidos.

Verifica-se, a grande influência da equação de secagem e umidificação sobre o modelo matemático utilizado.

No processo de secagem, onde a equação 4.10 teve uma pior adaptação, em comparação com o processo de umidificação, observa-

-se os maiores desvios.

Entre as variáveis analisadas, verifica-se que a umidade relativa do ar foi a que apresentou os maiores desvios ( com exceção da amostra C<sub>1</sub> do processo de umidificação) por ter seu valor muito afetado mesmo para pequenas variações da temperatura e umidade absoluta.

TABELA XVII

Resultado estatístico da avaliação do modelo matemático de transferência simultânea de calor e massa entre o ar e o duto de madeira para o processo de secagem.

AMOSTRA	Variável sob Análise	E <sub>méd</sub> encontrado	E <sub>méd</sub> Esperado			
			$\alpha = 0,05$		$\alpha = 0,10$	
			Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
B <sub>1</sub>	M	11,6	8,9	14,4	9,5	13,8
	T	14,7	9,0	20,5	10,3	19,1
	$\phi$	24,0	17,2	30,9	18,8	29,5
	H	4,0	2,1	6,0	2,6	5,5
B <sub>2</sub>	M	5,5	2,6	8,3	3,3	7,6
	T	11,5	8,9	14,0	9,5	13,4
	$\phi$	15,5	10,9	20,2	12,0	19,1
	H	6,3	4,2	8,5	4,7	8,0
B <sub>3</sub>	M	10,2	5,8	14,7	6,8	13,6
	T	13,8	9,9	17,7	10,8	16,8
	$\phi$	16,3	11,2	21,4	12,4	20,2
	H	6,3	4,6	8,0	5,0	7,6
C <sub>1</sub>	M	14,2	10,5	18,0	10,8	17,7
	T	7,3	5,4	9,3	5,8	8,8
	$\phi$	15,2	11,4	18,9	12,3	18,0
	H	3,7	2,1	5,3	2,5	4,9
C <sub>2</sub>	M	12,2	7,1	17,4	8,3	16,2
	T	7,8	6,8	9,3	6,7	9,0
	$\phi$	14,0	10,9	17,0	11,7	16,3
	H	6,9	4,1	9,7	4,7	9,0
C <sub>3</sub>	M	8,7	5,8	11,6	6,5	10,9
	T	12,9	10,1	15,7	10,8	15,0
	$\phi$	16,2	12,1	20,2	13,1	19,3
	H	9,2		12,8	6,5	12,0

TABELA XVIII

Resultado Estatístico da avaliação do modelo matemático de transferência simultânea de calor e massa entre o ar e o duto de madeira para o processo de umidificação.

AMOSTRA	Variável sob Análise	E <sub>méd</sub> encontrado	E <sub>méd</sub> Esperado			
			$\alpha = 0,05$		$\alpha = 0,10$	
			Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
B <sub>1</sub>	M	1,6	1,1	2,0	1,2	1,9
	T	1,4	1,0	1,9	1,1	1,8
	$\phi$	2,2	1,7	2,6	1,8	2,5
	H	1,1	0,7	1,4	0,8	1,3
B <sub>2</sub>	M	4,4	3,6	5,1	3,8	4,9
	T	4,7	3,3	6,2	3,7	5,8
	$\phi$	10,3	7,5	13,1	8,1	12,4
	H	3,0	1,8	4,2	2,1	3,9
B <sub>3</sub>	M	4,9	4,3	5,6	4,7	5,4
	T	7,7	5,3	10,1	5,8	9,5
	$\phi$	13,9	9,7	18,0	10,7	17,0
	H	3,7	3,0	4,5	3,1	4,3
C <sub>1</sub>	M	2,2	1,6	2,8	1,8	2,7
	T	1,3	0,6	2,0	0,8	1,8
	$\phi$	1,7	0,7	2,7	1,0	2,5
	H	0,8	0,6	1,1	0,6	1,0
C <sub>2</sub>	M	1,8	1,4	2,3	1,5	2,2
	T	1,7	1,3	2,1	1,4	2,0
	$\phi$	3,7	2,7	4,8	2,9	4,5
	H	1,6	1,0	2,2	1,2	2,1
C <sub>3</sub>	M	1,2	0,7	1,7	0,8	1,6
	T	2,6	1,7	3,5	1,9	3,3
	$\phi$	6,3	4,2	8,4	4,7	7,9
	H	2,2	1,5	2,9	1,6	2,7

# 5.7 - Comprovação do modelo matemático de secagem e umidificação do milho, em silo.

No Apêndice F, encontram-se as tabelas com os valores experimentais e simulados que foram utilizados na comprovação do modelo matemático de secagem e umidificação do milho em silo.

Na Tabela XIX estão os resultados da análise estatística realizada sobre estes valores acima referidos.

Verifica-se nos valores apresentados na Tabela XIX que, estatisticamente, o modelo matemático pode fornecer um erro médio máximo e mínimo de 4,28% e 1,99%, para o teor de umidade do grão, e de 5,52% e 2,21%, para a temperatura do ar, respectivamente, quando o nível de significância do teste estatístico é de  $\alpha = 0,05$ .

Verifica-se, também, que o erro médio máximo e mínimo encontrado nos valores simulados foi de 3,56% e 2,70%, para o teor de umidade do grão, e de 3,93% e 2,82% para a temperatura do ar, respectivamente.

TABELA XIX

Resultado estatístico da avaliação do modelo matemático de secagem e umidificação do milho em silo, referente às condições experimentais descritas no item 4.13

Altura do Silo* (m)	Variável sob Análise	E <sub>méd</sub> Encontrado	E <sub>méd</sub> Esperado			
			$\alpha = 0,05$		$\alpha = 0,10$	
			Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
0,00	M	3,56	2,89	4,23	3,05	4,07
	T	-	-	-	-	-
0,20	M	2,70	2,05	3,35	2,20	3,20
	T	2,86	2,33	3,39	2,45	3,27
0,40	M	3,06	2,50	3,63	2,63	3,50
	T	2,82	2,21	3,42	2,35	3,28
0,60	M	3,28	2,53	4,03	2,71	3,85
	T	3,26	2,46	4,06	2,66	3,87
0,80	M	3,31	2,18	4,45	2,45	4,18
	T	3,18	2,32	4,05	2,52	3,85
1,00	M	3,30	2,10	4,49	2,38	4,21
	T	3,40	2,50	4,29	2,71	4,08
1,20	M	3,13	1,99	4,28	2,27	4,00
	T	3,93	2,34	5,52	2,72	5,14

\* A partir da base, em que foi feita a medida.

5.8 - Avaliação do Sistema de Armazenamento de Energia Solar:

5.8.1 - O Ciclo de Armazenamento

5.8.1.1 - Condições do ar:

O ciclo de armazenamento num sistema que utiliza material higroscópico, ocorre quando é satisfeita a seguinte condição:

$$M > M_{eq}$$

onde M é o teor de umidade atual do material e  $M_e$  o seu teor de umidade de equilíbrio, dado pelas condições do ar que será utilizada no ciclo.

Em virtude dos diversos valores que M pode assumir e bem como muitos outros de  $M_{eq}$ , que é dado em função das condições do ar, verifica-se existir uma infinidade de situações em que pode ser satisfeita a inequação acima.

Na Tabela XX tem-se algumas das condições do ar em que o teor de umidade de equilíbrio ( $M_{eq}$ ) é igual ao teor de umidade (M), para a madeira, significando que o armazenamento de energia ocorrerá quando a temperatura do ar for superior e/ou sua umidade relativa for inferior aos valores ali apresentados.

TABELA XX

Condições do ar em que a umidade de equilíbrio é igual ao teor de umidade, para a madeira.

TEOR DE UMIDADE ATUAL (M) DA MADEIRA	VARIÁVEIS PSICROMÉTRICAS	CONDIÇÕES DO AR EM QUE $M_e = M$					
		T (°C)	φ (%)	T (°C)	φ (%)	T (°C)	φ (%)
.15	T (°C)	20	25	30	35	40	45
	φ (%)	77,8	80,1	82,1	84,1	85,9	87,9
.10	T (°C)	20	25	30	35	40	45
	φ (%)	44,8	46,4	48,3	50,4	52,9	55,7
.05	T (°C)	20	25	30	35	40	45
	φ (%)	26,1	26,7	27,3	27,9	28,6	29,1

Convém salientar, entretanto, que se o material higroscópico (madeira, por exemplo) estiver a uma temperatura inferior à do ar que está sendo utilizado, ocorrerá um resfriamento do ar com uma consequente condensação sobre o material, ou uma umidificação pelo aumento da umidade relativa.

#### 5.8.1.2 - Resposta do Sistema Frente a um Ciclo de Armazenamento

Através de um estudo simulado, foi verificada a resposta do sistema frente a um ciclo de armazenamento de energia, com as seguintes especificações:

Condições do ar:

Temperatura 45,0°C

Umidade relativa 21,0 %

Condições do sistema:

Temperatura da madeira 25,0°C

Teor de umidade inicial .20 (b.s.,dec.)

Características da simulação:

Velocidade do ar no duto 600,0 m/h

Comprimento do duto 4,20 m

Umidade de equilíbrio  
da madeira para as condições do ar .0254

Na Fig. 12, tem-se a variação do teor de umidade ao longo do duto em função do tempo de operação, para as condições especificadas acima, bem como a umidade média do duto.

Considerando que se queira armazenar energia até que o teor de umidade média do sistema esteja a .05, verifica-se que são necessárias 250 horas de funcionamento contínuo do ventilador, mantendo-se o ar nas mesmas condições.

Na prática, esta situação ocorrerá, seguramente, somente em algumas horas durante o dia e, talvez, nem todos os dias que precedem o período de utilização da energia armazenada. Assim, supon

do-se que estas condições do ar sejam conseguidas em apenas 3 horas por dia, seriam necessários 84 dias, no mínimo, de funcionamento intermitente do ventilador; para armazenar a energia solar no sistema até ao nível previamente estabelecido.

Pode-se concluir, também, que estabelecendo-se um nível de armazenamento em que a umidade média do sistema seja de .05, as condições do ar devem ser mais fortes do que aquelas apresentadas na Tabela T1, pelo fato de que demandaria um tempo razoavelmente longo para que a madeira atinja as condições de umidade de equilíbrio.

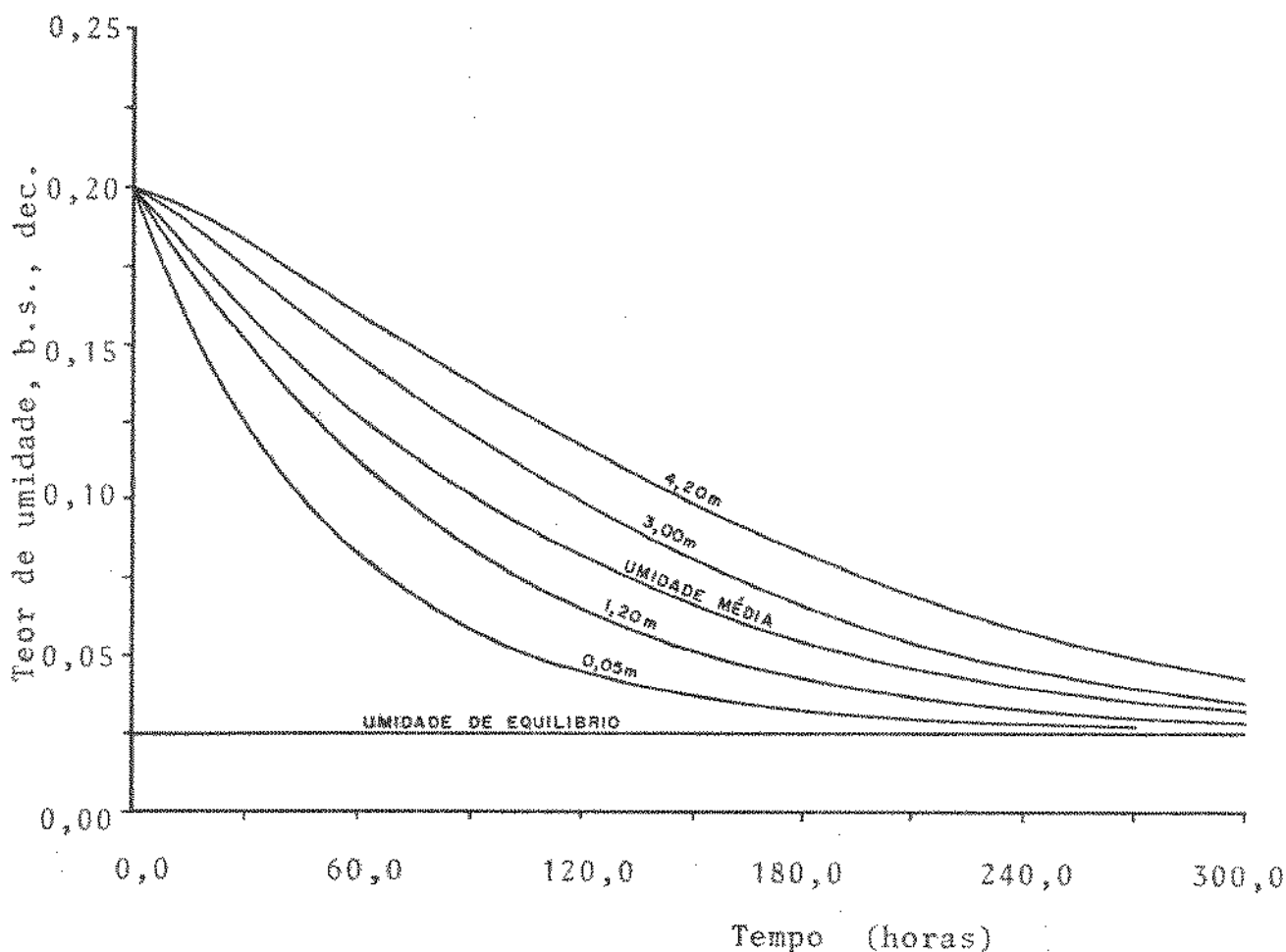


Fig. 12 - Variação do teor de umidade ao longo do duto de madeira, para um ciclo de armazenamento de energia solar.



## 5.8.2 - O Ciclo de Entrega

### 5.8.2.1 - Condições do ar

O ciclo de entrega da energia armazenada, num sistema que utiliza material higroscópico, ocorre quando é satisfeita a seguinte condição:

$$M < M_{eq}$$

onde  $M$  é o teor de umidade atual do material e  $M_e$  o seu teor de umidade de equilíbrio que é dado pelas condições do ar que receberá a energia armazenada.

Em virtude dos diversos valores em que pode se encontrar o teor de umidade atual do material ( $M$ ) e bem como dos muitos outros que  $M_{eq}$  pode assumir dado que é função das condições do ar, verifica-se existir uma infinidade de situações em que pode ser satisfeita a inequação acima.

Pelos valores apresentados na Tab. XX, para o caso da madeira, observa-se que ocorrerá entrega de energia armazenada quando a temperatura do ar for inferior e/ou sua umidade relativa for superior àqueles valores ali apresentados.

### 5.8.2.2 - Resposta do Sistema Frente a um Ciclo de Entrega da Energia Armazenada

Através de um estudo simulado, procurou-se avaliar a resposta do sistema frente a um ciclo de entrega da energia armazenada.

As condições utilizadas na simulação foram as seguintes:

Condições do ar:

Temperatura 20,2°C

Umidade relativa 89,9 %

Condições do sistema:

Temperatura inicial 18,0°C

Teor de umidade inicial .05

Umidade de equilíbrio  
(para as condições do ar) .1758

Características da simulação:

Velocidade do ar no duto 0,167 ; 0,333 ; 0,500 m/s

Comprimento do duto 10,0 m

As simulações com tres velocidades diferentes foram com o fim de verificar a influência desta variável sobre o tempo de entrega da energia armazenada pelo sistema. O comprimento do duto, 10,0 metros, justifica-se pelo fato de que os resultados da simulação nas posições intermediárias representam os valores para dutos de comprimentos intermediários, respectivamente.

As figuras 13 a 20 mostram os resultados obtidos nas simulações.

A zona "achuriada" das figuras 13 a 20 representa condições do ar correspondentes a um teor de umidade de equilíbrio do milho acima de .15. Considerando que o uso da energia armazenada é para garantir a continuação do processo de secagem quando as condições naturais do ar não o fazem, verifica-se que o ar naquelas condições não poderia ser utilizado, porque não levaria o teor de umidade do grão ao nível desejado no final do processo.

A Tabela XXI apresenta os tempos máximos de operação do sistema de armazenamento de energia, em função do comprimento do duto e da velocidade de escoamento do ar em seu interior, em que as condições do ar são compatíveis com um teor de umidade de equilíbrio do milho menor ou igual a .15.

TABELA XXI

Tempo máximo de operação, em horas, para sistemas de armazenamento de energia em dutos de madeira, em função da velocidade do ar em escoamento, nas condições do estudo simulado, para os quais a condição do ar é compatível com um teor de umidade de equilíbrio, não superior a 0,15 para o milho.

VELOCIDADE DO AR EM ESCOAMENTO (m/s)	COMPRIMENTO DO DUTO (m)			
	4,0	6,0	8,0	10,0
0,167	130	200	260	320
0,333	40	90	130	160
0,500	10	40	70	100

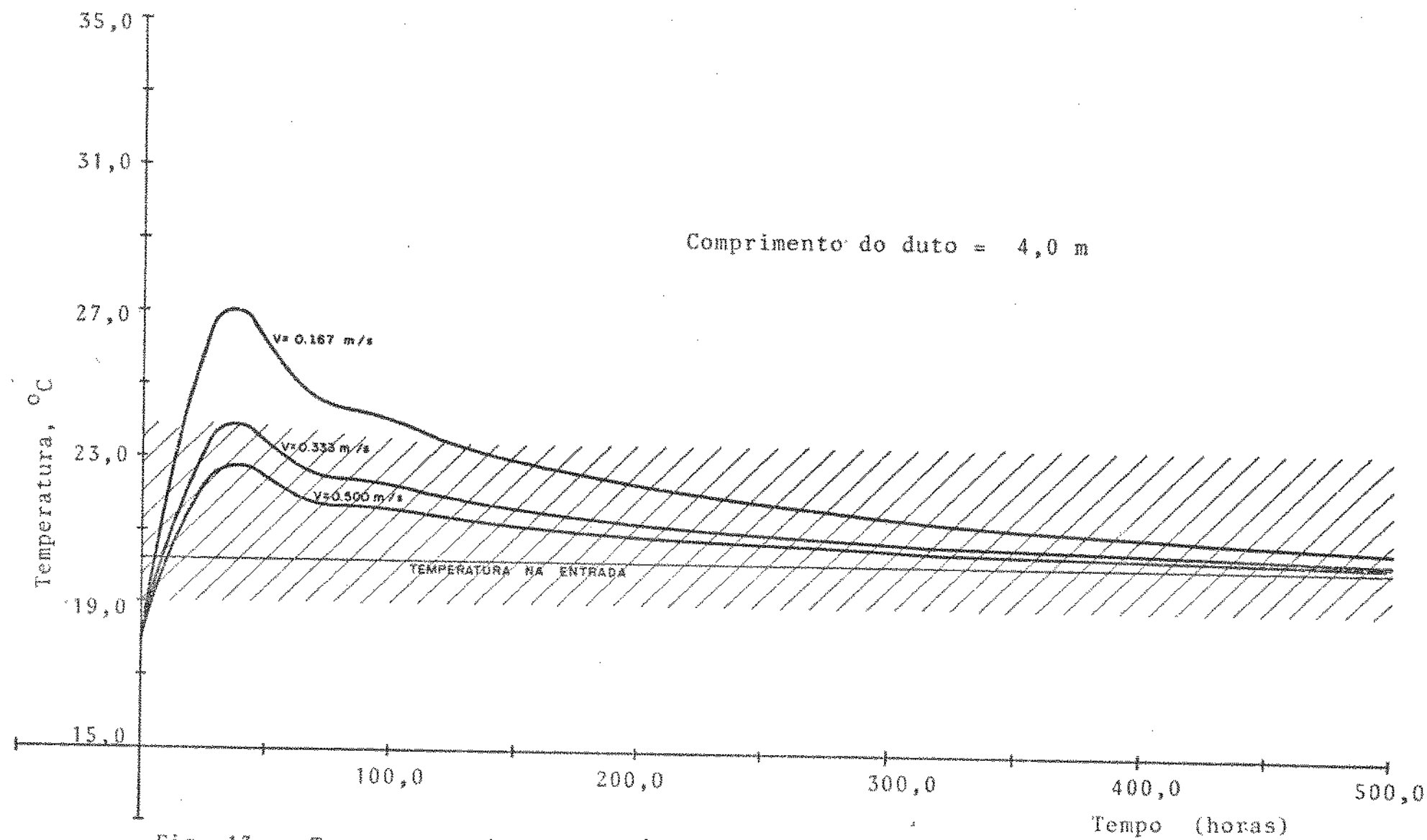


Fig. 13 — Temperatura do ar na saída do sistema de armazenamento de energia.

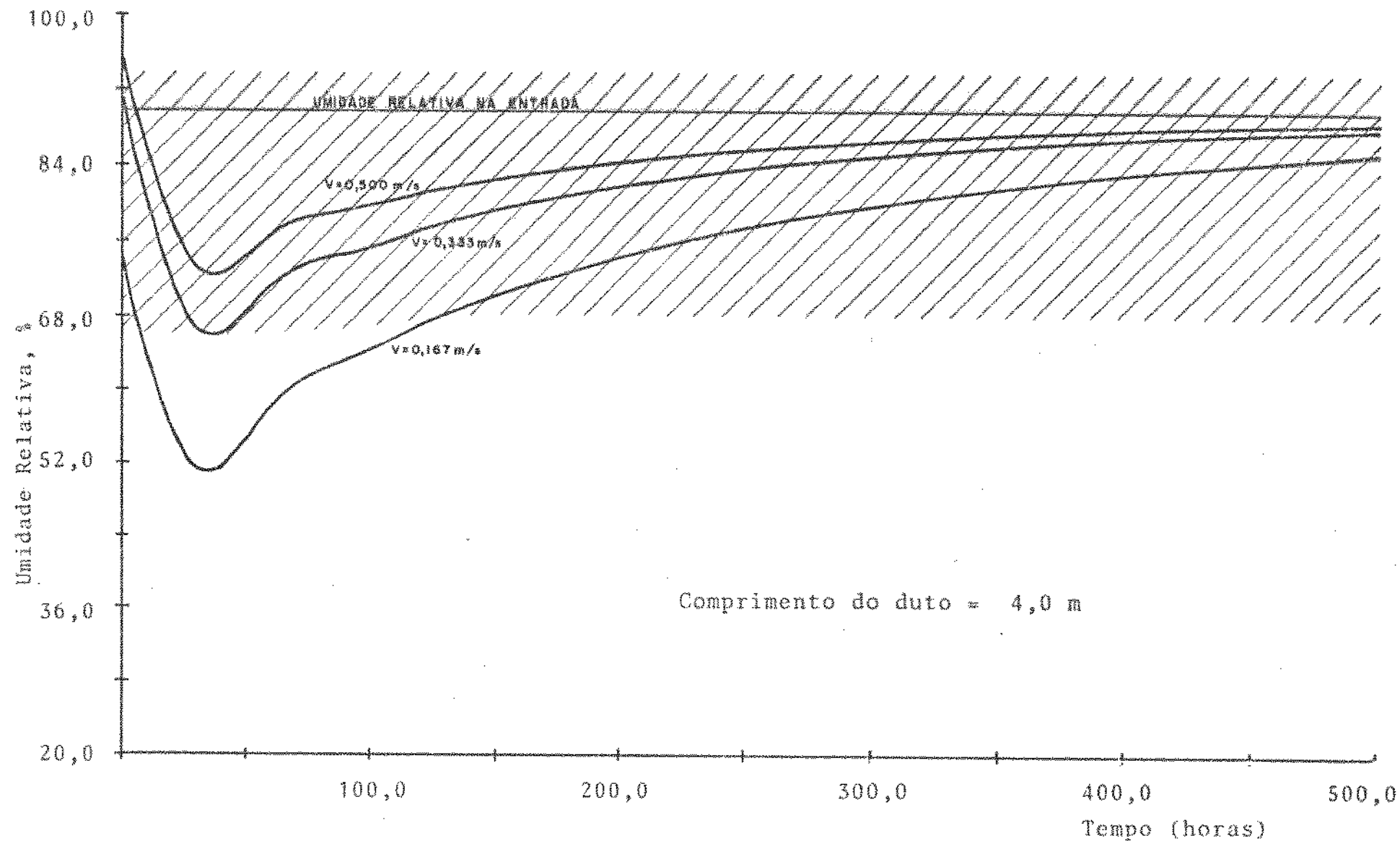


Fig. 14 — Umidade relativa do ar na saída do sistema de armazenamento de energia.

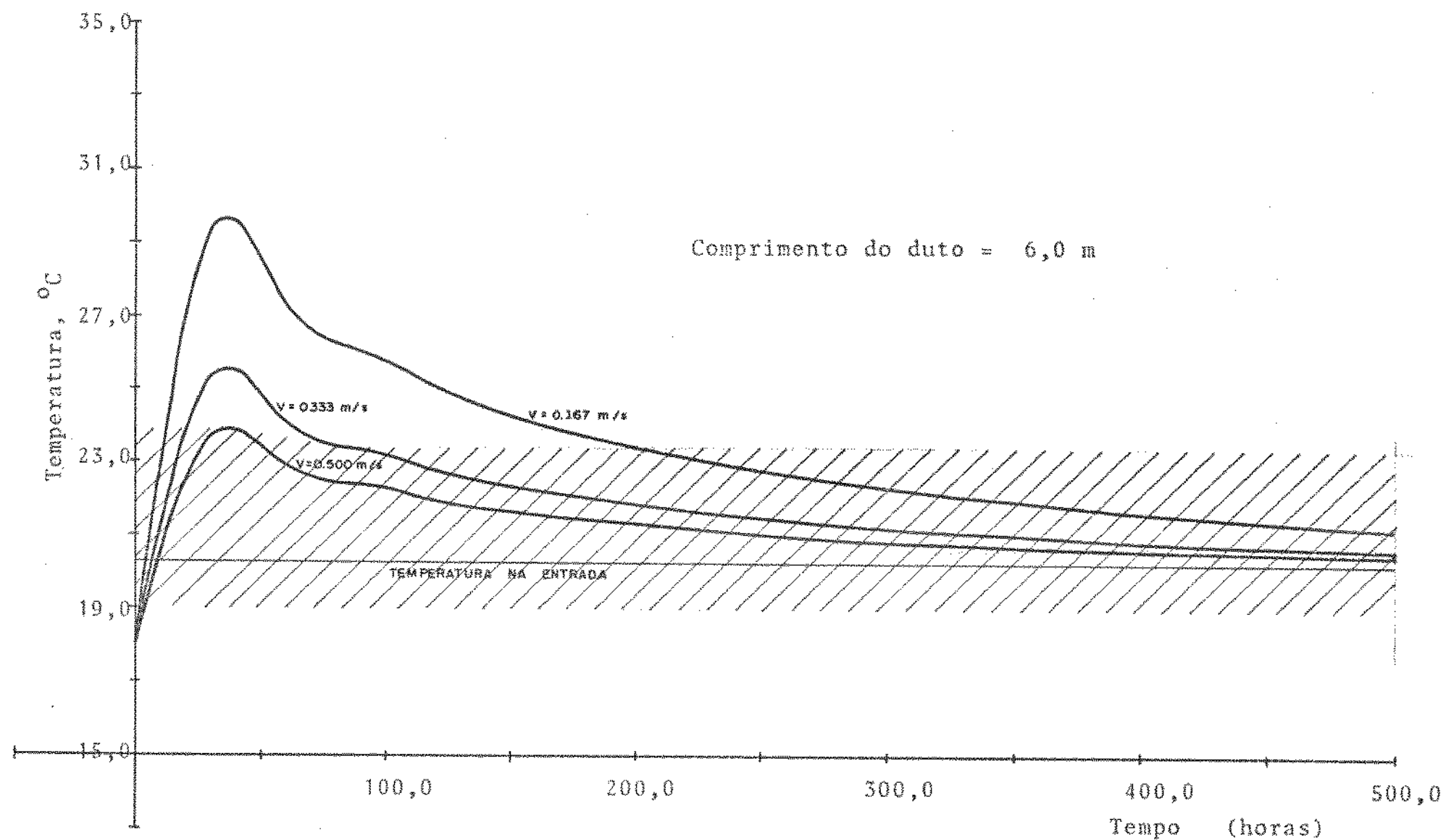


Fig. 15 — Temperatura do ar na saída do sistema de armazenamento de energia.

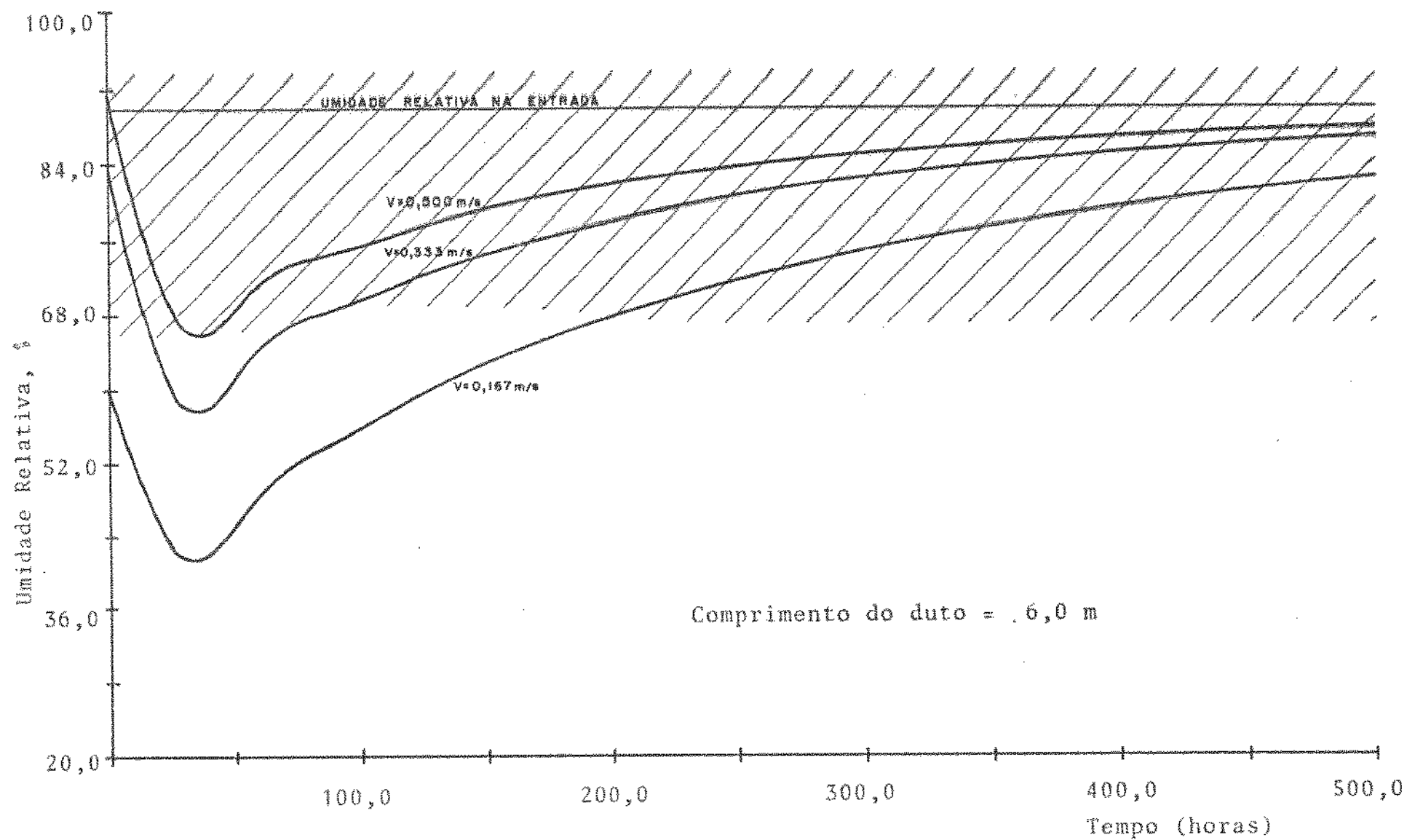


Fig. 16 — Umidade relativa do ar na saída do sistema de armazenamento de energia.

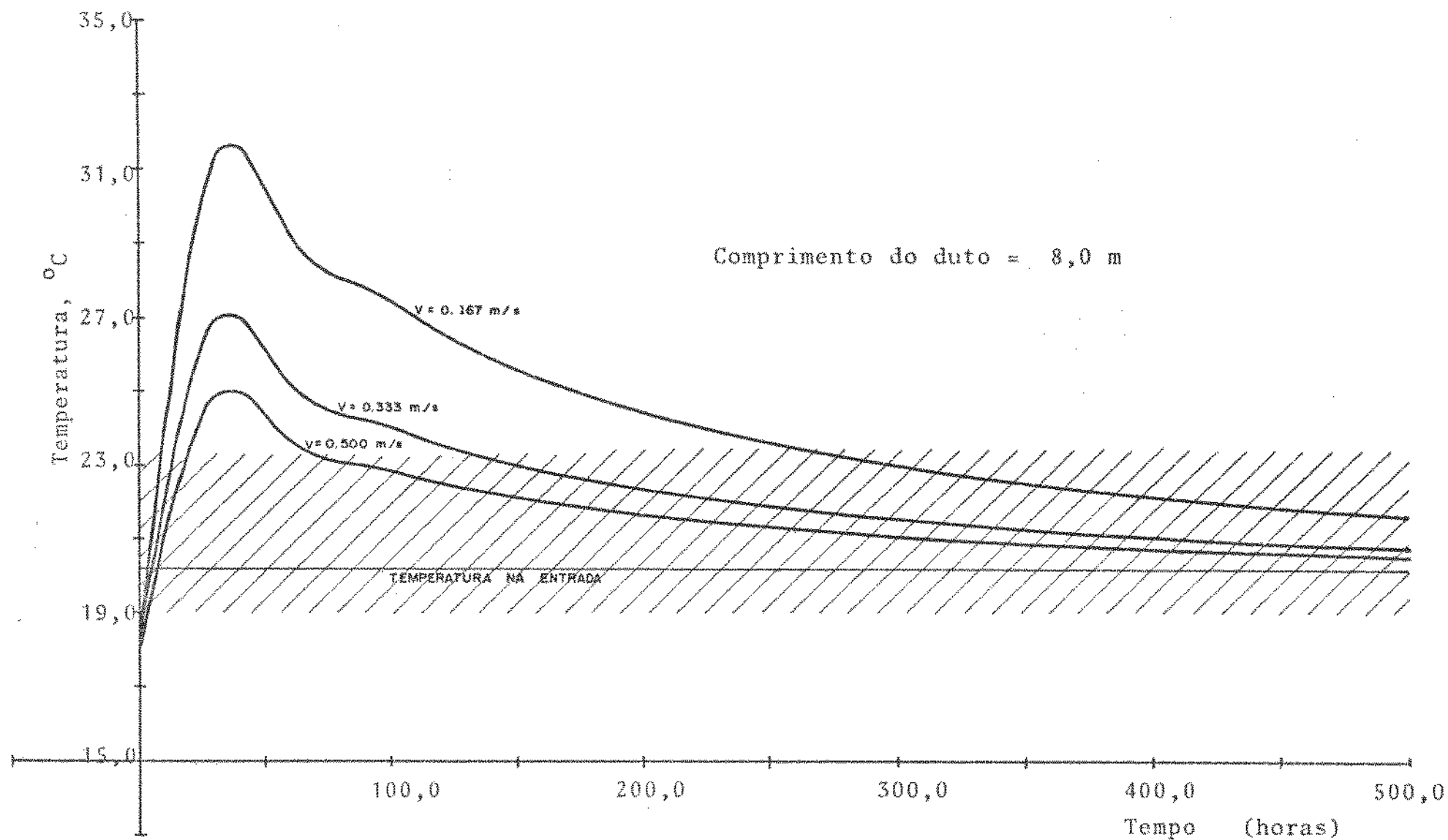


Fig. 17 — Temperatura do ar na saída do sistema de armazenamento de energia.

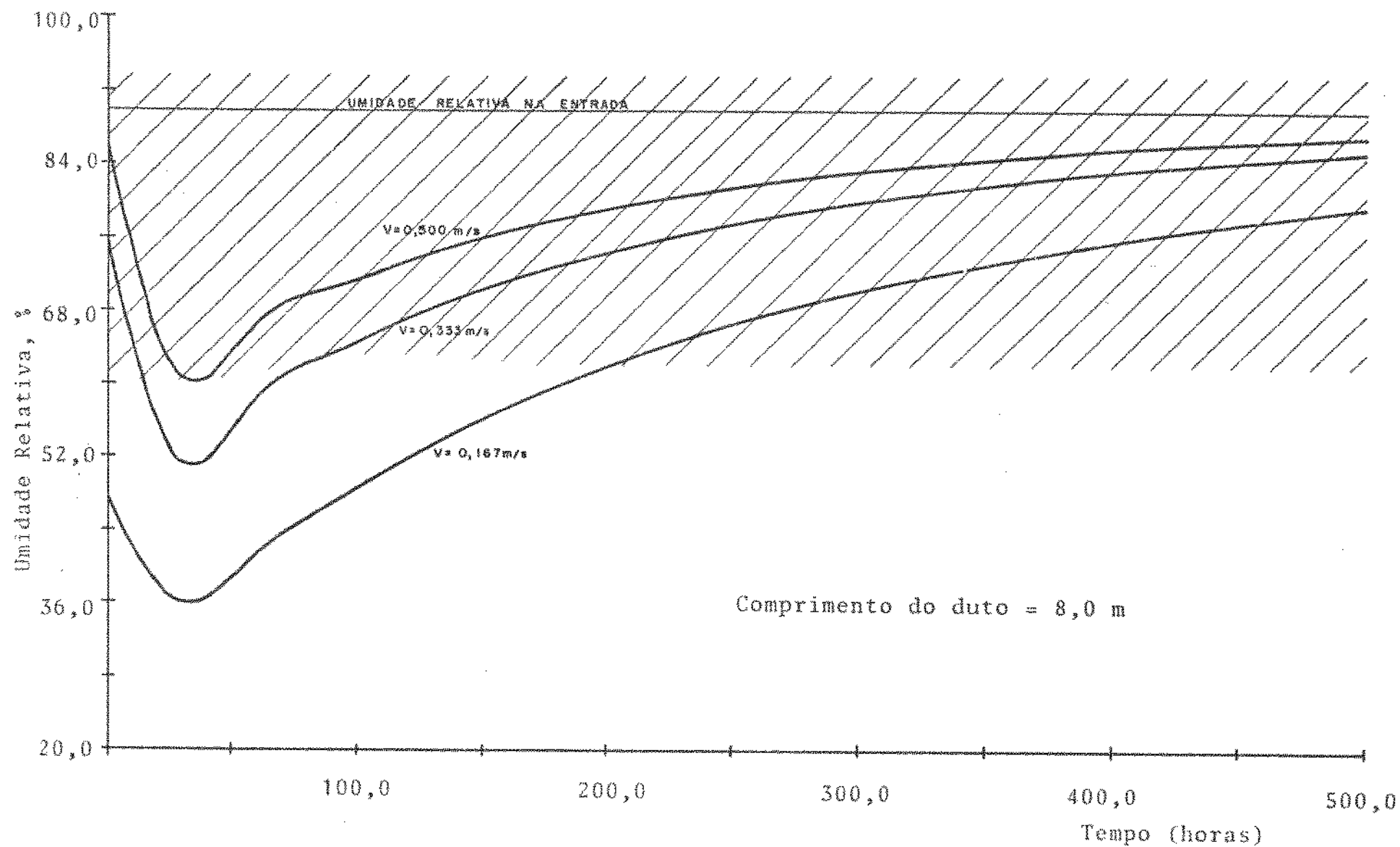


Fig. 18 — Umidade relativa do ar na saída do sistema de armazenamento de energia.



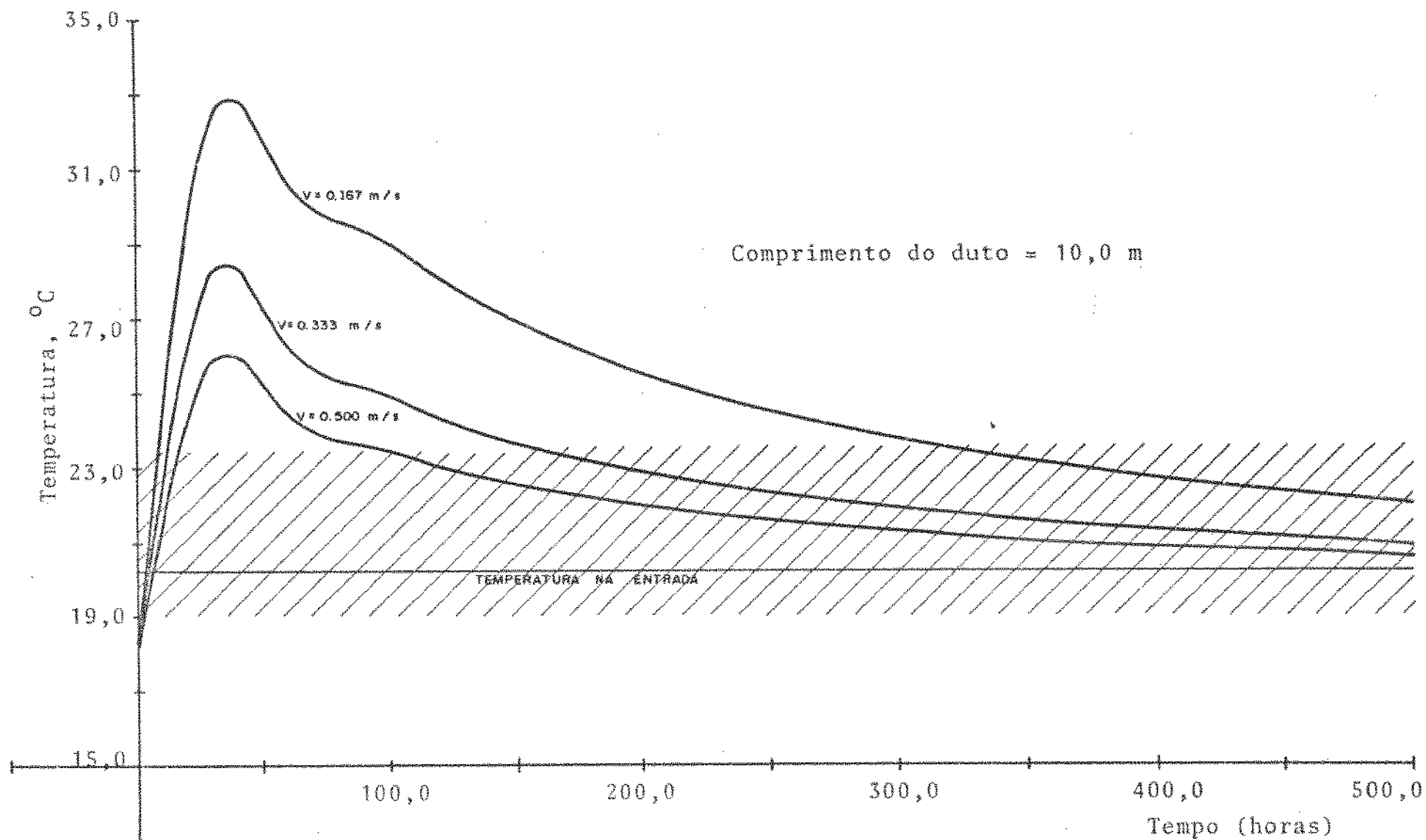


Fig. 19 — Temperatura do ar na saída do sistema de armazenamento de energia.

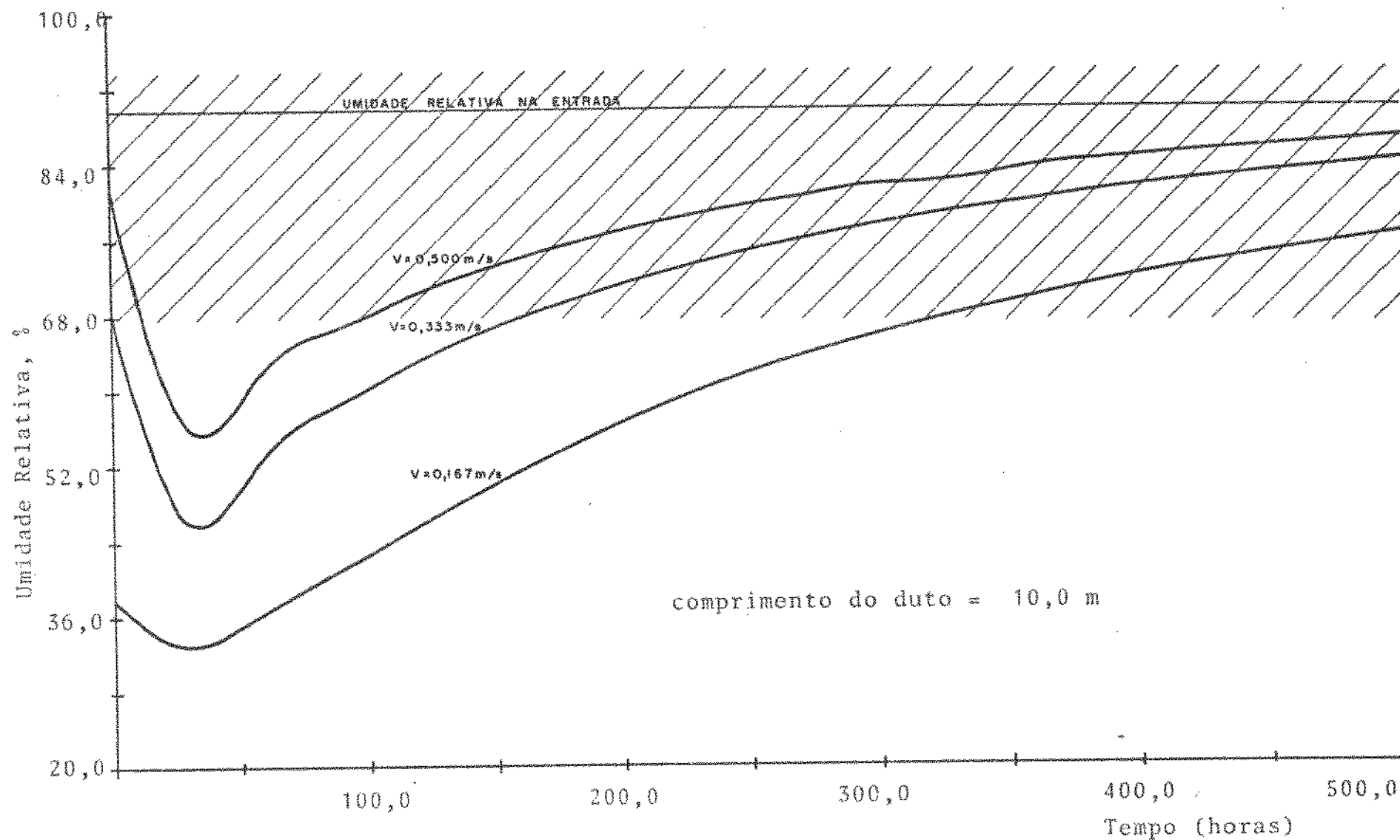


Fig. 20 — Umidade relativa do ar na saída do sistema de armazenamento de energia.

Verifica-se que o sistema mantém um residual de energia armazenada, a qual, mantendo-se as condições operacionais não interessa utilizar em virtude das condições inadequadas do ar resultante, conforme abordou-se anteriormente.

A equação 5.1 fornece o valor percentual da quantidade de água retida pelo sistema no tempo de operação, ( $\eta$ ), em relação à quantidade total de água que poderia ser retida, nas condições operacionais, num tempo de operação suficiente para que as condições de equilíbrio fossem atingidas:

$$\eta = \frac{\bar{M} - M_0}{M_e - M_0} \times 100 \quad (5.1)$$

onde  $\bar{M}$  é o teor de unidade média do duto, no tempo de operação da Tabela XXI;  $M_e$ , o teor de umidade de equilíbrio da madeira para as condições do ar e  $M_0$  o teor de umidade inicial da madeira.

A Tabela XXII apresenta os valores calculados pela equação 5.1, em função do comprimento do duto e da velocidade do ar em escoamento para os resultados das simulações:

TABELA XXII

Relação percentual entre quantidade de água retida pelo duto de madeira no tempo de operação e a quantidade total de água que poderia ser retida, nas condições operacionais, num tempo suficiente para que as condições de equilíbrio fossem atingidas.

VELOCIDADE DE ESCOAMENTO DO AR (m/s)	VALORES DE TERMINADOS	COMPRIMENTO DO DUTO			
		4,0	6,0	8,0	10,0
0,167	$\bar{M}$	.1103	.1227	.1288	.1331
	$\eta$	47,9	57,8	62,6	66,1
0,333	$\bar{M}$	.0772	.0990	.1103	.1161
	$\eta$	21,6	39,0	47,9	52,5
0,500	$\bar{M}$	.0565	.0773	.0914	.1020
	$\eta$	5,2	21,7	32,9	41,3

Pelos valores apresentados na Tabela XXII, pode-se verificar que quanto menor for a taxa de entrega da energia, maior é o rendimento do sistema de armazenamento e, portanto, o dimensionamento do sistema deve ser no sentido de utilizar dutos longos e, como uma das condições operacionais, velocidade de escoamento do ar pequena.

### 5.8.3 - Características do Sistema

#### 5.8.3.1 - Capacidade de retenção de água:

A capacidade de retenção de água do sistema ( $C_r$ ) depende do teor de umidade inicial e das condições do ar que fará a umidificação, e pode ser calculada pela equação 5.2 :

$$C_r = M_e - M_o \quad (5.2)$$

Na Tabela XXIII estão os valores calculados pela equação 5.2, para diversas condições do ar e do teor de umidade inicial da madeira.

#### 5.8.3.2 - Capacidade de armazenamento de energia:

A capacidade de armazenamento de energia do sistema ( $C_{en}$ ) é função da capacidade de retenção de água e do calor latente de vaporização da umidade da madeira, e pode ser calculada pela equação 5.3 :

$$C_{en} = \lambda_m' C_r \quad (5.3)$$

TABELA XXIII

Capacidade de retenção de água do sistema de armazenamento (kg H<sub>2</sub>O/kg madeira seca ) em função das condições do ar e do teor de umidade inicial da madeira

TEOR DE UMIDADE INICIAL DA MA - DEIRA	CONDIÇÕES DO AR																		
	TEMPERATURA 10°C						TEMPERATURA 15°C						TEMPERATURA 20°C						
	UMIDADE RELATIVA (%)						UMIDADE RELATIVA (%)						UMIDADE RELATIVA (%)						
	75,0	80,0	85,0	90,0	95,0	99,0	75,0	80,0	85,0	90,0	95,0	99,0	75,0	80,0	85,0	90,0	95,0	99,0	
0,05	0,104	0,114	0,125	0,136	0,146	0,152	0,099	0,109	0,120	0,131	0,141	0,147	0,095	0,104	0,115	0,126	0,136	0,143	
0,08	0,074	0,084	0,095	0,106	0,116	0,122	0,069	0,079	0,090	0,101	0,111	0,117	0,065	0,074	0,085	0,096	0,106	0,113	
0,10	0,054	0,064	0,075	0,086	0,096	0,102	0,049	0,059	0,070	0,081	0,091	0,097	0,045	0,054	0,065	0,076	0,086	0,093	
0,12	0,034	0,044	0,055	0,066	0,076	0,082	0,029	0,039	0,050	0,061	0,071	0,077	0,025	0,034	0,045	0,056	0,066	0,073	

onde  $\lambda_m^i$  é o valor médio integral do calor latente de vaporização da unidade da madeira que é dado por:

$$\lambda_m^i = (587,723 - 0,569T) \left( 1 + \frac{0,5843}{M_e - M_o} \cdot \frac{1}{(-11,5708) M_o} M_e e^{-11,5708.M} \right) \quad (5.4)$$

Considerando um processo isotérmico, na temperatura correspondente  $\bar{a}$  do ar, na Tabela XXIV, pode-se avaliar a capacidade de armazenamento de energia do sistema para diversas condições do ar ao qual a energia armazenada seria entregue.

#### 5.9 - Influência do uso da energia solar armazenada no processo de secagem do milho em silo

As condições ambientais do período de secagem, sob as quais as simulações de secagem do milho foram realizadas, são mostradas nas Figuras 21 e 22.

Pelo resultado da SIMULAÇÃO A, apresentado na Figura 23 e no Apêndice G, verifica-se que a operação contínua do ventilador ocasiona sucessiva secagem e umidificação das camadas inferiores, fazendo com que o próprio grão atue como fonte de energia armazenada, confirmando o que Brooker et alii (5) e Eno e Felderman (14) descrevem.

Por este fato, mesmo sob condições ambientais adversas (período noturno), a umidade média da massa de grãos decresceu continuamente, embora tivesse decorrido um longo tempo para que as camadas superiores comesçassem a secar.

TABELA XXIV

Capacidade total de armazenamento de energia do sistema (kcal/kg madeira seca), para um processo isotérmico em função do teor inicial de umidade do sistema e das condições do ar que utiliza a energia armazenada

TEOR DE UMIDADE INICIAL DA MA- DEIRA	CONDIÇÕES DO AR																	
	TEMPERATURA 10°C						TEMPERATURA 10°C						TEMPERATURA 10°C					
	UMIDADE RELATIVA (%)						UMIDADE RELATIVA (%)						UMIDADE RELATIVA (%)					
	75,0	80,0	85,0	90,0	95,0	99,0	75,0	80,0	85,0	90,0	95,0	99,0	75,0	80,0	85,0	90,0	95,0	99,0
0,05	89,8	95,6	101,9	108,4	114,3	117,8	86,6	92,3	98,6	105,1	111,0	114,5	83,6	89,2	95,5	101,9	107,7	111,2
0,08	72,3	78,1	84,4	91,0	96,8	100,4	69,2	75,0	81,3	87,6	93,6	97,1	66,3	71,9	78,2	84,6	94,4	94,0
0,10	60,7	66,5	72,8	79,3	85,2	88,7	57,6	63,4	69,7	76,2	82,0	85,6	54,8	60,4	66,7	73,1	78,9	82,4
0,12	49,0	54,8	61,2	67,7	73,6	77,1	46,1	51,8	58,1	64,6	70,4	74,0	43,2	48,9	55,2	61,6	67,4	70,9

O tempo máximo de simulação foi pré-fixado em 360,0 horas de operação do ventilador, e por este motivo não verificou-se o sucesso da operação. Porém, o resultado mostra que a camada de grãos no topo do silo, até este tempo, apresentou uma perda de matéria seca de 0,08 %, o que significa não ter havido deterioração do produto. Esta pequena taxa de secagem associada com este tipo de operação do sistema, foi salientada por Bunn et alii (7).

No final do processo, a umidade média dos grãos no silo estava em 18,0 %, com a necessidade de energia de 579,6 Kcal/Kg de umidade retirada do sistema. O ventilador forneceu energia ao processo, devido ao aquecimento do ar que ele ocasionou, num valor de 281,8 Kcal/Kg de umidade retirada dos grãos.

Os resultados da SIMULAÇÃO B estão na Figura 24 e no Apêndice H. As linhas verticais que constam na Figura 24, representam o tempo no qual o ventilador era desligado e, em seguida, após o período de repouso, ligado novamente. Este tempo devido ao período de repouso, não está explícito na Figura 24, a qual apresenta somente os valores que correspondem ao tempo de operação do ventilador.

Verifica-se que para esta gerência de operação, que o período total do processo foi de 27 dias, com um tempo total de operação do ventilador de 195,0 horas, necessárias para que o teor médio da umidade da massa de grãos atingisse o valor de 15%. Até este momento a camada superior permaneceu úmida, e o gradiente de umidade ao longo do silo foi notável, conforme é mostrado na Figura 32, além de ter ocorrido sobre-secagem das camadas inferiores.

Para que a camada de grãos no topo do silo atingisse o teor de umidade de 15,0 %, foram necessárias 259,0 horas de operação do ventilador, com um período total do processo de 34 dias. Neste tempo, o gradiente de umidade ao longo do silo foi menos pronunciado, mas as camadas inferiores sofreram sobre-secagem. Devido ao prolongado período decorrido, a camada superior apresentou uma perda de matéria seca de 0,21 %.



Até as 259,0 horas de operação, a energia necessária para a evaporação da umidade do grão foi de 593,8 Kcal/Kg de umidade evaporada. O ventilador entregou ao ar uma energia de aquecimento de 109,7 Kcal/Kg de umidade evaporada.

Os resultados da SIMULAÇÃO C constam na Figura 25 e no Apêndice I. As linhas verticais que aparecem na Figura 25, representam o tempo no qual o ventilador era desligado e em seguida, após o período de repouso, ligado novamente. O tempo decorrido durante o período de repouso não está explícito na Figura 25, a qual apresenta somente os valores que correspondem ao tempo de operação do ventilador.

Verifica-se para este sistema de secagem com tal gerência de processo, que decorreram 19 dias, com um tempo total de operação do ventilador de 141,0 horas, para que o teor médio da umidade da massa de grãos no silo atingisse o valor de 15,0 %.

Até este momento, a camada superior permaneceu úmida e o gradiente de umidade ao longo do silo foi notável, conforme é mostrado na Figura 32, além de ter ocorrido uma excessiva sobre-secagem das camadas inferiores.

Para que os grãos da camada superior atingissem o valor médio de 15,0 % para o seu teor de umidade, foram necessárias 206,0 horas de operação do ventilador, decorrendo um período total de 28 dias.

Nesta ocasião, o gradiente de umidade ao longo do silo foi menos pronunciado do que o anterior, conforme mostra a Figura 33. Porém, as camadas inferiores sofreram uma excessiva sobre-secagem, tendo a perda de matéria seca dos grãos da camada superior apresentado o valor de 0,19 %.

Neste tempo, a energia necessária para evaporação da umidade dos grãos foi de 599,6 Kcal/Kg de umidade evaporada. O ventilador colaborou com a parcela de 77,7 e o coletor solar com 281,7 Kcal/Kg de umidade evaporada.

No Apêndice J constam os resultados obtidos na SIMULAÇÃO D. A Figura 26 mostra a variação do teor de umidade dos grãos ao longo do silo, resultado desta Simulação.

Foram necessárias 213 horas para que o teor médio da umidade da massa de grãos no silo atingisse o valor de 15,0%. O gradiente de umidade do grão ao longo do silo foi razoável, conforme mostra a Figura 32, porém não ocorreu sobre-secagem dos grãos nas camadas inferiores. Os grãos da camada superior já estavam sofrendo secagem.

Para que os grãos da camada superior atingissem o teor de umidade de 15,0 %, foram necessárias 303,0 horas de operação. Neste momento o gradiente de umidade ao longo do silo, mostrado na Figura 33, foi desprezível, e a perda de matéria seca dos grãos da camada superior foi de 0,05 % (os mais baixos valores encontrados nas simulações).

Neste tempo, a energia necessária para a evaporação da umidade dos grãos foi de 587,0 Kcal/Kg de umidade evaporada. O ventilador participou com 154,8 e o sistema de armazenamento com 448,7 .

A região "achuriada" das Figuras 27 e 28, correspondem ao período em que o ar de secagem era o ambiente. Verifica-se em ambas Figuras, a exaustão do sistema de armazenamento de energia, com o passar do tempo. Justamente nas últimas horas de secagem, onde necessita-se um ar com condições de levar o produto a um nível adequado de umidade, é que o sistema de armazenamento não corresponde. Na Figura 26 isto também pode ser verificado, devido à crescente umidificação que a camada de grãos na base do silo apresenta.

A partir de um certo momento, inclusive, as condições em que o ar sai do sistema de armazenamento possuem menos condições de secagem do que o ar ambiente.

Neste estudo, isto ocorreu a partir de 152 horas de operação, sobretudo nos primeiros instantes ao final da tarde, em que o sistema armazenador iniciava sua participação no processo.

Mais adiante, ao findar sua participação durante o período noturno, principalmente no final do processo de secagem, esta qualidade inadequada do ar era observada.

No Apêndice K constam os resultados obtidos na SIMULAÇÃO E. A Figura 29 mostra a variação do teor de umidade do grão ao longo do silo, que é o resultado desta simulação.

Foram necessárias 168,0 horas de operação para que o teor médio da umidade da massa de grãos no silo atingisse o valor de 15,0 %. O gradiente de umidade do grão ao longo do silo foi razoável, até este momento, conforme mostra a Figura 32. Porém, não ocorreu sobre-secagem dos grãos nas camadas inferiores, e os grãos das camadas superiores já estavam sofrendo secagem.

Para que os grãos da camada superiores atingissem o teor de umidade de 15,0 %, foram necessárias 252,0 horas de operação. Neste momento, o gradiente de umidade ao longo do silo, mostrado na Figura 33, foi um pouco acentuado do que o da Simulação D porém, insignificante frente aos demais. A perda de matéria seca dos grãos da camada superior foi de 0,05 % (os mais baixos valores encontrados nas simulações).

Nestas 252,0 horas de operação, a energia necessária para a evaporação da umidade dos grãos foi de 588,0 Kcal/Kg de umidade evaporada. O ventilador participou com 120,4 e o sistema de armazenamento com 367,2 Kcal/Kg de umidade evaporada.

As Figuras 30 e 31 mostram a temperatura e a umidade relativa, respectivamente, em que o ar saía do sistema de armazenamento.

Para esta Simulação, verifica-se, também, uma certa exaustão do sistema de armazenamento de energia, em menor grau do que o resultado da simulação D, devido que o sistema sofre regenerações sucessivas durante o período diurno, em que as condições do ar lhe são favoráveis.

Esta exaustão pode ser notada, na Figura 29, onde

aparece a crescente reumidificação que sofre a camada inferior dos grãos.

Nesta simulação, também verifica-se, que a partir de um certo momento,, por um intervalo de tempo, condições em que o ar sai do sistema de armazenamento apresentando umidade relativa maior e temperatura menor do que em relação às condições ambientais. A partir de 96,0 horas de operação, isto já foi observado, e ocorre justamente na sua regeneração, durante o período diurno em que as condições do ar permitem que isto aconteça.

Pela necessidade de usar uma pequena velocidade de escoamento do ar nos dutos do sistema de armazenamento de energia, resultou para as condições destas simulações, uma relação de 83 dutos por  $m^2$  de área da base do silo.

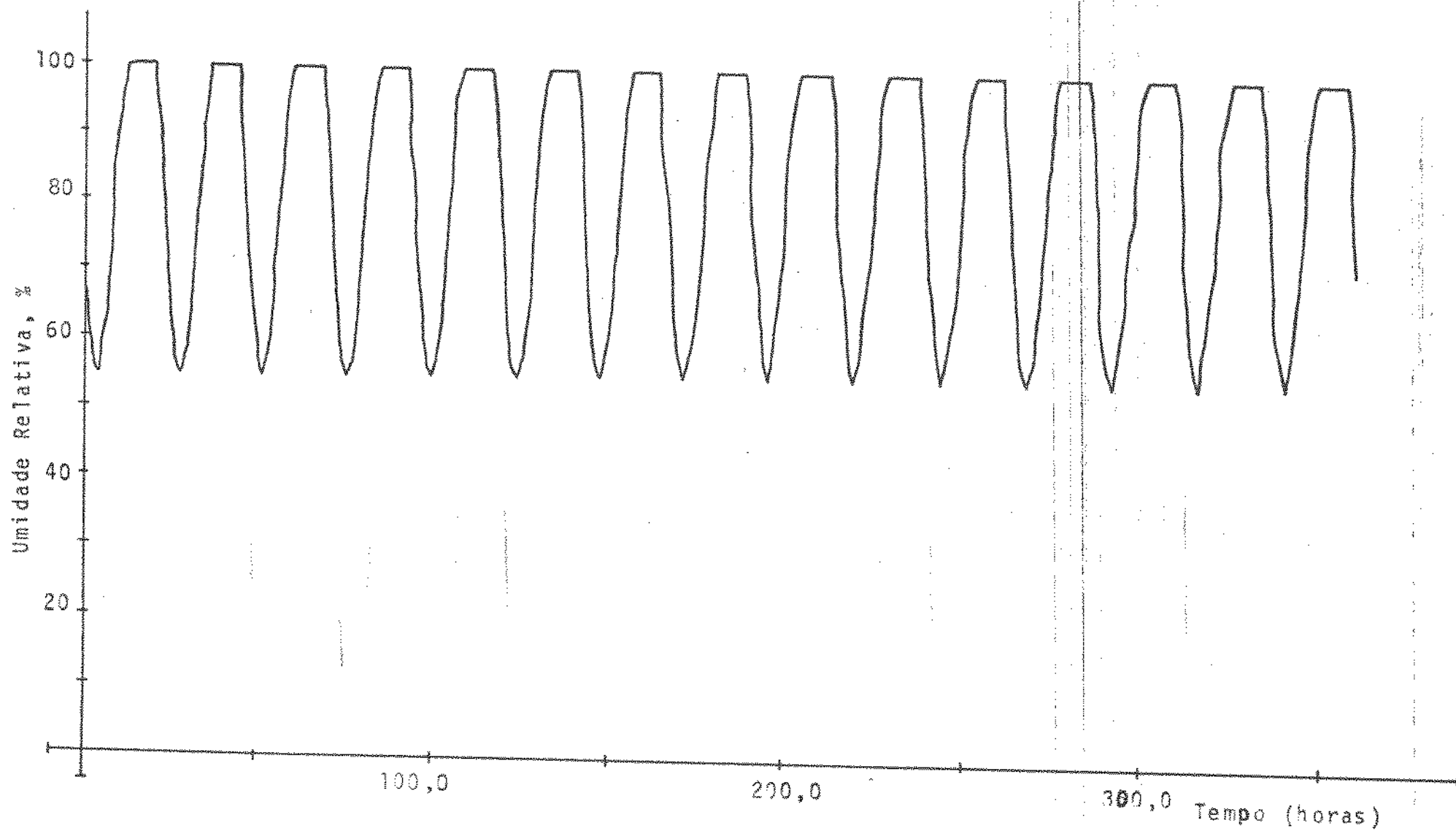


Fig. 21 —Variação da umidade relativa ambiente do período de secagem

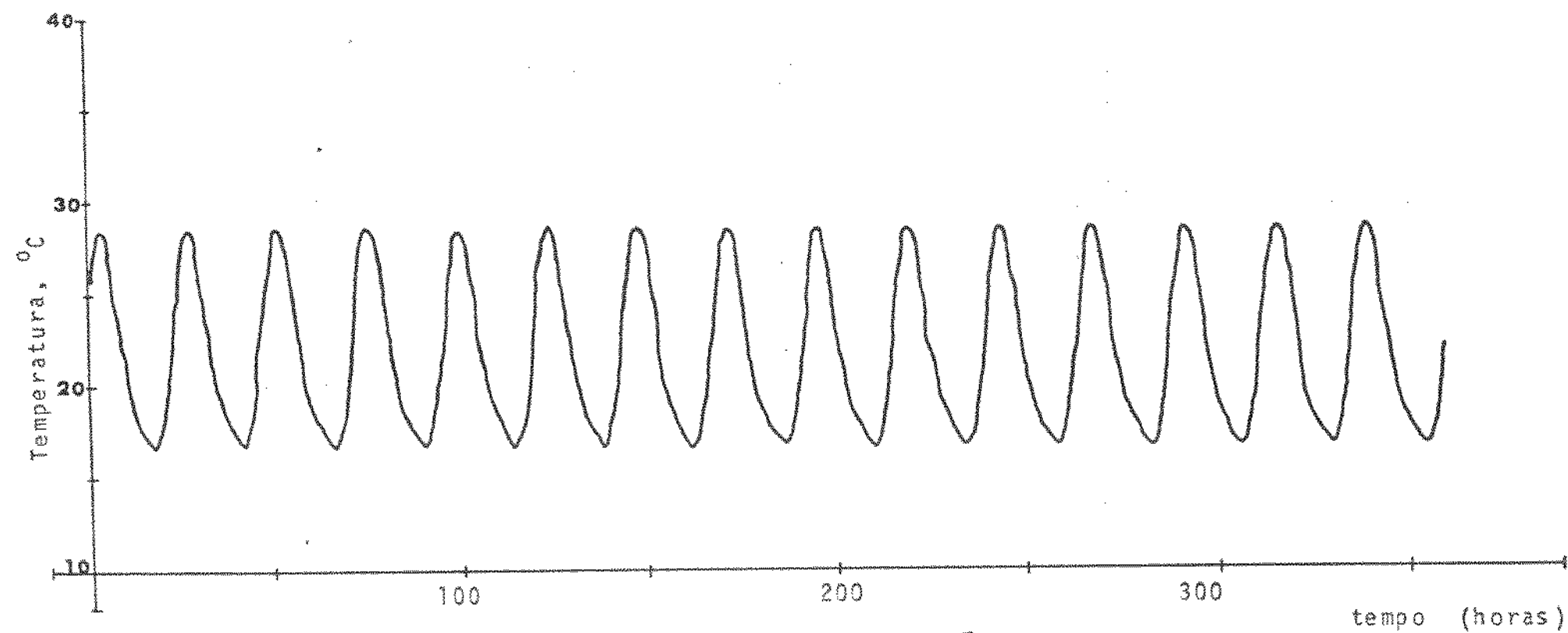


Fig. 22 — Variação da temperatura ambiente do período de secagem

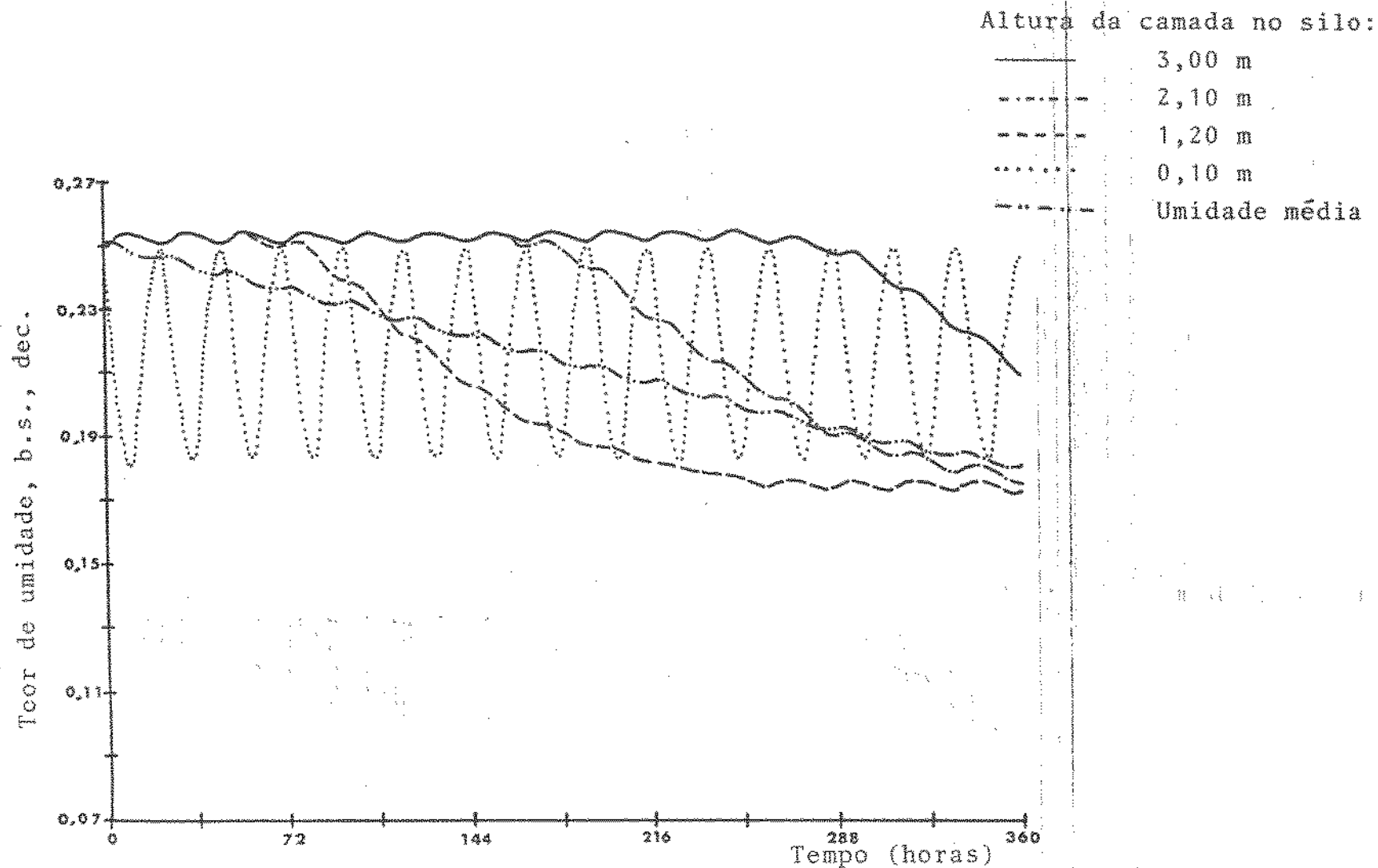


Fig. 23 — Variação do teor de umidade do grão ao longo do silo na SIMULAÇÃO A.

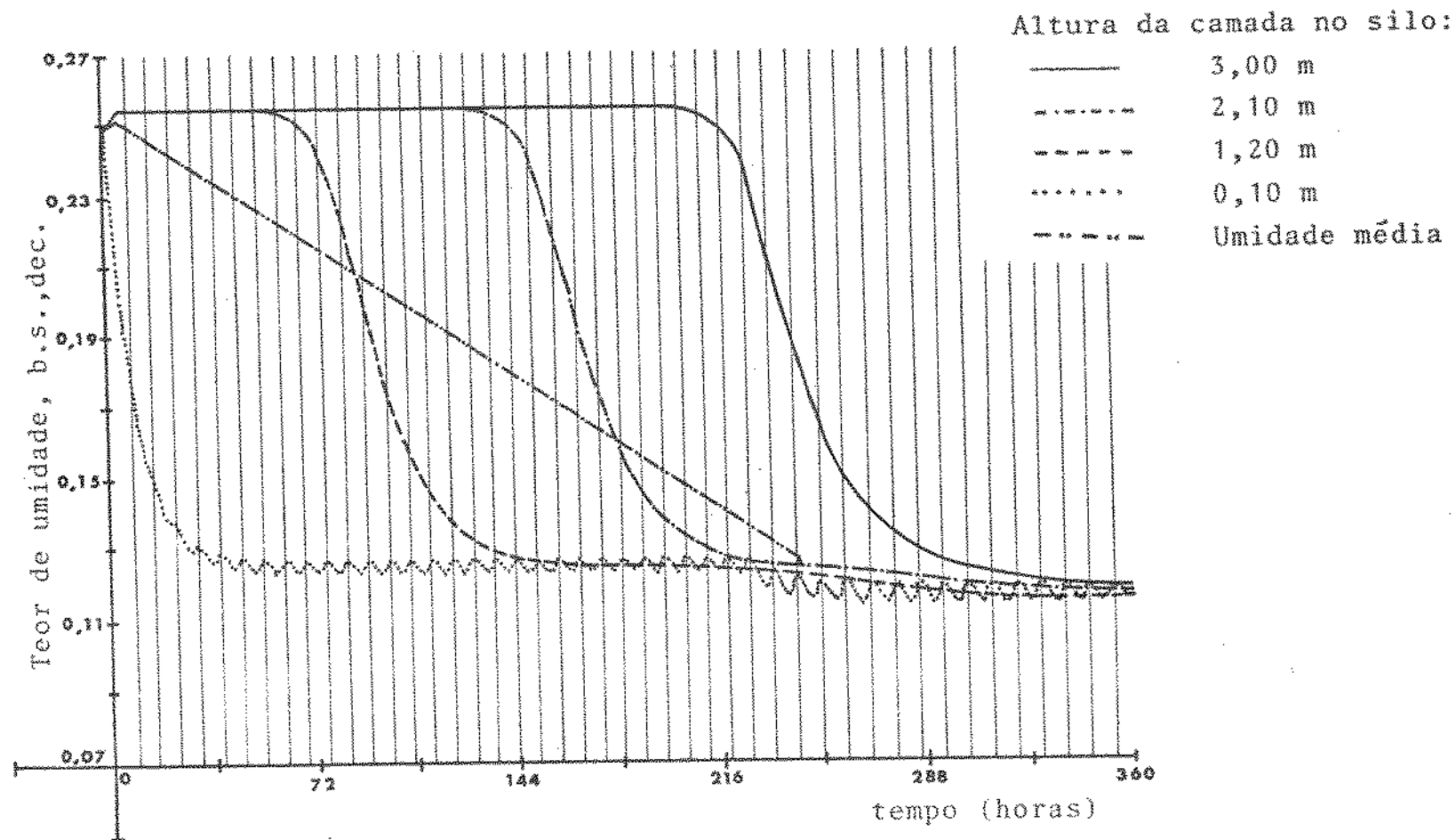


Fig. 24 — Variação do teor de umidade do grão ao longo do silo na SIMULAÇÃO B.



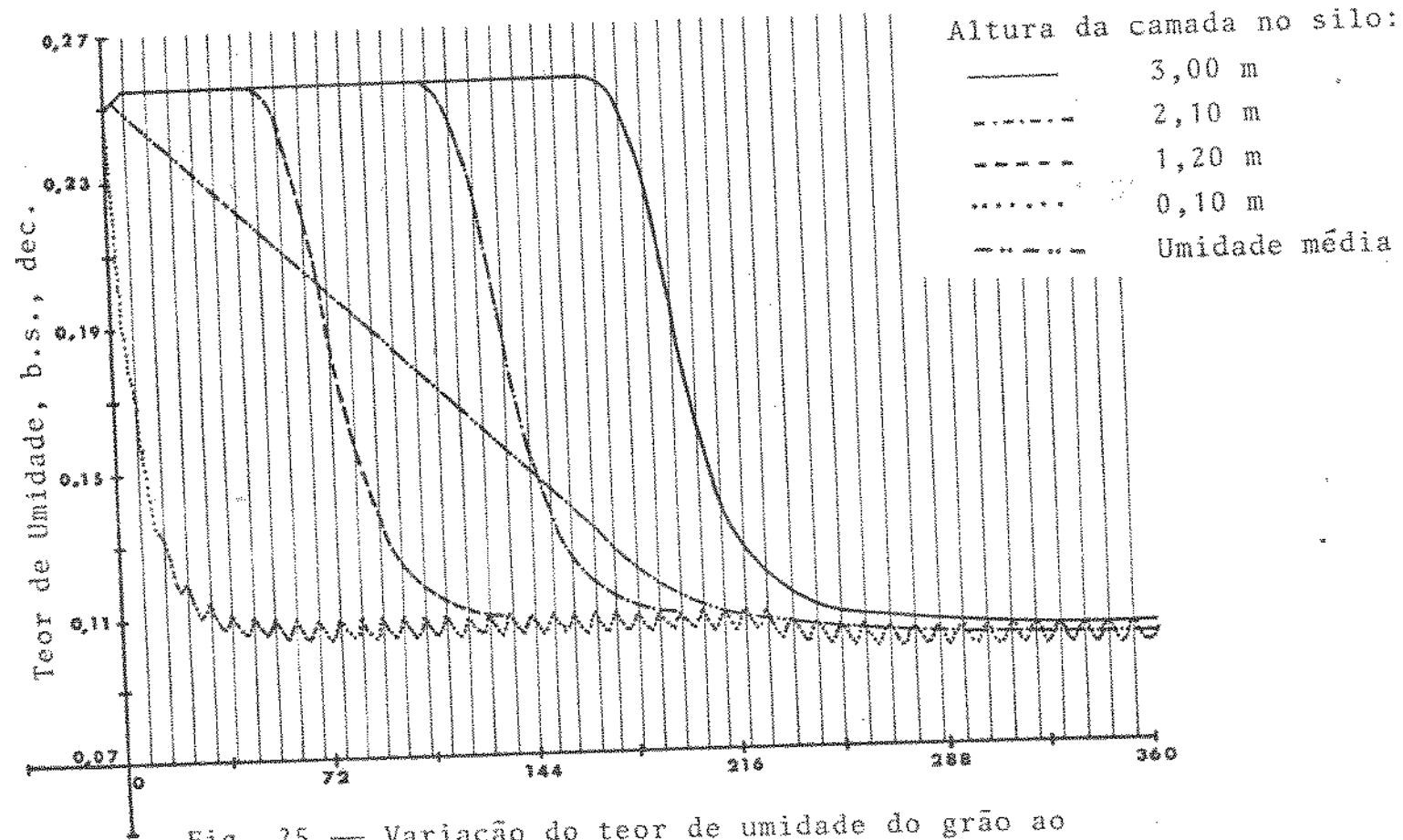


Fig. 25 — Variação do teor de umidade do grão ao longo do silo na SIMULAÇÃO C

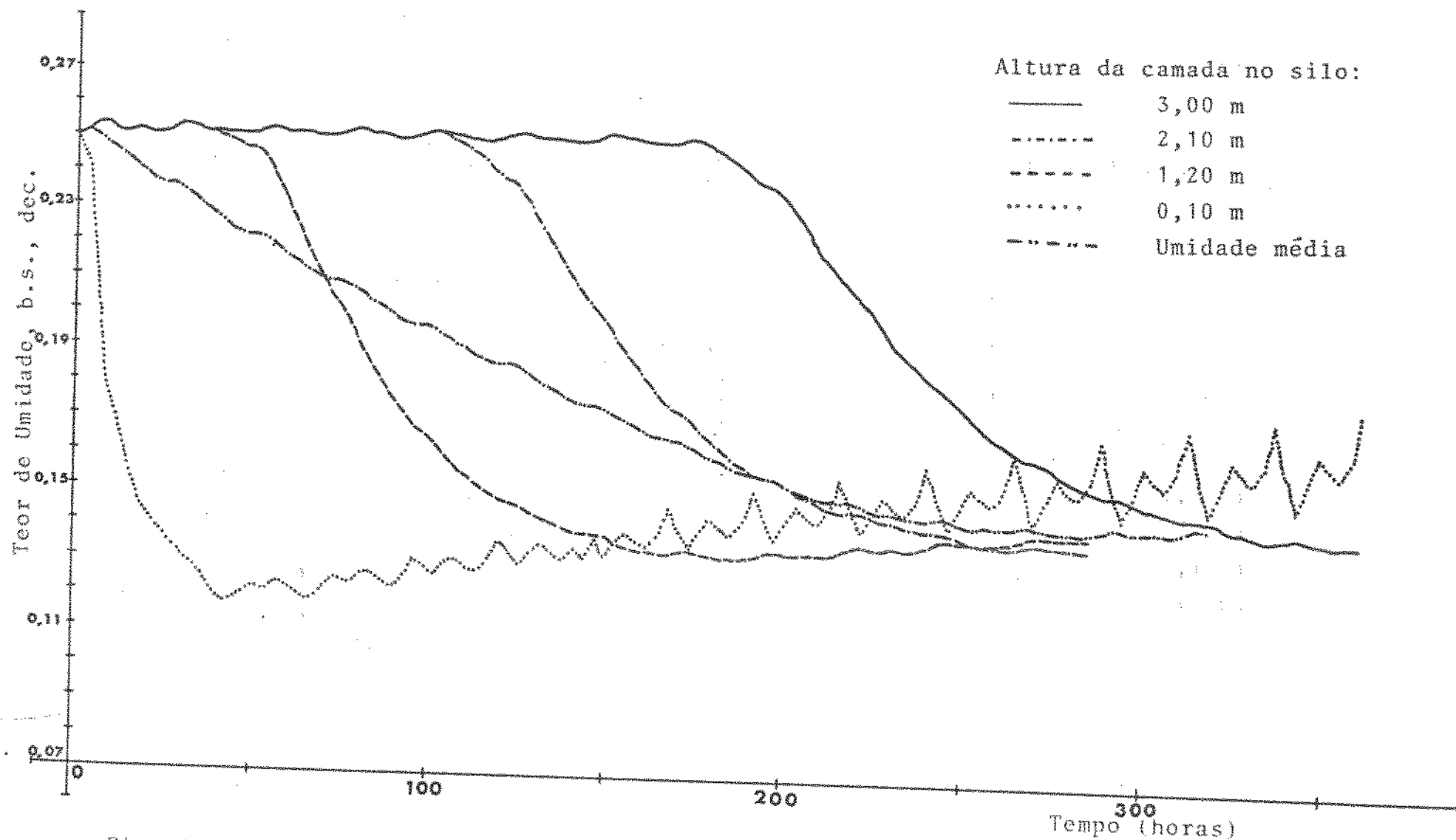


Fig. 26 — Variação do teor de umidade do grão ao longo do silo na simulação D

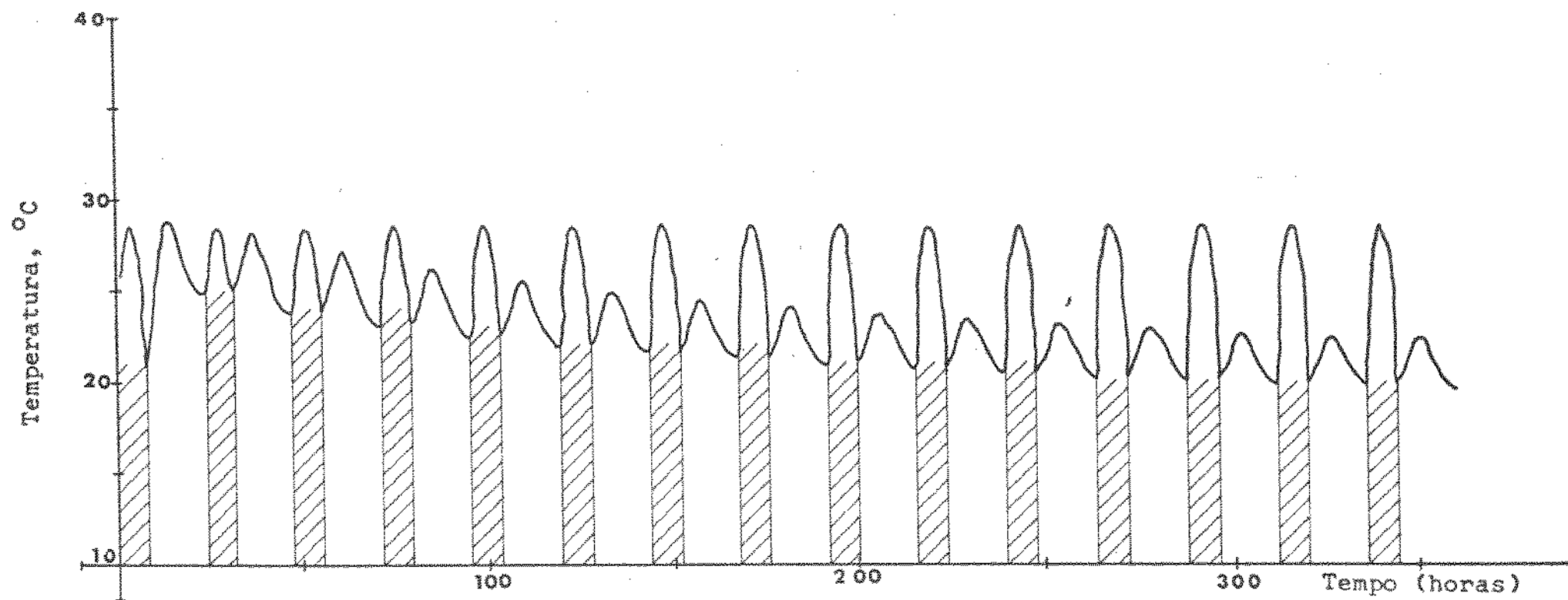


Fig. 27 — Temperatura do ar na entrada do ventilador para a SIMULAÇÃO D.

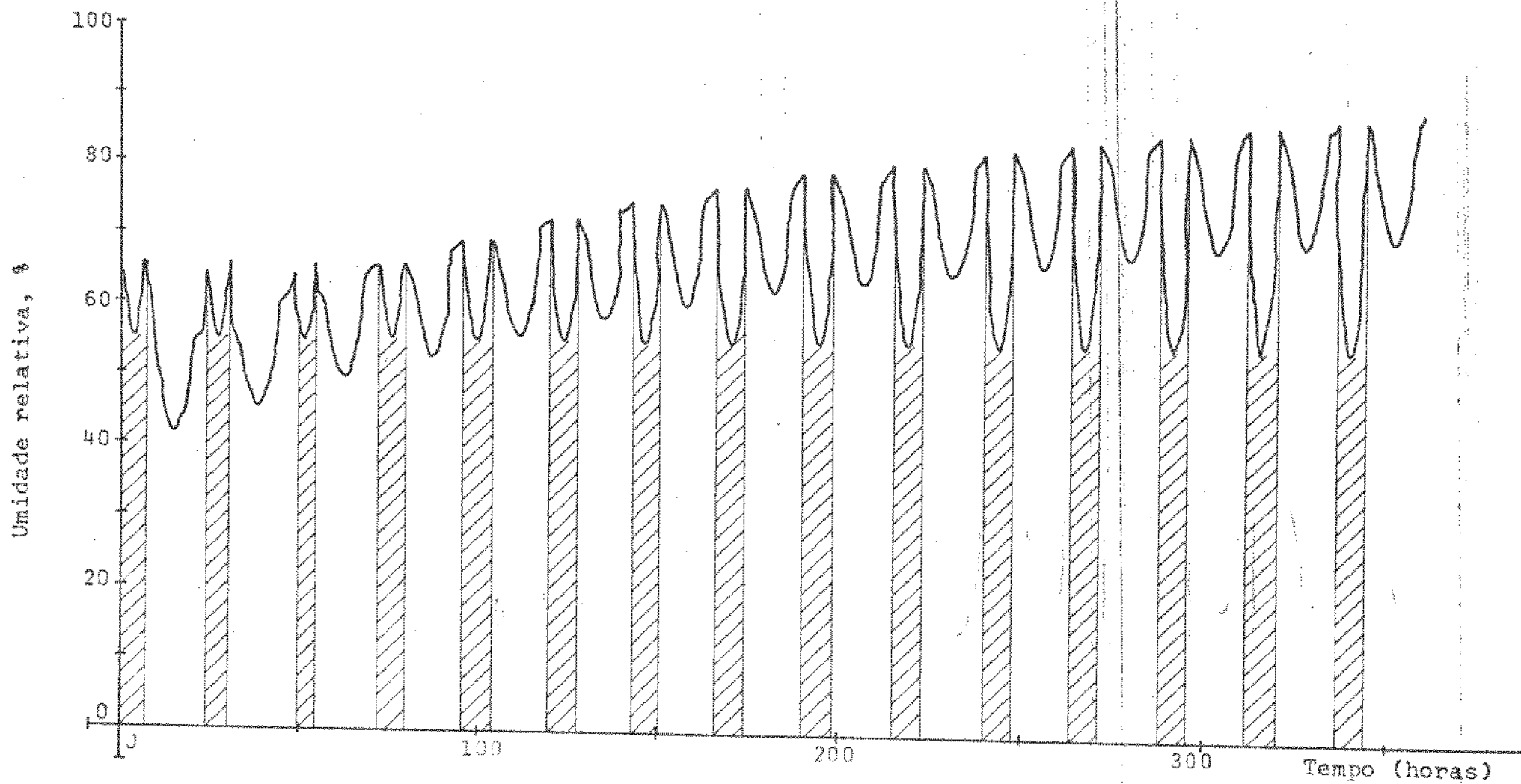


Fig. 29 - Umidade relativa do ar na entrada do ventilador na SIMULAÇÃO D.

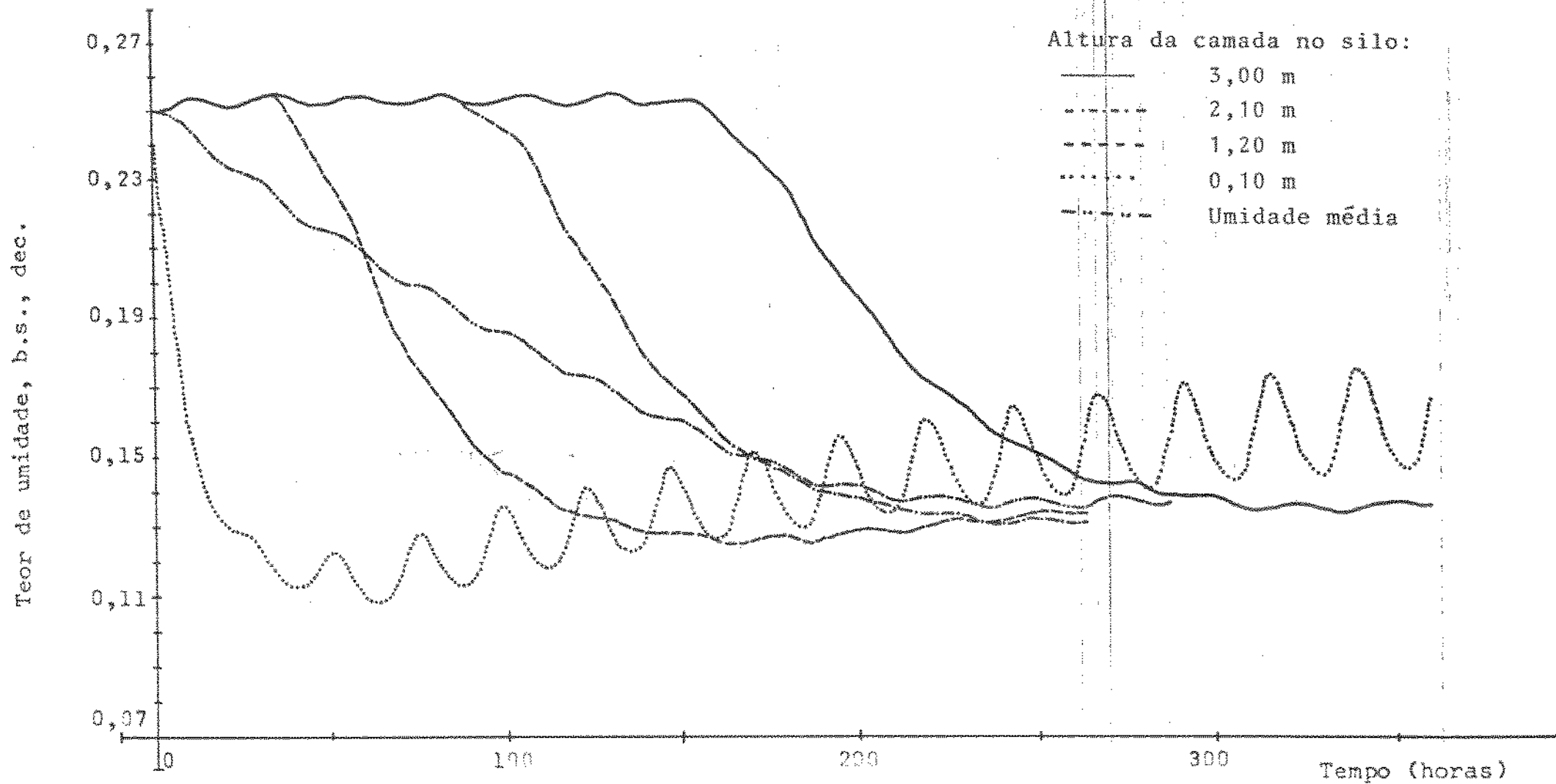


Fig. 29 Variação do teor de umidade do grão ao longo do silo na SIMULAÇÃO E.

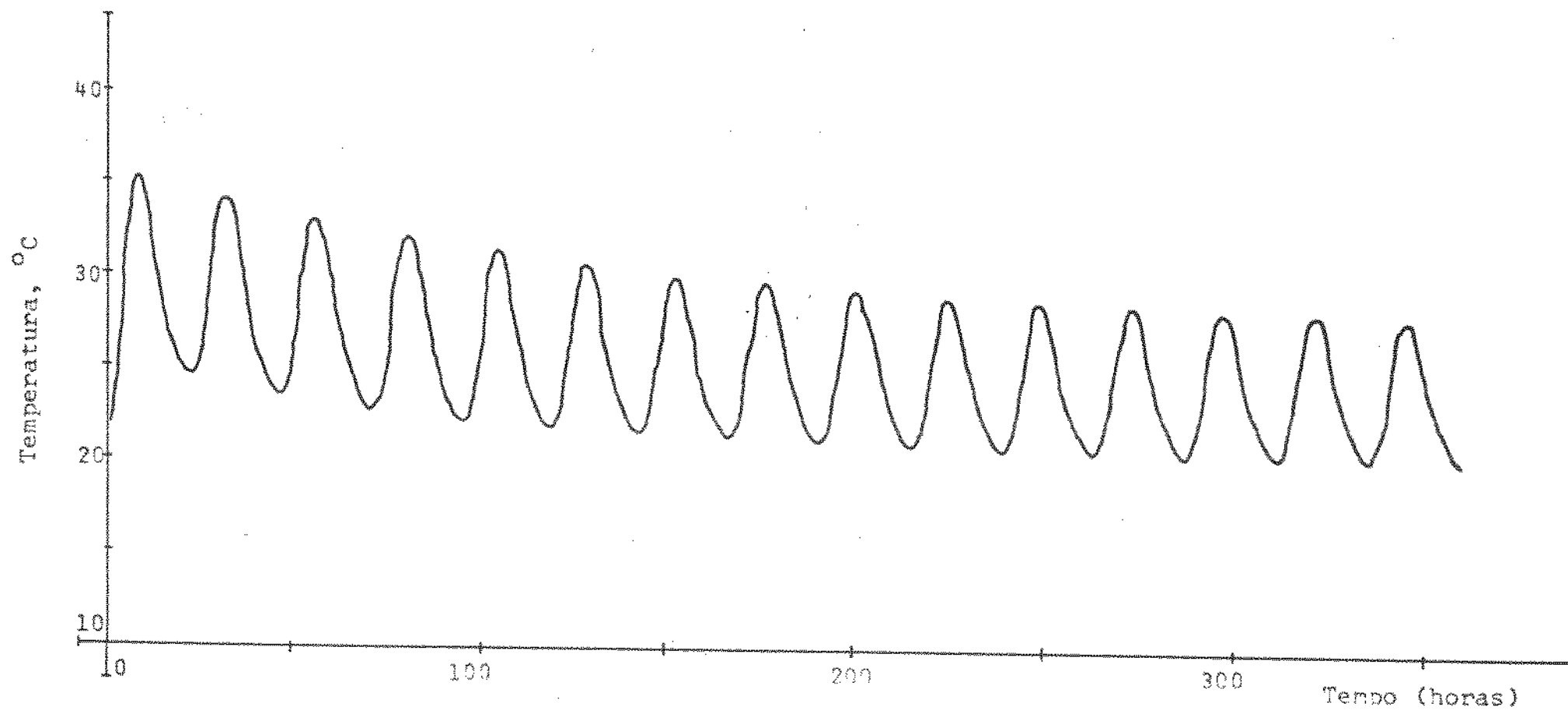


Fig. 30 — Temperatura do ar na entrada do ventilador na SIMULAÇÃO E.

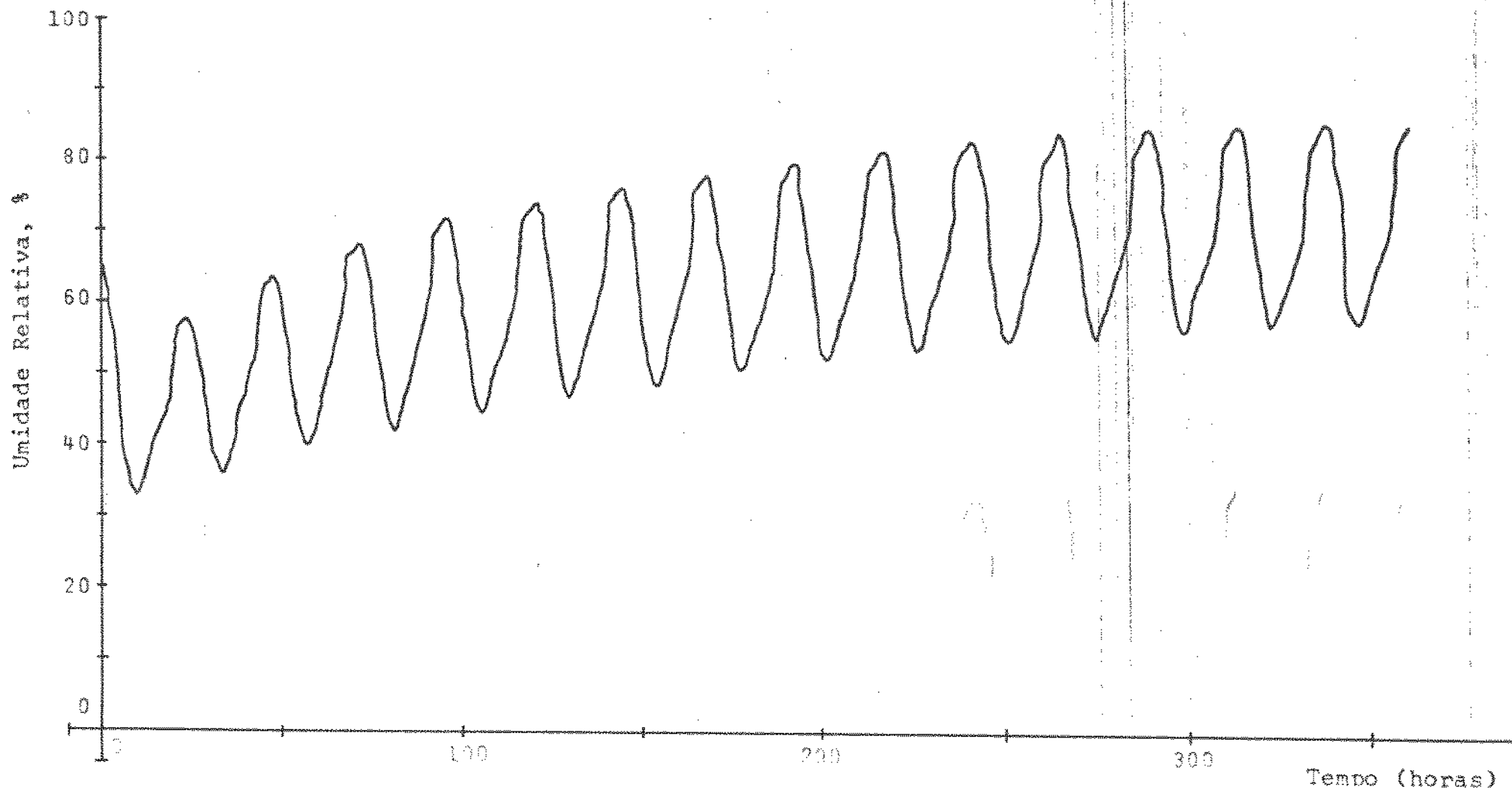


Fig. 31 — Umidade relativa do ar na entrada do ventilador na SIMULAÇÃO E.

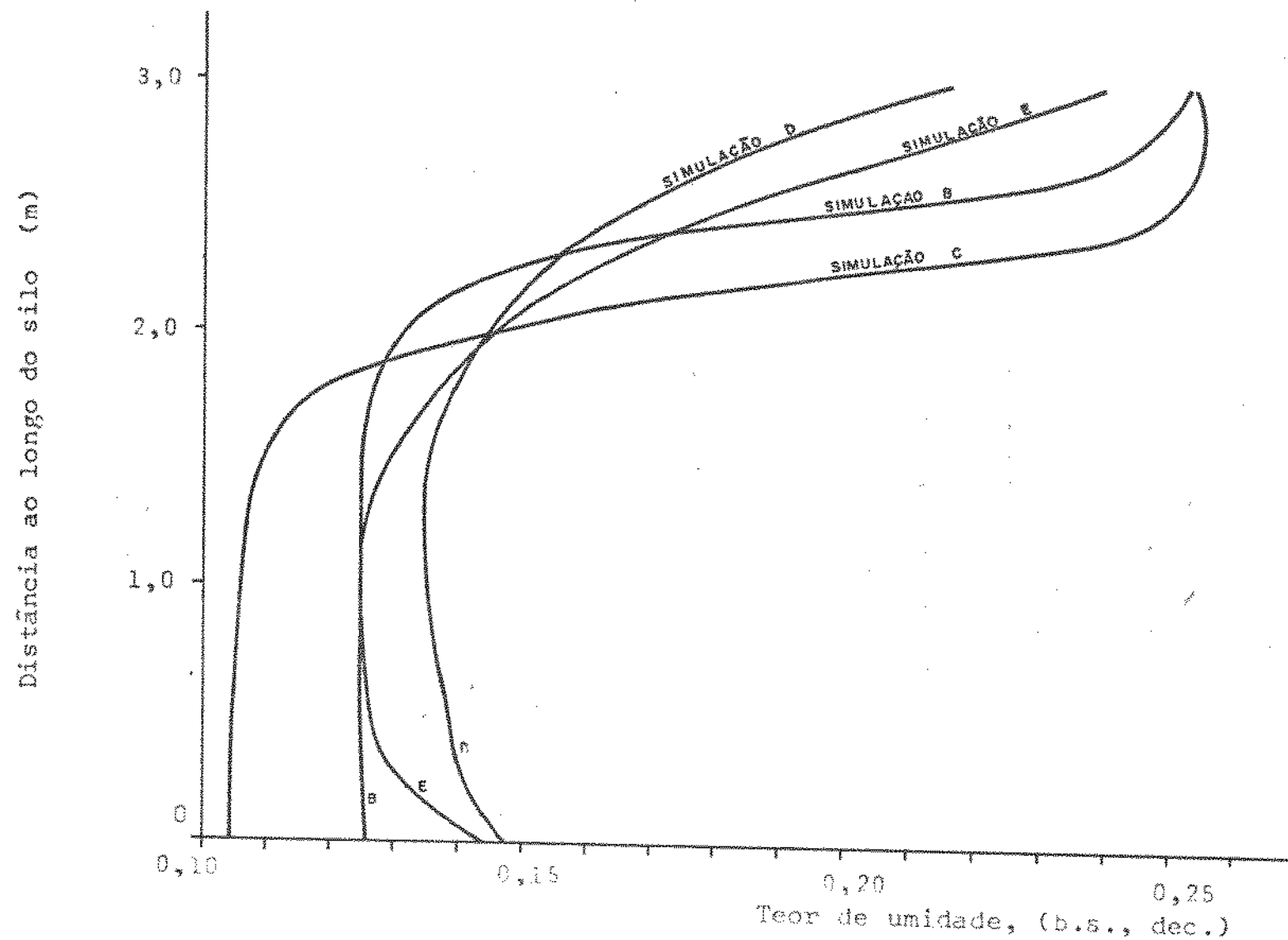


Fig. 32 — Gradiente de umidade do grão ao longo do silo para o teor de umidade média de 15,0%.



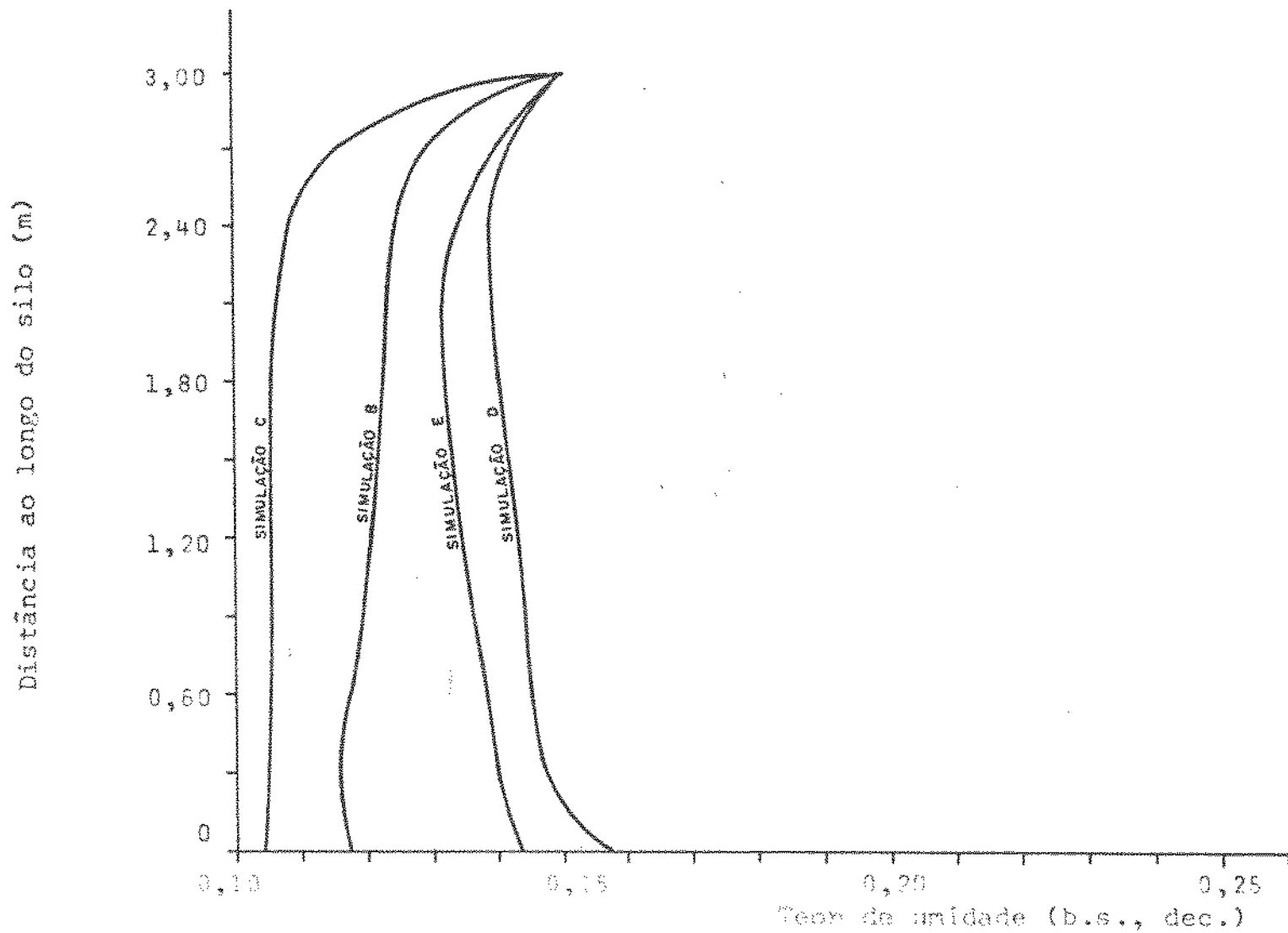


Fig. 33 — Gradiente de umidade do grão ao longo do silo no final do processo de secagem.

## 6. CONCLUSÕES:

1. - as propriedades físicas da madeira que foram determinadas, atenderam as necessidades do estudo.
2. - as propriedades físicas dependentes da forma geométrica do sistema que foram determinadas, atenderam as necessidades do estudo.
3. - o modelo matemático adaptado para simular a transferência simultânea de calor e massa entre o ar de processamento e os dutos de madeira, atendeu satisfatoriamente as necessidades do estudo.
4. - o armazenamento da energia solar na forma proposta, pode ser obtido sob condições compatíveis com o uso de coletor solar simples.
5. - para aumentar a quantidade de energia armazenada utilizável, o sistema exige condições operacionais e dimensões que dificultam a sua utilização.
6. - a ampla faixa de condições operacionais em que o sistema armazena e entrega energia, são compatíveis com aquelas utilizados em sistemas tradicionais de secagem de grãos em silo.
7. - a redução do tempo de operação do ventilador no processo de secagem do milho em silo, é incompatível com o tempo de operação do ventilador para o armazenamento de energia solar.
8. - a exaustão do sistema de armazenamento de energia, juntamente no final do processo de secagem, é uma característica que obriga a utilização de uma gerência de processo mais adequada.

9. - a utilização do armazenador de energia continuamente, durante o período de secagem, é uma gerência do processo que resulta nos menores tempos de operação.
10. - a utilização do armazenador de energia somente nos períodos de condições climáticas adversas, resulta num gradiente de umidade do grão ao longo do silo, desprezível.
11. - a utilização da energia armazenada no processo de secagem do grão em silo, resulta numa qualidade do grão no final, dada pelo valor da perda de matéria seca do grão, superior do que ocorre com os outros processos aqui estudados.
12. - a utilização da energia armazenada no processo de secagem do grão em silo, elimina, quase totalmente, o problema da sobre-secagem dos grãos.

## 7. BIBLIOGRAFIA

1. ALANIS, E. et alii. Acumulación térmica en materiales con cambio de fase. In: Atas do 2º Congresso Latino Americano de Energia Solar, Recife, s.d. v.3. p. 839-56.
2. ALDIS, D.F. et alii. Evaluation of solar regeneration of silica gel and its use in grain drying. Transactions of the ASAE, St. Joseph, 23 : 1557-63, 1980.
3. BAKKER-ARKEMA, F.W. et alii. Cereal grain drying. In: Advances in cereal science and technology. v.2. s.n.t. 90 p.
4. ————. Grain dryer simulation. Michigan, Michigan State University, 1974. 80 p. (Research Report - Farm Science nº 224).
5. BROOKER, D.B. et alii. Drying cereal grains. Westport, AVI, 1974. 265 p.
6. BROWN, G.M. et alii. Unit operations. New York, John Wiley, 1967. 611 p.
7. BUNN, J.M. et alii. Potential for ambient air drying in South Carolina. Transactions of the ASAE, St. Joseph, 24 : 227-32, 1981.
8. CARLSSON, B. et alii. An incongruent heat-of-fusion system  $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  - made congruent through modification of the chemical composition of the system. Solar energy, Phoenix, 23 : 343-50, 1979.
9. CARNAHAN, B. et alii. Applied numerical methods. New York, John Wiley, 1969. xx + 604 p.

10. CEQ optimistic on solar energy outlook. Chemical and engineering news, New York, 56 (16) : 7, 17 apr. 1978
11. COSTA NETO, P.L.O. Estatística. São Paulo, Edgard Blücher, 1977.
12. DANZIGER, M.T. et alii. Drying of field corn with silica gel. Transactions of the ASAE, St. Joseph, 15 : 1071-74, 1972.
13. DUFFIE, J.A. & BECKMAN, W.A. Solar energy thermal process. New York, John Wiley, 1974. p.215-39.
14. ENO, B.E. & FELDERMAN, E.J. Supplemental heat for grain drying with a transportable solar heater. Transactions of the ASAE, St. Joseph, 23 : 959-63, 1980.
15. FACTOR, H.M. & GROSSMAN, G. A packed bed the humidifier/regenerator for solar air conditioning with liquid desiccants. Solar energy, Phoenix, 24 : 541-50, 1980.
16. FEDDES, J.J.R. et alii. Grain drying with solar-heated air. Canadian agricultural engineering, Ottawa, 22 (1) : 81-4, jun. 1980.
17. FOUDA, A.E. et alii. Solar storage systems using salt hydrate latent heat and direct contact heat exchange-I. Preliminary design considerations. Solar energy, Phoenix, 25 : 437-44, 1980.
18. FOUST, A. et alii. Principles of unit operations. London, John Wiley, 1964. 578p.
19. FRASER, B.M. & MUIR, W.E. Airflow requirements predicted for drying grain with ambient and solar-heated air in Canada. Transactions of the ASAE, St. Joseph, 24 : 208-10, 1981.
20. ———. Energy consumptions predicted for drying grain with ambient and solar-heated air in Canada. Journal of agricultural engineering research, Silsoe, 25 : 325-31, 1980.

21. HALL, C.W. Drying farm crops. Westport, AVI, 1957.
22. HOTTEL, H.C. Solar energy. Chemical engineering progress, New York, 71 (7) : 53-65, jul. 1975.
23. IHNE, A. Le sechage des bois. 3.ed. Paris, Dunod, 1940. 476p.
24. ISMAIL, K.A.R. & REIS, J.A. Armazenador de calor sensível-sistema fluidizado sólido-líquido. In: Anais do II congresso brasileiro de energia, Rio de Janeiro, abr. 1981. p.987-97.
25. JOHNSON, P.D.A. & OTTEN, L. Solar-assisted, low-temperature corn drying in Southern Ontario. Canadian agricultural engineering, Ottawa, 22 (1) : 29-34, jun. 1980.
26. KAMIMOTO, M. et alii. Investigation of nitrate salts for solar latent heat storage. Solar energy, Phoenix, 24 : 581-7, 1980.
27. KNEULE, F. El secado. Espartero, Urmo, 1966. 414p.
28. KNUDSEN, J.G., KATZ, D.L. Fluid dynamics and heat transfer. New York, McGraw-Hill, 1958.
29. MANTOVANI, B.H.M. Análise e simulação de secagem de grãos de milho em camadas espessas. Viçosa, 1976. 90p. (tese de mestrado).
30. MEYER, J.A. et alii. Energia para a secagem dos produtos agropecuários. Revista brasileira de armazenamento. Viçosa, 3 (4) : 5-14, dez. 1978.
31. MILLS, A.D. et alii. Extended cycling behavior of a direct contact-phase change TES system. American institute of chemical engineers - Symposium Series, s.l., 76 (198) : 41-6, 1980.

32. MISHRA, C.B. & SHARMA, S.P. Performance study air-heated packed-bed solar-energy collectors. Energy, New York, 6 : 153-7, 1981.
33. OTHMER, D.F. Correlating vapor pressure and latent heat data: a new plot. Industrial & engineering chemistry, Easton, 32 (6): 841-56, jun. 1940.
34. PIERCE, R.O. & THOMPSON, T.L. Managment of solar and low temperature grain drying systems. Part I: Minimum airflow rates: supplemental heat and fan operation srtategies with full bin. St. Joseph, American Society of Agricultural Engineers, 1978. 13p. (Paper n° 78-3513).
35. ———. Management of solar and low-temperature grain drying systems. Part II: Layer drying and solution to the over drying problem. St. Joseph, American Society of Agricultural Engineers, 1978. 19p. (Paper n° 78-3514).
36. ROA, G. et alii. Dynamic estimation of thin layer drying parameters. St. Joseph, American Society of Agricultural Engineers, 1977. 10p. (Paper n° 77-3530).
37. ROA, G. Natural drying of cassava. East Lansing, 1974 (Tese de doutorado).
38. ROA, G. & MACEDO, I.C. Drying of "carioca" dry beans with solar energy in a stationary bin. St. Joseph, American Society of Agricultural Engineers, 1976. (Paper n° 76-3021).
39. ROBISON, H.I. Liquid sorbent solar air conditioner. In: VEZIROGLU, T.N. ed. Alternative energy sources. An international compendium. v.2. Washington, Hemisphere, s.d. p.761-79.
40. ROBISON, H.I. & HOUSTON, S.H. Absorption/desorption solar cooling system performance. In: Proceedings of american institute of chemical engineers 72nd annual meeting, San Francisco, nov. 25-29, 1979. 11p.

41. ROBISON, H.I. & HOUSTON, S.H. Thermo-chemical energy storage for heating and cooling. In: Solar energy storage options. Santo Antonio, Trinity University, mar. 19-20, 1979. 7p.
42. RODDA, E.D. & RODE, D.W. Desiccant dehumidifiers for drying grain. In: Winter meeting of american society of agricultural engineers, Chicago, dez. 1977. paper nº 77-3528 UILU-ENG 77-7022. 9p.
43. ROHSENOW & HARTNET Handbook of heat transfer. New York, McGraw-hill, c 1973. p.7-119.
44. ROSSI, S.J. Ar natural e bomba de calor na secagem e armazenamento de sementes de soja. Campinas, 1980. 178p. (Tese de mestrado).
45. SANTOS, L.A. et alii. Avaliação de um coletor armazenador de energia solar empregado para aquecimento de ar na secagem de soja em silos. In: Seminário Nacional de Armazenagem, 3, Curitiba, 1978.
46. SAUL, R.A. & LIND, E.F. Maximum time for safe drying of grain with unheated air. Transactions of de ASAE, St. Joseph, 1 : 29-33, 1958.
47. SHELL BRASIL S.A. A quantidade de energia solar enviada à terra. Revista de química industrial, Rio de Janeiro, 48 (567) : 20-21, jul. 1979.
48. SHIGEISHI, R.A. et alii. Solar energy storage using chemical potential changes associated with drying of zeolites. Solar energy, Phoenix, 23 : 489-95, 1979.
49. SINICIO, R. & ROA, G. Curvas e equações de equilíbrio higroscópico para 15 produtos agrícolas. Revista brasileira de armazenamento, Viçosa, 4 (2) : 45-55, dez. 1979.
50. SOLAR energy technology becoming competitive. Chemical and engineering news, New York, 56 (31), 31 jul. 1978.



51. STEELE, J.L. et alii. Deterioration of shelled corn as measured by carbon dioxide production. Transaction of the ASAE, St. Joseph, 12 : 685-9, 1969.
52. SVEC, O.J. & PALMER, J.H.L. Heat exchanger for in-ground heat storage. American institute of chemical engineers - Symposium Series, s.l., 76 (198) : 56-61, 1980.
53. TELKES, M. Solar energy storage. Ashrae Journal, New York, sep. 1974.
54. THOMPSON, T.L. et alii. Mathematical simulation of corn drying - a new model. Transactions of the ASAE, St. Joseph, 27 : 582-86, 1968.
55. THOMPSON, T.L. Temporary storage of high-moisture shelled corn using continuous aeration. Transactions of the ASAE, St. Joseph, 15 : 333-7, 1972.
56. VILLA, L.G. et alii. Uso da simulação matemática na análise de dados meteorológicos para determinação da vazão mínima de ar na secagem natural de grãos em silo. s.n.t.
57. WALTON, L.R. et alii. Storing solar energy in an underground rock bed. Transactions of the ASAE, St. Joseph, 22 : 1202-6, 1979.
58. WYMAN, C. et alii. A review of collector and energy storage technology for intermediate temperature applications. Solar energy, Phoenix, 24 : 517-40, 1980.
59. YUAN, S.W. & MAJDI, M.M. The mini-prototype solar energy earth storage system. Energy, New York, 6 (7) : 571-84, 1981.

# APÊNDICE A

*Programa para a simulação da secagem e umidificação dos dutos de madeira -*

```

        DIMENSION XMC(120),H(120),KSRM(120),TISR(120),T(120),RH(120),
        1THE(120),XLENGH(120)
C ***** VARIÁVEIS SOMATORIAS CUMULATIVAS
        DATA ENERGY,SENTRF,CON,SVEIP,TIME/0.0,0.0,0.0,0.0,0.0/
        DATA IDT,ITPR/0,0/
C ***** CARACTERÍSTICAS DO SIST. DE ARMAZENAMENTO
        DATA ROMAD,CF,YA,YB,YBUA/521.7,.324,.0270,.2650,7.06/
C ***** CONDUTIVIDADE TÉRMICA DO AR
        DATA PRK1,PRK2/.0284,0.64E-4/
C ***** CALOR LATENTE DE VAPORIZAÇÃO DA UNID. DA MADEIRA
        DATA PR1HFG,PR2HFG,PR3HFG,PR4HFG/587.723,.559959,.58463,-11.5703/
C ***** PARÂMETROS DA EQ. DE SECAGEM E UMIDIFICAÇÃO
        DATA XM,XN,XQ/1.17249E-3,.329567,.962721/
C ***** PARÂMETROS DA EQ. DE UNIDADE DE EQUILÍBRIO
        DATA P1,P2,P3,Q0/.44542,-7.43762E-2,-5.83661E-2,-3.02107E-2/
        DATA Q1,Q2,Q3,Q4,Q5/.163220,-.390098,.391262,-.13894,80.5945/
C ***** CONDIÇÕES AMBIENTAIS
        DATA THD4,HAMB4,P14,A14,P24,A24/21.59,.0145,5.7092,221.525,1.3070
        1,53.111/
        DATA THD5,P15,A15,P25,A25,HAMB5/19.82,6.4373,220.995,2.7404,67.636
        1,.0120/
        DATA P40,P41,P42/180.0,15.0,30.0/
C ***** AQUECIMENTO DO AR PELO COLETOR
        DATA P35,P36,P37/.04,1.04,5.76/
C ***** CONSTANTES FÍSICAS
        DATA CA,CV,CU,PI,PATN,PC1/.242,.45,1.0,3.1415927,93324.0,273.16/
C ***** PARAM. EQ. DA PRES. DE SATURAÇÃO
        DATA R,A,B/.2210584739E8,-.274055258361E5,.9754129373E2/
        DATA C,D,E/-.1462440044,.1255753189E-3,-.4850171032E-7/
        DATA F,G/.434902897800E1,.3938107141E-2/
C ***** ENTRADA DAS CONDIÇÕES PARA SIMULAÇÃO
        WRITE(2,799)
        READ(1,700)TTIME
        WRITE(2,800)
        READ(1,704)IDIA
        WRITE(2,801)
        READ(1,700)HORA
        WRITE(2,802)
        READ(1,702)TLENGH
        WRITE(2,803)
        READ(1,700)THIN
        WRITE(2,804)
        READ(1,703)XMO
        WRITE(2,805)
        READ(1,703)VELD
        WRITE(2,806)
        READ(1,703)VELS
        WRITE(2,807)
        READ(1,704)NDXPM
        WRITE(2,808)
    
```

```

READ(1,704)IANTC
WRITE(2,809)
READ(1,702)DELT
WRITE(2,810)
READ(1,703)RHC
WRITE(2,811)
READ(1,704)ITPI
WRITE(2,812)
READ(1,704)IGER
C ***** CALCULOS INICIAIS
U1=XH*XQ
U3=XQ-1.0
YL=TLENGH
YE=YA/2.0
S=(YA+2.0*YE)*(YB+2.0*YE)
DEQ=2.0*YA*YB/(YA+YB)
ASP=2.0*(YA+YB)/S
ROAP=RONAD*(S-(YA*YB))/S
DTS=0.5
ICDT=IFIX(DTS/DELT)
C ***** CALCULO DO NUMERO DE DUTOS
VDUTO=VELD*YA*YB
ND=IFIX(VELS/VDUTO)
VDUTO=VELS/FLOAT(ND)
VELD=VDUTO/(YA*YB)
GAR=VELD*3600.0*YA*YB/S
C ***** CONTROLADORES DA SIMULACAO
DELX=1.0/FLOAT(NDXPM)
ALENGH=FLOAT(NDXPM)*TLENGH
ILENGH=IFIX(ALENGH)
ILP1=ILENGH+1
NDXEI=ILENGH/10
IDXEI=NDXEI+1
C ***** CONDIÇÕES INICIAIS
XLENGH(1)=0.0
DO 110 I=1, ILENGH
K=I+1
XLENGH(K)=XLENGH(I)+DELX
XMC(I)=XMO
THE(I)=THIN
KSRM(I)=2
TISR(I)=0.0
110 CONTINUE
T(ILP1)=THE(ILENGH)
ATC=0.0
H(ILP1)=.0145
RH(ILP1)=.6757
C ***** CONSTANTES DO LOOP
CON4=CP*ROAP
CON5=CU*ROAP
CON7=S*DELX
CON3=CON7*ROAP
CON9=ROAP*S*YL
CON10=ROAP*DELX*S
C ***** IMPRESSAO DA PRIMEIRA PAGINA
WRITE(6,813)
WRITE(6,814)ND
WRITE(6,815)TLENGH
WRITE(6,816)XMO
WRITE(6,817)THIN
WRITE(6,818)VELD

```

```

WRITE(6,819)
IF(IGER-4)210,210,220
210 WRITE(6,820)
WRITE(6,821)
URC=RHC*100.0
WRITE(6,822)URC
GO TO 230
220 WRITE(6,823)
WRITE(6,824)IAMTC
WRITE(6,825)
WRITE(6,826)
230 CONTINUE
C ***** INICIO LOOP DE TEMPO
2 IF(TIME-TTIME)3,32,32
3 CONTINUE
TIME=TIME+DELT
IDT=IDT+1
CON6=DELT*ROAP
C ***** CONDIÇÕES AMBIENTAIS
HORA=HORA+DELT
DIA=FLOAT(IDIA)+HORA/24.0
IDIA=IFIX(DIA)
IF(HORA-24.0)7,8,8
8 HORA=HORA-24.0
7 IF(IDIA-30)9,9,10
9 TAMB=TMD4+P14*COS((PI/P40)*(P41*HORA-A14))+P24*COS((PI/P40)*
1(P42*HORA-A24))
HAMB=HAMB4
FECHA=FLOAT(IDIA)+.04
GO TO 11
10 CONTINUE
TAMB=TMD5+P15*COS((PI/P40)*(P41*HORA-A15))+P25*COS((PI/P40)*
1(P42*HORA-A25))
HAMB=HAMB5
FECHA=FLOAT(IDIA)-30.0+.05
11 DB=TAMB+FC1
PSAT=R*EXP((A+DB*(B+DB*(C+DB*(D+DB*E))))/(DB*(F-G*DB)))
FVAF=HAMB*PATM/(.6219+HAMB)
URIN=FVAF/PSAT
IF(URIN-1.0)14,13,13
13 URIN=1.0
HAMB=.6219*PSAT/(PATM-PSAT)
FVAF=PSAT
14 CONTINUE
C ***** CONTROLE DO PROCESSO
IF(IGER-4)60,60,43
C ***** PROCESSO INTERMITENTE
60 IF(URIN-RHC)43,43,62
62 IF(IDT-ICDT)3,65,65
65 IDT=0
WRITE(7,699)TIME,HORA,FECHA,TAMB,URIN,HAMB,ATC,HAMB,TAMB,
1URIN
ITCFR=IFIX(TIME)
GO TO 3
61 GO TO 43
43 ATC=0.0
C ***** AQUECIMENTO DO AR PELO COLETOR
IF(IAMTC)66,67,66
66 IF(HORA-8.0)67,67,68
68 IF(HORA-18.0)69,67,67
69 ATC=(-P35*HORA*HORA+P36*HORA-P37)*FLOAT(IAMTC)
67 TSC=TAMB+ATC
C ***** AR PASSANDO PELO LETTO

```

```

T(1)=TSC
H(1)=HAMB
DB=T(1)+FC1
VSP=287.0*DB*(.6219+H(1))/(.6219*PATH)
GA=GAR/VSP
CON1=ROAP*DELX/GA
TMD=(T(1)+T(ILP1))/2.0
YK=PRYK1+PRYK2*TMD
VISC=1435.236E-06*(TMD+FC1)**(2./3.)
RE=GA*S*DEQ/(YA*YB*VISC)
PR=CA*VISC/YK
YNU=YNUA
DO 120 I=2,ILP1
IM=I-1
WRITE(2,698)TIME,IM
IF(RE-500.)177,177,176
176 XL=XLENGH(IM)+DELX/2.0
YNU=((.019*YA/YB+.003)*(RE*PR*DEQ/XL)+1.0)*YNUA
177 HTC=YNU*YK/DEQ
CON3=HTC*ASP*DELT
CON2=HTC*ASF*DELX/(GA*(CA+CV*H(IM)))
T(I)=T(IM)-CON2*(T(IM)-THE(IM))
DB=T(I)+FC1
PSAT=R*EXP((A+DB*(B+DB*(C+DB*(D+DB*E))))/(DB*(F-G*DB)))
RH(IM)=PVAP/PSAT
DPV=PSAT-PVAP
H(I)=H(IM)
IF(RH(IM)-1.0)135,136,142
136 DPV=0.0
135 UR=RH(IM)
XEQMC=(UR*(P1+UR*(P2+UR*P3)))*EXP((Q0+UR*(Q1+UR*(Q2+UR*(Q3+
1UR*Q4))))*(T(I)+Q5))
C ***** CONTROLE INDIVIDUAL DO TEMPO DE PROCESSO
IF(XMC(IM)-XEQMC)160,161,162
160 KCSR=3
GO TO 163
161 KCSR=2
GO TO 163
162 KCSR=1
163 IF(KCSR-KSRM(IM))165,164,165
164 TISR(IM)=TISR(IM)+DELT
GO TO 166
165 KSRM(IM)=KCSR
TISR(IM)=DELT
C *****
166 DMDT=-U1*(DPV*XN)*(XMC(IM)-XEQMC)*(TISR(IM)*U3)
H(I)=H(IM)-CON1*DMDT
HFG=(PR1HFG-PR2HFG*THE(IM))*(1.+PR3HFG*EXP(PR4HFG*XMC(IM)))
CONV1=CON4+CON5*XMC(IM)
TD=THE(IM)
THE(IM)=THE(IM)+CON3*(T(IM)-THE(IM))/CONV1
1+(HFG+CV*(T(IM)-THE(IM)))*DMDT*CON6/CONV1
UMI=XMC(IM)
XMC(IM)=DMDT*DELT+XMC(IM)
ENCV=CON8*HFG*DMDT*DELT
PVAP=H(I)*PATH/(.6219+H(I))
RH(I)=PVAP/PSAT
IF(RH(I)-1.0)143,143,142
C ***** SIMULACAO DE CONDENSACAO POR SUPER-RECALCULO (DUTOS)
142 HSS=H(I)

```

```

HS=HSS
DHC=H(I)-H(IM)
FCC=DHC/5.0
IF(DHC)144,146,144
144 HS=HS-FCC
TBU=(T(I)-T(IM))*(HS-H(IM))/DHC+T(IM)
DB=TBU+FC1
PSS=R*EXP((A+DB*(B+DB*(C+DB*(D+DB*E))))/(DB*(F-G*DB)))
FVV=HS*PATH/(.6219+HS)
UUR=FPV/FSS
IF(UUR-1.0)145,145,144
145 H(I)=HS
UC=GA*DELT*(HSS-HS)/(ROAF*DELX)
XMC(IM)=XMC(IM)+UC
H2O=UC*CON10
ENCV=H2O*HFG
COND=COND+H2O
T(I)=TBU
FVAP=FPV
THE(IM)=THE(IM)
KSRM(IM)=2
GO TO 143
C ***** SIMULACAO DE CONDENSACAO POR RESFRIAMENTO (DUTOS)
146 H(I)=.6219*PSAT/(PATM-PSAT)
HSS=U(IM)
HS=H(I)
UC=GA*DELT*(HSS-HS)/(ROAF*DELX)
THE(IM)=THE(IM)+CON3*(T(IM)-THE(IM))/(CON4+CON5*XMC(IM))
XMC(IM)=XMC(IM)+UC
H2O=UC*CON10
ENCV=H2O*HFG
COND=COND+H2O
XMAR=GA*DELT*S
CPAR=CA+CV*HS
T(I)=T(I)+ENCV/(CPAR*XMAR)
FVAP=PSAT
KSRM(IM)=2
C ***** CALCULOS FINAIS DO LOOP
143 CONV2=CON4+CON5*XMC(IM)
ENERGY=ENERGY+ENCV
EIP1=CON7*CONV1*TD
EIP2=CON7*CONV2*THE(IM)
VEIP=EIP2-EIP1
SVEIP=SVEIP+VEIP
120 CONTINUE
ITIME=IFIX(TIME+0.001)
IF(IDT-ICDT)70,71,71
71 IDT=0
WRITE(7,699)TIME,HORA,FECHA,TAMB,URIN,HAMB,ATC,H(ILP1),T(ILP1),
1RH(ILP1)
70 IF(ITIME-ITTFR)2,30,30
30 CONTINUE
C ***** IMPRESSAO DOS RESULTADOS
C ***** UNIDADE MEDIA DO SIST. DE ARMAZENAMENTO
SUM=0.0
DO 50 J=1,ILENGTH
SUM=SUM+XMC(J)
50 CONTINUE
XMAVE=SUM/FLOAT(ILENGH)
C ***** ENERGIA LIBERADA POR KG DE MADEIRA SECA

```

```

      ENKGM=ENERGY/CON9
C ***** ENERGIA ARMAZENADA UTILIZADA
      ENAU=ENERGY*FLOAT(ND)
C ***** ENERGIA TRANSF. PARA O AR DE PROCESSO
      ENTRF=(ENERGY-SVETP)*FLOAT(ND)
C ***** AGUA RETIDA PELO SISTEMA DE ARMAZENAMENTO
      ARL=FLOAT(ND)*S*YL*ROAP*(KNAVE-XMO)
C *****
      ITTPR=ITPL+ITTPR
      WRITE(6,827)TIME,HORA,FECHA
      WRITE(6,828)TAMB,URIN,HAMB
      WRITE(6,829)KNAVE,ENKGM,ENTRF
      WRITE(6,830)ARL,ATC,ENAU
      WRITE(6,831)XLENGH(2),(XLENGH(K),K=IDXET,ILF1,NDXET)
      WRITE(6,832)XMC(1),(XMC(K),K=NDXET,ILF1,NDXET)
      WRITE(6,833)THE(1),(THE(K),K=NDXET,ILF1,NDXET)
      WRITE(6,834)T(1),(T(K),K=IDXET,ILF1,NDXET)
      WRITE(6,835)H(1),(H(K),K=IDXET,ILF1,NDXET)
      WRITE(6,836)RH(1),(RH(K),K=IDXET,ILF1,NDXET)
      WRITE(6,837)
      GO TO 2
32 STOP
C ***** F O R M A T S
698 FORMAT(5X,F6.2,I6)
699 FORMAT(10F10.5)
700 FORMAT(F5.1)
702 FORMAT(F5.2)
703 FORMAT(F6.4)
704 FORMAT(I3)
799 FORMAT(/,5X,'TEMPO TOTAL DO PROCESSO: ')
800 FORMAT(/,5X,'DIA DO INICIO DA OPERACAO: ')
801 FORMAT(/,5X,'HORA DO INICIO DA OPERACAO: ')
802 FORMAT(/,5X,'COMPRIMENTO DOS DUTOS: ')
803 FORMAT(/,5X,'TEMPERATURA INICIAL DOS DUTOS: ')
804 FORMAT(/,5X,'UNIDADE INICIAL DOS DUTOS: ')
805 FORMAT(/,5X,'VELOCIDADE DO AR NOS DUTOS: ')
806 FORMAT(/,5X,'VELOCIDADE DO AR NO SILO: ')
807 FORMAT(/,5X,'NUM. DE DELTA-X POR METRO DE DUTO: ')
808 FORMAT(/,5X,'AUMENTO DA TEMP. DO AR P/ COLETOR: ')
809 FORMAT(/,5X,'DELTA-T: ')
810 FORMAT(/,5X,'UNIDADE RELATIVA CRITICA: ')
811 FORMAT(/,5X,'INTERVALO DE TEMPO PARA IMPRESSOES: ')
812 FORMAT(/,5X,'GERENCIA DO PROCESSO: (CONT.=5 ; INTRNTE=4) ')
813 FORMAT(/,22X,'CARACTERISTICAS DO SISTEMA ARMAZENADOR DE ENERGIA:
1')
814 FORMAT(/,22X,'NUMERO DE DUTOS:.....',I9)
815 FORMAT(/,22X,'COMPRIMENTO DOS DUTOS (m):.....',F9.2)
816 FORMAT(/,22X,'UNIDADE INICIAL (b.s.,deg.).....',F9.4)
817 FORMAT(/,22X,'TEMPERATURA INICIAL (G.C.):.....',F9.1)
818 FORMAT(/,22X,'VELOCIDADE DO AR NOS DUTOS (m/s):.....',F9.4)
819 FORMAT(/,22X,'GERENCIA DO PROCESSO:')
820 FORMAT(/,22X,'AR DE SECAGEM PASSANDO PELO ARMAZENADOR DE ENERGI
1A')
821 FORMAT(/,22X,'QUANDO A UNIDADE RELATIVA AMBIENTE ESTIVER ACTUA
1')
822 FORMAT(/,22X,'DE',F5.1,'%. QUANDO IGUAL OU MELHOR,UTILIZA AR NA
1TURAL')
823 FORMAT(/,22X,'AR DE SECAGEM PASSANDO PELO COLETOR SOLAR, ONDE')
824 FORMAT(/,22X,'SOPRE UM AUMENTO MAXIMO DA TEMPERATURA EM',I4)
825 FORMAT(/,22X,'GRAUS, SEGUIDO PARA O ARMAZENADOR DE ENERGIA')

```

```
826 FORMAT('+',22X,'CONTINUAMENTE.')
827 FORMAT('0',7X,'TEMPO =',F13.2,7X,'HORA =',F14.2,7X,'DATA =',F14.
12)
828 FORMAT('+',7X,'T.AMB=',F14.1,7X,'UR.AMB =',F12.4,7X,'HAMB =',F14.
14)
829 FORMAT('+',7X,'UM.MED.=',F12.4,7X,'En./Kg =',F12.4,7X,'En.Trf=',
1F13.4)
830 FORMAT('+',7X,'H2O RET.L. =',F8.2,7X,'T. Col =',F12.1,7X,'En.Lib.
1=',F12.2)
831 FORMAT('/',2X,'POS',11F8.2)
832 FORMAT('+',2X,'UM.DE.',11F8.4)
833 FORMAT('+',2X,'T. DT.',11F8.1)
834 FORMAT('+',2X,'T. AR',11F8.1)
835 FORMAT('+',2X,'H. ABS',11F8.4)
836 FORMAT('+',2X,'U. REL',11F8.4)
837 FORMAT('+',')
838 FORMAT(I3)
END
```



# APENDICE B

Programa para simulação da secagem e umidificação do milho em silo. -

```

DIMENSION F(11),H(11),T(11),A1(100),IC(100),WI(100),Q1(100),
1UG(100),TG(100),CP(100),3AP(100),CTE(12)
C ***** PARAMETROS DA EQUAÇÃO DO DIA TÍPICO
DATA P1,P2,P3,P4,P5,P6/21.59,.0145,5.7092,221.525,1.3070,53.111/
DATA P7,P8,P9,P10,P11,P12/19.82,6.4373,220.995,2.7404,67.636,
1.0120/
DATA P13,P14,P15,P16/3.1415927,180.0,15.0,30.0/
C ***** PARAMETROS DAS EQUAÇÕES DE SECAGEM E UMIDIFICAÇÃO
DATA P17,P18,P19,P20/.0821,.0137,.000131,.375/
DATA P21,P22,P23,P24/.0876,.625,.466,6894.8/
C ***** PARAMETROS DA EQ. DE AQUECIMENTO DO AR P/COLETOR
DATA P25,P26,P27/.04,1.04,5.76/
C ***** PARAM. EQ. CALOR LAT. VAPORIZ. UNIDADE DO GRAU
DATA P28,P29,P30,P31/587.723,.57,4.349,28.25/
C ***** PARAM. EQ. CALOR ESPECÍFICO DO GRAU
DATA P32,P33/.35,.851/
C ***** CONSTANTES FÍSICAS
DATA P34,P35,P36,P37,P38/.242,.45,584.1,93324.0,273.16/
C ***** VARIÁVEIS SOMATORIAS CUMULATIVAS
DATA S1,S2,S3,S4,S5,U9,W2,TW4/0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0/
C ***** PARAMETROS DA EQUAÇÃO DE UNIDADE DE EQUILÍBRIO
DATA Y1,Y2,Y3,Y4,Y5/.108154,-.377078E-1,.702264E-1,-.148616E-1,
1.315231E-1/
DATA Y6,Y7,Y8,Y9/-.502257E-1,.432168E-1,-.163228E-1,-154.553/
C ***** PARAM. EQ. PRESSÃO DE SATURAÇÃO
DATA Y10,Y11,Y12/.2210534739E3,-.2740552533E5,.975412937382/
DATA Y13,Y14,Y15/-.1462440044,.1255753189E-3,-.4830171032E-7/
DATA Y16,Y17/.4349028978E1,.3938107141E-2/
C ***** ENTRADA DOS DADOS VARIÁVEIS
WRITE (2,100)
WRITE (2,148)
READ (1,84)W0
WRITE (2,101)
WRITE (2,148)
READ (1,85)D2
WRITE (2,102)
WRITE (2,148)
READ (1,86)U0
WRITE (2,103)
WRITE (2,148)
READ (1,87)D3
WRITE (2,104)
WRITE (2,148)
READ (1,88)D4
WRITE (2,105)
WRITE (2,148)
READ (1,89)G0
WRITE (2,106)
WRITE (2,148)
READ (1,90)D5
WRITE (2,107)
WRITE (2,148)
READ (1,91)ID1,J
WRITE (2,108)
WRITE (2,148)
READ (1,92)ID6
WRITE (2,109)

```

```
WRITE (2,148)
READ (1,93)ID7
WRITE (2,110)
WRITE (2,148)
READ (1,94)D8
WRITE (2,111)
WRITE (2,148)
READ (1,95)X9
WRITE (2,112)
WRITE (2,148)
READ (1,96)V
WRITE (2,113)
WRITE (2,148)
READ (1,97)U5
WRITE (2,114)
WRITE (2,148)
READ (1,98)I3
WRITE (2,115)
WRITE (2,148)
READ (1,99)P1
```

C \*\*\*\*\* CALCULOS PRELIMINARES

```
A=D5*D5*P13/4.0
A=1.0
V1=A*V
```

C \*\*\*\*\* DEFINIÇÃO DOS CONTROLADORES DO PROGRAMA

```
X=1.0/FLOAT(ID7)
XN=FLOAT(ID7)*D2
N=IFIX(XN)
N2=N/10
K1=IFIX(D8/X9)
```

C \*\*\*\*\* DEFINIÇÃO DAS CONDIÇÕES INICIAIS

```
C=P32+P33*U0/(1.0+U0)
R=P36*(1.0+U0)
DO 590 J=1,N
A1(J)=FLOAT(J)*X
U0(J)=U0
T0(J)=00
IC(J)=2
WI(J)=0.0
Q1(J)=0.0
CP(J)=C
RAP(J)=R
```

590 CONTINUE

C \*\*\*\*\* CALCULO DAS CONSTANTES UTILIZADAS NO LOOP

```
CTE(1)=D8*P36
CTE(2)=A*X
CTE(3)=CTE(2)*P36
CTE(4)=A*P36*D2
CTE(5)=P36*X*A
CTE(6)=CTE(3)*D3
CTE(7)=CTE(1)*X
CTE(8)=P36*X
```

C \*\*\*\*\* IMPRESSAO DAS CONDIÇÕES DA SIMULAÇÃO

```
WRITE (6,116)
WRITE (6,117)
WRITE (6,118)D5
WRITE (6,119)D2
WRITE (6,120)V
WRITE (6,121)V1
```

```
WRITE (6,122)
WRITE (6,123)00
WRITE (6,124)G0
WRITE (6,125)F36
WRITE (6,126)
WRITE (6,127)X
WRITE (6,128)H
WRITE (6,129)D3
WRITE (6,130)D4
WRITE (6,131)
IF (IS-1)1020,1050,1020
1020 WRITE (6,132)
F2=F1*100.0
WRITE (6,133)F2
GO TO 1060
1050 WRITE (6,134)
1060 IF (D3)1090,1070,1090
1070 WRITE (6,135)
ICPR=1
GO TO 1110
1090 WRITE (6,136)
C ***** INICIO DO LOOP DE TEMPO
ICPR=1
1110 IF (W2-W0)1120,1115,3920
1115 W0=W2-D8
GO TO 3200
1120 W2=W2+D8
W3=0.0
IZ1=0
IZ=1
C ***** CALCULO DAS CONDIÇÕES AMBIENTAIS
IAMB=1
GO TO 3980
1130 T3=T0
C ***** GERENCIA DO PROCESSO
IF (IS-1)1200,1405,1200
1200 IF (F0-F1)1260,1260,1210
1210 GO TO (1240,1220),ICPR
1220 W2=W2-D8
W=W-D8
T0=T3-T2
F0=U0
ICPR=1
GO TO 3200
1230 W2=W2+D8
W=W+D8
1240 W3=W3+D8
IAMB=2
GO TO 3980
1250 GO TO 1200
1260 IF (J3)1405,1405,1270
1270 CONTINUE
C ***** CALCULO DA DETERIOÇÃO DURANTE REPOUSO
IW4=IFIX(W2)
DO 1350 I=1,N
IC(I)=2
WI(I)=0.0
1350 CONTINUE
IDET=1
U4=UG(N)
Q=TQ(N)
```

```

D9=W3
GO TO 4260
1410 Q1(N)=Q1(N)+Q2
1405 T2=0.0
ICPR=2
IF (D3)1430,1480,1430
C ***** CALCULO DO AUMENTO DA TEMP. DO AR P/COLETOR
1430 IF(W-8.0)1480,1480,1420
1420 IF(W-18.0)1440,1480,1480
1440 T2=(-F25*W*W+F26*W-F27)*D3
1480 T3=T0+T2
UR0=P0
C ***** FIM DA GERENCIA DO PROCESSO
C ***** AUMENTO DA TEMPERATURA DO AR PELO VENTILADOR
T4=T3+D4
C ***** CALCULO DA ENERGIA CEDIDA AO AR P/COLETOR E P/VENTILADOR
C5=P34+F35*H0
T1=T4+F38
R5=287.0*T1*(.6219+H0)/(.6219*P37)
R6=1.0/R5
XM=V1*3600.0*R6*D3
XM1=XM*C5
S1=S1+XM1*T2
S2=S2+XM1*D4
C ***** CALCULO DAS COND. DO AR NA ENTRADA DO SILO
PS=Y10*EXP((Y11+T1*(Y12+T1*(Y13+T1*(Y14+T1*Y15))))
1/(T1*(Y16-Y17*T1)))
F2=FV/PS
C ***** CALCULO DA VAZAO DO AR NA ENTRADA DO SILO (Kg/h.m2)
V2=XM/(D8*A)
C ***** CALCULO DAS CONSTANTES DO LOOP QUE DEPENDEM DA VAZAO MASSICA DO AR
UG=0.0
CTE(9)=F36*X/V2
CTE(10)=X/(V2*D8)
CTE(11)=V2*D8
CTE(12)=CTE(11)/CTE(8)
T5=T4
H1=H0
C *****
C ***** INICIO DO LOOP DE POSIÇÃO
C *****
DO 3080 I=1,N
Q3=0.0
R0=RAP(I)*CTE(10)
C4=CP(I)*R0
C6=P34+F35*H1
T9=(C6*T5+C4*TC(I))/(C6+C4)
T1=T9+F38
PS=Y10*EXP((Y11+T1*(Y12+T1*(Y13+T1*(Y14+T1*Y15))))
1/(T1*(Y16-Y17*T1)))
F4=FV/PS
L1=(F28-P29*T9)*(1+F30*EXP(-F31*UG(I)))
IF (F4-1.0)1900,1900,2650
1900 E4=(F4*(Y1+F4*(Y2+F4*(Y3)))*EXP((Y4+F4*(Y5+F4*(Y6+F4*(Y7+F4*(Y8
1))))*(T9+Y9))
E4=E4/(1.0-E4)
C ***** CONTROLA O TEMPO INDIVIDUAL DO PROCESSO
C ***** CALCULA A SECAOEM OU UMIDIFICAÇÃO DA CAMADA
IF (UG(I)-E4)2000,1960,2080
1960 U3=0.0
GO TO 2200
2000 IF=3
IF (IF-IC(I))2020,2040,2020

```

```

2020 WI(I)=D3
      IC(I)=IP
      GO TO 2050
2040 WI(I)=WI(I)+D3
2050 U1=UG(I)
      PSI=P3/P24
      P40=P23*F4
      P41=-P22*PSI**P40*F4*F4*F4
      DO 2056 K=1,K1
      U3=P41*(U1-E4)
      U1=U3*X9+U1
2056 CONTINUE
      U3=(U1-UG(I))/D3
      GO TO 2200
2080 IP=1
      IF (IP-IC(I))2095,2130,2095
2095 IC(I)=IP
      WI(I)=D3
      GO TO 2140
2130 WI(I)=WI(I)+D3
2140 XK=P17-P18*T9+P19*T9*T9
      XM5=P20+P21*ALOG(100.0*F4)
      XK1=XK*XM5
      XM6=XM5-1.0
      U1=UG(I)
      W1=WI(I)-D3
      DO 2184 K=1,K1
      W1=W1+X9
      U3=XK1*(U1-E4)*W1**XM6
      U1=U3*X9+U1
2184 CONTINUE
      U3=(U1-UG(I))/D3
2200 H2=H1-CTE(9)*U3
      UG(I)=U3*D8+UG(I)
C ***** CALCULO DA TEMP. FINAL DO AR E DO PRODUTO
C ***** APOS SECAGEM OU UMIDIFICAÇÃO
      RAP(I)=P35*(1+UG(I))
      CP(I)=P32+P33*UG(I)/(1.0+UG(I))
      R0=RAP(I)*CTE(10)
      C4=CP(I)*R0
      C6=P34+P35*H2
      Q3=U3*L1*CTE(7)
      G3=Q3/(RAP(I)*X*CP(I))
      Q4=T9+Q3
      G2=(C6*T9+C4*Q4)/(C6+C4)
      T6=G2
      TG(I)=Q2
      T1=T6+P38
      PS=Y10*EXP(((Y11+T1*(Y12+T1*(Y13+T1*(Y14+T1*Y15))))
      1/(T1*(Y16-Y17*T1)))
      FV=H2*P37/(.6219+H2)
      Q4=0.0
      F5=FV/PS
C ***** VERIFICA A UNIDADE RELATIVA QUE SAI O AR DA CAMADA
C ***** E DECIDE OS PROXIMOS CALCULOS
C ***** CALCULO DA CONDENSACAO POR SUPERSECAGEM
      IF(F5-1.0)2890,2890,2420
2420 H9=H2
      H3=H9
      H7=H2-H1

```

```

      YY=H7/10
2460 H8=H8-YY
C ***** CALCULA A TEMP. DO AR CORRESPONDENTE AO DECRESCIMO
C ***** DA UNIDADE ABSOLUTA (POR TENTATIVA)
      T8=(T6-T5)*(H8-H1)/H7+T5
      T1=T8+F38
      PS=Y10*EXP(((Y11+T1*(Y12+T1*(Y13+T1*(Y14+T1*Y15))))
1/(T1*(Y16-Y17*T1)))
      XF9=PS
      XF8=H2*F37/(.6219+H2)
      F9=XF8/XF9
      IF (F9-1.0)2540,2540,2460
2540 H2=H8
      U9=CTE(12)*(H9-H8)
      UG(I)=UG(I)+U9
      A9=U9*CTE(5)
      S3=S3+A9
      PV=XP8
C ***** CALCULE AS TEMPERATURAS APOS CONDENSACAO
      GO TO 2750
C ***** SIMULACAO DE CONDENSACAO POR RESFRIAMENTO
2650 H2=.6219*PS/(F37-PS)
      H9=H1
      H8=H2
      U9=CTE(12)*(H9-H8)
      UG(I)=UG(I)+U9
      A9=U9*CTE(5)
      S3=S3+A9
      PV=PS
      IC(I)=2
C ***** CALCULO DA TEMPERATURA FINAL DO AR E DO GRAO
C ***** APOS CONDENSACAO
2750 RAP(I)=F36*(1.0+UG(I))
      CP(I)=F32+F33*UG(I)/(1.0+UG(I))
      R0=RAP(I)*CTE(10)
      C4=CP(I)*R0
      C6=F34+F35*H2
      Q4=U9*CTE(6)*L1
      G3=Q4/(RAP(I)*X*CP(I))
      Q4=T9+G3
      G2=(C6*T9+C4*Q4)/(C6+C4)
      T6=Q2
      TG(I)=G2
      T1=T6+F38
      PS=Y10*EXP(((Y11+T1*(Y12+T1*(Y13+T1*(Y14+T1*Y15))))
1/(T1*(Y16-Y17*T1)))
      F5=Pv/PS
C ***** CALCULOS FINAIS DO LOOP
2890 S4=S4+Q3+Q4
      T5=T6
      H1=H2
      U6=U6+UG(I)
      IF (IZ-I)3030,2990,3030
2990 IZ1=IZ1+1
      T(IZ1)=T6
      H(IZ1)=H2
      F(IZ1)=F5
      IZ=IZ1*N2
3030 CONTINUE
C ***** FIM DO LOOP DE POSICAO

```

```

IDET=2
U4=UG(N)
G=TG(N)
D9=D8
GO TO 4260
3100 Q1(N)=Q1(N)+Q2
C ***** VERIFICA SE TERMINA OU CONTINUA A SIMULAÇÃO
      U6=U6/N
      IF (U6-U5)3130,3130,3160
3130 W0=W2-1.0
      GO TO 3200
3160 IF (W2-IW4)3170,3200,3200
3170 GO TO 1110
C ***** CALCULO DE VALORES A SEREM IMPRESSOS:
C ***** UNIDADE RETIRADA DOS GRAOS (Kg H2O)
3200 A3=P36*A*D2*(U0-U6)
C ***** ENERGIA NECESSARIA PARA O PROCESSO (Kcal/Kg H2O evap.)
      IF(U0-U6)3220,3240,3220
3220 E5=(S5-S4)/(P36*D2*(U0-U6))
C ***** ENERGIA DE AQUEC. DO VENTIL. (Kcal/Kg H2O evap.)
      E6=S2/A3
C ***** ENERGIA DO COLETOR (Kcal/Kg H2O evap.)
      E7=S1/A8
C ***** IMPRESSAO DOS RESULTADOS
3240 WRITE (6,138)W2,W,D1
      WRITE (6,139)W0,T0,F0
      WRITE (6,140)T2,U6,A3
      WRITE (6,141)E5,E6,E7
      WRITE (6,142)U9,Q1(N),F2
      WRITE (6,143)A1(1),(A1(K),K=N2,N,N2)
      WRITE (6,144)UG(1),(UG(K),K=N2,N,N2)
      WRITE (6,145)T(1),(T(K),K=2,11)
      WRITE (6,146)H(1),(H(K),K=2,11)
      WRITE (6,147)F(1),(F(K),K=2,11)
      WRITE (6,148)
      GO TO (1230,3910),ICPR
C ***** VOLTA AO INICIO DO LOOP DE TEMPO
3910 IW4=IW4+ID6
      GO TO 1110
3920 STOP
C ***** F O R M A T S
      84 FORMAT(F6.2)
      85 FORMAT(F5.2)
      86 FORMAT(F6.4)
      87 FORMAT(F4.1)
      88 FORMAT(F4.2)
      89 FORMAT(F4.1)
      90 FORMAT(F7.5)
      91 FORMAT(I2,F5.2)
      92 FORMAT(I2)
      93 FORMAT(I3)
      94 FORMAT(F5.3)
      95 FORMAT(F5.4)
      96 FORMAT(F4.2)
      97 FORMAT(F5.4)
      98 FORMAT(I1)
      99 FORMAT(F5.4)
100 FORMAT (5X,'TEMPO TOTAL DE SECAGEM:')
101 FORMAT (5X,'ALTURA DA CAMADA DE GRAOS:')
102 FORMAT (5X,'TEOR DE UNIDADE INICIAL DO GRAO:')
103 FORMAT (5X,'AUMENTO MAX. DA TEMP. PELO COLETOR:')
104 FORMAT (5X,'AUMENTO DA TEMP. PELO VENTILADOR:')

```

```

105 FORMAT (5X, 'TEMPERATURA INICIAL DO GRAO: ')
106 FORMAT (5X, 'DIAMETRO DO SILO: ')
107 FORMAT (5X, 'DIA E HORA DO INICIO DO PROCESSO: ')
108 FORMAT (5X, 'INTERVALO DE TEMPO PARA IMPRESSOES: ')
109 FORMAT (5X, 'NUMERO DE CAMADAS DE GRAO POR METRO: ')
110 FORMAT (5X, 'DELTA TEMPO: ')
111 FORMAT (5X, 'DELTA TEMPO PARA SOLUÇÃO EQ. DIFERENCIAL: ')
112 FORMAT (5X, 'VELOCIDADE DO AR NO SILO (m/s): ')
113 FORMAT (5X, 'UMIDADE MEDIA DO GRAO FINAL: ')
114 FORMAT (5X, 'GERENCIA DO PROCESSO (CONT=1;INT=2): ')
115 FORMAT (5X, 'UMIDADE RELATIVA CRITICA: ')
116 FORMAT (/ , 27X, 'SIMULAÇÃO DA SECAGEM DE MILHO EM SILO')
117 FORMAT (/ , 22X, 'CARACTERISTICAS DO SISTEMA:')
118 FORMAT ('/ ', 22X, 'DIAMETRO DO SILO (m).....', F9.2)
119 FORMAT ('+', 22X, 'ALTURA DA CAMADA DE GRAOS.....', F9.2)
120 FORMAT ('+', 22X, 'VELOCIDADE DO AR NO SILO (m/s).....', F9.4)
121 FORMAT ('+', 22X, 'VAZAO TOTAL DO AR (m3/s).....', F9.5)
122 FORMAT (/ , 22X, 'CARACTERISTICAS DO PRODUTO:')
123 FORMAT ('/ ', 22X, 'UMIDADE INICIAL (b.s., dec.).....', F9.4)
124 FORMAT ('+', 22X, 'TEMPERATURA INICIAL (OC).....', F9.1)
125 FORMAT ('+', 22X, 'DENSIDADE APARENTE (grao seco).....', F9.2)
126 FORMAT (/ , 22X, 'CARACTERISTICAS DA SIMULAÇÃO:')
127 FORMAT ('/ ', 22X, 'ESPESURA DA CAMADA (DELTA X, m).....', F9.2)
128 FORMAT ('+', 22X, 'NUMERO TOTAL DE CAMADAS.....', I9)
129 FORMAT ('+', 22X, 'AUMENTO MAX. DA TEMP. AR P/COLETOR.....', F9.1)
130 FORMAT ('+', 22X, 'AUMENTO DA TEMP. DO AR P/VENTILADOR.....', F9.1)
131 FORMAT (/ , 22X, 'GERENCIA DO PROCESSO:')
132 FORMAT ('/ ', 22X, 'FUNCIONAMENTO DO VENTILADOR SOMENTE QUANDO A')
133 FORMAT ('+', 22X, 'UMIDADE RELATIVA AMBIENTE EH MENOR QUE ', F9.1, '%
1')
134 FORMAT ('/ ', 22X, 'FUNCIONAMENTO CONTINUO DO VENTILADOR')
135 FORMAT ('+', 22X, 'UTILIZANDO AR NATURAL, SEM COLETOR SOLAR')
136 FORMAT ('+', 22X, 'UTILIZANDO COLETOR SOLAR P/AQUECIMENTO DO AR')
138 FORMAT ('O ', 7X, 'TEMPO = ', F13.2, 7X, 'HORA = ', F14.2, 7X, 'DATA = ', F14.
12)
139 FORMAT ('+', 7X, 'HAMB = ', F14.4, 7X, 'TAMB = ', F14.1, 7X, 'UR AMB = ', F12.
14)
140 FORMAT ('+', 7X, 'T NO COL. = ', F9.2, 7X, 'UM. MEDIA = ', F9.4, 7X, 'H2O E
1v. = ', F11.2)
141 FORMAT ('+', 7X, 'Kcal/Kg Ev = ', F8.2, 7X, 'En. V/Kg Ev = ', F7.1, 7X, 'En.
1 C/Kg Ev = ', F7.1)
142 FORMAT ('+', 7X, 'KgH2O Cd. = ', F9.2, 7X, 'I.Q. = ', F14.4, 7X, 'UR Entr.
1Silo= ', F7.4)
143 FORMAT ('/ ', 2X, 'FOS ', 11F8.2)
144 FORMAT ('+', 2X, 'UG ', 11F8.4)
145 FORMAT ('+', 2X, 'T.AR ', 11F8.1)
146 FORMAT ('+', 2X, 'H.AR ', 11F8.4)
147 FORMAT ('+', 2X, 'U.REL ', 11F8.4)
148 FORMAT ('+', ' ')
C ***** SUBROTINA QUE CALCULA A TEMPERATURA, UMIDADE RELATIVA
C ***** E ABSOLUTA DO DIA TIPICO, A HORA E A DATA
3980 W=N+D3
      D=FLOAT(ID1)+(W/24.0)
      ID1=IFIX(D)
      IF (W-24.0)3990,3985,3985
3985 W=N-24.0
3990 IF (ID1-30)4010,4010,4060
C ***** CALCULO DA TEMP. DO DIA TIPICO DO MES DE ABRIL
4010 TO=P1+P3*COS((P13/P14)*(P15*W-P4))+P5*COS((P13/P14)*(P15*W-P5))
      HO=P2
      D1=FLOAT(ID1)+.04

```



```
GO TO 4100
C ***** CALCULO DA TEMP. DO DIA TÍPICO DO MES DE MAIO
4060 T0=P7+P8*COS((P13/P14)*(P15*W-P9))+P10*COS((P13/P14)*(P16*W-P11))
H0=P12
D1=FLOAT(ID1)-30.0+.05
4100 T1=T0+P38
PS=Y10*EXP((Y11+T1*(Y12+T1*(Y13+T1*(Y14+T1*Y15))))
1/(T1*(Y16-Y17*T1))
PV=H0*P37/(.6219+H0)
FO=PV/PS
IF (FO-1.0)4190,4190,4150
4150 FO=1.0
H0=.6219*PS/(P37-PS)
PV=PS
4190 GO TO (1130,1250),IAMB
C ***** CALCULO DA DETERIORAÇÃO
4260 U=U4/(1.0+U4)
G7=U*1.8+32.0
IF (G7-60.0)4270,4270,4290
4270 X1=123.76*EXP(-.078*G7)
GO TO 4360
4290 IF (U-.19)4300,4300,4320
4300 X1=32.3*EXP(-.058*G7)
GO TO 4360
4320 IF (U-.28)4330,4330,4350
4330 X1=32.3*EXP(-.058*G7)+(U-.19)*EXP(.61*(G7-60.0)/60.0)
GO TO 4360
4350 X1=32.3*EXP(-.058*G7)+.09*EXP(.61*(G7-60.0)/60.0)
4360 X2=.103*(EXP(455.0/((U*100.0)**1.53))-.645*U+1.558)
W9=D9/(X1*X2)
Q2=.0383*(EXP(.006*W9)-1.0)+.00102*W9
GO TO (1410,3100),IDET
END
```

# APÊNDICE C

*Teste Estatístico de uma Média com Desvio-Padrão Desconhecido* - Na comprovação dos modelos matemáticos, utilizou-se o teste de hipóteses referentes à média de uma população, cujo desvio-padrão é desconhecido, conforme é apresentado por Costa Neto (13).

O desvio-padrão da população é estimado com base na amostra de  $n$  elementos, na qual se realiza o teste, extraídos dessa população.

A expressão utilizada é a seguinte:

$$t_{n-1} = \frac{\bar{X} - \mu_0}{S_x / \sqrt{n}}$$

onde a variável resultante,  $t_{n-1}$ , tem distribuição  $t$  de Student com  $n-1$  graus de liberdade, e  $S_x$ , o desvio-padrão, é a raiz quadrada da variância da amostra calculada com  $n-1$  no denominador;  $\bar{X}$  é a média da amostra;  $\mu_0$  uma constante é  $n$  o número de elementos da amostra.

A Tab. XXV resume o procedimento adotado.

TABELA XXV

Testes de uma média com desvio-padrão desconhecido

Hipóteses	Rejeita-se $H_0$ se
$H_0, \mu = \mu_0$	
$H_1, \mu < \mu_0$	$t_{n-1} < -t_{n-1,\alpha}$
$H_0, \mu = \mu_0$	
$H_1, \mu > \mu_0$	$t_{n-1} > t_{n-1,\alpha}$

A chamada hipótese nula ( $H_0$ ), que se testa, é de que a média  $\mu$  é igual a uma constante arbitrada  $\mu_0$ . A hipótese alternativa ( $H_1$ ) é a que se mantém quando rejeita-se  $H_0$ .

O teste é feito para a amostra da população dos valores absolutos dos erros percentuais relativos entre os valores experimen

tais e os simulados:

$$X_i = \frac{|E_i - S_i|}{E_i} 100$$

Os outros valores necessários são:

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i$$

$$S_x^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2$$

$$S_x = \sqrt{S_x^2}$$

O nível de significância do teste é  $\alpha$  e  $t_{\alpha, n-1}$  é o valor de tabela.

No teste de hipótese, para um determinado  $\alpha$ , busca-se o valor  $\mu_0$  que rejeita  $H_0$  e mantém  $H_1$  :

$$\mu_0 \leq \bar{X} + t_{\alpha, n-1} \frac{S_x}{\sqrt{n}} \quad \text{para } H_1: \mu < \mu_0$$

$$\mu_0 \geq \bar{X} - t_{\alpha, n-1} \frac{S_x}{\sqrt{n}} \quad \text{para } H_1: \mu > \mu_0$$

assim, obtém-se o limite superior e inferior, para um determinado  $\alpha$ , do valor do erro médio da população.

Exemplo: Teste dos limites superior e inferior do erro para os valores experimentais e simulados da Tab. XXVI, ao nível de significância de 0,05.

Da Tab. XXVI tem-se que:

$$n = 15$$

$$\bar{X} = 1,588$$

$$S_x^2 = 0,992$$

$$S_x = 0,996$$

$$t_{0,05;14} = 1,761 \quad (\text{valor de tabela da Distribuição de Student})$$

Limite superior para o erro médio:

$$\mu_0 = \bar{X} + t_{\alpha, n-1} \frac{S_x}{\sqrt{n}} = 2,04$$

Limite inferior para o erro médio:

$$\mu_0 = \bar{X} - t_{\alpha, n-1} \frac{S_x}{\sqrt{n}} = 1,14$$

Conclui-se que ao nível de 0,05 de significância, que o valor do erro não é maior do que 2,04 e não é menor do que 1,14, para a população representada pela amostra sob teste.

TABELA XXVI  
Valores experimentais e simulados  
para exemplo de aplicação  
do teste de hipótese

Valor experimental ( $E_i$ )	Valor simulado ( $S_i$ )	Valor absoluto do erro relativo percentual ( $X_i$ )
0,0670	0,0670	0,00
0,0780	0,0764	2,05
0,0846	0,0831	1,77
0,0915	0,0911	0,44
0,0956	0,0959	0,31
0,1033	0,1043	0,97
0,1116	0,1136	1,79
0,1175	0,1199	2,04
0,1246	0,1259	1,04
0,1337	0,1363	1,94
0,1375	0,1413	2,76
0,1390	0,1424	2,45
0,1422	0,1436	0,98
0,1489	0,1466	1,54
0,1549	0,1491	3,74

## APÊNDICE D

*Solução Numérica das Equações Diferenciais* - Carnahan ( 10 ) apresenta o método das diferenças finitas ascendentes, para solução numérica de equações diferenciais.

A equação básica é:

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{u_{i+1} - u_i}{\Delta x} + \epsilon(\Delta x)$$

onde  $u = u(x)$  e  $\epsilon(\Delta x)$ , é o resíduo da solução numérica que é função do  $\Delta x$ .

Como exemplo, para a solução da equação de secagem:

$$\frac{M - M_{eq}}{M_0 - M_{eq}} = e^{-kt^r}$$

na forma integrada, onde  $M = M(t)$  e para a sua correspondente equação diferencial:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = -kr(M - M_{eq}) t^{r-1}$$

a solução numérica da equação diferencial será:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \frac{M_{t+\Delta t} - M_t}{\Delta t} + \epsilon(\Delta t)$$

donde:

$$M_{t+\Delta t} = \frac{\partial M}{\partial t} \Big|_{t+\Delta t} \Delta t + M_t - \varepsilon(\Delta t)$$

sendo:

$$\frac{\partial M}{\partial t} \Big|_{t+\Delta t} = -kr(M_t - M_{eq}) (t+\Delta t)^{r-1}$$

Adotando este procedimento, avaliou-se o  $\varepsilon(\Delta t)$  na solução da equação 4.22, em função dos valores de  $\Delta t$ , para as seguintes condições:

$$M_0 = 0,2035$$

$$T = 30,0^\circ\text{C}$$

$$\phi = 45,0\%$$

$$M_{eq} = 0,1100$$

donde:

$$k = 0,2110$$

$$r = 0,7084636$$

A Tab XXVII apresenta os valores calculados, para 5 horas de processo, pela equação na forma integrada e, numericamente, pela equação diferencial.

TABELA XXVII

Valor do resíduo  $\epsilon(\Delta t)$ , em função do  $\Delta t$   
utilizado, na solução numérica da  
equação diferencial de secagem

	Valor calculado pela equação na forma integrada	Valor da solução numérica da equação diferencial				
		$\Delta t = 0,1$	$\Delta t = 0,05$	$\Delta t = 0,01$	$\Delta t = 0,005$	$\Delta t = 0,001$
$M$	0,1583	0,1591	0,1589	0,1585	0,1585	0,1584
$\epsilon(\Delta t)$	-	0,0008	0,0006	0,0002	0,0002	0,0001

## APÊNDICE E

*Tabelas de resultados experimentais e simulados da secagem e umidificação dos áutos de madeira -*



TABELA XXVIII

COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS EXPERIMENTAIS E SIMULADOS,  
REFERENTES A AMOSTRA E<sub>1</sub>, PARA O PROCESSO DE  
UMIDIFICAÇÃO NOS DUTOS DE MADEIRA.

TEMPO (horas)	Teor de Umidade			Temperatura do Ar			Umidade Absoluta do Ar			Umidade Relativa do Ar		
	Experimental	Simulado	Desvio Relativo (abs. %)	Experimental	Simulado	Desvio Relativo (abs. %)	Experimental	Simulado	Desvio Relativo (abs. %)	Experimental	Simulado	Desvio Relativo (abs. %)
6.0	0.0670	0.0670	0.00	26.9	25.6	1.49	0.0183	0.0184	0.55	0.7492	0.7678	2.48
20.0	0.0780	0.0764	2.05	26.4	25.8	2.27	0.0188	0.0183	2.66	0.7944	0.7994	0.63
31.0	0.0846	0.0831	1.77	25.9	25.8	0.39	0.0191	0.0187	2.09	0.8343	0.8187	1.87
46.0	0.0915	0.0911	0.44	26.7	25.8	3.37	0.0189	0.0186	1.59	0.7880	0.8123	3.08
56.0	0.0956	0.0959	0.31	25.3	25.8	1.98	0.0185	0.0185	0.00	0.8363	0.8092	3.24
76.0	0.1033	0.1043	0.97	26.8	26.0	2.99	0.0194	0.0191	1.55	0.7998	0.8231	2.91
101.5	0.1116	0.1136	1.79	25.7	26.1	1.56	0.0197	0.0196	0.51	0.8689	0.8399	3.44
122.5	0.1175	0.1199	2.04	26.9	26.3	2.23	0.0196	0.0195	0.51	0.8039	0.8266	2.82
144.5	0.1246	0.1259	1.04	25.1	25.2	0.40	0.0194	0.0191	1.55	0.8875	0.8657	2.46
190.0	0.1337	0.1363	1.94	24.8	25.0	0.81	0.0190	0.0189	0.53	0.8868	0.8692	1.98
223.0	0.1375	0.1413	2.76	24.1	24.4	1.24	0.0172	0.0173	0.58	0.8364	0.8220	1.72
237.0	0.1390	0.1424	2.45	24.6	24.7	0.41	0.0172	0.0174	1.16	0.8141	0.8132	0.11
247.0	0.1422	0.1436	0.98	24.9	25.2	1.20	0.0199	0.0197	1.01	0.9158	0.8930	2.49
265.5	0.1489	0.1466	1.54	26.3	26.3	0.00	0.0210	0.0209	0.48	0.8940	0.8856	0.94
284.5	0.1549	0.1491	3.73	25.7	25.9	0.78	-	-	-	-	-	-

TABELA XXIX

COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS EXPERIMENTAIS E SIMULADOS.  
REFERENTES À AMOSTRA B<sub>2</sub>, PARA O PROCESSO DE  
UMIDIFICAÇÃO NOS DUTOS DE MADEIRA.

TEMPO (horas)	Teor de Umidade			Temperatura do Ar			Umidade Absoluta do Ar			Umidade Relativa do Ar		
	Experimental	Simulado	Desvio Relativo (abs. %)	Experimental	Simulado	Desvio Relativo (abs. %)	Experimental	Simulado	Desvio Relativo (abs. %)	Experimental	Simulado	Desvio Relativo (abs. %)
0.0	0.0648	0.0661	2.01	28.1	30.3	7.83	0.0174	0.0170	2.30	0.6688	0.5710	14.62
20.0	0.0721	0.0734	1.80	27.2	29.6	8.82	0.0178	0.0171	3.93	0.7187	0.5986	16.71
31.0	0.0768	0.0786	2.34	26.7	29.1	8.99	0.0184	0.0176	4.35	0.7660	0.6343	17.19
45.0	0.0823	0.0850	3.28	26.7	28.6	7.12	0.0197	0.0176	10.66	0.8216	0.6518	20.67
55.0	0.0855	0.0888	3.86	25.9	28.3	9.27	0.0181	0.0175	3.31	0.7924	0.6616	16.51
76.0	0.0917	0.0957	4.36	27.8	28.2	2.17	0.0191	0.0182	4.71	0.7523	0.6942	7.72
101.5	0.0979	0.1034	5.62	26.0	28.0	7.69	0.0191	0.0189	1.05	0.8270	0.7355	12.27
122.5	0.1024	0.1089	6.35	27.2	27.8	2.21	0.0193	0.0188	2.59	0.7793	0.7325	6.01
144.5	0.1077	0.1141	5.94	26.1	26.9	3.07	0.0191	0.0186	2.62	0.8235	0.7614	7.54
190.0	0.1167	0.1239	6.17	25.2	26.1	3.57	0.0189	0.0185	2.12	0.8558	0.7921	7.44
223.0	0.1215	0.1290	6.17	24.2	25.2	4.13	0.0172	0.0170	1.16	0.8288	0.7745	6.55
237.0	0.1233	0.1306	5.92	24.7	25.2	2.02	0.0172	0.0171	0.58	0.8069	0.7805	3.27
247.0	0.1262	0.1325	4.83	25.6	25.9	1.17	0.0197	0.0193	2.03	0.8765	0.8380	4.39
265.5	0.1303	0.1355	3.99	26.7	27.0	1.12	0.0208	0.0206	0.96	0.8636	0.8383	2.93
284.5	0.1343	0.1380	2.76	26.1	26.6	1.92	-	-	-	-	-	-

T A B E L A     X X X

COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS EXPERIMENTAIS E SIMULADOS.  
REFERENTES A AMOSTRA B<sub>3</sub>, PARA O PROCESSO DE  
UMIDIFICAÇÃO DOS DUTOS DE MADEIRA.

TEMPO (horas)	Teor de Umidade			Temperatura do Ar			Umidade Absoluta do Ar			Umidade Relativa do Ar		
	Experimental	Simulado	Desvio Relativo (abs. %)	Experimental	Simulado	Desvio Relativo (abs. %)	Experimental	Simulado	Desvio Relativo (abs. %)	Experimental	Simulado	Desvio Relativo (abs. %)
6.0	0,0603	0,0714	3,03	34,2	31,4	8,19	0,0168	0,0159	5,36	0,4586	0,5067	10,49
20.0	0,0737	0,0760	3,12	27,5	32,5	18,18	0,0171	0,0162	5,26	0,6823	0,4833	29,17
31.0	0,0769	0,0795	3,38	28,1	31,7	12,81	0,0175	0,0167	4,57	0,6721	0,5214	22,42
46.0	0,0807	0,0840	4,09	26,9	30,9	14,87	-	-	-	-	-	-
56.0	0,0854	0,0869	4,20	26,7	30,5	14,23	0,0177	0,0168	5,08	0,7371	0,5623	23,71
76.0	0,0879	0,0922	4,89	28,3	30,0	6,01	0,0186	0,0176	5,38	0,7039	0,6035	14,26
101,5	0,0922	0,0984	6,72	26,6	29,6	11,28	0,0189	0,0183	3,17	0,7913	0,6416	18,92
122,5	0,0964	0,1029	6,74	27,8	29,2	5,04	0,0188	0,0184	2,13	0,7355	0,6584	10,48
144,5	0,1013	0,1072	5,82	26,9	28,4	5,58	0,0188	0,0181	3,72	0,7709	0,6822	11,51
190,0	0,1087	0,1155	6,26	25,9	27,3	5,41	0,0187	0,0180	3,74	0,8151	0,7255	10,99
213,0	0,1139	0,1203	6,46	24,9	26,1	4,82	-	-	-	-	-	-
237,0	0,1152	0,1221	5,99	25,3	25,9	2,37	0,0171	0,0169	1,17	0,7747	0,7378	4,76
247,0	0,1174	0,1237	5,37	26,2	26,6	1,53	0,0195	0,0189	3,03	0,8316	0,7875	5,27
265,5	0,1214	0,1268	4,45	27,2	27,7	1,84	0,0206	0,0202	1,94	0,8272	0,7893	4,58
281,5	0,1247	0,1292	3,61	26,7	27,5	3,00	-	-	-	-	-	-

TABELA XXXI

COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS EXPERIMENTAIS E SIMULADOS,  
REFERENTES À AMOSTRA C<sub>1</sub>, PARA O PROCESSO DE  
UMIDIFICAÇÃO DOS DUTOS DE MADEIRA.

TEMPO (horas)	Teor de Umidade			Temperatura do Ar			Umidade Absoluta do Ar			Umidade Relativa do Ar		
	Experimental	Simulado	Desvio Relativo (abs. %)	Experimental	Simulado	Desvio Relativo (abs. %)	Experimental	Simulado	Desvio Relativo (abs. %)	Experimental	Simulado	Desvio Relativo (abs. %)
6,0	0,0664	0,0664	0,00	26,4	25,8	2,27	0,0187	0,0186	0,53	0,7906	0,8094	2,38
30,0	0,0783	0,0761	2,81	26,7	25,3	5,24	0,0186	0,0185	0,54	0,7770	0,8356	7,54
31,0	0,0849	0,0829	2,36	25,9	25,3	2,32	0,0191	0,0189	1,05	0,8343	0,8510	2,00
46,0	0,0920	0,0912	0,87	25,8	25,4	1,55	0,0192	0,0188	2,08	0,8380	0,8398	0,21
56,0	0,0967	0,0962	0,52	25,3	25,4	0,40	0,0185	0,0186	0,54	0,8325	0,8340	0,18
76,0	0,1038	0,1049	1,06	26,4	25,7	2,65	0,0193	0,0192	0,52	0,8133	0,8442	3,80
101,5	0,1109	0,1144	3,16	25,8	25,9	0,39	0,0198	0,0197	0,51	0,8654	0,8568	0,99
122,5	0,1171	0,1209	3,25	26,7	26,1	2,25	0,0196	0,0195	0,51	0,8141	0,8411	3,32
144,5	0,1245	0,1276	2,01	25,0	25,0	0,00	0,0195	0,0192	1,54	0,8954	0,8818	1,52
190,0	0,1339	0,1375	2,69	24,8	24,8	0,00	0,0189	0,0189	0,00	0,8827	0,8801	0,29
223,0	0,1375	0,1424	2,56	24,2	24,4	0,83	0,0171	0,0173	1,17	0,8248	0,8276	0,34
237,0	0,1392	0,1435	3,09	24,6	24,7	0,41	0,0172	0,0174	1,16	0,8141	0,8161	0,25
247,0	0,1428	0,1448	1,40	24,9	25,1	0,80	0,0196	0,0197	0,51	0,9035	0,9005	0,33
265,5	0,1504	0,1477	1,80	26,2	26,2	0,00	0,0211	0,0209	0,95	0,8979	0,8914	0,72
284,5	0,1575	0,1503	4,57	25,7	25,8	0,39	-	-	-	-	-	-

TABELA XXXII

COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS EXPERIMENTAIS E SIMULADOS,  
REFERENTES À AMOSTRA C<sub>2</sub>, PARA O PROCESSO DE  
UMIDIFICAÇÃO DOS DUTOS DE MADEIRA.

TEMPO (horas)	Temperatura de Umidade			Temperatura do Ar			Umidade Absoluta do Ar			Umidade Relativa do Ar		
	Experimental	Simulado	Desvio Relativo (abs. %)	Experimental	Simulado	Desvio Relativo (abs. %)	Experimental	Simulado	Desvio Relativo (abs. %)	Experimental	Simulado	Desvio Relativo (abs. %)
6.0	0,0712	0,0717	0,70	27,6	28,2	2,17	0,0179	0,0178	0,56	0,7100	0,6784	4,45
20.0	0,0906	0,0796	1,24	26,7	27,3	2,25	0,0184	0,0179	2,72	0,7660	0,7177	6,31
41.0	0,0859	0,0853	0,70	26,4	27,0	2,27	0,0187	0,0183	2,14	0,7909	0,7444	5,88
46.0	0,0926	0,0921	0,54	26,4	26,9	1,89	0,0181	0,0182	4,71	0,8094	0,7486	7,51
56.0	0,0958	0,0962	0,42	25,8	26,7	3,49	0,0183	0,0181	1,09	0,8033	0,7511	6,50
76.0	0,1019	0,1036	1,67	27,1	26,8	1,11	0,0193	0,0188	2,59	0,7825	0,7730	1,21
101,5	0,1081	0,1118	3,42	26,3	26,8	1,90	0,0195	0,0193	1,03	0,8281	0,7956	3,92
122,5	0,1137	0,1174	3,25	26,9	26,8	0,37	0,0195	0,0192	1,54	0,8002	0,7911	1,14
144,5	0,1202	0,1227	2,08	25,7	25,9	0,78	0,0194	0,0189	2,58	0,8533	0,8358	3,22
190,0	0,1295	0,1326	2,39	24,9	25,4	2,01	0,0190	0,0187	1,58	0,8789	0,8412	4,29
223,0	0,1338	0,1374	2,92	24,3	24,7	1,65	0,0170	0,0172	1,18	0,8210	0,8066	1,75
237,0	0,1355	0,1387	2,36	24,3	24,9	2,47	0,0173	0,0173	0,00	0,8291	0,8039	3,04
247,0	0,1384	0,1401	1,23	25,3	25,4	0,40	0,0196	0,0195	0,51	0,8839	0,8730	1,23
265,5	0,1450	0,1431	1,31	26,4	26,5	0,38	0,0209	0,0208	0,48	0,8824	0,8699	1,42
284,5	0,1505	0,1455	3,52	23,6	26,1	1,95	-	-	-	-	-	-

TABELA XXXIII

COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS EXPERIMENTAIS E SIMULADOS,  
REFERENTES À AMOSTRA C<sub>3</sub>, PARA O PROCESSO DE  
UMIDIFICAÇÃO DOS DUTOS DE MADEIRA.

TEMPO (horas)	Teor de Umidade			Temperatura do Ar			Umidade Absoluta do Ar			Umidade Relativa do Ar		
	Experimental	Simulado	Desvio Relativo (abs. %)	Experimental	Simulado	Desvio Relativo (abs. %)	Experimental	Simulado	Desvio Relativo (abs. %)	Experimental	Simulado	Desvio Relativo (abs. %)
5,0	0,0730	0,0737	0,96	29,4	29,7	1,02	0,0177	0,0173	2,26	0,6291	0,6024	4,24
20,0	0,0808	0,0802	0,74	27,1	28,9	6,64	0,0182	0,0173	4,95	0,7426	0,6326	14,81
31,0	0,0853	0,0849	0,47	27,2	28,5	4,78	0,0181	0,0178	1,66	0,7327	0,6685	9,17
46,0	0,0913	0,0908	0,55	26,7	28,1	5,24	0,0193	0,0178	7,77	0,8029	0,6791	18,42
56,0	0,0943	0,0942	0,11	26,6	27,9	4,89	0,0180	0,0177	1,67	0,7548	0,6867	9,02
76,0	0,0998	0,1006	0,80	27,9	27,8	0,36	0,0193	0,0184	4,66	0,7465	0,7160	4,09
101,5	0,1056	0,1078	2,08	26,9	27,7	2,97	0,0192	0,0190	1,04	0,7889	0,7445	5,63
122,5	0,1106	0,1129	1,90	27,8	27,6	0,72	0,0188	0,0190	1,06	0,7355	0,7485	1,77
144,5	0,1169	0,1178	0,77	26,4	26,7	1,13	0,0194	0,0187	3,61	0,8207	0,7777	5,24
190,0	0,1263	0,1271	0,63	25,1	26,0	3,59	0,0192	0,0185	3,65	0,8754	0,8048	8,06
233,0	0,1308	0,1319	0,84	24,6	25,0	1,63	0,0170	0,0171	0,59	0,8063	0,7837	2,80
257,0	0,1331	0,1334	0,23	24,6	25,1	2,03	0,0172	0,0172	0,00	0,8141	0,7879	3,22
247,0	0,1360	0,1349	0,81	25,7	25,8	0,39	0,0106	0,0194	1,02	0,8649	0,8470	2,07
265,5	0,1419	0,1380	2,75	26,6	26,8	0,75	0,0208	0,0206	0,96	0,8711	0,8467	2,80
284,5	0,1466	0,1404	4,23	25,7	26,5	3,11	-	-	-	-	-	-

TABELA: XXXIV

COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS EXPERIMENTAIS E SIMULADOS,  
REFERENTES À AMOSTRA E<sub>1</sub>, PARA O PROCESSO DE SECAGEM  
DOS DUTOS DE MADEIRA

TEMPO (horas)	Teor de Umidade			Temperatura do Ar			Umidade Absoluta do Ar			Umidade Relativa do Ar		
	Experimental	Simulado	Desvio Relativo (abs. %)	Experimental	Simulado	Desvio Relativo (abs. %)	Experimental	Simulado	Desvio Relativo (abs. %)	Experimental	Simulado	Desvio Relativo (abs. %)
4,0	0,2569	0,2627	2,26	28,3	37,5	32,51	0,0186	0,0162	12,90	0,7039	0,3874	44,96
7,0	0,2418	0,2532	4,71	27,0	39,4	45,93	0,0173	0,0159	8,09	0,7070	0,3280	53,61
17,0	0,2022	0,2229	10,34	30,7	39,7	29,32	0,0165	0,0150	9,09	0,5452	0,3087	43,58
45,5	0,1289	0,1533	18,93	39,8	44,8	12,56	0,0164	0,0166	1,22	0,3296	0,2600	21,12
53,0	0,1148	0,1383	20,47	40,9	44,8	9,54	0,0161	0,0159	1,24	0,3031	0,2495	17,68
66,5	0,0976	0,1158	18,65	40,4	42,6	5,45	0,0167	0,0170	1,80	0,3224	0,2968	7,94
90,5	0,0831	0,0937	12,76	41,1	43,9	6,81	0,0166	0,0158	4,82	0,3100	0,2577	16,87
116,0	0,0703	0,0728	3,56	43,1	47,1	9,28	-	-	-	-	-	-
139,5	0,0617	0,0584	5,35	43,9	48,5	10,48	0,0188	0,0180	4,26	0,3022	0,2306	23,73
162,5	0,0559	0,0503	9,86	43,3	46,3	6,93	0,0178	0,0180	1,12	0,2959	0,2555	13,65
197,0	0,0527	0,0458	13,09	41,1	44,5	8,27	0,0172	0,0167	2,91	0,3208	0,2617	18,42
215,5	0,0515	0,0446	13,40	41,1	44,7	8,76	0,0169	0,0169	0,00	0,3154	0,2612	17,18
241,0	0,0513	0,0434	15,40	40,8	44,4	8,82	0,0165	0,0166	0,61	0,3129	0,2611	16,55
282,5	0,0494	0,0423	14,37	39,9	44,4	11,28	0,0159	0,0166	4,40	0,3161	0,2611	17,40

TABELA XXXV

COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS EXPERIMENTAIS E SIMULADOS,  
REFERENTES À AMOSTRA B<sub>2</sub>, PARA O PROCESSO DE SECAGEM  
DOS COTOS DE MADEIRA

TEMPO (horas)	Teor de Umidade			Temperatura do Ar			Umidade Absoluta do Ar			Umidade Relativa do Ar		
	Experimental	Simulado	Desvio Relativo (abs. %)	Experimental	Simulado	Desvio Relativo (abs. %)	Experimental	Simulado	Desvio Relativo (abs. %)	Experimental	Simulado	Desvio Relativo (abs. %)
4,0	0,3333	0,3394	1,83	23,1	23,8	3,03	0,0182	0,0196	7,69	0,9384	0,9731	3,70
7,0	0,5297	0,3371	2,24	24,7	25,9	4,86	0,0178	0,0203	14,04	0,8382	0,8972	7,04
17,0	0,3155	0,3187	1,01	26,3	28,5	8,37	0,0170	0,0194	14,12	0,7279	0,7357	1,07
45,5	0,2396	0,2613	0,65	30,7	34,6	12,70	0,0188	0,0205	9,04	0,6215	0,5511	11,33
53,0	0,2431	0,2459	1,15	29,7	35,6	19,87	0,0203	0,0196	3,45	0,7078	0,4993	29,46
68,5	0,2120	0,2173	2,50	31,9	36,1	13,17	0,0186	0,0197	5,91	0,5738	0,4861	15,28
90,5	0,1789	0,1832	2,40	36,8	37,7	2,45	0,0169	0,0182	7,69	0,3994	0,4107	2,83
116,0	0,1470	0,1484	0,95	34,7	41,6	19,88	-	-	-	-	-	-
139,5	0,1241	0,1206	2,82	39,4	44,1	11,93	0,0200	0,0196	2,00	0,4063	0,3147	22,54
162,5	0,1059	0,0993	6,23	38,1	43,9	15,22	0,0186	0,0188	1,08	0,4079	0,3050	25,23
197,0	0,0884	0,0785	11,20	38,9	43,1	10,80	0,0180	0,0172	4,44	0,3771	0,2908	22,89
215,5	0,0777	0,0708	8,88	38,9	43,5	11,83	0,0173	0,0172	0,58	0,3629	0,2845	21,60
241,0	0,0732	0,0625	14,62	39,1	43,6	11,51	0,0162	0,0169	4,32	0,3387	0,2770	18,22
282,5	0,0671	0,0537	19,97	39,2	44,0	15,18	0,0156	0,0168	7,69	0,3411	0,2704	20,73



TABELA XXXVI

COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS EXPERIMENTAIS E SIMULADOS,  
REFERENTES À AMOSTRA B<sub>3</sub>, PARA O PROCESSO DE SECAGEM  
DOS DUTOS DE MADEIRA

TEMPO (horas)	Temperatura da Madeira			Temperatura da Ar			Umidade Absoluta da Ar			Umidade Relativa da Ar		
	Experimental	Simulado	Desvio Relativo (abs: %)	Experimental	Simulado	Desvio Relativo (abs: %)	Experimental	Simulado	Desvio Relativo (abs: %)	Experimental	Simulado	Desvio Relativo (abs: %)
1.0	0,3156	0,3197	1,30	22,4	22,5	0,45	0,0179	0,0187	4,47	0,9596	1,0000	4,21
7.0	0,3145	0,3209	2,03	23,1	23,8	3,03	0,0182	0,0202	10,99	0,9427	1,0000	6,08
17.0	0,3127	0,3216	2,86	24,2	24,4	0,83	0,0194	0,0210	8,25	0,9365	0,9998	6,87
45.5	0,3059	0,3106	1,54	25,1	27,4	9,16	0,0206	0,0233	13,11	0,9367	0,9331	0,38
53.0	0,3024	0,3029	0,17	25,1	28,1	11,95	0,0215	0,0227	5,58	0,9787	0,8767	11,04
68.5	0,2942	0,2844	3,33	25,0	29,2	12,74	0,0211	0,0225	6,64	0,9173	0,8098	11,72
90.5	0,2788	0,2554	8,39	26,4	30,8	16,67	0,0202	0,0209	3,47	0,8514	0,6869	19,09
116.0	0,2543	0,2199	13,53	28,3	34,8	22,97	0,0200	0,0220	10,00	0,7555	0,5797	23,27
139.5	0,2281	0,1881	17,54	30,9	38,0	22,98	0,0209	0,0218	4,31	0,6703	0,4831	27,93
162.5	-	-	-	31,1	39,3	26,37	-	-	-	-	-	-
197.0	0,1625	0,1271	21,78	32,8	39,8	21,34	0,0193	0,0184	4,66	0,5658	0,3706	34,50
215.5	0,1333	0,1133	15,00	36,1	40,6	12,47	0,0181	0,0182	0,55	0,4412	0,3508	20,49
241.0	0,1206	0,0971	19,49	35,8	41,4	15,64	0,0170	0,0177	4,12	0,4227	0,3266	22,73
282.5	0,1045	0,0776	25,74	36,4	42,4	16,48	0,0163	0,0173	6,13	0,3938	0,3017	23,39

TABELA XXXVII

COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS EXPERIMENTAIS E SIMULADOS,  
REFERENTES À AMOSTRA C<sub>1</sub>, PARA O PROCESSO DE SECAGEM  
DOS DUTOS DE MADEIRA

TEMPO (horas)	Teor de Umidade			Temperatura do Ar			Umidade Absoluta do Ar			Umidade Relativa do Ar		
	Experimental	Simulado	Desvio Relativo (abs. %)	Experimental	Simulado	Desvio Relativo (abs. %)	Experimental	Simulado	Desvio Relativo (abs. %)	Experimental	Simulado	Desvio Relativo (abs. %)
4,0	0,2182	0,2483	4,24	34,6	39,2	13,29	0,0168	0,0155	7,74	0,4472	0,3417	23,59
7,0	0,2233	0,2383	6,72	35,5	41,6	17,18	0,0149	0,0153	2,68	0,3770	0,2744	27,21
17,0	0,1881	0,2077	10,42	36,6	41,1	12,30	0,0146	0,0144	1,57	0,3803	0,2739	21,81
45,5	0,1253	0,1395	11,33	44,2	45,9	3,85	0,0160	0,0162	1,25	0,2547	0,2394	6,01
53,0	0,1130	0,1254	10,97	43,9	45,6	3,87	0,0161	0,0155	3,73	0,2601	0,2322	10,73
68,5	0,1001	0,1047	4,60	41,6	43,1	3,61	0,0170	0,0169	0,59	0,3102	0,2846	8,25
90,5	0,0882	0,0850	3,63	42,0	44,4	5,71	0,0170	0,0157	7,63	0,3035	0,2477	18,39
116,0	0,0752	0,0662	11,97	44,4	47,5	6,98	-	-	-	-	-	-
139,5	0,0674	0,0535	20,62	44,7	48,8	9,17	0,0198	0,0179	9,60	0,3055	0,2255	26,19
162,5	0,0610	0,0468	23,28	43,9	46,4	5,69	0,0181	0,0178	1,66	0,2922	0,2535	13,24
197,0	0,0569	0,0437	23,20	42,2	44,5	5,45	0,0174	0,0167	4,02	0,3071	0,2608	15,08
215,5	0,0563	0,0430	23,62	42,8	44,7	4,34	0,0169	0,0168	0,59	0,3896	0,2605	10,05
241,0	0,0521	0,0423	23,25	41,9	44,4	5,97	0,0166	0,0166	0,00	0,2961	0,2604	12,06
262,5	0,0531	0,0417	21,47	42,2	44,4	5,21	0,0155	0,0166	7,10	0,2731	0,2609	4,47

TABELA XXXVIII

COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS EXPERIMENTAIS E SIMULADOS.  
REFERENTES A ANOSTRA C<sub>2</sub>, PARA O PROCESSO DE SECAÇÃO  
DOS DUTOS DE MADEIRA

TEMPO (horas)	Teor de Umidade			Temperatura do Ar			Umidade Absoluta do Ar			Umidade Relativa do Ar		
	Experimental	Simulado	Desvio Relativo (abs. %)	Experimental	Simulado	Desvio Relativo (abs. %)	Experimental	Simulado	Desvio Relativo (abs. %)	Experimental	Simulado	Desvio Relativo (abs. %)
4,0	0,3712	0,3770	1,56	27,6	27,1	1,81	0,0184	0,0189	2,72	0,7242	0,7826	8,06
7,0	0,3614	0,3698	2,32	29,1	30,0	3,09	0,0165	0,0192	16,36	0,5987	0,6707	12,03
17,0	0,3306	0,3392	2,60	28,9	32,2	11,32	0,0154	0,0180	16,88	0,5664	0,5550	2,01
45,5	0,2558	0,2585	1,06	37,6	38,4	2,13	0,0167	0,0191	14,37	0,3765	0,4157	10,41
55,0	0,2381	0,2388	0,29	36,4	39,2	7,69	0,0173	0,0182	5,20	0,4143	0,3812	7,99
68,5	0,2092	0,2044	2,29	35,6	38,8	8,99	0,0176	0,0185	5,11	0,4436	0,3950	10,96
90,5	0,1792	0,1662	7,25	36,8	40,4	9,78	0,0175	0,0172	1,71	0,4126	0,3361	18,54
116,0	0,1473	0,1290	12,42	39,7	44,1	11,08	-	-	-	-	-	-
139,5	0,1230	0,1015	17,64	42,3	46,2	9,22	0,0206	0,0188	8,74	0,3583	0,2709	24,42
162,5	0,1044	0,0822	21,25	41,4	45,2	9,18	0,0187	0,0183	2,14	0,3433	0,2772	19,25
197,0	0,0877	0,0657	25,09	40,8	43,9	7,60	0,0180	0,0169	6,11	0,3406	0,2738	19,61
215,5	0,0774	0,0601	22,35	40,9	44,2	8,07	0,0173	0,0170	1,73	0,3262	0,2706	17,04
241,0	0,0733	0,0542	26,06	40,6	44,1	8,62	0,0168	0,0167	0,60	0,3233	0,2673	17,32
282,5	0,0682	0,0483	29,18	40,0	44,3	10,75	0,0155	0,0167	7,74	0,3074	0,2646	13,92

TABELA XXXIX

COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS EXPERIMENTAIS E SIMULADOS,  
REFERENTES À AMOSTRA C<sub>3</sub>, PARA O PROCESSO DE SECAGEM  
DOS DUTOS DE MADEIRA

TEMPO (horas)	Teor de Umidade			Temperatura do Ar			Umidade Absoluta do Ar			Umidade Relativa do Ar		
	Experimental	Simulado	Desvio Relativo (abs. %)	Experimental	Simulado	Desvio Relativo (abs. %)	Experimental	Simulado	Desvio Relativo (abs. %)	Experimental	Simulado	Desvio Relativo (abs. %)
4,0	0,2741	0,2815	2,70	24,0	23,2	3,33	0,0183	0,0196	7,10	0,8933	1,0000	11,94
7,0	0,2708	0,2816	3,09	24,1	24,9	3,32	0,0167	0,0207	23,95	0,8124	0,9666	18,98
17,0	0,2599	0,2736	5,27	22,9	26,5	15,72	0,0178	0,0202	13,48	0,9294	0,8503	8,51
45,5	0,2179	0,2397	10,00	29,7	32,2	12,20	0,0177	0,0215	21,47	0,6561	0,6537	0,37
53,0	0,2070	0,2290	10,63	30,0	33,3	11,00	0,0183	0,0206	12,57	0,6295	0,5893	6,39
68,5	0,1893	0,2077	9,72	29,3	34,2	16,72	0,0181	0,0205	13,26	0,6502	0,5585	14,10
90,5	0,1683	0,1809	7,49	30,3	35,9	18,48	0,0178	0,0189	6,18	0,6038	0,4674	22,59
116,0	0,1446	0,1520	5,12	33,4	39,9	19,46	0,0179	0,0201	12,29	0,5061	0,4006	20,85
139,5	0,1249	0,1274	2,08	35,0	42,6	21,71	0,0198	0,0201	1,52	0,5126	0,3467	32,36
162,5	0,1103	0,1071	2,90	36,7	42,9	16,89	0,0191	0,0192	0,52	0,4523	0,3273	27,67
197,0	0,0952	0,0857	9,98	38,3	42,4	10,70	0,0175	0,0176	0,06	0,3786	0,3052	19,39
215,5	0,0866	0,0773	10,74	40,8	42,9	5,15	0,0171	0,0174	1,75	0,3252	0,2980	8,98
241,0	0,0810	0,0680	16,07	39,2	43,2	12,70	0,0162	0,0170	4,94	0,3521	0,2856	18,80
262,5	0,0761	0,0576	24,31	38,7	43,7	13,92	0,0153	0,0169	10,46	0,3255	0,2755	15,56

## APÊNDICE F

*Tabelas de resultados experimentais e simulados do teste de  
secagem do milho em silo -*

TABELA X L

Comparação entre os resultados experimentais e simulados, para a temperatura do ar ao longo do silo, referentes às condições operacionais do Teste de secagem.

TEMPO (horas)	POSIÇÃO AO LONGO DO SILO, A PARTIR DA BASE (m)																	
	0,20			0,40			0,60			0,80			1,00			1,20		
	Exp.*	Simulado	Desvio Relativo (abs., %)	Exp.*	Simulado	Desvio Relativo (abs., %)	Exp.*	Simulado	Desvio Relativo (abs., %)	Exp.*	Simulado	Desvio Relativo (abs., %)	Exp.*	Simulado	Desvio Relativo (abs., %)	Exp.*	Simulado	Desvio Relativo (abs., %)
1,0	27,3	25,9	5,13	23,8	23,5	1,28	22,5	23,7	0,89	23,0	22,5	2,17	23,2	22,5	3,02	22,8	22,6	0,88
2,0	27,0	27,3	2,15	24,9	25,1	0,80	22,3	23,6	3,51	22,5	22,9	1,78	21,5	22,0	3,67	21,6	22,5	4,17
3,0	27,5	27,9	1,45	24,7	26,0	5,26	22,5	24,4	8,44	21,5	23,4	8,84	21,0	22,0	9,05	20,8	22,7	9,13
4,0	29,5	28,3	4,07	26,8	26,6	0,75	24,5	25,1	2,45	22,8	23,9	4,82	22,2	23,2	4,50	21,5	22,9	6,51
6,0	29,6	28,7	3,04	28,0	27,3	2,50	26,1	26,0	0,38	24,2	24,8	2,48	22,9	23,9	4,37	21,7	23,3	7,37
8,0	30,3	29,0	4,29	29,2	27,9	4,45	27,6	26,7	3,26	25,6	25,6	0,00	24,3	24,6	1,23	22,5	23,9	6,22
10,0	30,1	29,2	2,99	29,1	28,2	3,00	28,1	27,2	3,20	26,6	26,2	1,50	25,2	25,3	0,40	23,0	24,4	6,09
12,0	30,4	29,3	3,62	29,8	28,8	4,36	28,9	27,6	4,50	27,7	26,7	3,61	26,4	25,8	2,27	24,2	25,0	3,31
14,0	30,3	29,4	2,97	29,5	28,7	2,71	29,0	28,0	3,45	28,0	27,1	3,21	27,0	26,3	2,59	25,1	25,5	1,59
16,0	30,6	29,5	3,39	30,0	28,9	3,67	29,3	28,2	3,75	28,5	27,5	3,51	27,5	26,7	2,91	25,9	25,9	0,00
18,0	30,4	29,6	2,63	30,0	29,1	3,00	29,3	28,5	2,73	28,6	27,8	2,80	27,9	27,1	2,87	26,5	26,3	0,75
20,0	30,2	29,6	1,99	30,0	29,2	2,67	29,4	28,6	2,72	28,7	28,0	2,44	28,0	27,4	2,14	27,0	26,7	1,11
22,0	29,7	29,7	0,00	29,5	29,3	0,68	29,2	28,8	1,37	28,7	28,3	1,39	28,1	27,7	1,42	-	-	-
24,0	30,5	29,7	2,62	30,4	29,4	3,29	30,1	28,9	3,09	29,6	28,5	3,72	29,0	27,9	3,79	-	-	-
26,0	30,8	29,8	3,25	30,6	29,4	3,92	30,4	29,1	4,28	30,0	28,6	4,67	29,7	28,1	5,39	-	-	-
28,0	30,4	29,8	1,97	30,3	29,5	2,64	30,2	29,2	3,31	30,0	28,8	4,00	29,7	28,3	4,21	-	-	-

\* Valores obtidos por Nutevminic (20)

TABELA XLI

COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS EXPERIMENTAIS E SIMULADOS, PARA  
O TIPO DE UNIDADE DO TILHO AO LONGO DO SILO, REFERENTE ÀS  
CONDIÇÕES OPERACIONAIS DO TESTE DE SECAGEM.

Distância (m)	Posição ao longo do silo, a partir da base (m)																				
	0,00			0,20			0,40			0,60			0,80			1,00			1,20		
	Exp.*	Simulado	Desvio Relativo (abs., %)	Exp.*	Simulado	Desvio Relativo (abs., %)	Exp.*	Simulado	Desvio Relativo (abs., %)	Exp.*	Simulado	Desvio Relativo (abs., %)	Exp.*	Simulado	Desvio Relativo (abs., %)	Exp.*	Simulado	Desvio Relativo (abs., %)	Exp.*	Simulado	Desvio Relativo (abs., %)
1,0	0,1853	0,1824	1,13	0,1989	0,1929	3,03	0,2018	0,1929	4,44	0,2002	0,2019	0,85	0,2041	0,2028	0,64	0,2005	0,2030	1,25	0,2053	0,2030	1,12
2,0	0,1721	0,1776	3,20	0,1904	0,1831	3,83	0,1915	0,1927	0,75	0,2050	0,1987	3,07	0,2067	0,2019	2,52	0,2004	0,2026	1,10	0,2061	0,2029	1,55
3,0	0,1661	0,1700	2,35	0,1790	0,1739	1,73	0,1949	0,1867	4,21	0,2051	0,1945	5,17	0,2055	0,1995	3,02	0,1999	0,2016	0,85	0,2046	0,2026	0,98
4,0	0,1577	0,1638	3,87	0,1724	0,1698	1,51	0,1920	0,1811	5,68	0,2010	0,1900	5,47	0,2042	0,1963	3,87	0,2020	0,2000	0,99	0,2036	0,2018	0,88
5,0	0,1450	0,1541	5,62	0,1581	0,1599	1,14	0,1772	0,1715	3,33	0,1905	0,1813	4,83	0,2027	0,1894	4,56	0,2015	0,1953	3,08	0,2022	0,1991	1,53
6,0	0,1125	0,1467	2,95	0,1521	0,1522	0,07	0,1672	0,1632	2,39	0,1858	0,1734	6,67	0,1997	0,1825	8,71	0,2030	0,1896	7,01	0,2057	0,1950	5,20
7,0	0,1361	0,1409	3,53	0,1438	0,1460	1,53	0,1583	0,1563	1,26	0,1727	0,1663	3,71	0,1896	0,1755	7,44	0,2008	0,1835	8,62	0,2019	0,1901	5,84
8,0	0,1288	0,1362	5,75	0,1351	0,1408	4,22	0,1467	0,1505	2,59	0,1610	0,1601	0,56	0,1789	0,1692	5,42	0,1937	0,1776	8,31	0,1973	0,1849	6,24
9,0	0,1257	0,1323	5,25	0,1300	0,1366	4,35	0,1404	0,1456	3,70	0,1521	0,1546	1,64	0,1704	0,1635	4,05	0,1823	0,1719	5,70	0,1914	0,1796	6,17
10,0	0,1229	0,1390	5,74	0,1267	0,1329	4,80	0,1361	0,1413	3,82	0,1476	0,1498	1,49	0,1609	0,1553	1,62	0,1718	0,1666	3,03	0,1808	0,1744	3,54
11,0	0,1190	0,1262	5,25	0,1242	0,1299	4,59	0,1312	0,1376	4,88	0,1409	0,1456	3,34	0,1527	0,1536	0,59	0,1650	0,1617	2,00	0,1755	0,1694	3,48
12,0	0,1215	0,1259	3,14	0,1223	0,1272	4,01	0,1297	0,1343	3,55	0,1361	0,1418	4,19	0,1490	0,1494	0,27	0,1581	0,1571	0,63	0,1666	0,1648	1,08
13,0	0,1189	0,1219	2,52	0,1220	0,1240	1,68	0,1286	0,1315	2,26	0,1353	0,1384	2,29	0,1449	0,1456	0,48	0,1532	0,1530	0,13	-	-	-
14,0	0,1167	0,1201	2,91	0,1201	0,1229	2,33	0,1251	0,1290	3,12	0,1317	0,1355	2,89	0,1399	0,1427	1,94	0,1457	0,1492	2,40	-	-	-
15,0	0,1140	0,1186	3,92	0,1178	0,1212	2,89	0,1229	0,1268	3,17	0,1285	0,1328	3,35	0,1345	0,1391	3,42	0,1411	0,1457	3,26	-	-	-
16,0	0,1155	0,1185	1,56	0,1178	0,1197	1,61	0,1213	0,1248	2,89	0,1266	0,1304	3,00	0,1326	0,1363	2,79	0,1373	0,1438	3,86	-	-	-

\* Valores obtidos por interpolação

## APÊNDICE G

### Resultado da SIMULAÇÃO A

#### SIMULAÇÃO DA SECAGEM DE MILHO EM SILO

##### CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA:

DIAMETRO DO SILO (m).....	1.13
ALTURA DA CAMADA DE GRAOS.....	3.00
VELOCIDADE DO AR NO SILO (m/s).....	.1000
VAZAO TOTAL DO AR (m <sup>3</sup> /s).....	.10000

##### CARACTERÍSTICAS DO PRODUTO:

UMIDADE INICIAL (b.s., dec.).....	.2500
TEMPERATURA INICIAL (°C).....	18.0
DENSIDADE APARENTE (grao seco).....	584.10

##### CARACTERÍSTICAS DA SIMULAÇÃO:

ESPESSURA DA CAMADA (DELTA X, m).....	.05
NUMERO TOTAL DE CAMADAS.....	60
AUMENTO MAX. DA TEMP. AR P/COLETOR.....	0.0
AUMENTO DA TEMP. DO AR P/VENTILADOR.....	1.0

##### GERENCIA DO PROCESSO:

FUNCIONAMENTO CONTINUO DO VENTILADOR  
UTILIZANDO AR NATURAL, SEM COLETOR SOLAR



TEMPO = .50  
HAMB = .0145  
T NO COL. = 0.00  
KCAL/KG EV = 579.14  
KGH20 Cd. = 0.00

HORA = 9.50  
TAMB = 21.9  
UM. MEDIA = .2502  
En. V/KG EV = -151.5  
I.Q. = .0001

DATA = 1.04  
UR AMB = .8109  
H2O EV. = -.32  
En. C/KG EV = 0.0  
UR Entr. Silo = .7631

POS	.05	.60	.90	1.20	1.50	1.80	2.10	2.40	2.70	3.00
UG	.2460	.2527	.2504	.2502	.2501	.2500	.2500	.2500	.2500	.2500
T.A.R	20.5	19.7	18.3	18.1	18.1	18.0	18.0	18.0	18.0	18.0
H.A.R	.0151	.0138	.0130	.0129	.0129	.0129	.0129	.0129	.0129	.0129
U.REL	.9196	.8819	.9111	.9141	.9153	.9158	.9161	.9162	.9162	.9162

TEMPO = 51.00  
HAMB = .0145  
T NO COL. = 0.00  
KCAL/KG EV = 576.62  
KGH20 Cd. = 0.00

HORA = 12.00  
TAMB = 26.6  
UM. MEDIA = .2415  
En. V/KG EV = 329.5  
I.Q. = .0121

DATA = 5.04  
UR AMB = .6090  
H2O EV. = 14.87  
En. C/KG EV = 0.0  
UR Entr. Silo = .5744

POS	.05	.60	.90	1.20	1.50	1.80	2.10	2.40	2.70	3.00
UG	.2230	.2234	.2494	.2526	.2527	.2526	.2524	.2523	.2521	.2519
T.A.R	25.7	23.3	21.5	21.3	21.2	21.0	20.8	20.6	20.4	20.2
H.A.R	.0152	.0159	.0162	.0160	.0158	.0156	.0154	.0152	.0150	.0147
U.REL	.6722	.8132	.9256	.9258	.9193	.9181	.9171	.9160	.9148	.9139



TEMPO =	201.00	HORA =	18.00	DATA =	17.04
HAMB =	.0145	TAMB =	24.6	UR AMB =	.6881
P 30 COL. =	0.00	UM, MEDIA =	.2095	H2O EV. =	71.05
Kcal/Kg EV =	578.68	En. V/Kg EV =	271.8	En. C/Kg EV =	0.0
KSH2O Cd. =	0.00	I.Q. =	.0487	UR Entr. Silo =	.6483

POS	.05	.30	.60	.90	1.20	1.50	1.80	2.10	2.40	2.70	3.00
UG	.1842	.1742	.1732	.1770	.1855	.1980	.2173	.2395	.2523	.2536	.2534
T.A.R	25.3	24.4	24.1	24.1	24.0	23.7	23.1	22.4	22.1	22.1	22.2
H.A.R	.0147	.0154	.0156	.0158	.0159	.0162	.0163	.0168	.0170	.0171	.0171
U.REL	.6723	.7370	.7640	.7696	.7824	.8075	.8506	.9054	.9332	.9353	.9352

TEMPO =	252.00	HORA =	21.00	DATA =	21.04
HAMB =	.0145	TAMB =	20.2	UR AMB =	.8986
P 30 COL. =	0.00	UM, MEDIA =	.1981	H2O EV. =	90.87
Kcal/Kg EV =	579.15	En. V/Kg EV =	266.5	En. C/Kg EV =	0.0
KSH2O Cd. =	0.00	I.Q. =	.0612	UR Entr. Silo =	.8449

POS	.05	.30	.60	.90	1.20	1.50	1.80	2.10	2.40	2.70	3.00
UG	.1845	.1728	.1740	.1743	.1759	.1813	.1933	.2084	.2304	.2489	.2528
T.A.R	22.0	22.7	22.8	22.9	23.0	23.0	22.9	22.5	21.9	21.4	21.4
H.A.R	.0142	.0141	.0142	.0144	.0145	.0147	.0149	.0153	.0157	.0161	.0162
U.REL	.7864	.7500	.7511	.7535	.7567	.7701	.7865	.8196	.8732	.9213	.9303



## APÊNDICE H

### *Resultado da SIMULAÇÃO B*

#### SIMULAÇÃO DA SECAGEM DE MILHO EM SILO

##### CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA:

DIAMETRO DO SILO (m).....	1.13
ALTURA DA CAMADA DE GRAOS.....	3.00
VELOCIDADE DO AR NO SILO (m/s).....	.1000
VAZAO TOTAL DO AR (m3/s).....	.10000

##### CARACTERÍSTICAS DO PRODUTO:

UMIDADE INICIAL (b.s.,dec.).....	.2500
TEMPERATURA INICIAL (GC).....	18.0
DENSIDADE APARENTE (grao seco).....	584.10

##### CARACTERÍSTICAS DA SIMULAÇÃO:

ESPESSURA DA CAMADA (DELTA X, m).....	.05
NUMERO TOTAL DE CAMADAS.....	60
AUMENTO MAX. DA TEMP. AR P/COLETOR.....	0.0
AUMENTO DA TEMP. DO AR P/VENTILADOR.....	1.0

##### GERENCIA DO PROCESSO:

FUNCIONAMENTO DO VENTILADOR SOMENTE QUANDO A  
UMIDADE RELATIVA AMBIENTE EH MENOR QUE 70.0%  
UTILIZANDO AR NATURAL, SEM COLETOR SOLAR

TEMPO = .50  
HAMB = .0145  
T NO COL. = 0.00  
Kcal/Kg Ev = 580.05  
Kgh20 Cd. = 0.00

HORA = 11.00  
TAMB = 24.9  
UM. MEDIA = .2502  
En. V/Kg Ev = -151.5  
I.Q. = .0001

DATA = 1.04  
UR AMB = .6757  
H2O Ev. = -.31  
En. C/Kg Ev = 0.0  
UR Entr. Silo = .6367

POS  
UG  
T.AR  
H.AR  
U.REL

.05  
.2423  
21.7  
.0157  
.8852

.30  
.2499  
19.7  
.0144  
.9220

.90  
.2499  
18.3  
.0131  
.9175

1.80  
.2500  
18.0  
.0129  
.9163

2.40  
.2500  
18.0  
.0129  
.9163

2.70  
.2500  
18.0  
.0129  
.9163

3.00  
.2500  
18.0  
.0129  
.9163

TEMPO = 51.00  
HAMB = .0145  
T NO COL. = 0.00  
Kcal/Kg Ev = 587.71  
Kgh20 Cd. = 0.00

HORA = 16.50  
TAMB = 26.9  
UM. MEDIA = .2265  
En. V/Kg Ev = 117.0  
I.Q. = .0443

DATA = 7.04  
UR AMB = .5999  
H2O Ev. = 41.16  
En. C/Kg Ev = 0.0  
UR Entr. Silo = .5658

POS  
UG  
T.AR  
H.AR  
U.REL

.05  
.1241  
28.1  
.0145  
.5607

.30  
.1327  
28.0  
.0147  
.5683

.90  
.2420  
22.7  
.0169  
.8976

1.80  
.2533  
22.2  
.0171  
.9356

2.40  
.2532  
22.1  
.0171  
.9357

2.70  
.2532  
22.1  
.0170  
.9355

3.00  
.2531  
22.1  
.0170  
.9352

TEMPO = 104.00  
HAMB = .0145  
T NO COL. = 0.00  
Kcal/Kg Ev = 589.89  
Kgh20 Cd. = 0.00

HORA = 17.00  
TAMB = 26.2  
UM. MEDIA = .1988  
En. V/Kg Ev = 109.5  
I.Q. = .0943

DATA = 14.04  
UR AMB = .6255  
H2O Ev. = 89.64  
En. C/Kg Ev = 0.0  
UR Entr. Silo = .5898

POS  
UG  
T.AR  
H.AR  
U.REL

.05  
.1238  
27.5  
.0145  
.5786

.30  
.1242  
28.1  
.0144  
.5564

.90  
.1325  
27.8  
.0147  
.5771

1.80  
.2532  
22.1  
.0170  
.9347

2.40  
.2533  
22.2  
.0171  
.9342

2.70  
.2533  
22.2  
.0171  
.9333

3.00  
.2533  
22.2  
.0170  
.9324

TEMPO =	150.00	HORA =	18.00	DATA =	20.04
HAMB =	.0145	TAMB =	23.8	UR AMB =	.6881
T NO COL. =	0.00	UN. MEDIA =	.1748	H2O EV. =	131.70
Kcal/Kg Ev =	590.60	En. V/Kg Ev =	107.5	En. C/Kg Ev =	0.0
KSH20 Cd. =	0.00	I.Q. =	.1371	UR Entr. Silo =	.6483
POS	.05				
UC	.1254	.30	1.20	1.80	2.40
T.A.R	26.2	.1243	.1266	.1698	.2531
H.A.R	.0143	27.9	27.9	25.9	22.0
U.REL	.6196	.0141	.0143	.0152	.0169
		.5664	.5599	.6682	.9340
			.5795	.8808	.9345
					3.00
					.2532
					22.1
					.0170
					.9346

TEMPO =	198.00	HORA =	13.50	DATA =	27.04
HAMB =	.0145	TAMB =	28.3	UR AMB =	.5536
T NO COL. =	0.00	UN. MEDIA =	.1499	H2O EV. =	175.49
Kcal/Kg Ev =	591.01	En. V/Kg Ev =	106.5	En. C/Kg Ev =	0.0
KSH20 Cd. =	0.00	I.Q. =	.1852	UR Entr. Silo =	.5225
POS	.05				
UC	.1254	.30	1.20	1.80	2.40
T.A.R	28.9	.1246	.1245	.1267	.1723
H.A.R	.0146	27.9	27.9	27.7	25.2
U.REL	.5356	.0147	.0145	.0145	.0154
		.5660	.5675	.5711	.7025
			.5671	.5947	.9066
					3.00
					.2529
					21.8
					.0167
					.9332

TEMPO =	259.00	HORA =	18.50	DATA =	4.05
HAMB =	.0120	TAMB =	20.5	UR AMB =	.6804
T NO COL. =	0.00	UN. MEDIA =	.1228	H2O EV. =	222.93
Kcal/Kg Ev =	593.85	En. V/Kg Ev =	109.7	En. C/Kg Ev =	0.0
KSH20 Cd. =	0.00	I.Q. =	.2146	UR Entr. Silo =	.6402
POS	.05				
UC	.1171	.30	1.20	1.80	2.40
T.A.R	23.6	.1175	.1206	.1226	.1245
H.A.R	.0118	25.7	26.5	26.2	26.1
U.REL	.5966	.0115	.0119	.0122	.0124
		.5135	.5059	.5258	.5390
			.5171	.5325	.5507
					3.00
					.1504
					24.9
					.0129
					.6011

## APÊNDICE I

### Resultado da SIMULAÇÃO C

#### SIMULAÇÃO DA SECAGEM DE MILHO EM SILO

##### CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA:

DIAMETRO DO SILO (m).....	1.13
ALTURA DA CAMADA DE GRAOS.....	3.00
VELOCIDADE DO AR NO SILO (m/s).....	.1000
VAZAO TOTAL DO AR (m3/s).....	.10000

##### CARACTERÍSTICAS DO PRODUTO:

UMIDADE INICIAL (b.s.,dec.).....	.2500
TEMPERATURA INICIAL (GC).....	18.0
DENSIDADE APARENTE (grao seco).....	584.10

##### CARACTERÍSTICAS DA SIMULAÇÃO:

ESPESSURA DA CAMADA (DELTA X, m).....	.05
NUMERO TOTAL DE CAMADAS.....	60
AUMENTO MAX. DA TEMP. AR P/COLETOR.....	5.0
AUMENTO DA TEMP. DO AR P/VENTILADOR.....	1.0

##### GERENCIA DO PROCESSO:

FUNCIONAMENTO DO VENTILADOR SOMENTE QUANDO A  
UMIDADE RELATIVA AMBIENTE EH MENOR QUE 70.0%  
UTILIZANDO COLETOR SOLAR P/AQUECIMENTO DO AR





TEMPO =	141.00	HORA =	16.50	DATA =	19.04
HAMB =	.0145	TAMB =	26.9	UR AMB =	.5999
T NO COL. =	2.55	UM. MEDIA =	.1500	H2O EV. =	175.21
Kcal/Kg EV =	597.93	En. V/Kg EV =	75.1	En. C/Kg EV =	272.8
KGH2O Cd. =	0.00	I.Q. =	.1435	UR Entr. Silo =	.4884
POS	.05	.90	1.20	1.80	2.40
UG	.1040	.1057	.1067	.1202	.2418
T.A.R	30.9	32.1	31.9	30.8	23.6
H.A.R	.0145	.0146	.0147	.0151	.0179
U.REL	.4763	.4503	.4578	.4961	.8946
					.9387
					3.00
					.2539
					23.0
					.0181
					.9372

TEMPO =	180.00	HORA =	18.00	DATA =	24.04
HAMB =	.0145	TAMB =	23.8	UR AMB =	.6381
T NO COL. =	0.00	UM. MEDIA =	.1215	H2O EV. =	225.10
Kcal/Kg EV =	598.48	En. V/Kg EV =	74.6	En. C/Kg EV =	268.9
KGH2O Cd. =	0.00	I.Q. =	.1824	UR Entr. Silo =	.6483
POS	.05	.90	1.20	1.80	2.40
UG	.1074	.1051	.1054	.1068	.1218
T.A.R	26.8	31.5	31.6	31.5	30.6
H.A.R	.0142	.0138	.0139	.0141	.0146
U.REL	.5906	.4371	.4391	.4490	.4865
					.6097
					3.00
					.2436
					23.4
					.0175
					.8910

TEMPO =	206.00	HORA =	14.00	DATA =	28.04
HAMB =	.0145	TAMB =	28.5	UR AMB =	.5472
T NO COL. =	4.80	UM. MEDIA =	.1089	H2O EV. =	247.22
Kcal/Kg EV =	599.61	En. V/Kg EV =	77.7	En. C/Kg EV =	281.7
KGH2O Cd. =	0.00	I.Q. =	.1939	UR Entr. Silo =	.3936
POS	.05	.90	1.20	1.80	2.40
UG	.1050	.1055	.1055	.1058	.1084
T.A.R	34.0	31.6	31.5	31.5	31.4
H.A.R	.0146	.0149	.0148	.0147	.0147
U.REL	.4029	.4698	.4710	.4665	.4698
					.4913
					3.00
					.1480
					28.5
					.0156
					.5874

## APÊNDICE J

### *Resultado da SIMULAÇÃO D*

#### SIMULAÇÃO DA SECAGEM DE MILHO EM SILO

##### CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA:

DIÂMETRO DO SILO (m).....	1.13
ALTURA DA CAMADA DE GRAOS.....	3.00
VELOCIDADE DO AR NO SILO (m/s).....	.1000
VAZÃO TOTAL DO AR (m <sup>3</sup> /s).....	.10000

##### CARACTERÍSTICAS DO PRODUTO:

UMIDADE INICIAL (b.s.,dec.).....	.2500
TEMPERATURA INICIAL (°C).....	16.0
DENSIDADE APARENTE (grao seco).....	584.10

##### CARACTERÍSTICAS DA SIMULAÇÃO:

ESPESURA DA CAMADA (DELTA X, m).....	.05
NÚMERO TOTAL DE CAMADAS.....	60
AUMENTO MAX. DA TEMP. AR P/COLETOR.....	0.0
AUMENTO DA TEMP. DO AR P/VENTILADOR.....	1.0

##### GERENCIA DO PROCESSO:

FUNIONAMENTO CONTINUO DO VENTILADOR UTILIZANDO  
ENERGIA ARMAZENADA QUANDO A UMIDADE RELATIVA

AMBIENTE FOR SUPERIOR A 70.0%. QUANDO INFERIOR  
OU IGUAL, UTILIZA AR NATURAL.

TEMPO = 51.00 HORA = 13.50 DATA = 3.04  
 RANB = .0145 TAMB = 26.3 UR ANB = .5536  
 T NO COL. = 0.00 UM. MEDIA = .2223 H2O EV. = 48.50  
 Kcal/Kg EV = 586.09 En. V/Kg EV = 99.4 C/Kg EV = 0.0  
 KWH2O Cd. = 0.00 I.Q. = .0123 UR Entr.Silo = .5225

POS .05 .30 .60 .90 1.20 1.50 1.80 2.10 2.40 2.70 3.00  
 UC .1224 .1389 .1663 .2095 .2473 .2529 .2525 .2522 .2520 .2518 .2516  
 T.AR 29.0 27.6 25.9 23.6 21.8 21.6 21.4 21.2 21.0 20.7 20.5  
 H.AR .0146 .0149 .0153 .0160 .0166 .0164 .0163 .0161 .0158 .0155 .0153  
 U.REL .5327 .5898 .6700 .8057 .9239 .9322 .9339 .9331 .9320 .9304 .9289

TEMPO = 102.00 HORA = 16.50 DATA = 5.04  
 RANB = .0145 TAMB = 26.9 UR ANB = .5999  
 T NO COL. = 0.00 UM. MEDIA = .1963 H2O EV. = 94.12  
 Kcal/Kg EV = 587.92 En. V/Kg EV = 102.6 C/Kg EV = 0.0  
 KWH2O Cd. = 0.00 I.Q. = .0249 UR Entr.Silo = .5658

POS .05 .30 .60 .90 1.20 1.50 1.80 2.10 2.40 2.70 3.00  
 UC .1267 .1266 .1323 .1443 .1634 .1998 .2381 .2527 .2533 .2531 .2530  
 T.AR 28.0 28.2 27.8 27.2 26.2 24.5 22.7 22.1 22.0 22.0 21.9  
 H.AR .0145 .0146 .0148 .0150 .0154 .0161 .0168 .0170 .0170 .0169 .0169  
 U.REL .5629 .5622 .5818 .6124 .6653 .7663 .8394 .9338 .9352 .9354 .9355

TEMPO = 150.00 HORA = 16.50 DATA = 7.04  
 RANB = .0145 TAMB = 26.9 UR ANB = .5999  
 T NO COL. = 0.00 UM. MEDIA = .1746 H2O EV. = 132.19  
 Kcal/Kg EV = 587.69 En. V/Kg EV = 107.6 C/Kg EV = 0.0  
 KWH2O Cd. = 0.00 I.Q. = .0366 UR Entr.Silo = .5658

POS .05 .30 .60 .90 1.20 1.50 1.80 2.10 2.40 2.70 3.00  
 UC .1327 .1325 .1321 .1325 .1383 .1506 .1696 .2003 .2360 .2523 .2532  
 T.AR 27.9 27.7 27.4 27.4 27.0 26.6 25.7 24.2 22.6 22.0 21.9  
 H.AR .0146 .0148 .0149 .0150 .0151 .0153 .0156 .0161 .0167 .0169 .0168  
 U.REL .5680 .5844 .5908 .6024 .6198 .6441 .6936 .7827 .8093 .9321 .9348

TEMPO = 213.00 HORA = 7.50 DATA = 10.04  
 HAMB = .0145 TAMB = 13.4 UR AMB = 1.0000  
 T NO COL. = 0.00 UM. MEDIA = .1493 H2O EV. = 175.63  
 Kcal/Kg EV = 587.39 En. V/Kg EV = 115.3 C/Kg EV = 0.0  
 KER20 Cd. = 0.00 I.Q. = .0499 UR Entr. Silo = .7362

FOS .05 .60 1.80 2.10 2.40 3.00  
 UC .1470 .1375 .1359 .1346 .1351 .1405 .1478 .1611 .1838 .2165  
 T.A.R 22.6 23.4 23.7 23.7 23.8 23.7 23.4 23.0 22.1 20.7  
 H.A.R .0129 .0123 .0122 .0121 .0120 .0120 .0121 .0124 .0128 .0134  
 U.REL .6944 .6398 .6125 .6041 .6000 .6048 .6189 .6487 .7075 .8050

TEMPO = 249.00 HORA = 19.50 DATA = 11.04  
 HAMB = .0145 TAMB = 22.2 UR AMB = .7969  
 T NO COL. = 0.00 UM. MEDIA = .1445 H2O EV. = 184.87  
 Kcal/Kg EV = 587.24 En. V/Kg EV = 120.1 C/Kg EV = 0.0  
 KER20 Cd. = 0.00 I.Q. = .0521 UR Entr. Silo = .7679

FOS .05 .60 1.30 2.10 2.40 3.00  
 UC .1490 .1413 .1402 .1390 .1378 .1375 .1404 .1477 .1586 .1774  
 T.A.R 22.7 24.0 24.9 25.2 25.5 25.7 25.8 25.7 25.5 24.7  
 H.A.R .0132 .0130 .0132 .0133 .0135 .0137 .0139 .0141 .0144 .0148  
 U.REL .7050 .6352 .6156 .6134 .6096 .6076 .6120 .6256 .6465 .6963

TEMPO = 303.00 HORA = 1.50 DATA = 14.04  
 HAMB = .0136 TAMB = 17.5 UR AMB = 1.0000  
 T NO COL. = 0.00 UM. MEDIA = .1437 H2O EV. = 186.32  
 Kcal/Kg EV = 586.99 En. V/Kg EV = 134.8 C/Kg EV = 0.0  
 KER20 Cd. = 0.00 I.Q. = .0527 UR Entr. Silo = .6519

FOS .05 .60 1.30 2.10 2.40 3.00  
 UC .1505 .1455 .1444 .1432 .1420 .1408 .1397 .1395 .1422 .1498  
 T.A.R 23.4 23.5 23.9 24.1 24.2 24.3 24.4 24.5 24.4 24.2  
 H.A.R .0130 .0131 .0131 .0131 .0131 .0131 .0131 .0131 .0131 .0132  
 U.REL .6649 .6625 .6471 .6426 .6379 .6329 .6282 .6261 .6298 .6426

## APÊNDICE K

### *Resultado da SIMULAÇÃO E*

#### SIMULAÇÃO DA SECAGEM DE MILHO EM SILO

##### CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA:

DIÂMETRO DO SILO (m).....	1.13
ALTURA DA CAMADA DE GRãos.....	3.00
VELOCIDADE DO AR NO SILO (m/s).....	.1000
VAZÃO TOTAL DO AR (m³/s).....	.10000

##### CARACTERÍSTICAS DO PRODUTO:

UMIDADE INICIAL (b.s., dec.).....	.2500
TEMPERATURA INICIAL (°C).....	18.0
DENSIDADE APARENTE (grão seco).....	504.10

##### CARACTERÍSTICAS DA SIMULAÇÃO:

ESPESSURA DA CAMADA (DELTA X, m).....	.05
NÚMERO TOTAL DE CAMADAS.....	60
AUMENTO MAX. DA TEMP. AR P/COLETOR.....	5.0
AUMENTO DA TEMP. DO AR P/VENTILADOR.....	1.0

##### GERÊNCIA DO PROCESSO:

FUNCIONAMENTO CONTÍNUO DO VENTILADOR UTILIZANDO SEMPRE O AR DE SAÍDA DO ARMAZENADOR DE ENERGIA. ESTE, POR SUA VEZ, UTILIZA O COLETOR SOLAR PARA SUA REGENERAÇÃO DURANTE O DIA.

TEUPO = 51.00  
 RAIB = .0145  
 T NO COL. = 4.95  
 kcal/kg Ev = 586.64  
 KGH2O Cd. = 0.00

HORA =  
 TAMB =  
 UH. MEDIA =  
 En. V/KG Ev =  
 I.Q. =

DATA =  
 UR AMB =  
 H2O EV. =  
 En. C/KG Ev =  
 UR Entr. Silo =

POS .05  
 UG .1222  
 T.AR 26.6  
 H.AR .0132  
 U.REL .5566

1.20  
 .90  
 .1863  
 23.6  
 .0135  
 .7023

1.50  
 .2502  
 20.2  
 .0150  
 .9249

2.10  
 .2514  
 20.0  
 .0148  
 .9255

2.70  
 .2515  
 19.9  
 .0146  
 .9225

3.00  
 .2515  
 19.8  
 .0145  
 .9220

TEUPO = 102.00  
 RAIB = .0145  
 T NO COL. = 2.55  
 kcal/kg Ev = 588.33  
 KGH2O Cd. = 0.00

HORA =  
 TAMB =  
 UH. MEDIA =  
 En. V/KG Ev =  
 I.Q. =

DATA =  
 UR AMB =  
 H2O EV. =  
 En. C/KG Ev =  
 UR Entr. Silo =

POS .05  
 UG .1323  
 T.AR 23.9  
 H.AR .0144  
 U.REL .5298

1.20  
 .90  
 .1312  
 27.4  
 .0144  
 .5700

1.50  
 .1673  
 25.2  
 .0149  
 .7963

2.10  
 .2428  
 21.6  
 .0160  
 .9073

2.70  
 .2523  
 21.0  
 .0158  
 .9303

3.00  
 .2521  
 20.9  
 .0157  
 .9303

TEUPO = 150.00  
 RAIB = .0145  
 T NO COL. = 2.55  
 kcal/kg Ev = 588.21  
 KGH2O Cd. = 0.00

HORA =  
 TAMB =  
 UH. MEDIA =  
 En. V/KG Ev =  
 I.Q. =

DATA =  
 UR AMB =  
 H2O EV. =  
 En. C/KG Ev =  
 UR Entr. Silo =

POS .05  
 UG .1433  
 T.AR 27.7  
 H.AR .0148  
 U.REL .5640

1.20  
 .90  
 .1243  
 27.5  
 .0144  
 .5755

1.50  
 .1338  
 26.8  
 .0143  
 .6285

2.10  
 .1673  
 24.9  
 .0147  
 .6657

2.70  
 .2365  
 21.6  
 .0157  
 .8916

3.00  
 .2518  
 21.0  
 .0158  
 .9263

TEUPO = 168.00 HORA = 10.50  
 HAIB = .0145 TAIB = 23.9  
 T NO COL. = 3.75 UI. MEDIA = 1498  
 Keal/Kg Ev = 588.71 En. V/Kg Ev = 90.4  
 KJH2O Cd. = 0.00 I.Q. = .0424

POS .05 1.00 2.40 3.00  
 UG .1435 .1255 .1377 .1732  
 T.AR 22.9 24.9 24.8 23.1  
 H.AR .0130 .0122 .0121 .0128  
 U.REL .6059 .5683 .5725 .6651

TEUPO = 201.00 DATA = 9.04  
 HAIB = .0145 UR AIB = .7969  
 T NO COL. = 0.00 H2O Ev. = 190.39  
 Keal/Kg Ev = 587.98 En. C/Kg Ev = 146.8  
 KJH2O Cd. = 0.00 UR Entr.Silo = .4971

POS .05 1.80 2.40 3.00  
 UG .1439 .1316 .1376 .1400  
 T.AR 29.5 27.6 27.3 25.7  
 H.AR .0147 .0151 .0151 .0153  
 U.REL .5235 .6167 .5979 .6110

TEUPO = 252.00 DATA = 11.04  
 HAIB = .0145 UR AIB = .9737  
 T NO COL. = 0.00 H2O Ev. = 198.20  
 Keal/Kg Ev = 568.03 En. C/Kg Ev = 173.1  
 KJH2O Cd. = 0.00 UR Entr.Silo = .5234

POS .05 1.80 2.40 3.00  
 UG .1434 .1321 .1319 .1346  
 T.AR 28.2 27.3 27.4 27.3  
 H.AR .0141 .0149 .0149 .0150  
 U.REL .5431 .6029 .6006 .6068