

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ALIMENTOS E AGRÍCOLA

CONSTRUÇÃO E AVALIAÇÃO DE UM COLETOR
ARMAZENADOR DE ENERGIA SOLAR, NÃO
CONVENCIONAL, PARA AQUECIMENTO DE AR
NA SECAGEM DE PRODUTOS AGRÍCOLAS.

LUIZ ALBERTO DOS SANTOS

ORIENTADOR

PROF. DR. JORGE E. QUINTERO PINTO

Tese Apresentada à Faculdade de Engenharia de Alimentos e Agrícola
da Universidade Estadual de Campinas, para Obtenção do Título
de Mestre em Engenharia de Alimentos.

1980

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL

Classif. <u>T</u>
Autor <u>Sa 59 e</u>
V. _____ Ex. _____
Ex. _____
Tombo BC/ <u>3305</u>

CM-00035031-1

Aos meus pais, testemunhas de todos os dias ...

dedico.

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Dr. Gonzalo Roa, pela oportunidade que me concedeu de trabalhar consigo durante dois anos e meio; período no qual norteou-me de forma segura, foi amigo e conselheiro nos momentos em que optar era muito difícil.

Ao Professor Luiz Gabriel Villa, grande colaborador e in-centivador deste trabalho e, sobretudo, um amigo muito humano.

Ao Professor Dr. Isaias de Carvalho Macedo, pelo apoio, colaboração no desenvolvimento matemático do coletor solar e pelos valiosos ensinamentos.

Ao Professor Dr. Jorge E. Quintero Pinto, pelas sugestões valiosas que vieram enriquecer o trabalho.

Ao Mestre José W. M. Bassani, pelas discussões e sugestões na parte de programação.

À Senhorita Regina C. Xavier, pela colaboração em diversas partes do texto e, mais ainda, pela presença.

À Professora Vilma A. Frisso, pela correção do texto.

À Senhora Vera M. de Q. Moura, pela paciência durante a execução dos trabalhos de datilografia.

Aos técnicos Dagoberto F. Júnior e Dario B. de Oliveira, pelo auxílio na realização dos trabalhos experimentais.

Aos meus colegas do Grupo de Secagem da UNICAMP, pelas dis-cussões do dia-a-dia, nas quais muito aprendi.

Ao Grupo de Energia da UNICAMP, na pessoa dos Professores J. A. Meyer, J. C. Macedo e M. Zwanziger, pelo auxílio financeiro no início do trabalho e pelo apoio durante toda sua execução.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo - FAPESP, pela ajuda financeira concedida durante dois anos.

À Faculdade de Engenharia de Alimentos e Agrícola da UNICAMP, particularmente ao Departamento de Engenharia Agrícola, pelas facilidades oferecidas à execução do trabalho.

À Cooperativa Central Agropecuária Campinas, pelo empréstimo da soja usada nos experimentos de secagem.

À Kepler, Weber S. A., pela doação dos silos empregados nas experiências de secagem.

Aos meus pais pelo auxílio e apoio que têm me dado.

À Deus pela oportunidade que nos dá de aproximarmos de Si pela simples observação da natureza.

LISTAGEM DE SIMBOLOS

- A = Área superficial da partícula, m^2
 A_c = Área coletora de energia solar, m^2
 A_n = Amplitude da curva de simulação da radiação solar, $watt/m^2$
 A_p = Relação entre a área de pedra e tijolos e a área do coletor solar, adm
 A' = Constante
 B' = Constante
 D = Coeficiente de difusão, m^2/h
 D_{ap} = Difusividade térmica aparente do conjunto pedra-ar, m^2/s
 D_h = Diâmetro hidráulico do duto de ar, m
 F_R = Fator de perda de calor do coletor solar, adm
 G_a = Fluxo mássico de ar, kg/m^2s
 H = Radiação incidente, $watt/m^2$
 K = Constante de secagem, hr^{-1}
 K_{ap} = Condutividade térmica aparente do conjunto constituído por pedra e ar intersticial, $watt/m\ ^\circ C$
 K_1 = Condutividade térmica do isolamento, $watt/m\ ^\circ C$
 L = Comprimento do coletor armazenador solar, m
 M = Umidade do produto, base seca, decimal
 Meq = Umidade de equilíbrio, base seca, decimal
 MR = Relação de umidades, adm
 M_0 = Umidade inicial do produto, base seca, decimal
 P = Perímetro do coletor plano, m
 P_d = Perímetro do duto de ar, m
 Q_a = Energia armazenada na unidade de tempo, J/s
 Q_u = Energia perdida ao ambiente na unidade de tempo, J/s

- Q_u = Energia útil fornecida ao fluido na unidade de tempo, J/s
 R = Razão entre a radiação total que incide sobre uma superfície inclinada e a que incide sobre uma superfície horizontal, adm
 Re_y = Número de Reynolds, adm
 R_0 = Constante universal dos gases, 8,31 J/k.mol
 R_1 = Resistência que o isolamento oferece ao fluxo de calor $\frac{m^{\circ}C}{watt}$
 R_2 = Resistência associada à radiação e convecção do fundo do coletor ao ambiente, $\frac{m^{\circ}C}{watt}$
 R_3 = Resistência associada à radiação da placa e convecção entre placa e cobertura $\frac{m^{\circ}C}{watt}$
 R_4 = Resistência associada à convecção devido à ação do vento sobre a cobertura e radiação da cobertura, $\frac{m^{\circ}C}{watt}$
 S = Área da secção transversal do silo, m^2
 S_d = Área da secção transversal do duto de ar, m^2
 T = Temperatura do ar, $^{\circ}C$
 T_c = Temperatura da cobertura, $^{\circ}C$
 $T_{c\acute{e}u}$ = Temperatura do céu, $^{\circ}C$
 T_e = Temperatura de entrada do fluido no coletor solar, $^{\circ}C$
 T_f = Temperatura no fundo do coletor, $^{\circ}C$
 T_{∞} = Temperatura ambiente, $^{\circ}C$
 T_0 = Temperatura inicial do ar, $^{\circ}C$
 T_{pl} = Temperatura da placa, $^{\circ}C$
 \bar{T} = Valor médio entre a temperatura da placa e da cobertura, $^{\circ}C$
 $\bar{T}_{ambiente}$ = Temperatura média do ambiente, $^{\circ}C$
 $\bar{T}_{saída}$ = Temperatura média do ar na saída do coletor, $^{\circ}C$

- \hat{T} = Valor experimental da temperatura do ar, $^{\circ}\text{C}$
- U = Coeficiente global de transferência de calor, entre a pedra e ar, $\text{watt/m}^2\text{ }^{\circ}\text{C}$
- U_1 = Coeficiente de perda de calor através do isolamento, $\text{watt/m}^2\text{ }^{\circ}\text{C}$
- U_k = Temperatura inicial da pedra no experimento k , $k = 4-7$, $^{\circ}\text{C}$
- U_l = Coeficiente de perda de calor pelas laterais, $\text{watt/m}^2\text{ }^{\circ}\text{C}$
- U_p = Coeficiente global de perda de calor no coletor solar plano, $\text{watt/m}^2\text{ }^{\circ}\text{C}$
- U_i = Coeficiente de perda de calor entre a cobertura de plástico e o ambiente, $\text{watt/m}^2\text{ }^{\circ}\text{C}$
- U_3 = Massa de pedra por unidade de área de coletor, kg/m^2
- V = Volume da partícula, m^3
- W = Umidade absoluta do ar, $\text{kg vapor/kg ar seco}$
- W_0 = Umidade absoluta inicial do ar, $\text{kg vapor/kg ar seco}$
- a = Largura do coletor armazenador, m
- a_s = Área superficial da partícula por unidade de volume do leito, m^2/m^3
- $a_1 \dots a_9$ = Constantes das equações de umidade de equilíbrio (eq. 16 a 19)
- c_a = Calor específico do ar seco, $\text{J/kg }^{\circ}\text{C}$
- c_p = Calor específico do produto, $\text{J/kg }^{\circ}\text{C}$
- c_v = Calor específico do vapor d'água, $\text{J/kg }^{\circ}\text{C}$
- c_w = Calor específico da água líquida, $\text{J/kg }^{\circ}\text{C}$
- d_e = diâmetro equivalente médio da partícula, m
- h = Coeficiente de transferência de calor por unidade de volume, $\text{watt/m}^3\text{ }^{\circ}\text{C}$

- h_{fg} = Calor latente de vaporização da água, J/kg
 h_i = Altura da camada de isolamento, m
 $h_{p\ell-c}$ = Coeficiente de transferência de calor, por convecção, entre placa e cobertura, watt/m²°C
 h_{rc} = Coeficiente de transferência de calor, por radiação, da cobertura, watt/m²°C
 h_{rp} = Coeficiente de transferência de calor, por radiação, da placa absorvedora, watt/m²°C
 h_v = Coeficiente de transferência de calor, por convecção, do vento sobre a cobertura, watt/m²°C
 h' = Coeficiente de transferência de calor, por convecção, watt/m²°C
 h'_d = Coeficiente de transferência de massa, por convecção, kg/m²h
 ℓ = Distância entre a placa e a cobertura, m
 m = Parâmetro da equação de camada delgada
 \dot{m} = Vazão de ar, kg/s
 \dot{m}_s = Vazão mínima de ar na secagem, m³/ton
 n = Parâmetro da equação de camada delgada
 p_v = Pressão de vapor d'água, kg/m² (exceto eq. Haynes (lbf/in²))
 p_{vs} = Pressão de vapor de saturação, kg/m² (exceto eq. Haynes (lbf/in²))
 q = Parâmetro da equação de camada delgada
 \dot{q} = Fluxo de calor, watt/m²
 q_p = Calor perdido pela superfície absorvedora para o ambiente, watt/m²
 r = Coordenada da partícula, m
 r_0 = Raio da partícula, m

t = tempo, horas

t_s = tempo de secagem, dias

v_a = Velocidade do ar, m/s

v_v = Velocidade do vento, m/s

x = Coordenada do leito, m

z = Coordenada do leito, m

ΔT = Diferença de temperatura entre a placa e a cobertura, °C

Δt = Incremento no tempo = 0,25 horas

Δx = Incremento no comprimento = 0,5 m

α = Absortividade do material receptor de energia solar

δ = Espessura do isolamento, m

ϵ = Porosidade do produto, decimal

ϵ_c = Emissividade da cobertura, adm

ϵ_p = Emissividade da placa, adm

η = Eficiência instantânea do coletor solar plano, %

θ = Temperatura do grão ou da pedra, C

θ_0 = Temperatura inicial da pedra ou do produto, C

μ = Viscosidade do ar, kg/m.s

ρ_a = Densidade do ar, kg/m³

ρ_p = Densidade do produto, kg/m³

σ = Constante de Boltzmann, $5,67 \times 10^{-8}$ watt/m²R

τ = Transmissividade da cobertura, adm

ϕ = Umidade relativa do ambiente, decimal

w = frequência = $\pi/10$

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1 Introdução	4
2.2 Disponibilidade de Energia Solar	5
2.3 Coletores Solares Planos	7
2.4 Utilização do Leito de Pedras para o Armazenamento de Energia	12
2.5 Princípios de Secagem de Grãos	14
2.5.1 Teor de Umidade de Equilíbrio	14
2.5.2 Secagem de Uma Camada Delgada de Grãos..	22
2.5.3 Secagem de Uma Camada Espessa de Grãos..	27
3. MATERIAIS E MÉTODOS	31
3.1 Construção do Coletor Armazenador de Energia Solar	31
3.2 Medições Efetuadas para a Avaliação do Coletor Solar	36
3.3 Determinação Experimental da Condutividade e Difusividade Térmicas do Conjunto Constituído por Pedra e Ar Intersticial	40
4. ANÁLISE MATEMÁTICA DO COLETOR SOLAR	41
5. RESULTADOS OBTIDOS	50
5.1 Resultados da Determinação da Condutividade Térmica e Difusividade Térmica do Conjunto Pedra-Ar	50

5.2	Resultados da Integração Gráfica das Curvas de Radiação Solar e Valores Experimentais da Temperatura do Ar e da Pedra, nas Quatro Secções do Coletor Solar	51
5.3	Resultados da Estimação dos Parâmetros do Modelo de Simulação do Coletor Solar	65
5.4	Simulações de Secagem de Soja	66
5.5	Cálculo da Área Coletora para Três Níveis de Radiação Solar	76
5.6	Comparações entre o Coletor Armazenador e o Coletor Plano Simples	96
6.	CONCLUSÕES	103
7.	SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	105
8.	RESUMO	106
9.	SUMMARY	108
10.	BIBLIOGRAFIA	109
	APÊNDICE A ₁	114
	APÊNDICE A ₂	116
	APÊNDICE A ₃	117
	APÊNDICE A ₄	119
	APÊNDICE A ₅	121
	APÊNDICE A ₆	125
	APÊNDICE B	127
	APÊNDICE C ₁	129

APÊNDICE C ₂	.....	130
APÊNDICE C ₃	.....	131
APÊNDICE C ₄	.....	132
APÊNDICE D	.....	133

1. INTRODUÇÃO

A produção agrícola brasileira tem sofrido, nos últimos anos, variações prejudiciais à economia. As adversidades climáticas aliadas à má qualidade das sementes plantadas têm contribuído para a redução da produtividade, que particularmente no caso da soja foi de 30% no ano de 1978, segundo estimativas do Instituto Brasileiro de Economia Agrícola (1978).

A agricultura tem recebido por parte do Governo Federal, notadamente a partir de 1978, promessas de incentivos com o intuito de incrementar a produção, já que os produtos agrícolas podem constituir um importante item no equilíbrio da balança comercial brasileira.

Após a colheita, a preservação das qualidades nutritivas das matérias-primas agrícolas é um imperativo e, neste particular, a secagem é o processo comercial mais utilizado devido à simplicidade de operação e o custo relativamente baixo, quando comparado ao de outros processos de preservação de alimentos.

A secagem de produtos agrícolas tem sido realizada, no Brasil, por dois processos distintos e tecnicamente criticáveis. O primeiro deles é a secagem realizada pelo pequeno produtor, que utiliza de forma primitiva a radiação solar e a entalpia do ar. Neste processo, o produto é exposto ao sol, ocupando com isso grande área e ficando sujeito ao ataque de insetos e pássaros. Estima-se que 80% da produção agrícola brasileira seja secada desta forma (Rossi e Roa, 1980). Esta metodologia embora bastante praticada tende a desaparecer, à medida que a tecnologia agrícola pro

gride. O segundo processo resulta da utilização dos secadores mecânicos, que são capazes de secar em curto espaço de tempo grandes quantidades do produto. Utilizam como agente de secagem o ar quente e como fontes de energia a lenha, a eletricidade e os combustíveis derivados do petróleo.

Tendo sido projetados numa época em que o custo do combustível era pequeno, não houve preocupação em se construir secadores com alta eficiência térmica, sendo que as perdas de calor nestes equipamentos são grandes (principalmente naqueles com aquecimento indireto, usados na secagem de café e cacau). Assim, a eficiência térmica destes secadores situa-se por volta dos 40% (Rossi e Roa, 1980). Com o crescente aumento dos preços do petróleo e derivados, o custo da secagem, através deste processo tem-se elevado, representando, por vezes, uma parcela considerável do preço do produto. Muitos materiais chegam mesmo a perder o seu valor comercial, já que o custo da secagem pode superar o valor do próprio produto (Meyer et. al., 1978).

Com a proibição, a partir de janeiro de 1980, do uso de combustíveis derivados de petróleo para a secagem de produtos agrícolas, surgiu a necessidade de serem adotados outros sistemas de secagem economicamente viáveis e que possam aproveitar as potencialidades climáticas das regiões produtoras. Os sistemas que utilizam a própria energia do ar para secagem natural ou que utilizam o ar aquecido por meio de coletores solares parecem reunir estas características; e têm sido pesquisados em muitos países, inclusive no Brasil (Vilela, 1977).

Nestes sistemas de secagem solar, o aquecimento do agente

de secagem, no caso o ar, é realizado por intermédio de coletores solares, e pelo fato de estes coletores serem capazes de aquecer grandes vazões de ar de alguns poucos graus (2 a 6 °C acima da temperatura ambiente) podem ser construídos a baixo custo e podem apresentar grande eficiência térmica (acima de 50%).

Considerando o exposto acima, o presente trabalho tem por objetivos:

a) Construir um coletor armazenador de energia solar, de baixo custo⁽¹⁾ com materiais facilmente adquiríveis por um pequeno ou médio produtor⁽²⁾.

b) Avaliá-lo através de um modelo matemático baseado em transferência de calor. Isto é, determinar a área coletora por unidade de massa do produto a ser secado, em função das condições ambientais (radiação solar, temperatura ambiente, umidade relativa do ar) e dos requerimentos de vazão necessários à secagem do produto.

c) Comparar as características do coletor rústico com as de um coletor plano convencional.

(1) Entende-se, no trabalho em questão, por um coletor solar de baixo custo, um equipamento para o qual o investimento inicial necessário à sua aquisição seja menor que aquele necessário à aquisição de um similar existente no mercado. Apresentar-se-ã a ordem absoluta dos custos no item 5.6.

(2) Adotou-se o mesmo critério empregado pelo Banco do Brasil S/A para a classificação do produtor em pequeno ou médio. O critério em questão baseia-se no montante de vendas anuais do produtor, com base num valor de referência (adotado pelo Banco e sujeito a alterações) designado por MVR - Montante do Valor de Referência. Assim, classifica-se como:

Mini-produtor: Montante de vendas anuais até 100 MVR

(1 MVR = Cr\$ 1.962,20 em janeiro de 1980)

Pequeno produtor: 100 - 400 MVR

Médio produtor: 400 - 2 000 MVR

Grande produtor: acima de 2 000 MVR

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Introdução

O emprego da energia solar para secagem de produtos agrícolas é uma prática que vem sendo utilizada no Brasil desde longa data, segundo uma tecnologia rudimentar. A preocupação no sentido de melhorar esta tecnologia é, todavia, recente em nosso País. Os trabalhos pioneiros foram realizados, de 1974 a 1979, pelo Grupo de Secagem da Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP, de maneira integrada com o Grupo de Energia da mesma universidade. Estes trabalhos tiveram como objetivo a determinação das vantagens relativas dos diversos sistemas de secagem, através da comparação entre eles, com base na eficiência técnica dos sistemas, nos custos energéticos, na economia do processo e na qualidade do produto.

Os sistemas de secagem comparados foram:

- a secagem solar tradicional,

- a secagem em silos ou similares, usando como agente de secagem o ar natural ou aquecido por processo convencional, ou a través de coletores solares simples. (Roa et. al., 1979).

Em países desenvolvidos, o emprego criterioso da energia solar para secagem de produtos agrícolas não é recente e vem merecendo verbas cada vez maiores para a pesquisa. Por exemplo, nos Estados Unidos, de cinquenta projetos de pesquisa de aplicação de energia solar na agricultura, 30% foram relativos à secagem de grãos (Altman, 1977).

2.2 Disponibilidade de Energia Solar

Um parâmetro básico que surge quando se trabalha com energia solar é a constante solar, que é, por definição, a energia proveniente do sol e que incide, na unidade de tempo, sobre uma superfície de área unitária, disposta perpendicularmente aos raios solares e situada no espaço na distância média entre a terra e o sol. O seu valor é de 1353 watt/m^2 (Buellow, 1977).

Embora constitua um parâmetro importante, a constante solar não possui muito valor prático devido à série de eventos que a radiação está sujeita durante sua trajetória até atingir a superfície terrestre, quais sejam: a) alteração na própria distância entre a terra e o sol (aproximadamente $1,5 \times 10^8 \text{ km} \pm 1,7\%$); b) variações devido à absorção da energia solar por moléculas de O_2 , O_3 , H_2O e CO_2 ; e c) espalhamentos devido às partículas de poeira e vapor d'água presentes na atmosfera.

Apesar de alguns constituintes da atmosfera interferirem na

radiação solar, uma parte da radiação espalhada (radiação difusa) atinge a superfície da terra juntamente com a radiação direta, que por sua vez não sofre mudança de direção (Duffie e Beckman, 1974).

Como não constitui metodologia prática calcular a radiação incidente sobre uma superfície, baseando-se nos efeitos de atenuação extraterrestre, costumam-se utilizar os dados de radiação solar da localidade em questão, caso existam; ou de outro local com características semelhantes ao primeiro, tais como: latitude, topografia e clima, se por ventura não existirem dados locais de radiação e se não puder estimar a radiação com base em outras informações como: visibilidade, números de horas de sol, etc (Duffie e Beckman, 1974).

Liu e Jordan (1967) investigaram as relações entre radiação total e difusa, de maneira que a radiação difusa pode ser estimada da radiação total do local. Determinaram, por exemplo, que a razão entre a média mensal da radiação difusa diária e a média mensal da radiação total (direta + difusa) diária é uma função da nebulosidade média, ou seja, da razão entre a média mensal da radiação total diária e a radiação extraterrestre, considerando que a radiação incide sobre uma superfície horizontal.

Macedo et. al. (1978), usando os dados meteorológicos como horas do sol, altitude local e visibilidade, bem como a correlação de Liu e Jordan para a radiação difusa, calcularam as médias mensais das radiações direta, difusa e total para dezesseis estações da região amazônica.

2.3 Coletores Solares Planos

O coletor solar plano constitui o dispositivo principal nos sistemas de aquecimento de ar e água. A operação deste equipamento é simples. A energia solar que incide sobre o coletor é parcialmente absorvida por uma superfície pintada de preto. Uma parte da energia absorvida é transferida ao fluido, enquanto que a fração restante é perdida para o ambiente.

As partes principais do coletor são: a) uma placa metálica, delgada, cuja face destinada à absorção da energia solar é pintada com tinta preta não-reflectiva; b) dutos ou tubos em contato com a superfície absorvedora, nos quais circula ar ou água; c) superfície isolante nas laterais e no fundo do coletor, para evitar as perdas, por condução; e d) uma ou mais coberturas transparentes à radiação, situadas sobre a placa absorvedora (Duffie , Beckman e Klein, 1977).

As figuras 1 e 2 ilustram os coletores para o aquecimento de ar e água, respectivamente.

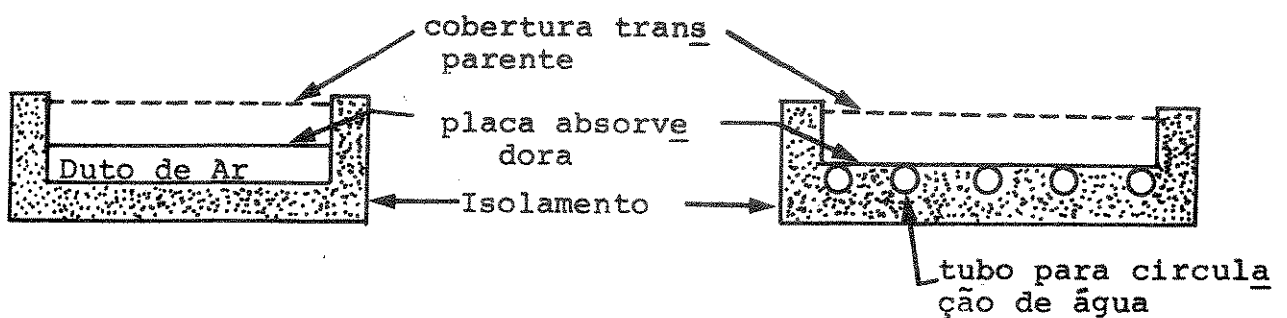


Fig. 1. Coletor para Aquecimento de Ar

Fig. 2. Coletor para Aquecimento de Água

Através de um balanço de energia, como o da equação nº 1 abaixo, poderão ser relacionadas as parcelas referentes à energia útil efetivamente transferida ao fluido; a energia perdida para o ambiente; a energia armazenada no coletor e a energia que incide sobre a placa absorvedora.

$$Ac HR (\alpha\tau) = Q_u + Q_p + Q_a \dots\dots (1)$$

A fim de melhor visualizar as perdas de energia nos diversos componentes de um coletor solar, é útil representá-lo através de um circuito elétrico como o da figura 3 (Duffie e Beckman, 1974). No circuito em questão são apresentadas as várias resistências ao fluxo de calor devidas aos diversos componentes do sistema de aquecimento solar, apresentado na figura 2.

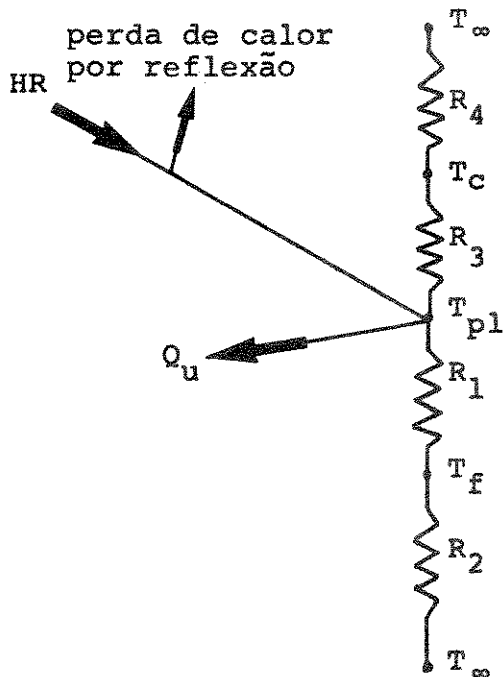


Fig. 3 Circuito Elétrico Análogo ao Coletor Solar para Aquecimento de Água.

A resistência que o isolamento oferece ao fluxo de calor está representada por R_1 , enquanto que R_2 representa a radiação e convecção do fundo do coletor para o ambiente. Geralmente, R_2 é muito menor que R_1 , sendo, portanto, desprezada. Assim é que se pode definir um coeficiente global de perda de calor pe lo isolamento, como:

$$U_i = \frac{1}{R_1} = \frac{K_i}{\delta} \dots\dots\dots (2)$$

O coeficiente de perda de calor entre a superfície absorvedora e a cobertura é o resultado da convecção e radiação entre superfícies paralelas. O calor perdido pode ser escrito como:

$$q_p = (h_{pl-c} + h_{r_p}) (T_{pl} - T_c) \dots\dots\dots (3)$$

sendo:

$$h_{pl-c} = \left[1 - 0,0018 (\bar{T} - 10) \right] \left(1,14 \frac{\Delta T^{0,31}}{\lambda^{0,07}} \right) \dots\dots (4)$$

e

$$h_{r_p} = \frac{\sigma (T_{pl} + T_c) (T_{pl}^2 + T_c^2)}{1/\epsilon_p + 1/\epsilon_c - 1} \dots\dots\dots (5)$$

Poderemos expressar a resistência R_3 , como:

$$R_3 = \frac{1}{h_{pl-c} + h_{r_p}} \dots\dots\dots (6)$$

Entre a superfície transparente e o ambiente há a transferência de calor por radiação e por convecção devido ã ação do vento.

O coeficiente de troca de calor por convecção é dado pela seguinte equação empírica:

$$h_v = 5,7 + 3,8 v_v \dots\dots\dots (7)$$

Para o cálculo da resistência devido à radiação da superfície transparente, considera-se que a superfície celeste absorve toda radiação proveniente da cobertura, atuando assim como um corpo negro. O coeficiente de transferência de calor devido à parcela referente à radiação é dado por:

$$h_{r_c} = \epsilon_c \sigma (T_c + T_{c\acute{e}u}) (T_c^2 + T_{c\acute{e}u}^2) \dots\dots\dots (8)$$

A resistência R_h ficará:

$$R_h = \frac{1}{h_v + h_{r_c}} \dots\dots\dots (9)$$

As perdas de energia pelas laterais do coletor são geralmente calculadas considerando a espessura do isolamento lateral i igual a do fundo do coletor, e supondo que a transferência de calor ocorre apenas em uma dimensão, ao longo do perímetro do coletor solar. Assim, pode-se definir um coeficiente de perda de calor nas laterais, como sendo:

$$U_l = \left(\frac{k_i}{\delta} \right) \cdot \left(\frac{P \cdot h_i}{A_c} \right) \dots\dots\dots (10)$$

Conseguir-se-á, finalmente, definir um coeficiente global de perda de calor, somando-se as parcelas individuais obtidas, ou seja:

$$U_p = \left[\frac{1}{h_{pl-c} + h_r} + \frac{1}{h_v + h_{rc}} \right]^{-1} + U_i + U_\ell \dots\dots\dots (11)$$

Através do estudo analítico da distribuição de temperatura entre os tubos e também na direção do fluxo de fluido, pode-se obter uma expressão para o calor útil recebido pelo coletor, como função da temperatura de entrada do fluido no sistema (Duffie e Beckman, 1974), ou seja:

$$Q_u = A_c F_R \left[HR(\alpha\tau) - U_p(T_e - T_\infty) \right] \dots\dots\dots (12)$$

A taxa de absorção de energia pelo coletor num determinado instante constitui o produto da radiação incidente HR, pela fração transmitida pela cobertura, τ , e pela fração absorvida pelo absorvedor, α . Tanto α quanto τ são funções do material e do ângulo de incidência da radiação.

O produto do coeficiente global de perda de calor U_p pela diferença de temperatura ($T_e - T_\infty$) representaria a perda de energia no coletor, se a sua temperatura fosse igual a temperatura de entrada do fluido, T_e . Entretanto, quando o coletor recebe energia útil, a temperatura da placa é maior que T_e , para que haja transferência de calor da placa ao fluido. Sendo assim, a perda real de energia é maior que o produto $U_p(T_e - T_\infty)$. Esta diferença é levada em consideração pelo fator F_R . Duffie e Beckman (1974) apresentam uma expressão para o cálculo de F_R e de R, sendo que este último representa a razão entre a radiação total que incide sobre uma superfície inclinada e a que incide sobre uma

superfície horizontal.

Pode-se definir a eficiência do coletor como sendo:

$$\eta = \frac{Q_u}{A_c HR} = F_R (\alpha \tau) - \frac{F_R U_p}{HR} (T_e - T_\infty) \dots \dots \dots (13)$$

Assumindo-se que U_p é constante, pode-se observar que a eficiência varia linearmente com $(T_R - T_\infty)/HR$; sendo a declividade da reta igual ao produto $(-F_R U_p)$ e a intersecção da reta com o eixo das coordenadas igual a $F_R (\alpha \tau)$. Deve-se observar que os testes para determinação da eficiência do coletor são realizados em dias claros, num horário próximo ao meio dia solar, sendo o produto $(\alpha \tau)$ devido praticamente à radiação direta.

O enfoque da eficiência de um coletor, segundo o critério tratado acima, constitui parte importante no estudo da eficiência durante grandes períodos de operação do sistema solar (Beckman, Duffie e Klein, 1977).

2.4 Utilização do Leito de Pedras para o Armazenamento de Energia

Em muitas situações em que se estuda o escoamento de um fluido através de um leito constituído por elementos sólidos (como por exemplo pedras), considera-se o escoamento do fluido através do material, não sendo comum as situações em que o fluido escoava sobre a superfície do leito.

A formulação e resolução analítica do problema relativo à transferência de calor entre um fluido incompressível, escoando através de um leito constituído por partículas sólidas, foram fei

tas, originalmente, por Shumann, em 1929, e são descritas, em detalhes, por Jakob (1957).

Löf e Hawley (1948) determinaram, experimentalmente, uma correlação para o coeficiente de transferência de calor entre o ar quente e o leito de pedras, como função do fluxo de ar e do diâmetro das partículas. Neste estudo, o objetivo básico do leito era o de armazenar energia, sendo obtida a seguinte correlação:

$$h = 650 \left(\frac{G_a}{d_e} \right)^{0,7} \dots\dots (14)$$

Esta correlação, obtida com base nos ensaios de aquecimento do leito de pedras, pode ser usada para resfriamento do mesmo, segundo sugerem os autores. Diversos ensaios foram realizados, nos quais variou-se a temperatura de entrada do ar no leito de pedras, concluindo-se que esta praticamente não tinha influência sobre o coeficiente de película.

Os autores recomendam a equação na seguinte condição - faixa de temperatura entre 37,8°C e 121,1°C ; pedra cujo tamanho varia de 0,8 a 3,3 cm e velocidade do ar entre 0,6 e 0,34 m/s.

Alanis et.al. (1977) determinaram, experimentalmente, uma correlação similar à primeira, no que diz respeito à dependência do coeficiente de película. Neste estudo, a temperatura do ar ficou na faixa de 18 a 67°C, a velocidade do ar entre 0,02 e 0,12 m/s. Foram realizadas experiências utilizando pedras com diâmetros equivalentes de 2,8 cm e de 5,1 cm. Segundo os autores, nenhuma diferença foi encontrada nos ensaios de aquecimento e resfriamento. A correlação obtida foi:

$$h = 0,824 \left(\frac{G_a}{d_e} \right)^{0,92} \dots\dots\dots (15)$$

2.5 Princípios de Secagem de Grãos

2.5.1 Teor de Umidade de Equilíbrio

O teor de umidade de equilíbrio constitui um parâmetro importante na secagem, armazenamento e manuseio dos produtos agrícolas. Na secagem, representa a umidade limite que o produto irá atingir quando em contato com ar, numa determinada temperatura e pressão de vapor. No armazenamento, o teor de umidade de equilíbrio que o grão atinge está intimamente relacionado aos valores médios de temperatura e umidade relativa da região. A umidade e qualidade do grão e a temperatura ambiente irão determinar o tempo máximo que o produto poderá ser armazenado sem sofrer deterioração. No manuseio, ou seja, ao serem realizadas as operações - colheita, classificação, limpeza - é importante que os equipamentos que as realizam apresentem alto rendimento quando a umidade do produto for a de equilíbrio nas condições ambientais da região.

O teor de umidade (relação entre a massa de água contida no produto e a massa do produto, em base úmida; ou a massa de água por massa de matéria seca, em base seca) de equilíbrio é de

finido como a umidade que um certo produto atinge ao ser deixado por tempo suficientemente longo, sob condições controladas de temperatura e umidade relativa do ar. A umidade de equilíbrio depende do produto, ou seja, da espécie, variedade e maturidade, bem como da umidade e temperatura do ar (Brooker et.al., 1974).

Um produto agrícola, com determinada umidade, possui uma pressão de vapor de água bem determinada. Da mesma forma, o ar numa certa umidade relativa e temperatura também exibe uma pressão de vapor. Se ambos, o grão e o ar são postos em contato haverá uma migração de umidade, quer do grão ao ar ou vice-versa, até que se atinja um estado de igualdade de pressões de vapor. A umidade que o produto possui nesta situação de equilíbrio de pressões corresponde à sua umidade de equilíbrio.

Um certo produto pode atingir a sua umidade de equilíbrio perdendo umidade ao ar, fazendo-o por um processo chamado de dessorção. O processo inverso, no qual o ar cede umidade ao grão recebe, por sua vez, o nome de adsorção. O mesmo produto colocado sob condições ambientais idênticas pode apresentar diferentes teores de umidade de equilíbrio se o processo de migração de umidade ocorrer por dessorção ou adsorção. Em geral, o valor obtido no primeiro é maior do que aquele obtido no segundo. Este fenômeno é chamado de histerese e tem sido explicado através de teorias baseadas no estudo de capilaridade (Brooker et. al. 1974).

A relação entre o teor de umidade de equilíbrio e a umidade relativa do ar, numa temperatura fixa, pode ser expressa por

meio de curvas isotermas. A figura nº 4 apresenta algumas destas curvas para soja. O conteúdo de umidade de equilíbrio de um produto depende basicamente de três fatores: a) espécie do produto, cuja constituição a predominância de determinados compostos químicos, como proteína, amido ou óleo, farão com que dois produtos possuam teores de umidade de equilíbrio diferentes, mesmo quando submetidos às mesmas condições ambientais; b) umidade e temperatura do ar (que é igual a temperatura do grão, quando ambos estão em contato). O teor de umidade de equilíbrio varia de forma inversa com a temperatura quando se mantém constante a umidade relativa, pois um aumento de temperatura proporciona um aumento da pressão de vapor no ar e no grão, sendo muito maior neste último, pois sua quantidade de água é muitas vezes superior a do ar. Como consequência, haverá uma migração de umidade do grão para o ar (Brooker et. al., 1974).




A determinação do conteúdo de umidade de equilíbrio pode ser realizada por dois métodos: o método estático e o dinâmico. No método estático, a atmosfera, na qual o produto é envolto, permanece sem agitação até que seja atingido o estado de equilíbrio de pressões de vapor. Neste método, o produto é mantido sobre um anteparo, geralmente, uma pequena peneira de arame, num ambiente cujas temperatura e umidade relativa são controladas; sendo o controle da umidade realizado por meio de soluções de ácido sulfúrico ou soluções saturadas de sais. Hall (1957) apresenta uma gama destas soluções e a umidade relativa que elas mantêm, numa temperatura determinada.

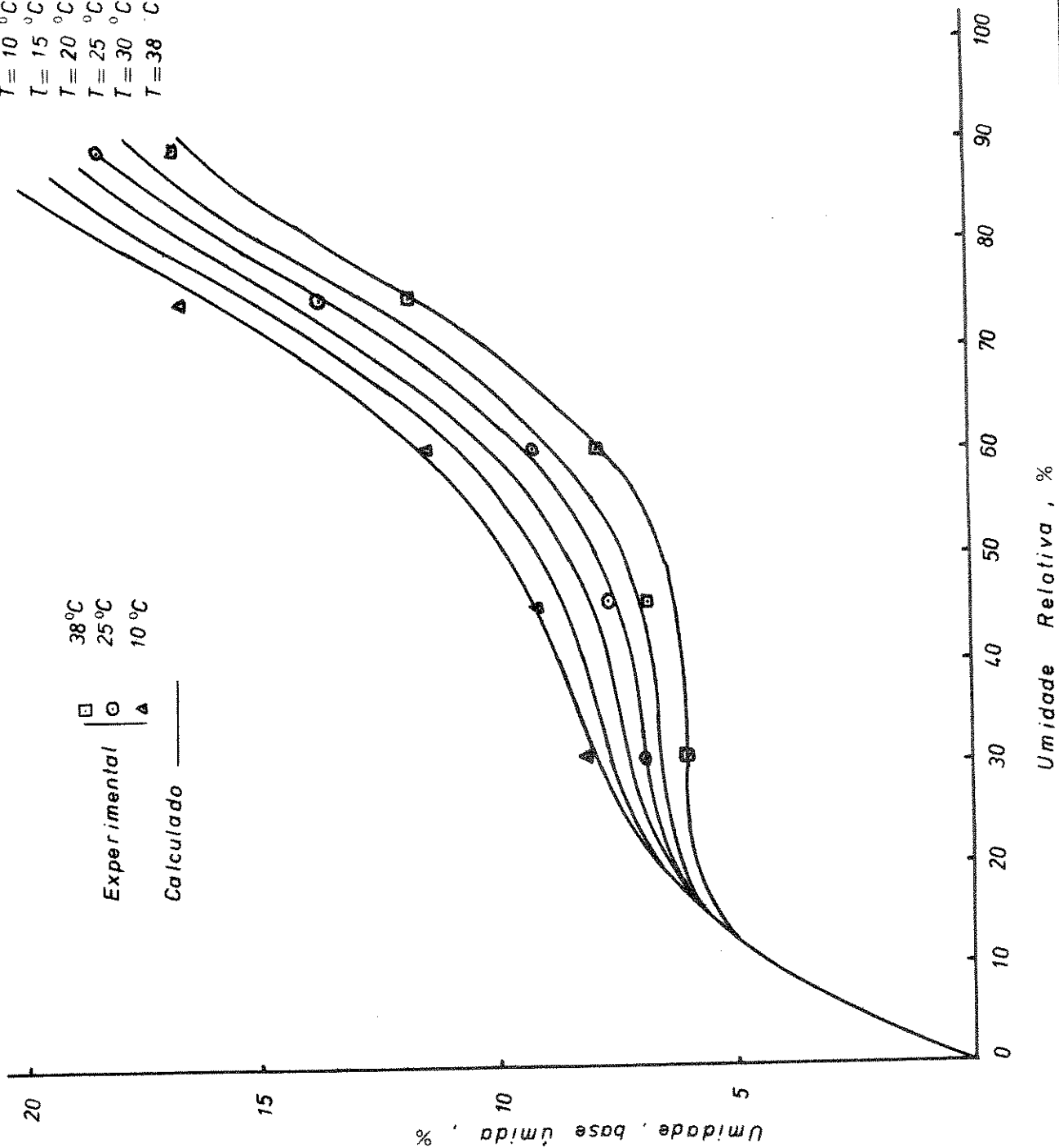
No método dinâmico, o ar com umidade relativa e temperatu

IG 4 CURVAS DE UMIDADE DE EQUILÍBRIO PARA SOJA
FONTE: SINÍCIO E ROA (1978)

T = 10 °C
T = 15 °C
T = 20 °C
T = 25 °C
T = 30 °C
T = 38 °C

38 °C
25 °C
10 °C

Experimental   
Calculado —



ra controladas é forçado a passar pelo produto. Este método em bora produza resultados mais rápidos que o estático, é mais caro devido ao fato de o controle do estado do ar ser feito por processos mecânicos sofisticados (Hall, 1957).

Um método simples e barato capaz de fornecer resultados rápidos e precisos foi desenvolvido pelo grupo de secagem da UNICAMP e consiste em colocar num recipiente hermético uma amostra do produto juntamente com o terminal de um higrosensor. O recipiente é deixado numa câmara com temperatura controlada até que a umidade registrada pelo higrosensor não varie. Retiram-se então pequenas amostras do produto contido no recipiente sendo que uma delas é utilizada para se determinar o teor de umidade, enquanto as demais são usadas para novos experimentos. Os valores experimentais obtidos por este método têm concordado com os obtidos pelos métodos tradicionais, exceto para valores altos de umidade, onde os últimos falham em virtude do aparecimento de fungos antes do término do experimento (Roa e Rossi, 1977).

Algumas teorias têm sido propostas com o intuito de explicar o fenômeno de equilíbrio higroscópico nos produtos biológicos: a) condensação de água nos capilares formados na estrutura do produto; b) adsorção de uma monocamada de vapor d'água sobre a superfície interna de um sólido devido a forças químicas; c) adsorção e desorção de água em virtude de campos potenciais existentes nas superfícies da estrutura porosa; d) adsorção de umidade como resultado da função de Gibbs (Brooker et. al., 1974). Apesar da intensa pesquisa nesta área, nenhuma destas teorias

consequiram, quer de maneira isolada ou mesmo de forma conjunta, explicar com precisão e generalidade o fenômeno de higroscopicidade, embora vêm servindo de base ao desenvolvimento de equações empíricas ou semi-empíricas, capazes de quantificar sob condições particulares o fenômeno em questão.

Uma equação semi-empírica baseada na equação termodinâmica de Gibbs foi originalmente desenvolvida por Henderson e melhorada por Thompson, possuindo a forma (Brooker et. al., 1974):

$$1 - \phi = \exp \left[-a_1 (T + a_2) \text{Meq}^{a_3} \right] \dots\dots\dots (16)$$

Com base na teoria de campos potenciais, Chung-Pfost desenvolveu uma equação que pode ser utilizada (assim como a de Henderson-Thompson) quando erros de 2 a 2,5% no cálculo da umidade de equilíbrio são aceitáveis. A equação é a seguinte (Brooker et. al., 1974):

$$\ln \phi = - \frac{a_1}{R_0 (T + a_2)} \exp (-a_3 \text{Meq}) \dots\dots\dots (17)$$

Uma equação completamente empírica capaz de apresentar melhor precisão que as anteriores foi proposta por Haynes (Brooker et. al., 1974)

$$\begin{aligned} \ln(p_v) = & a_1 + a_2 \ln(p_{vs}) + a_3 \ln(\text{Meq}) + a_4 \ln(p_{vs})^2 + \\ & + a_5 \ln(p_{vs}) \cdot \text{Meq} \dots\dots\dots (18) \end{aligned}$$

Uma equação de teor de umidade de equilíbrio, também empírica e de bastante precisão e generalidade, foi proposta por Roa (1974), e tem sido utilizada com sucesso para muitos produtos agrícolas (Sinício e Roa, 1978). A equação possui a forma:

$$Meq = (a_1 \theta + a_2 \theta^2 + a_3 \theta^3) \exp \left[(a_4 + a_5 \theta + a_6 \theta^2 + a_7 \theta^3 + a_8 \theta^4) (T + a_9) \right] \dots \dots \dots (19)$$

Nas tabelas de número 1 a 4, a seguir, estão os parâmetros das equações 16 a 19 para diversos produtos agrícolas.

TABELA 1

Parâmetros da Equação Teor de Umidade de Equilíbrio de HENDERSON - THOMPSON

Produto	PARÂMETROS		
	a ₁	a ₂	a ₃
Cevada	22,919 x 10 ⁻⁶	195,267	2,0123
Milho	86,541 x 10 ⁻⁶	49,810	1,8634
Amendoim	650,413 x 10 ⁻⁶	50,560	1,4984
Amendoim em casca	66,587 x 10 ⁻⁶	23,318	2,5362
Arroz em casca	19,187 x 10 ⁻⁶	51,161	2,4451
Sorgo	8,532 x 10 ⁻⁶	113,725	2,4757
Soja	503,633 x 10 ⁻⁶	43,016	1,3628
Trigo duro	25,738 x 10 ⁻⁶	70,318	2,2110
Trigo mole	12,3 x 10 ⁻⁶	64,346	2,5558

FONTE: Pomeranz, Y. (1978).

TABELA 2

Parâmetros da Equação de Teor de Umidade de Equilíbrio de Chung-Pfost

Produto	PARÂMETROS		
	a_1	a_2	a_3
Cevada	1513,47	19,889	91,323
Milho	620,56	16,958	30,205
Amendoim	506,65	29,243	33,892
Amendoim em casca	1037,19	37,903	12,354
Arroz com casca	1181,57	21,733	35,703
Sorgo	2185,07	19,644	102,849
Soja	275,11	14,967	24,576
Trigo duro	1831,40	18,077	112,350
Trigo mole	1442,54	23,607	35,662

FONTE: Pomeranz Y. (1978).

TABELA 3

Parâmetros da Equação de Teor de Umidade de Equilíbrio de Haynes.

Produto	PARÂMETROS				
	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5
Milho	-1,6435	1,4371	0,1193	-0,0025	-0,0160
Sorgo	-2,0650	1,2505	0,1723	-0,0037	-0,0110
Trigo	-1,6136	1,2694	0,1254	-0,0025	-0,0118

FONTE: Brooker et. al., (1974).

TABELA 4
Parâmetros da Equação de Teor de Umidade de Equilíbrio da UNICAMP.

Parâmetros	PRODUTOS			
	feijão-preto	milho	soja	arroz integral
a ₁	0,551293	0,461044	0,469448	0,476028
a ₂	-1,058734	-0,700133	-0,295153	-0,835204
a ₃	0,798426	0,452310	0,17048	0,642545
a ₄	-0,00571	-0,007337	0,00219	0,000495
a ₅	-0,03667	-0,044321	-0,00691	-0,036094
a ₆	0,10822	0,139807	-0,22417	-0,118
a ₇	-0,12353	-0,159269	0,46542	-0,155575
a ₈	0,50086	0,063424	-0,24788	0,072624
a ₉	-15,39	-26,21	32,08	43,57

FONTE: Sinício e Roa (1978).

2.5.2 Secagem de Uma Camada Delgada de Grãos

A secagem constitui, fundamentalmente, um processo de transferência simultânea de calor e massa. Quando um produto biológico com umidade acima de 70%, base úmida, é posto a secar, sob condições ambientais constantes, a taxa de secagem também será constante e dependerá, principalmente, das condições ambientais e muito pouco do produto. Nesta fase, a secagem acontece na superfície do material, sendo semelhante a evaporação de umidade de um local contendo água livre. O final deste processo é caracterizado por uma diminuição da taxa de difusão de água no interior do produto, abaixo

xo daquela necessária para repor a umidade na superfície do mesmo. Para os grãos em geral, o período de taxa de sacagem constante é de curta duração e depende da: a) área, temperatura e umidade do produto; b) diferença entre a umidade do ar e a do produto; e c) velocidade de secagem (Hall, 1957; Brooker et. al., 1974).

Após o término do período de secagem com taxa constante inicia-se o período cuja taxa é decrescente que é principalmente controlada pelo produto e envolve: a) O movimento de umidade do interior até a superfície do produto e b) A remoção da umidade da parte exterior do material. Na transição entre os dois períodos de secagem a umidade que o produto possui é chamada de umidade crítica (Hall, 1957). A figura nº 5 ilustra os fenômenos descritos.

A compreensão do fenômeno de secagem de uma partícula isolada de um determinado produto é fundamental no estabelecimento de qualquer modelo de secagem.

Considerando-se que o fluxo de umidade no interior do grão acontece por difusão e se for desprezado o gradiente interno de temperatura, pode-se quantificar a taxa de secagem de determinado produto com geometria esférica, através da equação seguinte (Brooker et. al., 1974):

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D \left[\frac{\partial^2 M}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial M}{\partial r} \right] \dots\dots\dots (20)$$

com as seguintes condições inicial e de contorno:

FIG. 5 PERÍODOS DE SECAGEM COM TAXA CRESCENTE E DECRESCENTE. FONTE: BROOKER et al (1974)

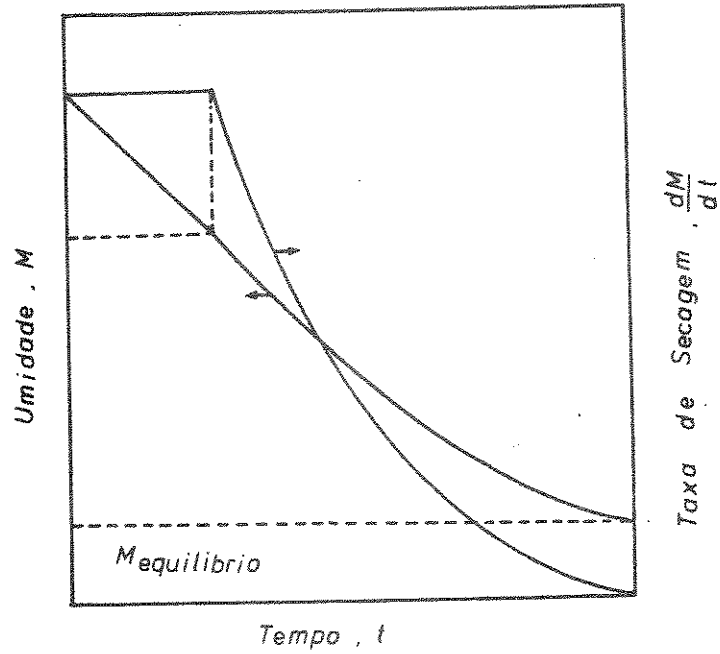
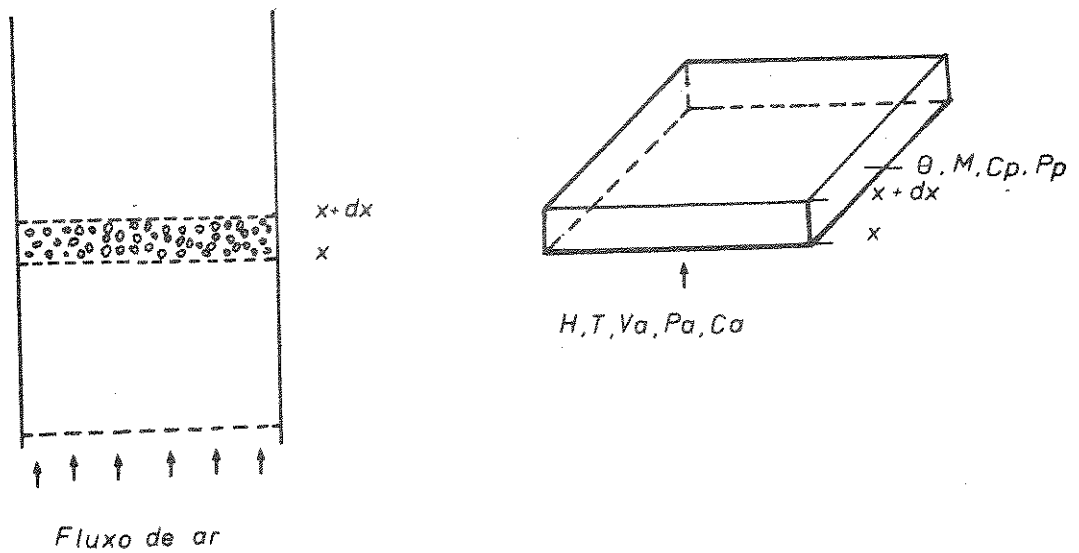


FIG. 6 ELEMENTO DE VOLUME SITUADO NUMA POSIÇÃO QUALQUER DA CAMADA ESPESSA DE GRÃOS



$$M(r, t=0) = M_0 \quad \dots\dots\dots (21)$$

$$\left. \frac{\partial M}{\partial r} \right|_{r=r_0} = h'_d \left[M_{r=r_0} - M_{eq} \right] \quad \dots\dots\dots (22)$$

Considerando: umidade inicial uniforme, coeficiente de difusão constante, condições fixas de contorno ($M(r, t) = M_{eq}$) e desprezados os efeitos de contração da partícula, a integração numérica da equação 20 fornecerá:

$$MR = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp \left[\frac{n^2 \pi^2}{9} X^2 \right] \quad \dots\dots\dots (23)$$

como:

$$MR = \frac{M(t) - M_{eq}}{M_0 - M_{eq}} \quad \dots\dots\dots (24)$$

$$X = \frac{A}{V} (Dt)^{1/2} \quad \dots\dots\dots (25)$$

$$\frac{A}{V} = \frac{3}{r_0} \quad \dots\dots\dots (26)$$

Se apenas o primeiro termo do somatório da equação 23 for considerado, obtêm-se:

$$\frac{M(t) - M_{eq}}{M_0 - M_{eq}} = \frac{6}{\pi^2} \exp \left(- \frac{D\pi^2 t}{r_0^2} \right) = \frac{6}{\pi^2} \exp(-kt) \quad \dots\dots\dots (27)$$

O erro cometido pela simplificação acima é de 5% quando

$$\frac{D\pi^2 t}{r_0^2} > 1,2 \quad \dots\dots\dots (28)$$

Algumas equações empíricas ou semi-empíricas para a taxa de secagem de uma camada delgada de grãos (camada inteiramente exposta ao movimento do ar) têm sido utilizadas, sendo a mais comum a equação a seguir, análoga à lei de resfriamento de Newton.

$$\frac{dM}{dt} = k(M - M_{eq}) \quad \dots\dots\dots (29)$$

cuja solução é:

$$\frac{M(t) - M_{eq}}{M_0 - M_{eq}} = \exp(-kt) \quad \dots\dots\dots (30)$$

Algumas equações de secagem puramente empíricas têm sido proposta apresentando, por vezes, resultados melhores do que a aqueles fornecidos pelas equações teóricas (Becker, 1959; Thompson et. al., 1968).

Um modelo empírico fundamentado na diferença de pressões de vapor entre a superfície do produto e o ar foi proposto por Roa e Macedo (1976). Este modelo foi testado na UNICAMP para uma série de produtos agrícolas, apresentando boa concordância com os resultados experimentais. A sua forma é:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = -mq(M - M_{eq})(P_{vs} - p_v)^n t^{q-1} \quad \dots\dots\dots (31)$$

Os parâmetros m, n, q possuem, para soja, os seguintes valores:

$$m = 0,348358$$

$$n = 0,15897$$

$$q = 0,45916$$

2.5.3 Secagem de uma Camada Espessa de Grãos.

Quando se realiza a secagem de um leito espesso de grãos , como num silo, as camadas do produto próximas à entrada do ar (usualmente realizada pelo fundo) cedem-lhe parte de sua umidade . Ao entrar em contato com as camadas superiores, o ar possui menos capacidade de secagem e, como consequência, as mesmas irão secar mais lentamente que as inferiores.

Para realizar a evaporação da umidade do grão o ar cede-lhe parte do calor sensível que dispõe e, por esta razão, estará mais frio ao deixar o secador. A energia que o grão recebe é novamente incorporada ao ar na forma de calor latente. Assim a secagem pode ser considerada, com boa aproximação como um processo cujo calor total não varia.

Em 1967, Bakker-Arkema apresentou um modelo para a secagem de uma camada espessa de grãos que tem permitido quantificar a variação da umidade e temperatura do ar e do produto, com relação ao tempo e à posição no silo (Brooker et. al., 1974; Roa e Macedo, 1976).

A análise realizada por Bakker-Arkema consistiu em efetuar balanços de energia e de massa num elemento diferencial de volume, localizado numa posição qualquer do silo (fig. 6).

As seguintes simplificações são assumidas:

- a) Os grãos não diminuem de volume.
- b) Os gradientes de temperatura e de umidade absoluta do ar com relação ao tempo são considerados desprezíveis quando comparados aos mesmos gradientes, em relação à posição.

- c) O ar é distribuído, uniformemente, através das camadas de grãos.
- d) Não existe transferência de calor por condução entre os grãos.
- e) As perdas de calor através das paredes do silo são consideradas desprezíveis.
- f) Os calores específicos do ar e do produto são considerados constantes, durante pequenos intervalos de tempo.
- g) A energia do vapor d'água é considerada desprezível em relação à energia do ar seco.

Após estas simplificações foram efetuados balanços de energia e de massa para o ar e para o grão, apresentando, na sua forma final, o seguinte aspecto (Brooker et. al., 1974).

a) Para a entalpia do ar:

$$\left[\begin{array}{l} \text{Energia que} \\ \text{entra na po} \\ \text{sição } x. \end{array} \right] - \left[\begin{array}{l} \text{Energia que} \\ \text{sai da posi} \\ \text{ção } x + dx. \end{array} \right] = \left[\begin{array}{l} \text{Energia trans} \\ \text{ferida ao pro} \\ \text{duto, por con} \\ \text{vecção.} \end{array} \right] + \left[\begin{array}{l} \text{Variação, com re} \\ \text{lação ao tempo,} \\ \text{da entalpia do} \\ \text{ar nos espaços} \\ \text{vazios entre os} \\ \text{grãos.} \end{array} \right]$$

matematicamente, tem-se

$$(\rho_a v_a c_a + \rho_a v_a W c_v) S T dt - (\rho_a v_a c_a + \rho_a v_a W c_v) (T + \frac{\partial T}{\partial x} dx) S dt =$$

$$= h' a_s (T - \theta) S dx dt + (\rho_a c_a + \rho_a W c_v) \epsilon S dx \frac{\partial T}{\partial t} dt$$

pela simplificação feita no item c, pode-se desprezar $\epsilon \frac{\partial T}{\partial t}$ em

relação a $v_a \frac{\partial T}{\partial x}$, obtendo com isso

$$\frac{\partial T}{\partial x} = - \frac{h'a_s}{G_a c_a + G_a W c_v} (T - \theta) \dots\dots\dots (32)$$

com $G_a = \rho_a v_a$

b) Para a entalpia do grão:

$$\left[\begin{array}{l} \text{Energia trans} \\ \text{ferida, por} \\ \text{convecção, do} \\ \text{ar ao grão.} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{l} \text{Energia reque} \\ \text{rida para a} \\ \text{quecer o grão.} \end{array} \right] + \left[\begin{array}{l} \text{Energia re} \\ \text{querida pa} \\ \text{ra evapo -} \\ \text{rar a água} \\ \text{do grão.} \end{array} \right] + \left[\begin{array}{l} \text{Energia reque} \\ \text{rida para a} \\ \text{quecer o vapor} \\ \text{d'água evapo -} \\ \text{rado.} \end{array} \right]$$

matematicamente, tem-se

$$h'a_s S dx (T - \theta) dt = (\rho_p c_p + \rho_p c_w M) S dx \frac{\partial \theta}{\partial t} dt -$$

$$- h_{fg} a v_a S \frac{\partial W}{\partial x} dx dt - c_v (T - \theta) \rho_a v_a \frac{\partial W}{\partial x} dx dt S$$

donde
$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{h'a_s (T - \theta)}{\rho_p c_p + \rho_p c_w M} + \frac{G_a h_{fg} + c_v (T - \theta)}{\rho_p c_p + \rho_p c_w M} \frac{\partial W}{\partial x}$$

..... (33)

c) Para a umidade do ar:

$$\left[\begin{array}{l} \text{A quantidade} \\ \text{de vapor d'á} \\ \text{gua que entra} \\ \text{na posição x.} \end{array} \right] - \left[\begin{array}{l} \text{A quantidade} \\ \text{de vapor d'á} \\ \text{gua que sai} \\ \text{em } x + dx. \end{array} \right] + \left[\begin{array}{l} \text{A variação da} \\ \text{umidade do ar} \\ \text{nos espaços} \\ \text{vazios.} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{l} \text{Umidade} \\ \text{perdida pe} \\ \text{lo grão.} \end{array} \right]$$

$$\rho_a v_a S W dt - \rho_a v_a S (W + \frac{\partial W}{\partial x} dx) dt + \epsilon S dx \rho_a \frac{\partial W}{\partial t} dt =$$

$$= \rho_p S dx \frac{\partial M}{\partial t} dt$$

desprezando o termo $\frac{\partial W}{\partial x}$, tem-se

$$\frac{\partial W}{\partial x} = - \frac{\rho_p}{G_a} \frac{\partial M}{\partial t} \dots\dots\dots (34)$$

d) Para a umidade do grão:

A variação da umidade do produto no tempo $\left(\frac{\partial M}{\partial t}\right)$ deverá ser expressa por uma equação de secagem de uma camada delgada do produto como, por exemplo, a equação 31 do item 2.5.2

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \text{equação de camada delgada} \dots\dots\dots (35)$$

Para a resolução numérica das equações 32 a 35 as seguintes condições deverão ser satisfeitas:

$$T(x = 0, t) = T_0 \dots\dots\dots (36)$$

$$\theta(x, t = 0) = \theta_0 \dots\dots\dots (37)$$

$$W(x = 0, t) = W_0 \dots\dots\dots (38)$$

$$M(x, t = 0) = M_0 \dots\dots\dots (39)$$

3. MATERIAIS E MÉTODOS

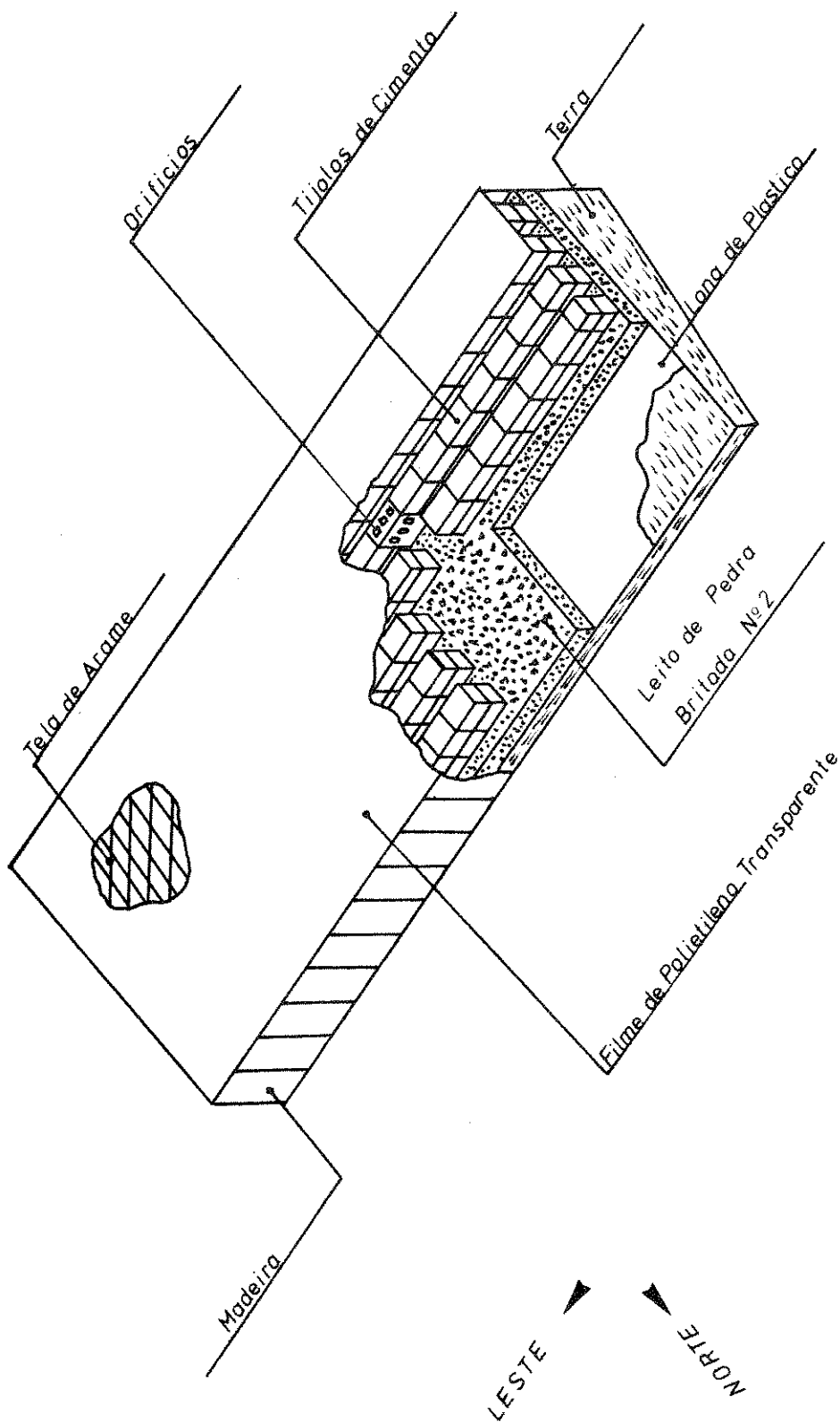
3.1 Construção do Coletor Armazenador de Energia Solar.

Para a construção do coletor armazenador de energia solar (fig.7) utilizou-se uma área de 60 m^2 (3 m de largura por 20 m de comprimento). Nesta área movimentou-se, primeiramente, a terra até formar um ângulo de 15° com a superfície horizontal. Procedeu-se, simultaneamente, à fixação de tábuas de madeira de pinho (0,3 m de largura por 0,02 m de espessura) que serviram como paredes laterais do coletor em toda sua extensão, permitindo que a terra ficasse firmemente compactada na posição inclinada.

Sobre a superfície de pedra colocou-se uma lona de plástico, impermeável, evitando, com isto, a migração de umidade em qualquer sentido. Sobre a lona de plástico, colocou-se uma camada de pedra britada nº 1 que viria constituir parte do sistema absorvedor e armazenador de energia solar. Sobre a camada de pedras foram colocados tijolos de cimento (0,2 m de largura por 0,2 m de altura por 0,4 m de comprimento) de três orifícios, cujo fundo foi parcialmente perfurado. Os tijolos foram dispostos em sete fileiras, tendo cada uma a altura de 0,40 m. Estas fileiras guardaram, entre si e entre as paredes laterais de madeira, uma distância de 0,2 m.

Os tijolos superiores foram dispostos de maneira que seus orifícios estavam voltados para cima, enquanto que os inferiores apresentavam seus orifícios voltados para o Norte. Com esta disposição objetivava-se o aquecimento das cavidades em toda

FIG. 7 COMPONENTES DO COLETOR DE ENERGIA SOLAR



das as épocas do ano e, portanto, um aumento no tempo de uso do coletor.

Sobre os tijolos de cimento, colocou-se uma tela de arame com fios espaçados de 0,1 m, pintada de branco, que veio sustentar um filme de polietileno transparente. Este filme teve como função formar dutos juntamente com as fileiras de tijolos. A figura 8 apresenta um corte transversal do coletor.

As faces laterais e superior dos blocos de concreto, assim como a camada superficial da pedra foram pintadas de preto fosco com o objetivo de aumentar a absorvidade destes materiais à energia solar.

Na frente do coletor solar construiu-se um sistema de drenagem de águas pluviais, utilizando-se manilhas de 0,15 m de diâmetro, perfuradas, as quais foram dispostas de maneira a formar uma canalização.

Foram colocados, em quatro secções ao longo do comprimento do coletor ($x \approx 0,0$, $x = L/3$, $x = 2L/3$ e $x \approx L$, onde x designa a distância a partir da entrada do ar no coletor e L o seu comprimento total), oito termopares para a leitura da temperatura no interior do leito de pedras. Uma das extremidades dos termopares foi conectada a uma chave de 2 polos e 11 pontos que, por sua vez, era conectada a um potenciômetro (LEEDS & NORTHROP - 8690 - 2 MILIVOLT POTENTIOMETER), no momento das leituras de temperaturas nos vários pontos do leito de pedras. A figura 9 mostra uma secção do coletor com a posição dos termopares.

Num dos extremos do coletor conectou-se um duto de madei-

FIG. 8 SECÇÃO TRANSVERSAL DO COLETOR SOLAR

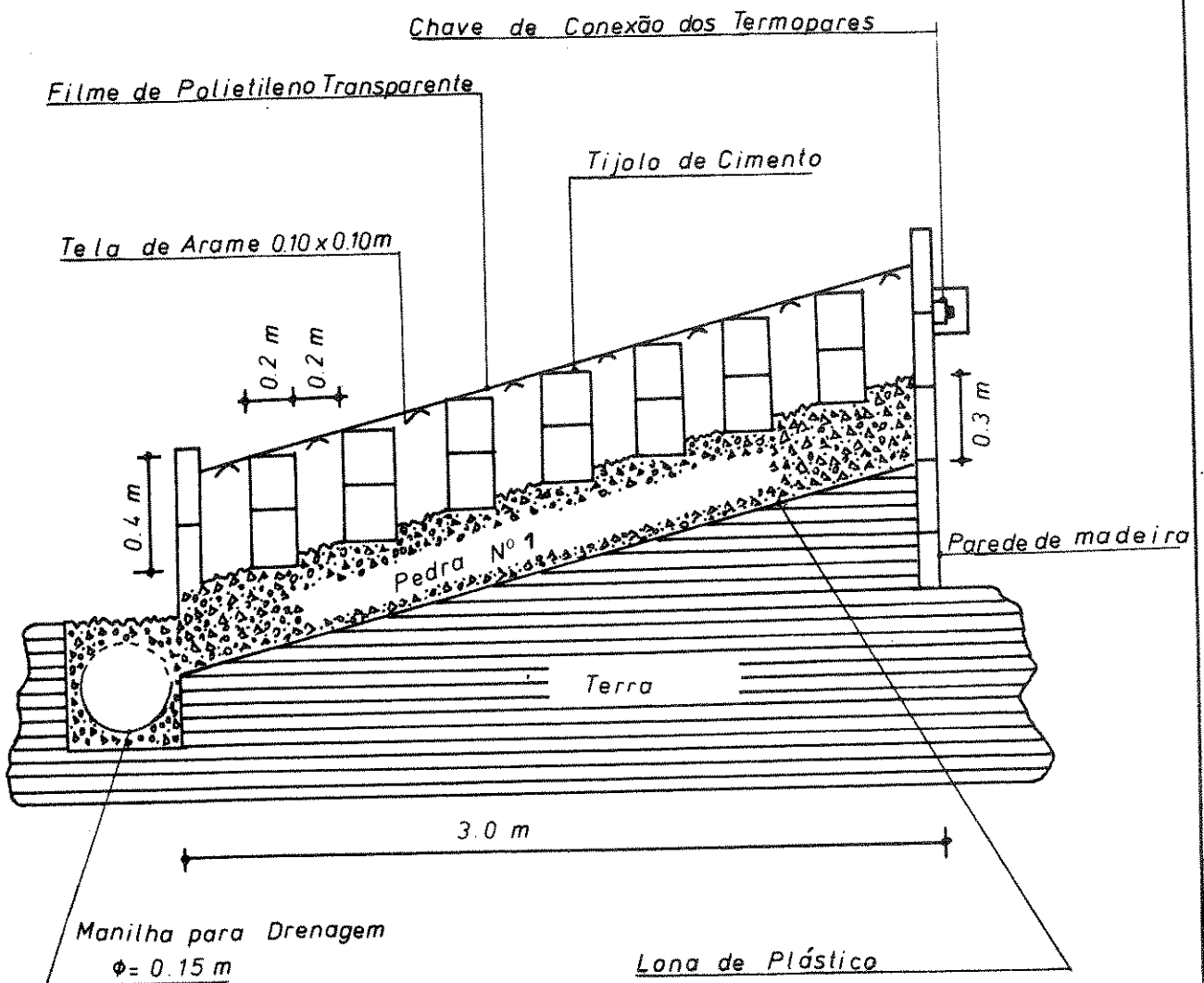
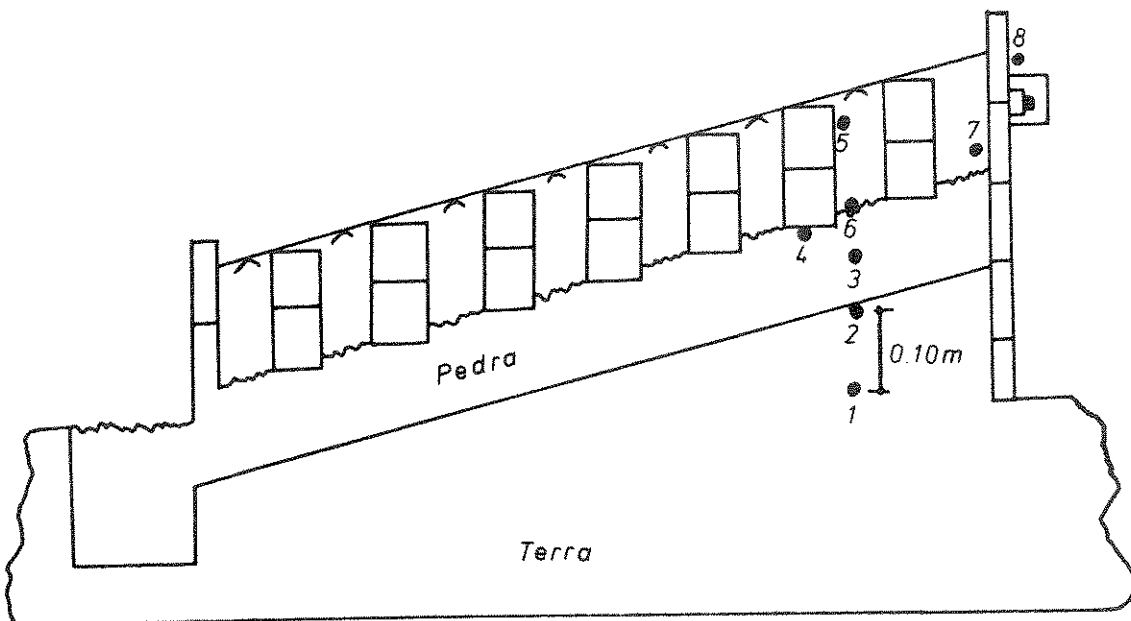


FIG 9 POSIÇÃO DOS TERMOPARES NUMA SECÇÃO DO COLETOR SOLAR



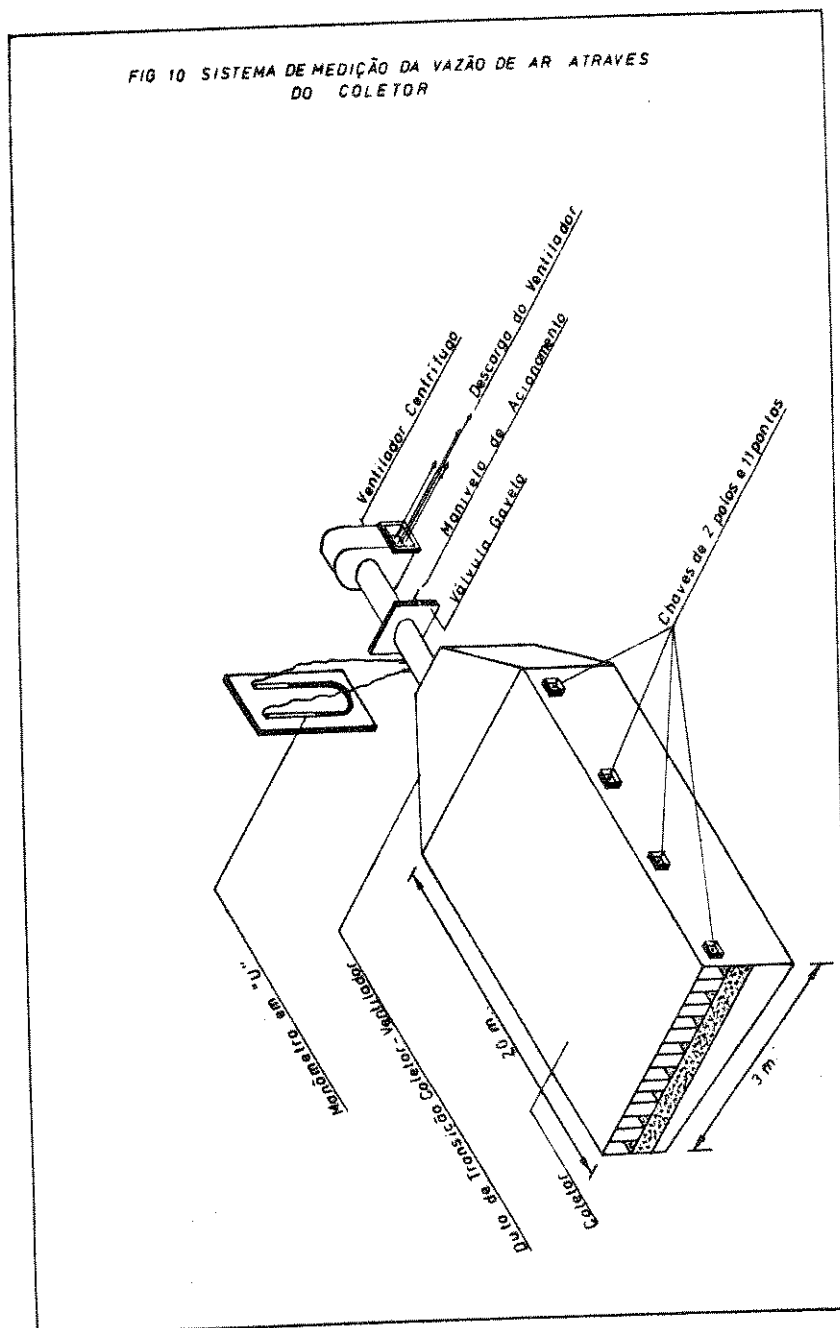
ra acoplado a um duto metálico de 0,5 m de diâmetro e 0,7 m de comprimento que, por sua vez, foi conectado a um ventilador centrífugo de 7,5 HP (BERNAUER). Entre o ventilador e o duto metálico, colocou-se uma válvula gaveta que permitia variar a vazão de ar succionado desde 0,0 até 3,2 m³/s. Na metade do duto metálico, colocou-se um orifício previamente calibrado (fig. 10). Assim sendo, com um manômetro de coluna em "U" podia-se medir a vazão de ar durante o experimento.

O ar succionado pelo ventilador era introduzido através do fundo perfurado (furos de 2,4 mm de diâmetro) de um silo metálico (5,81 m de diâmetro por 5,21 m de altura) fornecido pela Kepler Weber, onde foram colocadas, por camadas, cinqüenta e cinco toneladas de soja "Santa Rosa" com teor médio de umidade de 17,2 %, base úmida, para que fosse realizada a secagem.

A radiação solar incidente sobre o coletor era registrada diariamente através de um pireliômetro Eppley, colocado num plano com inclinação igual a do coletor, e acoplado a um registrador de radiação solar (SPEEDO MAX. W., LEEDS & NORTHROP - 79-10/51059).

3.2 Medições Efetuadas para a Avaliação do Coletor Solar

Para a obtenção das temperaturas em cada uma das quatro secções distintas do coletor solar, utilizou-se um potenciômetro (referido anteriormente), previamente calibrado, que no momento da leitura era acoplado à chave magnética de 2 pólos e 11 pontos, onde um dos extremos dos termopares estava ligado. A leitura destas temperaturas era realizada a cada 30 minutos. A



temperatura do ar na saída do coletor solar próxima à entrada do ventilador, também, era avaliada a cada 30 minutos, por meio de um termômetro comum.

O registro da radiação solar era realizado, continuamente, por meio de um pireliômetro ligado a um registrador que efetuava o registro da radiação solar durante todo o dia. Os resultados experimentais da radiação solar, da temperatura nas distintas secções do coletor solar e na entrada do ventilador serão apresentados no item 5.

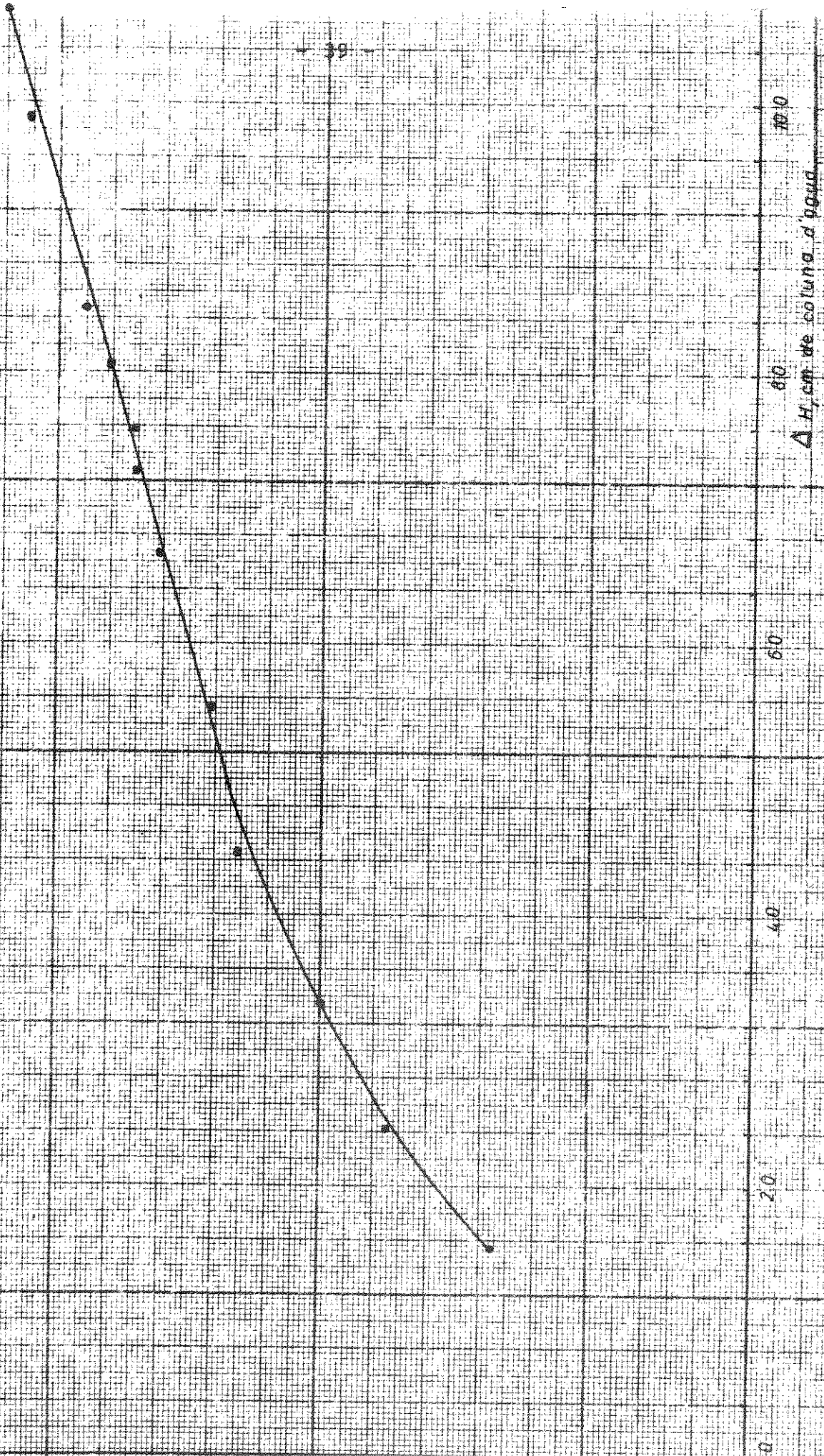
Para a avaliação do coletor armazenador solar eram necessários os seguintes dados: a) as propriedades físicas do material (ar, pedra); b) a energia média incidente num determinado período de tempo e c) a vazão de ar.

Para a obtenção da energia incidente no período de tempo desejado, fez-se a integração gráfica das curvas de radiação solar (apresentadas no item 5), mediante a utilização de um planímetro (MAHO Nº 18587).

Para a avaliação do fluxo de ar lia-se a perda de pressão no orifício, situado próximo ao ventilador, através do manômetro em "U". Por meio da curva de calibração do orifício (apresentada na fig. 11), conhecia-se a vazão de ar em m^3/seg .

As propriedades físicas do ar foram tomadas da literatura disponível (Silva et. al., 1972) enquanto que algumas propriedades térmicas aparentes do conjunto constituído por pedra e ar intersticial foram determinadas experimentalmente (item 3.3).

FIG. II CURVA DE CALIBRAÇÃO DO ORIFÍCIO



3.3 Determinação Experimental da Condutividade e Difusividade Térmicas do Conjunto Constituído por Pedra e Ar Intersticial.

Para a determinação das propriedades térmicas aparentes da pedra utilizou-se um equipamento proposto por Rossi e Roa (1976). O aparelho consiste basicamente no seguinte: um fio de níquel - crômio de 100 Ω /m é enrolado na forma de espiras e colocado dentro de um tubo de vidro de 0,367 cm de diâmetro. O conjunto é posto no eixo central de um cilindro de acrílico de 0,19 m de diâmetro que posteriormente é enchido com pedras (a mesma usada na construção do coletor). Uma das extremidades do fio de níquel - crômio é conectada a um amperímetro, enquanto a outra é ligada a um dos pólos de um regulador de voltagem. O outro pólo do regulador é ligado a uma das extremidades de um resistor. O circuito é finalmente fechado em série ao se conectar o resistor ao amperímetro.

Na metade da altura do cilindro de acrílico foram colocados cinco termopares de cobre-constantan-AWG 20, nas posições a 3,0, 4,4, 6,3 e 8,7 cm a partir do tubo de vidro, que contém a resistência de níquel-crômio, sendo que uma das extremidades de cada termopar é, posteriormente, conectada a um potenciômetro.

Faz-se circular eletricidade através da resistência elétrica medindo-se sua intensidade com o amperímetro. O calor dissipado pela resistência faz com que o conjunto constituído por pedra e ar intersticial se aqueça sendo sua temperatura obtida através dos termopares.

Os valores experimentais da temperatura do conjunto pedra-ar são comparados com os valores gerados por um modelo matemático, baseado no fenômeno de transferência de calor em regime transitório, num cilindro infinito.

Faz-se variar, através de um programa de computador de regressão não-linear (Dye e Nicelly, 1971), os valores de condutividade e difusividade térmicas do conjunto pedra-ar, a partir de um valor inicial, até que a soma dos quadrados dos resíduos entre as temperaturas experimentais e simuladas seja mínima. Quando a referida soma dos quadrados atinge o seu valor mínimo, significa que os parâmetros estimados são tais que o modelo proposto com base na transferência de calor simula o fenômeno real. Os resultados experimentais de condutividade e difusividade térmicas para o conjunto pedra-ar são apresentados no item 5.

4. ANÁLISE MATEMÁTICA DO COLETOR SOLAR

Na obtenção de um modelo matemático para o coletor solar foi considerado um elemento diferencial de volume numa posição arbitrária do mesmo (fig. 12), e realizados balanços de energia para o sistema pedra-ar. Considerou-se que a temperatura do ar depende do tempo e da posição ao longo do comprimento do coletor, e a temperatura da pedra foi considerada como função do tempo e da posição ao longo do comprimento e da espessura do leito (fig. 13).

As seguintes simplificações foram assumidas:

a) A queda da temperatura através da cobertura de plástico é

FIG 12 ELEMENTO DE VOLUME NUMA POSIÇÃO ARBITRÁRIA DO
COLETOR SOLAR

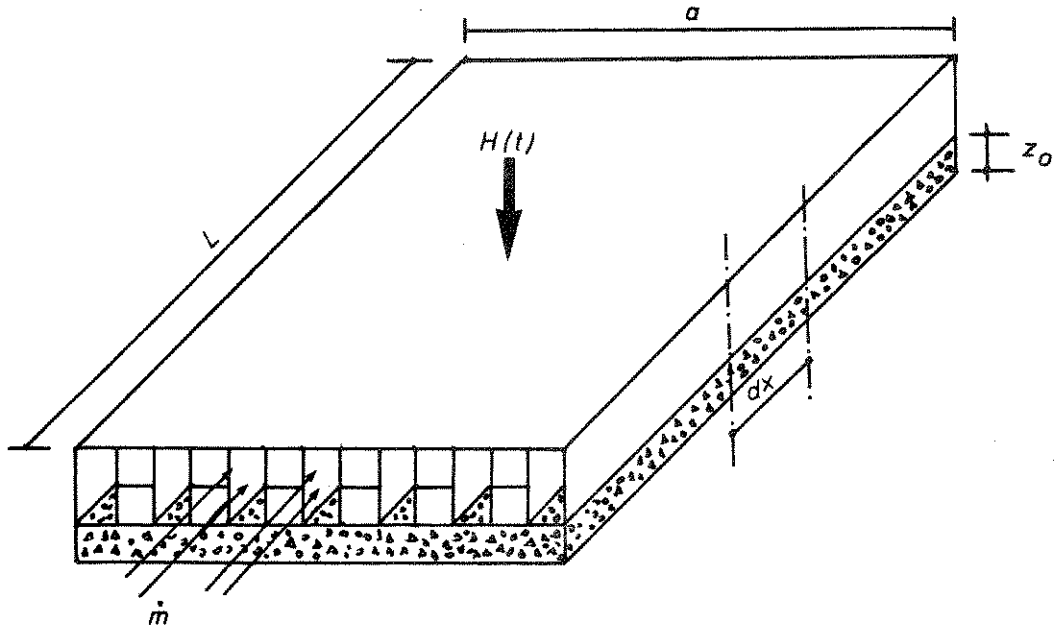
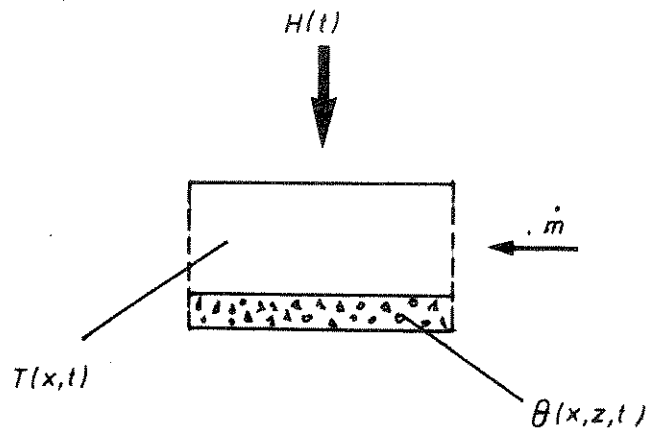


FIG 13 ELEMENTO DE VOLUME DO COLETOR SOLAR



desprezível.

- b) Os efeitos devidos a depósitos de poeira sobre o plástico não são considerados.
- c) As perdas de calor através das laterais são incluídas nas perdas, por convecção, para o ambiente.
- d) As perdas de calor por emissão da massa de pedras foram linearizadas e incluídas nas perdas, por convecção, através do plástico.

Após estas simplificações, os seguintes balanços de energia foram efetuados num elemento de volume do coletor (fig. 13), tais como:

$$a) \left[\begin{array}{l} \text{Energia absor} \\ \text{vida pelo ab} \\ \text{sorvedor.} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{l} \text{Energia transmitida} \\ \text{pela massa de pe} \\ \text{dras, por condução.} \end{array} \right] + \left[\begin{array}{l} \text{Energia cedida} \\ \text{ao ar, por con} \\ \text{vecção.} \end{array} \right]$$

matematicamente, tem-se:

$$H(t) \cdot (\alpha \tau) (a \, dx) = -k_{ap} (a \, dx) \frac{\partial \theta}{\partial z} (x, z=0, t) + \\ + U(a \, dx) A_p \left[\theta(x, z = 0, t) - T(x, t) \right] \dots\dots (40)$$

$$b) \left[\begin{array}{l} \text{Energia recebida} \\ \text{pelo ar, por con} \\ \text{vecção.} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{l} \text{Aumento de Energia} \\ \text{Interna do ar.} \end{array} \right] + \left[\begin{array}{l} \text{Perdas para o} \\ \text{ambiente, por} \\ \text{convecção.} \end{array} \right]$$

matematicamente,

$$\begin{aligned}
 A_p U(a \, dx) \left[\theta(x, z = 0, t) - T(x, t) \right] = \\
 = m c_a \frac{\partial T}{\partial x}(x, t) \, dx + (a \, dx) U_1 \left[T(x, t) - T_\infty(t) \right] \\
 \dots\dots\dots (41)
 \end{aligned}$$

A difusão de energia através da camada de pedras é dada por:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t}(x, z, t) = D_{ap} \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2}(x, z, t) \dots\dots\dots (42)$$

Como condições iniciais tem-se:

$$\frac{\partial \theta}{\partial z}(x, z = z_0, t) = 0 \dots\dots\dots (43)$$

$$\theta(x, z, t = 0) = \theta_0 \dots\dots\dots (44)$$

$$T(x = 0, t) = T_\infty(t) \dots\dots\dots (45)$$

Uma simplificação adicional, que pode ser realizada no modo descrito pelas equações 41 a 45, é obtida considerando-se que a massa absorvedora, constituída por pedra e tijolos, aquece-se de maneira uniforme, ou seja, não se considera o gradiente de temperatura no interior do leito. Assim, tem-se a temperatura do ar e a da pedra como função da posição ao longo do comprimento do coletor e do tempo. Após esta consideração, pode-se realizar dois balanços de energia semelhantes aos anteriores:

a) Balanço de energia para o absorvedor no elemento de volume
(a dx)

$$\left[\begin{array}{l} \text{Energia recebida} \\ \text{pelo coletor.} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{l} \text{Aumento da energia} \\ \text{interna da massa} \\ \text{absorvedora.} \end{array} \right] + \left[\begin{array}{l} \text{Energia que a mas} \\ \text{sa absorvedora ce} \\ \text{de ao ar, por con} \\ \text{vecção.} \end{array} \right]$$

$$H(t) \alpha r(a dx) = U_3 c_p (a dx) \frac{\partial \theta(x, t)}{\partial t} + A_p U(a dx) \left[\theta(x, t) - T(x, t) \right] \dots\dots\dots (46)$$

b) Balanço de energia para o ar no elemento de volume (a dx)

$$\left[\begin{array}{l} \text{Energia que a mas} \\ \text{sa absorvedora ce} \\ \text{de ao ar, por con} \\ \text{vecção.} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{l} \text{Aumento da energia} \\ \text{interna do ar.} \end{array} \right] + \left[\begin{array}{l} \text{Energia perdida} \\ \text{ao ambiente ,} \\ \text{por convecção.} \end{array} \right]$$

$$A_p U(a dx) \left[\theta(x, t) - T(x, t) \right] = \dot{m} c_a \frac{\partial T(x, t)}{\partial x} dx + (a dx) U_1 \left[T(x, t) - T_\infty(t) \right] \dots\dots\dots (47)$$

As seguintes condições iniciais e de contorno deverão ser satisfeitas:

$$\theta(x, t = 0) = U_k, \quad k = 4 \dots 7 \dots\dots\dots (48)$$

$$T(x = 0, t) = T_\infty(t) \dots\dots\dots (49)$$

A condição estabelecida pela equação (48) determina que a temperatura da massa absorvedora assumirá um valor constante no instante $t = 0$. O valor numérico da constante U_k será diferente para cada ensaio, pois as condições ambientais são diferentes.

A equação (49) informa que a temperatura do ar na entrada do coletor (posição $x = 0$), no instante t , é igual a temperatura ambiente, no instante em questão.

Para a resolução das equações (46) e (47) as seguintes aproximações foram feitas (Carnahan et. al. , 1969):

$$\frac{\partial T(x, t)}{\partial x} = \frac{T(x + \Delta x, t) - T(x, t)}{\Delta x} \dots\dots\dots (50)$$

$$\frac{\partial \theta(x, t)}{\partial t} = \frac{\theta(x, t + \Delta t) - \theta(x, t)}{\Delta t} \dots\dots\dots (51)$$

Substituindo os valores de $\frac{\partial T(x, t)}{\partial x}$ e $\frac{\partial \theta(x, t)}{\partial t}$ obtidas das equações (50) e (51) nas equações (46) e (47) tem-se:

$$\theta(x, t + \Delta t) = \frac{1}{U_3 c_p} \left[H(t) \alpha \tau \Delta t - [U_3 c_p - A_p U \Delta t] \theta(x, t) + A_p U \Delta t T(x, t) \right] \dots\dots\dots (52)$$

Considerando:

$$\theta_1 = A_p U \Delta t \dots\dots\dots (53)$$

$$\theta_2 = U_3 c_p - \theta_1 \dots\dots\dots (54)$$

$$U = A' (Rey)^{B'} \dots\dots\dots (55)$$

Com $Rey = \frac{\rho_a v_a D_h}{\mu_a} \dots\dots\dots (56)$

e $D_h = \frac{4.S_d}{P_d} \dots\dots\dots (57)$

Após as considerações acima, a constante θ_1 pode ser escrita como:

$$\theta_1 = A_p A' (Rey)^{B'} \Delta t \dots\dots\dots (58)$$

fazendo $A_p A' (Rey)^{B'} = U_2$, tem-se

$$\theta_1 = U_2 \Delta t \dots\dots\dots (59)$$

Finalmente a equação (52) adquire a forma:

$$\theta(x, t + \Delta t) = \frac{1}{U_3 c_p} \left[H(t) \alpha \tau \Delta t - [U_3 c_p - \theta_1] \theta(x, t) + \theta_1 T(x, t) \right] \dots\dots\dots (60)$$

A equação (47), após as substituições numéricas ficará:

$$T(x + \Delta x, t) = \frac{A_p A' (Rey)^{B'} a \Delta x}{\dot{m} c_a} \theta(x, t) - \left[\frac{A_p A' (Rey)^{B'} a \Delta x}{\dot{m} c_a} - 1 + \frac{a U_1 \Delta x}{\dot{m} c_a} \right] T(x, t) +$$

$$+ \frac{a U_1 \Delta x}{\dot{m} c_a} T_\infty (t) \dots\dots\dots (61)$$

onde se considera

$$T_1 = \frac{A_p A' Re^{B'} a \Delta x}{\dot{m} c_a} \dots\dots\dots (62)$$

$$T_2 = T_1 - 1 + \frac{a U_1 \Delta x}{\dot{m} c_a} \dots\dots\dots (63)$$

$$T_3 (t) = \frac{a U_1 \Delta x T_\infty (t)}{\dot{m} c_a} \dots\dots\dots (64) ,$$

donde tem-se, finalmente, para a temperatura do ar

$$T(x + \Delta x, t) = T_1 [\theta(x, t)] - T_2 [T(x, t)] - T_3 (t) \dots\dots\dots (65)$$

Pelas equações (46) a (49) vê-se que os valores experimentais que se deve ter para a resolução do modelo descrito pelas equações (46) a (65) são: a) a radiação solar; b) a temperatura ambiente; c) a vazão de ar; e d) a temperatura da massa absorvedora no início da operação do coletor. Considerou-se a temperatura da massa absorvedora como um parâmetro desconhecido, restando apenas a radiação solar, a temperatura ambiente e a vazão de ar como grandezas que deverão ser obtidas experimentalmente. Assim, os parâmetros desconhecidos U_1 a U_7 foram obtidos com base em técnicas de estimação de parâmetros (Beck, 1973),

através de um programa de regressão não-linear (Dye e Nicelly , 1971), não apresentado por questão de espaço.

Para a operação de estimação dos parâmetros construiu-se:

- um arquivo de dados chamado RADS01.DAT, apresentado no apêndice A₃, contendo todos os dados experimentais acima enumerados e mais algumas informações adicionais (listadas no apêndice A₁), necessárias à execução do programa de regressão não linear;
- um programa chamado PROPRI, escrito em FORTRAN IV (DECSYSTEM10 1975), apresentado no apêndice A₂, cujo objetivo é ler as informações contidas no arquivo de dados e fornecê-las a uma rotina chamada CYLNUM, abordada a seguir e
- a rotina CYLNUM, também escrita em FORTRAN IV (apresentada no apêndice A₄), cuja função é receber os dados experimentais e calcular, de forma iterativa, com base nas equações (46) a (55), a temperatura do ar e da pedra num determinado instante, em qualquer posição do coletor solar.

A estimação dos parâmetros U₁ a U₇ consiste, basicamente, em minimizar a função:

$$R_1 = \sum_{i=1}^{\text{NOPT}} \left[\hat{T}_1(x = L, t_1) - T_1(x = L, t_1) \right]^2$$

A minimização de R₁ foi realizada através do programa de regressão não-linear, que varia os parâmetros U's, a partir de um valor inicial. A cada variação dos parâmetros, a temperatura do ar na saída do coletor ($\hat{T}_1(x = L, t_1)$) é recalculada através da rotina CYLNUM, e de posse da temperatura do ar obtida experi

mentalmente ($T_1(x = L, t_1)$) na mesma posição e tempo (também incluída no arquivo de dados RADS01.DAT) é computada a função objetiva R_1 . Quando a referida função atinge o seu valor mínimo, os parâmetros U's são tais que ao serem reincorporados ao modelo irão deixá-lo em condições de simular, com precisão, novos "experimentos" em menos tempo e com menor custo.

Após a programação e execução (num computador PDP-10 do Centro de Computação da UNICAMP) do modelo descrito pelas equações (46) a (65), tentou-se melhorá-lo com a introdução da equação de difusão de energia no leito de pedras (equação 42), resultando no modelo descrito pelas equações (40) a (45). Após a resolução numérica destas equações e a programação do modelo, muitas tentativas foram realizadas com o intuito de estimar seus parâmetros desconhecidos. Entretanto, todas elas resultaram em tempos excessivamente longos de utilização do computador, possivelmente por inadequação dos dados experimentais, ou mesmo por ineficiência de programação. Assim, a simplificação inicial de aquecimento uniforme do leito de pedras foi definitivamente aceita, embora deva-se reconhecer a importância de rever este detalhe em estudos futuros.

5. RESULTADOS OBTIDOS

5.1 Resultados da Determinação da Condutividade Térmica e Difusividade Térmica do Conjunto Pedra-Ar.

Para determinação das propriedades térmicas aparentes do con

junto pedra-ar foram realizados três ensaios, conforme descrição no item 3.3. Nas figuras 14 a 16 estão comparados, graficamente, os resultados experimentais e calculados da temperatura do referido conjunto, nas diferentes posições ao longo do raio do cilindro, relativos aos 3 experimentos em questão. Pode-se observar uma boa concordância entre os dados experimentais e os valores calculados, o que confirma que o equipamento proposto por Rossi e Roa (1976), para determinação das propriedades térmicas dos grãos, funciona satisfatoriamente para a pedra usada.

Os valores médios da condutividade térmica e o da difusividade térmica do conjunto constituído por pedra e ar, intersticial, obtidos dos três ensaios, são os seguintes:

$$\text{Difusividade Térmica} = (0,137 \cdot 10^{-6} \pm 0,202 \cdot 10^{-8}) \text{ m}^2/\text{s}$$

$$\text{Condutividade Térmica} = (0,166 \pm 0,391 \cdot 10^{-2}) \text{ Kcal/m h } ^\circ\text{C}$$

5.2 Resultados da Integração Gráfica das Curvas de Radiação Solar e Valores Experimentais da Temperatura do Ar e da Pedra, nas Quatro Secções do Coletor Solar.

Os resultados dos registros de radiação solar para 4 ensaios com o coletor são apresentados nas figuras 17 a 20. Nas mesmas figuras estão apresentados os valores da temperatura do ar na saída do coletor. É interessante notar que não existem picos na temperatura do ar, como acontece nas curvas de radiação solar. A massa de pedras tem um papel importante na atenuação destes picos de temperatura.

Os resultados obtidos: a) da integração gráfica das curvas

FIG 14 TEMPERATURA EM DIFERENTES POSIÇÕES DO RAIO DO
CILINDRO CHEIO DE PEDRA Nº 1

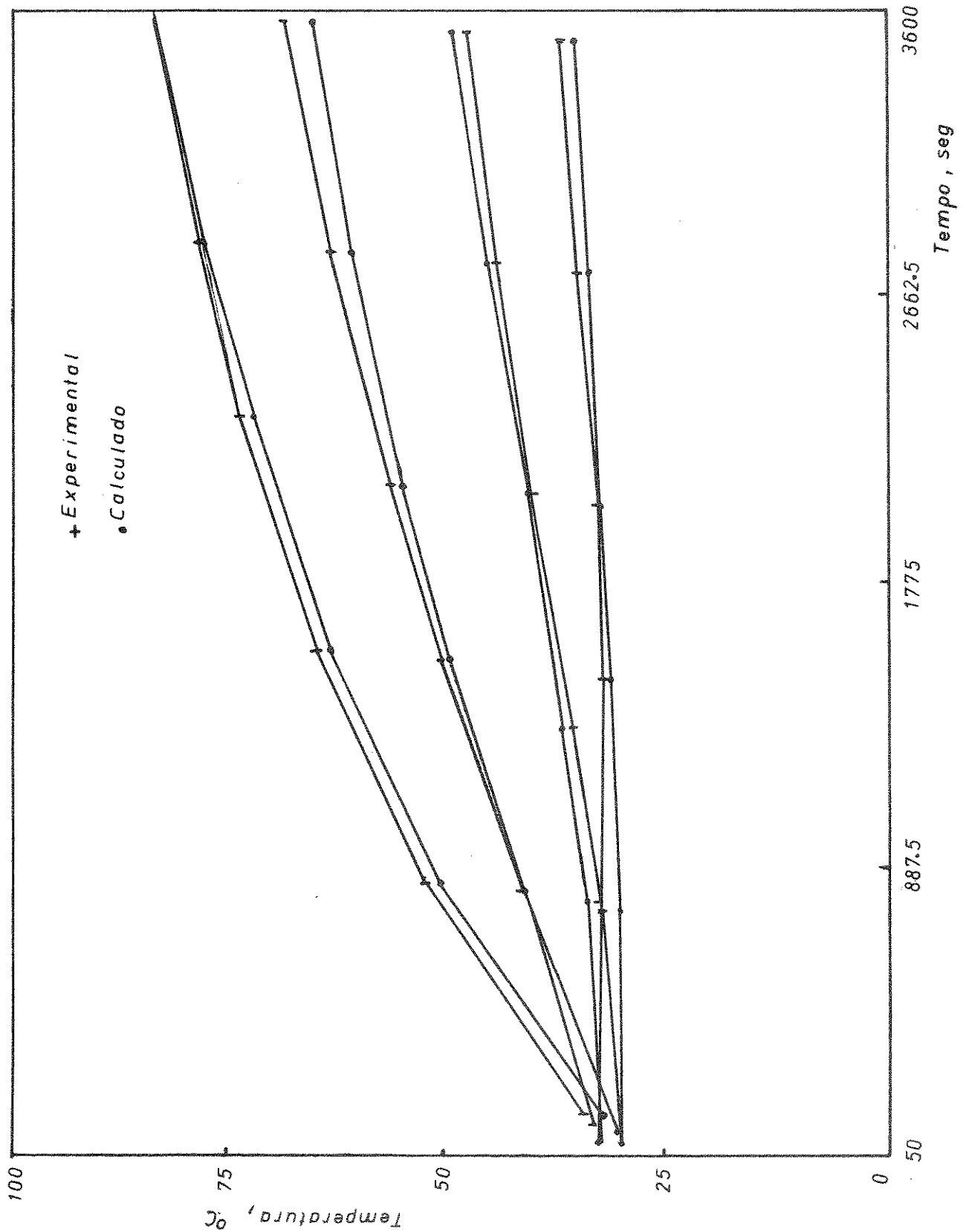


FIG 15 TEMPERATURA EM DIFERENTES POSIÇÕES DO RAIO DO
CILINDRO CHEIO DE PEDRA Nº 1

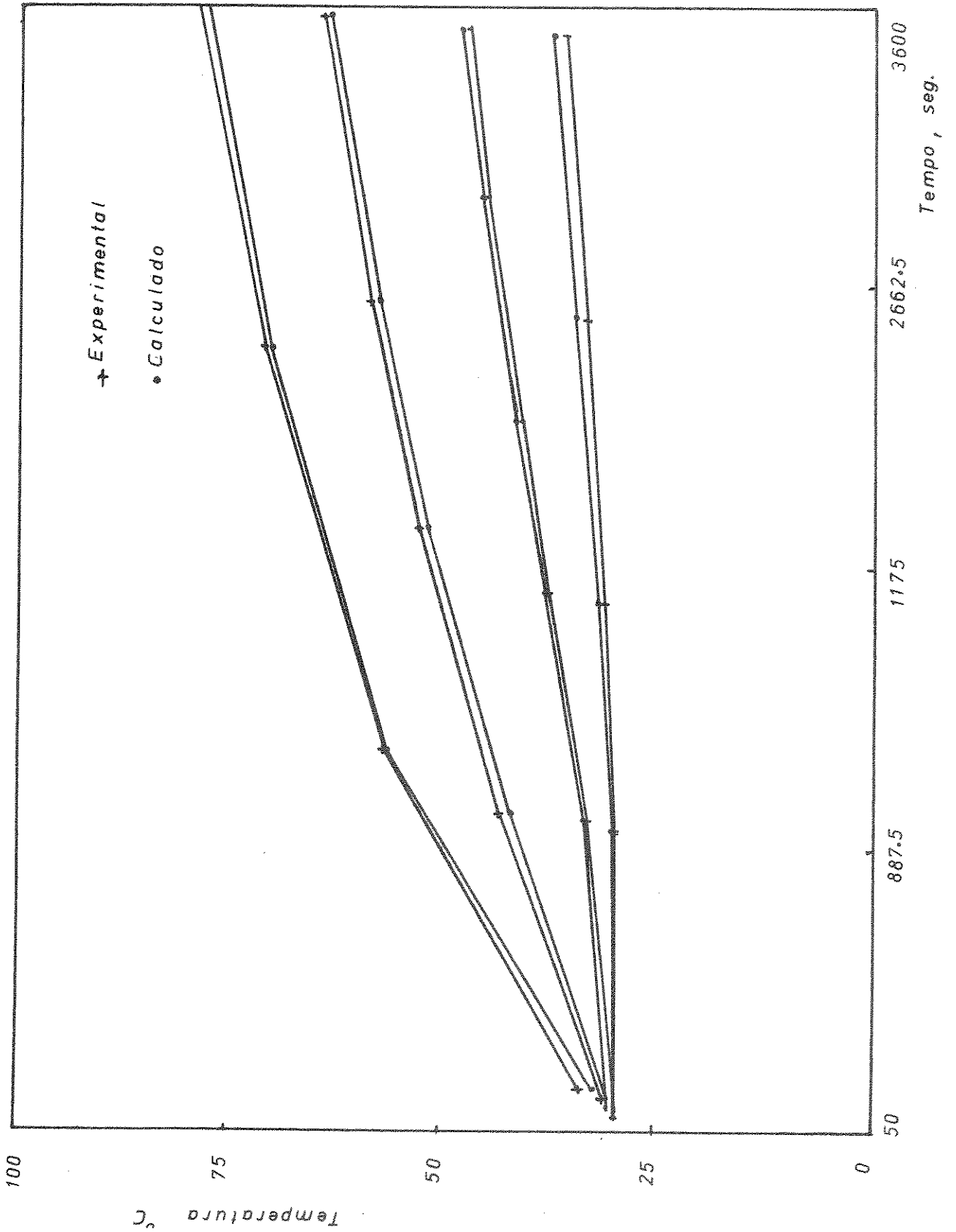


FIG 17 Curva de Radiação Solar (27-04-77)

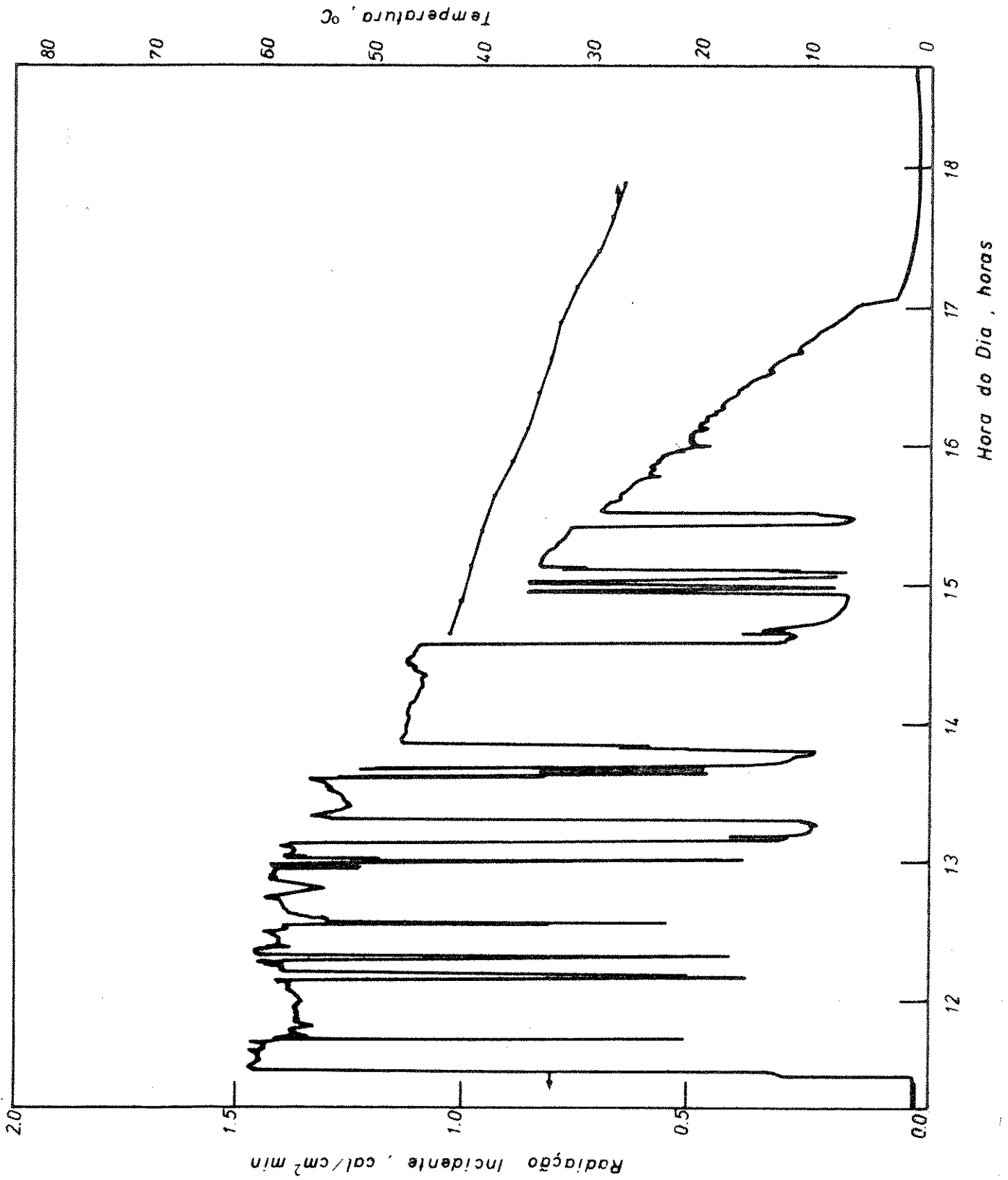


FIG 19 Curva de Radiação Solar (29-04-77)

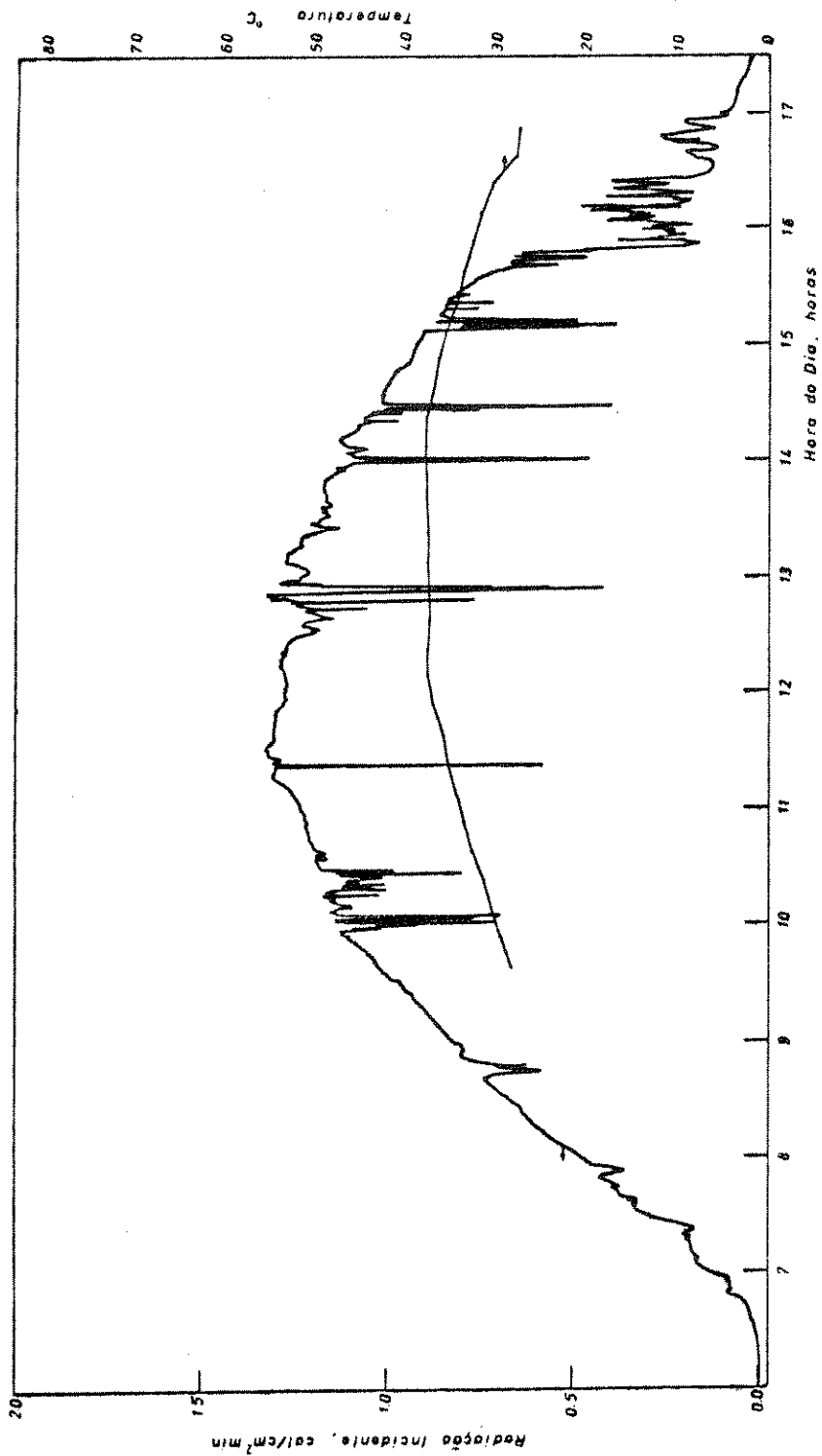
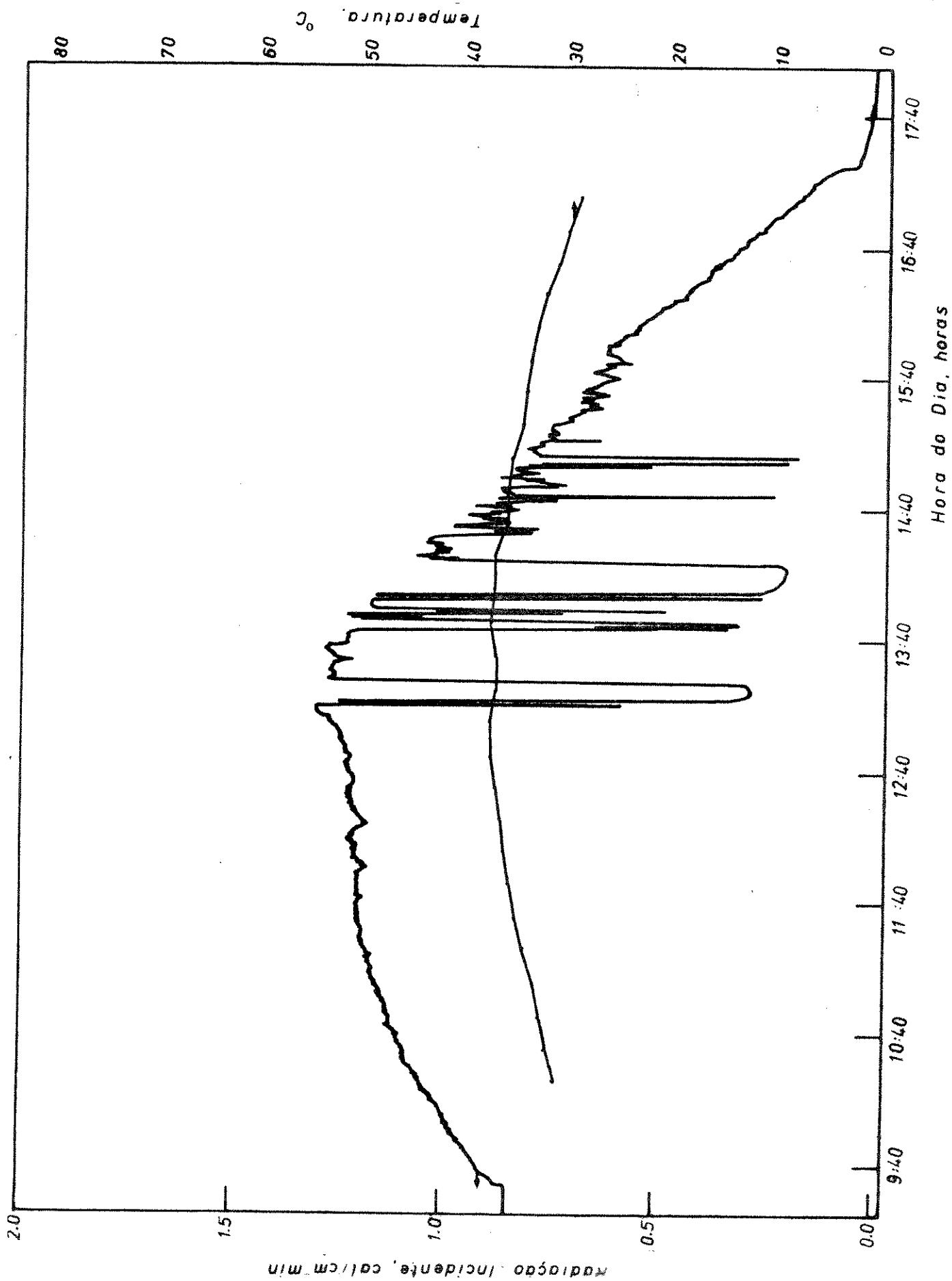


FIG 20 Curva de Radiação Solar (05-05-77)



de radiação solar; b) da temperatura do ar na saída do coletor; c) da temperatura ambiente e d) da vazão de ar utilizada nos quatro ensaios são apresentados nas tabelas 5 a 9, enquanto que na tabela 10 estão os dados de temperatura no interior do leito de pedras, para 1 ensaio.

TABELA 5

Resultados Experimentais de Radiação Solar, Temperatura e Vazão do Ar, Obtidos no Dia 27.04.77.

Período (horas)	Energia Incidente (Watt/m ²).	Temperatura do Ar na Saída do Coletor (°C).	Temperatura Ambiente (°C).
14:30-14:45	426,7	43,5	26,0
14:45-15:00	280,0	42,5	26,0
15:00-15:15	426,7	41,5	26,0
15:15-15:30	413,3	40,5	26,0
15:30-15:45	413,3	39,4	26,0
15:45-16:00	400,0	37,8	27,7
16:00-16:15	346,7	36,5	26,5
16:15-16:30	333,3	35,5	26,2
16:30-16:45	306,7	34,5	26,0
16:45-17:00	106,7	33,5	25,8
17:00-17:15	53,3	32,0	25,5
17:15-17:30	13,3	30,0	25,0
17:30-17:45	13,3	28,5	24,5
17:45-18:00	13,0	27,5	24,5

Vazão de Ar = 1,64 kg/s

TABELA 6

Resultados Experimentais de Radiação Solar, Temperatura e Vazão do Ar, Obtidos no Dia 28.04.77.

Período (horas)	Energia Inci- dente, (Watt/ m ²).	Temperatura do Ar na Saída do Coletor, (°C).	Temperatura Ambiente , (°C).
12:00-12:15	973,3	39,0	27,0
12:15-12:30	960,0	38,7	27,2
12:30-12:45	973,3	37,7	27,5
12:45-13:00	893,3	37,0	28,0
13:00-13:15	640,0	38,0	28,5
13:15-13:30	933,0	39,5	29,0
13:30-13:45	920,0	40,0	29,5
13:45-14:00	880,0	39,8	29,3
14:00-14:15	813,3	39,3	29,0
14:15-14:30	853,3	38,8	28,0
14:30-14:45	746,7	38,3	27,0
14:45-15:00	680,0	38,2	27,5
15:00-15:15	720,0	37,7	28,0
15:15-15:30	666,7	36,9	27,7
15:30-15:45	680,0	36,0	27,5
15:45-16:00	466,7	35,0	27,2
16:00-16:15	426,7	33,8	27,0
16:15-16:30	373,3	32,6	26,7
16:30-16:45	240,0	31,5	26,5
16:45-17:00	240,0	30,5	26,0

Vazão do Ar = 2,69 kg/s.

TABELA 7

Resultados Experimentais de Radiação Solar, Temperatura e Vazão do Ar, Obtidos no Dia 29.04.77.

Período (horas)	Energia Inci- dente, (Watt/ m ²).	Temperatura do Ar na Saída do Coletor, (°C).	Temperatura Ambiente , (°C).
09:30-09:45	733,3	28,3	23,0
09:45-10:00	733,3	29,5	23,0
10:00-10:15	733,3	30,5	23,5
10:15-10:30	760,0	31,5	23,2
10:30-10:45	813,3	32,5	24,0
10:45-11:00	866,7	33,5	24,2
11:00-11:15	880,0	34,5	24,5
11:15-11:30	960,0	35,3	24,7
11:30-11:45	973,3	36,2	25,0
11:45-12:00	973,3	37,0	25,0
12:00-12:15	960,0	37,5	25,0
12:15-12:30	973,3	37,5	25,2
12:30-12:45	866,7	37,5	25,5
12:45-13:00	813,3	37,5	25,7
13:00-13:15	906,7	37,5	26,0
13:15-13:30	866,7	37,5	26,2
13:30-13:45	826,7	37,6	26,5
13:45-14:00	773,3	37,6	26,2
14:00-14:15	773,3	37,8	27,0
14:15-14:30	720,0	37,6	27,0
14:30-14:45	653,3	36,8	27,0
14:45-15:00	720,0	36,3	27,0
15:00-15:15	560,0	35,5	27,0
15:15-15:30	586,7	34,5	27,5
15:30-15:45	440,0	33,5	26,0
15:45-16:00	186,7	32,5	25,7
16:00-16:15	240,0	31,9	25,5
16:15-16:30	146,7	30,2	25,2
16:30-16:45	133,3	28,8	25,0
16:45-17:00	106,7	27,5	25,0

Vazão do Ar = 2,63 kg/s.

TABELA 8

Resultados Experimentais de Radiação Solar, Temperatura e Vazão do Ar, Obtidos no Dia 05.05.77.

Período (horas)	Energia Incidente, (Watt/m ²).	Temperatura do Ar na Saída do Coletor (°C).	Temperatura Ambiente, °C.
10:10-10:25	746,7	31,5	27,0
10:25-10:40	780,0	32,3	27,7
10:40-10:55	813,2	32,8	28,5
10:55-11:10	853,3	33,5	28,7
11:10-11:25	866,7	34,5	29,0
11:25-11:40	853,3	35,3	29,2
11:40-11:55	853,3	35,8	29,5
11:55-12:10	866,7	36,4	29,5
12:10-12:25	866,7	36,8	29,5
12:25-12:40	866,7	37,3	29,2
12:40-12:55	893,3	37,8	29,0
12:55-13:10	946,7	37,8	29,0
13:10-13:25	506,7	37,3	29,0
13:25-13:40	880,0	37,3	29,0
13:40-13:55	693,3	37,7	29,0
13:55-14:10	466,7	37,5	29,0
14:10-14:25	426,7	37,5	29,0
14:25-14:40	573,3	36,0	29,0
14:40-14:55	533,3	36,0	29,0
14:55-15:10	466,7	35,7	28,7
15:10-15:25	533,3	34,9	28,5
15:25-15:40	413,3	34,3	28,2
15:40-15:55	440,0	34,1	28,0
15:55-16:10	413,3	33,5	27,5
16:10-16:25	306,7	32,5	27,0
16:25-16:40	200,0	31,5	26,5
16:40-16:55	186,7	30,5	26,0
16:55-17:10	173,3	29,5	25,0

Vazão do Ar = 3,19 kg/s.

TABELA 9

Temperaturas em Diferentes Locais nas Quatro Secções Distintas do
Coletor Solar, Obtidas no Dia 05.05.77.

Horário (horas)	Secção	TEMPERATURA, C							T _{ambiente}
		T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅	T ₆	T ₇	
11:20	S ₁	25,7	25,7	26,2	32,3	38,1	34,2	32,5	29,6
11:25	S ₂	26,0	26,0	26,0	35,7	34,9	32,1	27,4	26,7
11:30	S ₃	26,5	26,5	33,0	36,1	32,3	30,4	27,2	28,7
11:35	S ₄	25,3	24,8	25,7	32,3	26,0	27,7	27,2	27,7
11:55	S ₁	24,3	25,7	26,2	34,5	41,6	35,9	36,9	30,6
12:00	S ₂	26,5	27,0	27,2	36,9	37,8	34,5	29,6	30,8
12:10	S ₃	26,7	26,7	34,5	37,3	33,5	31,3	28,2	30,1
12:15	S ₄	25,3	23,8	25,7	33,5	28,2	27,9	27,7	29,6
13:00	S ₁	25,3	25,7	26,5	35,9	43,1	37,8	38,3	32,3
13:05	S ₂	25,3	25,5	25,7	35,7	38,1	34,5	29,2	29,2
13:10	S ₃	24,8	25,3	34,5	35,2	33,0	31,1	27,7	28,2
13:20	S ₄	24,8	24,8	28,4	32,8	28,7	29,2	29,2	30,6
14:00	S ₁	26,7	27,2	34,9	34,9	34,5	33,0	29,9	30,1
14:05	S ₂	24,3	24,5	28,2	32,8	28,2	28,7	28,7	29,6
14:10	S ₃	27,0	27,2	28,2	35,2	36,2	34,9	31,1	29,4
14:15	S ₄	25,5	26,2	26,7	35,9	38,3	36,2	32,5	30,1

TABELA 9 (Continuação)

Horário (horas)	Seção	TEMPERATURA, °C							T _{ambiente}
		T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅	T ₆	T ₇	
15:00	S ₁	25,5	26,0	27,0	35,2	39,3	36,1	34,0	30,0
15:05	S ₂	27,0	27,2	28,7	34,5	35,2	34,0	30,6	28,7
15:10	S ₃	26,7	27,4	32,8	32,3	32,8	31,8	29,6	29,2
15:15	S ₄	24,5	24,8	28,4	30,6	28,4	28,7	28,7	28,9
16:00	S ₁	24,5	25,0	28,4	31,6	29,2	29,4	28,7	29,4
16:05	S ₂	26,7	27,4	31,8	32,1	32,5	31,6	29,4	29,6
16:10	S ₃	27,0	27,4	28,7	33,0	34,2	32,8	30,1	29,6
16:15	S ₄	25,7	26,2	27,2	34,5	35,9	34,2	31,8	30,1
17:00	S ₁	26,0	26,7	27,4	32,5	32,5	32,3	30,1	28,7
17:05	S ₂	27,0	27,7	29,2	29,9	29,9	30,4	29,2	29,4
17:10	S ₃	27,0	27,7	30,1	29,2	28,9	29,2	28,4	27,9
17:15	S ₄	25,0	25,7	28,2	28,4	27,2	27,0	27,2	27,2
18:00	S ₁	25,3	27,0	27,7	29,4	27,2	28,4	25,7	25,3
18:05	S ₂	27,4	27,7	29,2	27,7	26,5	27,7	27,0	22,8
18:10	S ₃	27,4	27,7	28,4	27,2	26,2	27,4	27,2	25,3
18:15	S ₄	26,2	26,2	27,4	27,0	25,0	25,7	25,7	25,3

Os resultados experimentais de temperatura no interior do leito de pedras, apresentados na Tabela 9, deveriam ser utilizados na comprovação do modelo apresentado no item 4, que considera o gradiente de temperatura no interior do leito.

5.3 Resultados da Estimação dos Parâmetros do Modelo de Simulação do Coletor Solar.

Os resultados obtidos dos parâmetros do modelo de simulação do coletor são apresentados na Tabela 10, a seguir.

TABELA 10

Resultados dos Parâmetros do Modelo de Simulação do Coletor Solar.

Parâmetro	Significado	Valor estimado	Desvio Padrão
U ₁	Coefficiente Global de transferência de calor, associado às perdas de energia para o ambiente, (Watt/ m ² °C)	14,1	1,3
U ₂	Ap. A. Rey ^B	65,3	14,9
U ₃	Massa de pedra/unidade de área do coletor (kg/m ²)	112,7	12,2
U ₄	Temperatura inicial da pedra para o ensaio do dia 29.04.77 (°C).	30,8	1,4
U ₅	Temperatura inicial da pedra para o ensaio do dia 27.04.77.	49,8	2,3

TABELA 10 (Continuação)

Parâmetro	Significado	Valor estimado	Desvio Padrão
U_6	Temperatura inicial da pedra para o ensaio do dia 28.04.77.	42,7	2,1
U_7	Temperatura inicial da pedra para o ensaio do dia 05.05.77.	31,8	1,4

São apresentados no apêndice A₅ os resultados da temperatura do ar e da pedra, calculados pelo modelo matemático após incorporar-lhe os parâmetros estimados U_1 a U_7 , enquanto que, no apêndice A₆ encontra-se o programa de simulação do modelo matemático que gerou estes resultados.

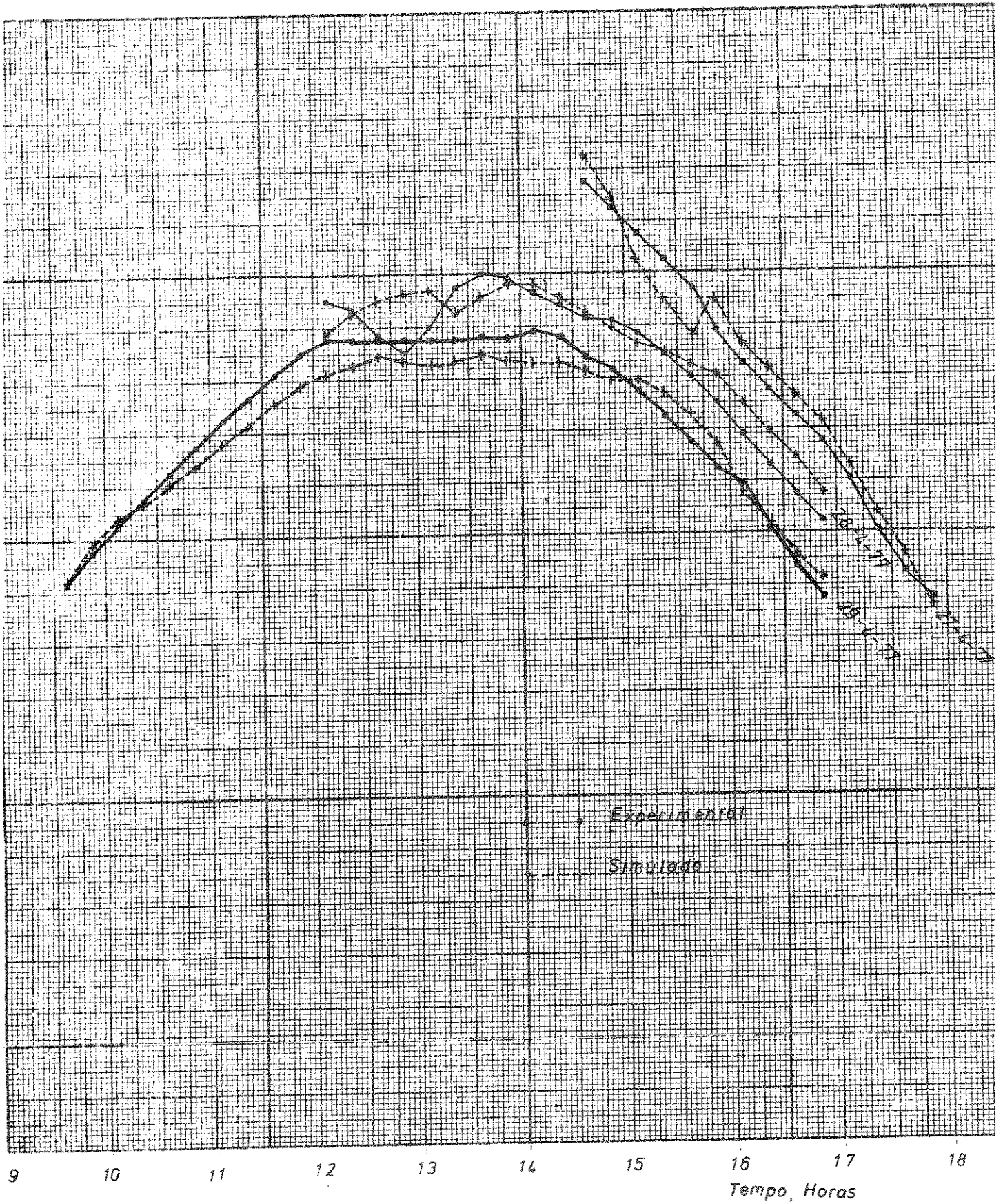
Na figura 21 é feita uma comparação gráfica entre os valores da temperatura do ar na saída do coletor solar obtidos experimentalmente e os calculados pelo modelo matemático de simulação, na sua forma final.

5.4 Simulações de Secagem de Soja

Foram realizadas simulações de secagem com sementes de soja e com soja para fins industriais, sendo que os teores iniciais de umidade dos produtos foram de 18 e de 20%, base úmida. Estas umidades iniciais foram baixadas até 12%, base úmida, que é tido como um valor seguro para que o produto seja armazenado (Villa et. al., 1978).

Simulou-se a secagem para diferentes condições ambientais, ou seja, diferentes condições de umidade relativa a tempe

FIG. 21. TEMPERATURA DO AR NA SAÍDA DO COLETOR SOLAR



ratura. Em cada situação foram determinados:

- a) O incremento de temperatura a ser fornecido ao ar ambiente para que sua umidade relativa fique em equilíbrio com a umidade de 12%, base úmida, do produto.
- b) A vazão mínima de ar necessária para efetuar a secagem do produto sem que haja deterioração do mesmo.
- c) O tempo necessário à realização da secagem do produto.

O exposto, a seguir, ilustra o procedimento de cálculo dos itens a, b e c, acima.

Conhecendo as condições ambientais de temperatura e umidade relativa do ar (T, ϕ), pode-se calcular a pressão de vapor de saturação do ar, através da seguinte equação (Brooker et. al., 1974):

$$p_{vs} = 0,0703 \exp \left[54,63 - \frac{12301,69}{1,8 T + 491,69} - 5,17 \ln(1,8 T + 491,69) \right] \dots\dots\dots (67)$$

Para $0^\circ\text{C} \leq T \leq 93,3^\circ\text{C}$ e p_{vs} em kg/cm^2

De posse de p_{vs} calcula-se a pressão do vapor do ar ambiente, através de:

$$p_v = \phi p_{vs} \dots\dots\dots (68)$$

Com a equação (19), repetida abaixo, calcula-se a umidade de equilíbrio do produto.

$$\text{Meq} = (a_1 \theta + a_2 \theta^2 + a_3 \theta^3) \exp(a_4 + a_5 \theta + a_6 \theta^2 + a_7 \theta^3 + a_8 \theta^4) (T + a_9) \dots\dots\dots (19)$$

Calculado Meq e comparando-o a 12%, tem-se duas possibilidades:

- 1) Se $(\text{Meq} - 0,12) \leq \delta$ não é necessário aquecer o ar e, portanto, pode-se secar o grão sem qualquer aquecimento adicional.
- 2) Se $(\text{Meq} - 0,12) > \delta$ deve-se então aquecer o ar. Neste caso se faz $T' = T + \Delta T$ e volta-se à equação (67). O processo é repetido até que a condição descrita no item 1 seja satisfeita.

Os valores de δ e ΔT utilizados no processo iterativo foram considerados, arbitrariamente, iguais a 0.001 (milésimos de umidade) e 0,1 °C, respectivamente.

Ao fim do processo sabe-se qual o incremento de temperatura que deverá ser fornecido ao ar e qual o valor da umidade relativa que estará em equilíbrio com a umidade de 12%, base úmida, do produto.

De posse das condições finais de temperatura e umidade relativa, pode-se determinar a vazão mínima de ar e o tempo de secagem através das seguintes equações:

Grão industrial com umidade
inicial de 20% b. u.

$$t_S = 23,3 - 2,23 (T - 29,0) + 0,06(T - 29,0)^2 \dots (69)$$
$$m_S = 3,73 + 0,32 (T - 27,3) + 0,02(T - 27,3)^2 \dots (70)$$

Grão industrial com umidade
inicial de 18% b. u.

$$t_S = 25,4 - 2,47 (T - 30,0) + 0,05(T - 30,0)^2 \dots (71)$$
$$m_S = 2,76 - 0,19 (T - 27,3) + 0,011(T - 27,3)^2 \dots (72)$$

Semente com umidade inicial de
20% b. u.

$$t_S = 12,8 - 0,887(T - 27,5) + 0,011(T - 27,5)^2 \dots (73)$$
$$m_S = 6,02 + 0,55 (T - 27,3) + 0,036(T - 27,3)^2 \dots (74)$$

Semente com umidade inicial de
18% b. u.

$$t_S = 15,22 - 1,25 (T - 27,5) + 0,036(T - 27,5)^2 \dots (75)$$
$$m_S = 5,22 - 0,43 (T - 27,3) + 0,028 (T - 27,3)^2 \dots (76)$$

As equações (69) a (76) foram obtidas mediante regressão polinomial (Scaffi, 1979), com os dados de Villa et. al., (1978), nos quais já está implícita a condição de que o produto não sofre deterioração comercial, durante a secagem.

As tabelas, a seguir, mostram os valores encontrados (mediante o processo iterativo descrito acima) das variáveis dos i tens a, b e c. A programação do processo iterativo está apresentada no apêndice B.

Nas tabelas 11 a 14, a seguir, são apresentados os valores calculados dos incrementos de temperatura fornecidos ao ar ambiente, a vazão mínima de ar e o tempo de secagem para sementes de soja e soja industrial com teor inicial de umidade de 18 e de 20%, base úmida. A umidade relativa do ar ambiente após seu aquecimento é a de equilíbrio com o teor de 12%, b. u., do produto em questão.

TABELA 11
Fluxo Mínimo e Tempo de Secagem, em Diversas Condições Ambientais, para Sementes de Soja
com Teor Inicial de Umidade de 18%, Base Úmida.

Umidade Relativa do Ambiente, %	(1) Umidade Relativa do Ar após o aquecimento, %				(2) Temperatura do Ar após o Aquecimento, °C.				(3) Vazão Mínima do Ar quente, kg/s.				(4) Tempo de Secagem, dias							
	Umidade Relativa do Ambiente, %																			
	75			80			85			90			95							
	(1)	(2)	(3)	(4)	(1)	(2)	(3)	(4)	(1)	(2)	(3)	(4)	(1)	(2)	(3)	(4)	(1)	(2)	(3)	
5	68,1	16,5	3,8	33,3	68,2	17,5	3,7	31,3	68,5	18,4	3,6	27,9	68,6	19,3	3,6	27,9	68,4	20,2	3,6	2
0	68,8	21,4	3,7	24,2	69,1	22,4	3,8	22,5	69,1	23,4	4,0	21,0	69,3	24,3	4,2	19,6	69,7	25,1	4,4	1
5	69,9	26,2	4,8	16,9	69,8	27,3	5,2	15,5	70,0	28,3	5,7	14,2	70,4	29,2	6,2	13,2	70,5	30,1	6,7	1
0	70,4	31,1	7,3	11,2	70,6	32,2	8,0	10,1	70,9	33,2	8,8	9,3	71,0	34,2	9,6	8,5	70,9	35,2	10,4	
5	71,4	35,9	11,0	7,3	71,3	37,1	12,2	6,5	71,4	38,2	13,3	6,0	71,6	39,2	14,4	5,5	71,7	40,2	15,5	

TABELA 12

Fluxo Mínimo e Tempo de Secagem, em Diversas Condições Ambientais, para Sementes de Soja com Teor Inicial de Umidade de 20%, Base Úmida.

Temperatura Ambiente, °C.	(1) Umidade Relativa do Ar após o Aquecimento, %.				(2) Temperatura do Ar Após o Aquecimento, °C.				(3) Vazão Mínima de Ar Quente, kg/s.				(4) Tempo de Secagem, dias						
	Umidade Relativa do Ambiente, %																		
	75				80				85				90				95		
	(1)	(2)	(3)	(4)	(1)	(2)	(3)	(4)	(1)	(2)	(3)	(4)	(1)	(2)	(3)	(4)	(1)	(2)	(3)
15	68,1	16,5	4,3	23,9	68,2	17,5	4,1	22,8	68,5	18,4	4,0	21,8	68,6	19,3	3,9	20,8	68,4	20,2	3,9
20	68,8	21,4	4,0	18,6	69,1	22,4	4,2	17,6	69,1	23,4	4,4	16,6	69,3	24,3	4,7	15,8	69,7	25,1	5,0
25	69,9	26,2	5,5	14,0	69,8	27,3	6,0	13,0	70,0	28,3	6,6	12,1	70,4	29,2	7,2	11,3	70,5	30,1	7,9
30	70,4	31,1	8,7	9,7	70,6	32,2	9,6	8,9	70,9	33,2	10,6	8,1	71,0	34,2	11,6	7,4	70,9	35,2	12,7
35	71,4	35,9	13,5	6,1	71,3	37,1	14,9	5,3	71,4	38,2	16,4	4,6	71,6	39,2	17,7	3,9	71,7	40,2	19,2

TABELA 13

Fluxo Mínimo e Tempo de Secagem, em Diversas Condições Ambientais, para Soja Industrial com Teor Inicial de Umidade de 18%, Base Úmida.

Umidade Relativa do Ambiente, %	(1) Umidade Relativa após o Aquecimento, %				(2) Temperatura do Ar após o Aquecimento, °C.				(3) Vazão Mínima de Ar Quente, kg/s.				(4) Tempo de Secagem, dia					
	Umidade Relativa do Ambiente, %												(1)	(2)	(3)			
	75			80			85			90						95		
(1)	(2)	(3)	(4)	(1)	(2)	(3)	(4)	(1)	(2)	(3)	(4)	(1)	(2)	(3)	(4)	(1)	(2)	(3)
68,1	16,5	2,0	68,0	68,2	17,5	2,0	64,2	68,5	18,4	1,9	60,9	68,6	19,3	1,9	57,7	68,4	20,2	2,0
68,8	21,4	2,2	50,5	69,1	22,4	2,1	47,7	69,1	23,4	2,2	44,0	69,3	24,3	2,3	41,2	69,7	25,1	2,4
69,9	26,2	2,6	35,6	69,8	27,3	2,8	32,6	70,0	28,3	3,0	29,9	70,4	29,2	3,2	27,5	70,5	30,1	3,4
70,4	31,1	3,7	22,9	70,6	32,2	4,0	20,3	70,9	33,2	4,3	18,1	71,0	34,2	4,6	16,0	70,9	35,2	5,0
71,4	35,9	5,2	12,7	71,3	37,1	5,7	10,5	71,4	38,2	6,2	8,6	71,6	39,2	6,6	7,0	71,7	40,2	7,1

TABELA 14
Fluxo Mínimo e Tempo de Secagem em Diversas Condições Ambientais, para Soja Industrial com Teor Inicial de Umidade de 20%, Base Úmida.

Temperatura ambiente, °C.	(1) Umidade Relativa do Ar após o Aquecimento, %.				(2) Temperatura do Ar após o Aquecimento, °C.				(3) Vazão Mínima do Ar Quente, kg/s.				(4) Tempo de Secagem, dias.						
	Umidade Relativa do Ambiente, %																		
	75				80				85				90				95		
	(1)	(2)	(3)	(4)	(1)	(2)	(3)	(4)	(1)	(2)	(3)	(4)	(1)	(2)	(3)	(4)	(1)	(2)	(3)
15	68,1	16,5	2,6	60,5	68,2	17,5	2,5	56,8	68,5	18,4	2,5	53,6	68,6	19,3	2,5	50,5	68,4	20,2	2,5
20	68,8	21,4	2,5	43,7	69,1	22,4	2,6	40,6	69,1	23,4	2,8	37,6	69,3	24,3	3,0	35,1	69,7	25,1	3,1
25	69,9	26,2	3,4	30,0	69,8	27,3	3,7	27,2	70,0	28,3	4,1	24,8	70,4	29,2	4,4	22,8	70,5	30,1	4,8
30	70,4	31,1	5,3	18,8	70,6	32,2	5,8	16,7	70,9	33,2	6,3	14,9	71,0	34,2	6,9	13,3	70,9	35,2	7,5
35	71,4	35,9	8,0	10,7	71,3	37,1	8,8	9,1	71,4	38,2	9,6	7,8	71,6	39,2	10,4	6,7	71,7	40,2	11,2

Pelas tabelas apresentadas (11 a 14), vê-se que incrementos na temperatura do ar de 5 a 6 °C acima da temperatura ambiente, são suficientes para deixá-lo em condições de ser usado na secagem de soja. Incrementos de temperatura desta magnitude são facilmente conseguidos através de coletores solares de construção simples.

À medida que as condições de secagem vão se tornando mais críticas (alta umidade relativa e alta temperatura), a secagem vai se tornando mais difícil, pois são necessárias altas vazões de ar em decorrência de a secagem ter que ser realizada em curto espaço de tempo. Neste caso, cuidados maiores devem ser tomados para evitar que o produto deteriore antes do término da secagem.

De posse da vazão e do incremento de temperatura, que deve ser fornecido ao ar ambiente, passou-se a calcular as áreas de coletor solar que são suficientes para aquecer a referida vazão de ar do incremento de temperatura requerido. Foram calculadas as áreas para três níveis de radiação solar.

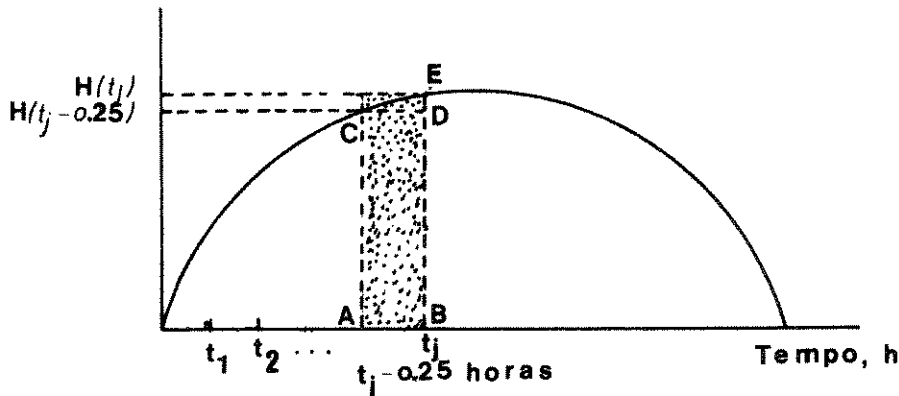
5.5 Cálculo da Área Coletora para Três Níveis de Radiação Solar.

De uma maneira simplificada, a radiação incidente, num determinado instante, pode ser simulada pela equação:

$$H(t) = A_n \sin(\omega t) \quad \dots \dots \dots \quad (77)$$

Se se quiser a radiação média, que incide num período de 15 minutos, como a requerida pelo programa de simulação do modelo do coletor solar, algumas considerações devem ser feitas com relação à equação acima.

Considerando a curva descrita pela equação (77), tem-se:



A área hachurada sob a curva é aproximadamente igual à área do retângulo ABCD somado à área do triângulo CDE. Esta área total pode ser obtida através da equação:

$$\begin{aligned} \text{ÁREA} = & \{ A_n \sin(wt_j) - A_n \sin[w(t_j - 0,25)] \} \times 0,125 + \\ & + A_n \sin[w(t_j - 0,25)] \times 0,25 \quad \dots\dots\dots (78) \end{aligned}$$

Dependendo do valor da constante A_n , pode-se simular vários níveis de radiação solar. Escolheram-se três níveis de radiação numa tentativa de representar uma baixa, uma média e uma alta incidência solar.

O programa de geração da radiação solar, assim como os níveis de radiação escolhidos são apresentados nos apêndices C₁ a C₄, respectivamente.

De posse da equação (78), dos incrementos de temperatura

que devem ser fornecidos ao ar ambiente, da vazão de ar e considerando a temperatura ambiental constante durante todo o dia, passou-se a simular a área coletora necessária para fornecer ao ar o incremento de temperatura requerido. Além disso, foi calculado por quanto tempo esta área simulada pode armazenar energia, até que a temperatura do ar na saída do coletor seja diferente da temperatura ambiental por $\pm 0,21^{\circ}\text{C}$.

O programa, que simula o cálculo das áreas coletoras e o tempo de armazenamento de energia, chamado "SIMULA" é apresentado no apêndice D. O processo de cálculo da área foi feito da forma seguinte:

- a) Foram fornecidos os seguintes dados ao programa "SIMULA": Nível de radiação, vazão de ar, incremento de temperatura e temperatura ambiente.
- b) O programa de simulação ia aumentando a área e testando se esta área era suficiente para dar a vazão fornecida o aumento de temperatura requerido (item 5.3). Quando os incrementos de temperatura, o requerido e o calculado, diferiam de $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$ aceitava-se a área simulada.
- c) Após o cálculo da área, o programa simulava o resfriamento do coletor, até que a diferença entre a temperatura do ar na saída do coletor solar e a temperatura ambiente fosse próxima de $0,2^{\circ}\text{C}$ por $\pm 0,01^{\circ}\text{C}$.

Os resultados de simulação das áreas e dos tempos de armazenamento de energia para os três níveis de radiação são mostrados nas tabelas 15 a 18, que se seguem.

TABELA 15

Áreas e Tempos de Armazenamento de Energia Simulados.
(Secagem de Sementes de Soja com Umidade Inicial de 18%, Base Úmida).

Temperatura Ambiente °C	Radiação Média Watt/m ²	(1)		(2)		Umidade Relativa do Ambiente, %		Tempo de Armazenamento de Energia horas			
		Área Coletora, m ² /ton	Tempo de Armazenamento de Energia	Área Coletora, m ² /ton	Tempo de Armazenamento de Energia	75	80	85	90	95	
15	155,0	0,6	0,25	1,1	0,5	1,6	0,75	2,2	1,0	3,0	1,5
	387,4	0,3	0,25	0,6	0,5	0,7	0,5	1,0	0,75	1,3	1,0
	620,0	0,2	0,25	0,4	0,5	0,5	0,5	0,7	0,75	0,8	0,75
20	155,0	0,6	0,25	1,2	0,5	1,9	0,75	3,0	1,25	4,0	1,5
	387,4	0,3	0,25	0,6	0,5	0,9	0,5	1,2	0,75	1,5	0,75
	620,0	0,2	0,25	0,4	0,5	0,6	0,5	0,8	0,5	1,0	0,75
25	155,0	0,7	0,25	0,7	0,5	3,0	0,75	4,6	1,0	7,1	1,5
	387,4	0,4	0,25	0,8	0,25	1,3	0,5	1,8	0,5	2,5	0,75
	620,0	0,2	0,25	0,5	0,25	0,8	0,5	1,1	0,5	1,5	0,5
30	155,0	1,1	0,25	2,8	0,5	5,0	0,75	8,5	1,25	...	...
	387,4	0,5	0,25	1,4	0,25	2,0	0,5	2,9	0,5	...	...
	620,0	0,3	0,25	0,7	0,25	1,2	0,25	1,8	0,5	...	...
35	155,0	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
	387,4	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
	620,0	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...

TABELA 16

Áreas e Tempos de Armazenamento de Energia Simulados.

(Secagem de Sementes de Soja com Umidade Inicial de 20%, Base Úmida).

Temperatura Ambiente °C	Radiação Média Watt/m ²	(1)		(2)		Umidade Relativa do Ambiente, %	75	80	85	90	95
		Área Coletora, m ² /ton	Tempo de Armazenamento de Energia horas	(1)	(2)						
15	155,0	0,7	0,25	1,2	0,5	1,7	0,75	2,4	1,0	3,3	1,5
	387,4	0,4	0,25	0,6	0,5	0,8	0,5	1,1	0,75	1,4	0,75
	620,0	0,3	0,25	0,4	0,5	0,6	0,5	0,7	0,5	0,9	0,75
20	155,0	0,7	0,25	1,3	0,5	2,1	0,75	3,2	1,0	4,6	1,5
	387,4	0,3	0,25	0,6	0,5	1,0	0,5	1,4	0,75	1,8	0,75
	620,0	0,2	0,25	0,4	0,25	0,6	0,5	0,9	0,5	1,1	0,5
25	155,0	0,8	0,25	2,0	0,5	3,4	0,75	5,3	1,0	8,4	1,5
	387,4	0,4	0,25	0,9	0,25	1,4	0,5	2,1	0,5	2,9	0,75
	620,0	0,3	0,25	0,6	0,25	0,9	0,5	1,3	0,5	1,8	0,5
30	155,0	1,3	0,25	3,2	0,25	...	...	...	...	...	...
	387,4	0,6	0,25	1,4	0,25	...	...	...	...	...	...
	620,0	0,4	0,25	0,9	0,25	...	...	...	...	...	...
35	155,0	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
	387,4	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
	620,0	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...

TABELA 17

Áreas e Tempos de Armazenamento de Energia Simulados.
(Secagem de Soja Industrial em Umidade Inicial de 18%, Base Úmida).

Temperatura Ambiente °C	Radiação Média Watt/m ²	(1)		(2)		75		80		85		90		95	
		Área Coletora m ² /ton	Tempo de Armazenamento de Energia horas	Área Coletora m ² /ton	Tempo de Armazenamento de Energia horas	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)
15	155,0	0,3	0,25	0,6	0,75	0,8	1,25	0,8	0,75	1,1	1,25	1,2	1,5	1,8	2,0
	387,4	0,2	0,5	0,3	0,75	0,4	1,1	0,4	0,75	0,5	1,0	0,6	0,25	0,8	1,5
	620,0	0,1	0,5	0,2	0,75	0,3	1,0	0,4	0,75	0,3	1,0	0,4	1,0	0,5	1,25
20	155,0	0,3	0,25	0,7	0,75	1,1	1,25	1,1	0,75	1,1	1,25	1,7	1,5	2,4	2,0
	387,4	0,2	0,5	0,3	0,75	0,5	1,0	0,5	0,75	0,5	1,0	0,7	1,0	0,9	1,25
	620,0	0,1	0,5	0,2	0,5	0,3	0,75	0,3	0,5	0,3	0,75	0,5	1,0	0,6	1,0
25	155,0	0,4	0,25	1,0	0,75	1,6	1,0	1,6	0,75	1,6	1,0	2,5	1,5	3,9	2,0
	387,4	0,2	0,25	0,4	0,5	0,7	0,75	0,7	0,5	0,7	0,75	1,0	0,75	1,3	1,0
	620,0	0,1	0,25	0,3	0,5	0,4	0,5	0,4	0,5	0,4	0,5	0,6	0,75	0,8	0,75
30	155,0	0,6	0,25	1,4	0,5	2,5	1,0	2,5	0,5	2,5	1,0	4,2	1,5	7,4	2,25
	387,4	0,3	0,25	0,6	0,5	1,0	0,5	1,0	0,5	1,0	0,5	1,4	0,75	2,0	0,75
	620,0	0,2	0,25	0,4	0,25	0,6	0,25	0,6	0,25	0,6	0,25	0,9	0,5	1,2	0,75
35	155,0	0,7	0,25	2,2	0,5	4,3	1,0	4,3	0,5	4,3	1,0	7,3	1,5	...	...
	387,4	0,3	0,25	0,8	0,25	1,5	0,5	1,5	0,25	1,5	0,5	2,2	0,75	3,0	0,75
	620,0	0,2	0,25	0,5	0,25	0,9	0,25	0,9	0,25	0,9	0,25	1,3	0,5	1,8	0,5

Áreas e Tempos de Armazenamento de Energia Simulados.
(Secagem de Soja Industrial com Umidade Inicial de 20% , Base Úmida)

Temperatura Ambiente °C	Radiação Média Watt/m ²	(1)		(2)		Umidade Relativa do Ambiente, %		Tempo de Armazenamento de Energia horas			
		Área Coletora, m ² /ton		Tempo de Armazenamento de Energia horas							
		75	80	85	90	95	(1)	(2)	(1)	(2)	
15	155,0	0,4	0,25	0,7	0,5	1,1	1,0	1,6	1,25	2,2	1,75
	387,4	0,2	0,25	0,4	0,5	0,5	0,75	0,7	1,0	0,9	1,25
	620,0	0,2	0,25	0,3	0,5	0,4	0,75	0,5	0,75	0,6	1,0
20	155,0	0,4	0,25	0,8	0,75	1,4	1,0	2,1	1,25	3,0	1,75
	387,4	0,2	0,25	0,4	0,5	0,6	0,75	0,9	0,75	1,1	1,0
	620,0	0,2	0,25	0,3	0,5	0,4	0,75	0,6	0,75	0,7	0,75
25	155,0	0,5	0,25	1,2	0,5	2,1	0,75	3,4	1,25	5,3	1,75
	387,4	0,3	0,25	0,6	0,5	0,9	0,5	1,3	0,75	1,8	0,75
	620,0	0,2	0,25	0,4	0,5	0,6	0,5	0,8	0,5	1,1	0,75
30	155,0	0,8	0,25	2,0	0,5	3,6	0,75	6,2	1,25	10,7	2,0
	387,4	0,4	0,25	0,8	0,25	1,4	0,5	2,1	0,5	3,0	0,75
	620,0	0,2	0,25	0,4	0,25	0,9	0,5	1,3	0,5	1,8	0,5
35	155,0	1,1	0,25	3,3	0,5	6,6	1,0	...	...	...	...
	387,4	0,5	0,25	1,3	0,25	2,3	0,5	...	...	...	...
	620,0	0,3	0,25	0,8	0,25	1,4	0,25	...	...	...	...

Nos espaços incompletos a execução do programa foi interrompida devido ao excessivo consumo de tempo. Os resultados das tabelas 15 a 18 estão na forma de gráficos nas figuras 22 a 33, nos quais se vê que o nível de radiação solar tem grande influência na área do coletor. À medida que o nível de radiação aumenta, há uma diminuição da área. Este decréscimo é maior quando se passa do 1º para o 2º nível de radiação que do 2º para o 3º. A diminuição da área é mais pronunciada para o caso da soja industrial que para o da semente; e dentro de um mesmo grupo, quer semente, quer soja industrial, a diminuição da área é maior quando a umidade inicial do produto é menor.

A influência da radiação concorda com a prática, pois ao se ter mais radiação tem-se mais calor para aquecer o ar e, portanto, a atuação deste ar quente como agente de secagem é muito mais eficiente. Entretanto, ao se atingir altos níveis de radiação, a diminuição da área não vai sendo tão acentuada devido ao fato de que as perdas de calor para o ambiente também vão sendo relevantes.

A temperatura ambiente, assim como a umidade relativa têm também influência na área coletora de maneira que ao aumentar a temperatura, aumentam-se as necessidades de área, pois o produto fica mais susceptível à deterioração. O mesmo acontece com a umidade relativa.

Nos gráficos 28 a 33 as informações são basicamente as mesmas, com a diferença de que no eixo das abscissas encontra-se a umidade relativa para facilitar a interpolação dos dados.

FIG 22 AREA COLETORA DE ENERGIA SOLAR
(SEMENTE DE SOJA - 1º NIVEL)

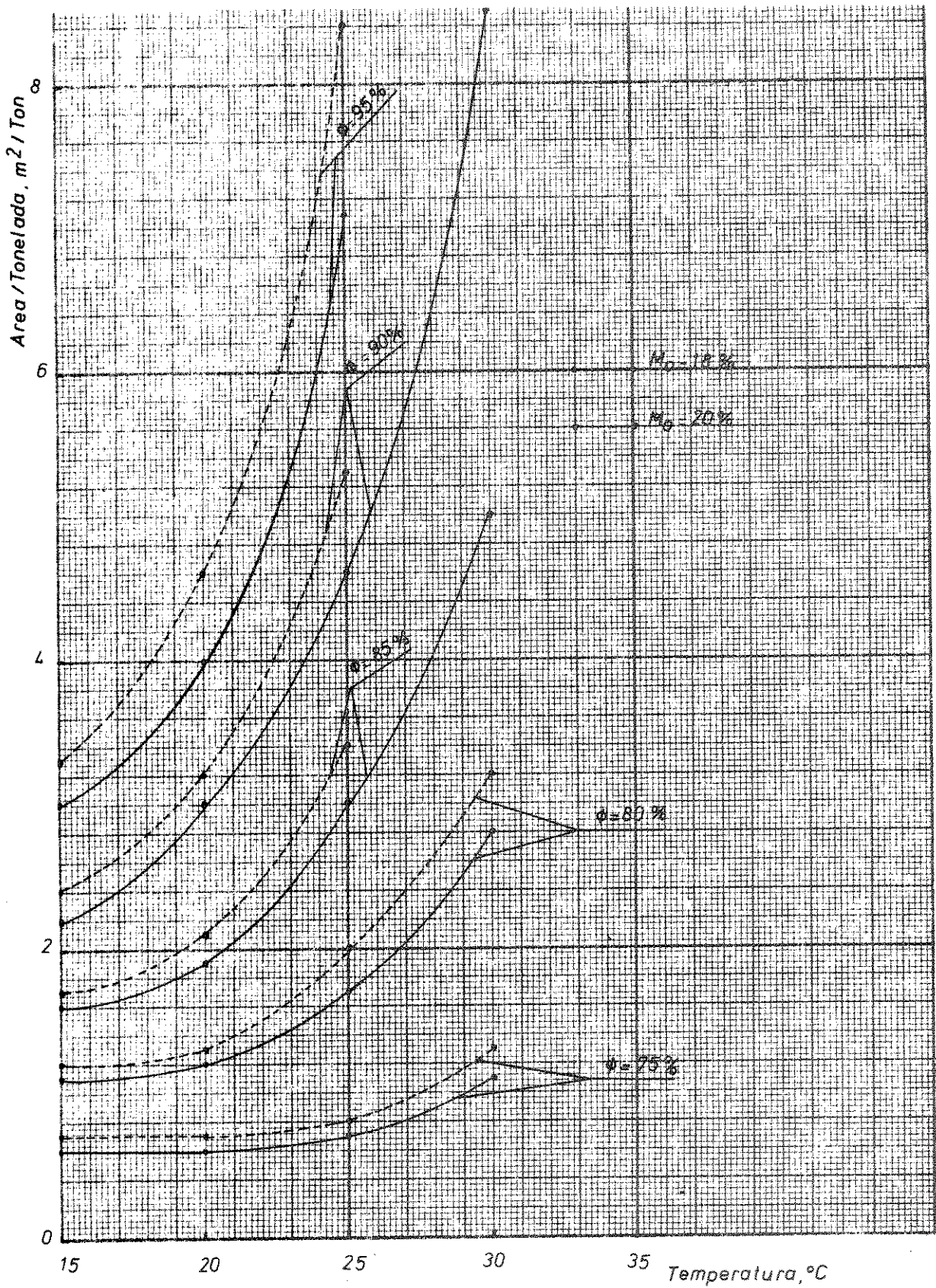


FIG. 23 AREA COLETORA DE ENERGIA SOLAR
(SEMENTE DE SOJA - 2º NIVEL)

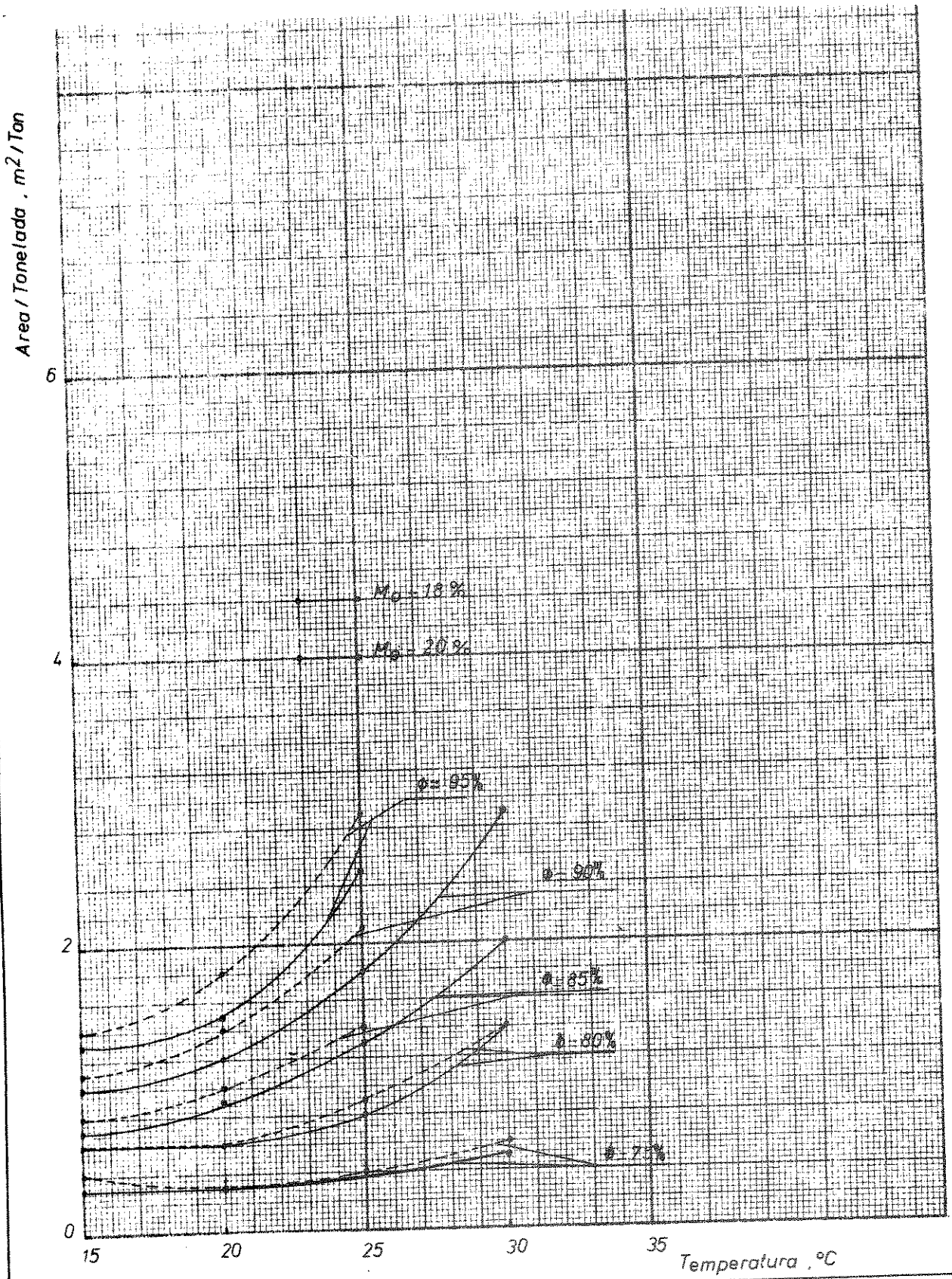


FIG. 24 AREA COLETORA DE ENERGIA SOLAR
(SEMENTE DE SOJA - 3º NIVEL)

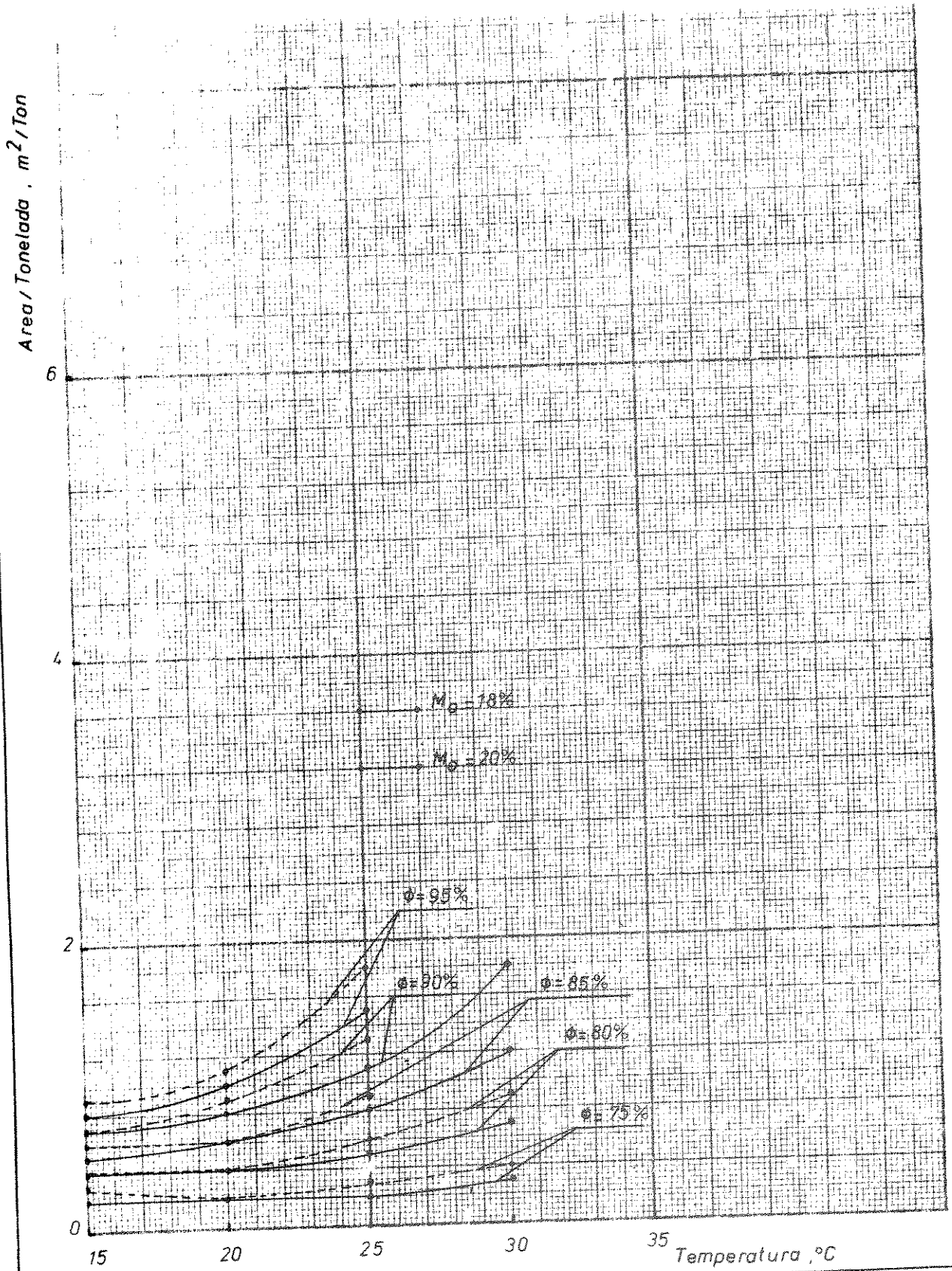


FIG 25 AREA COLETORA DE ENERGIA. SOLAR
(SOJA INDUSTRIAL - 1º NIVEL)

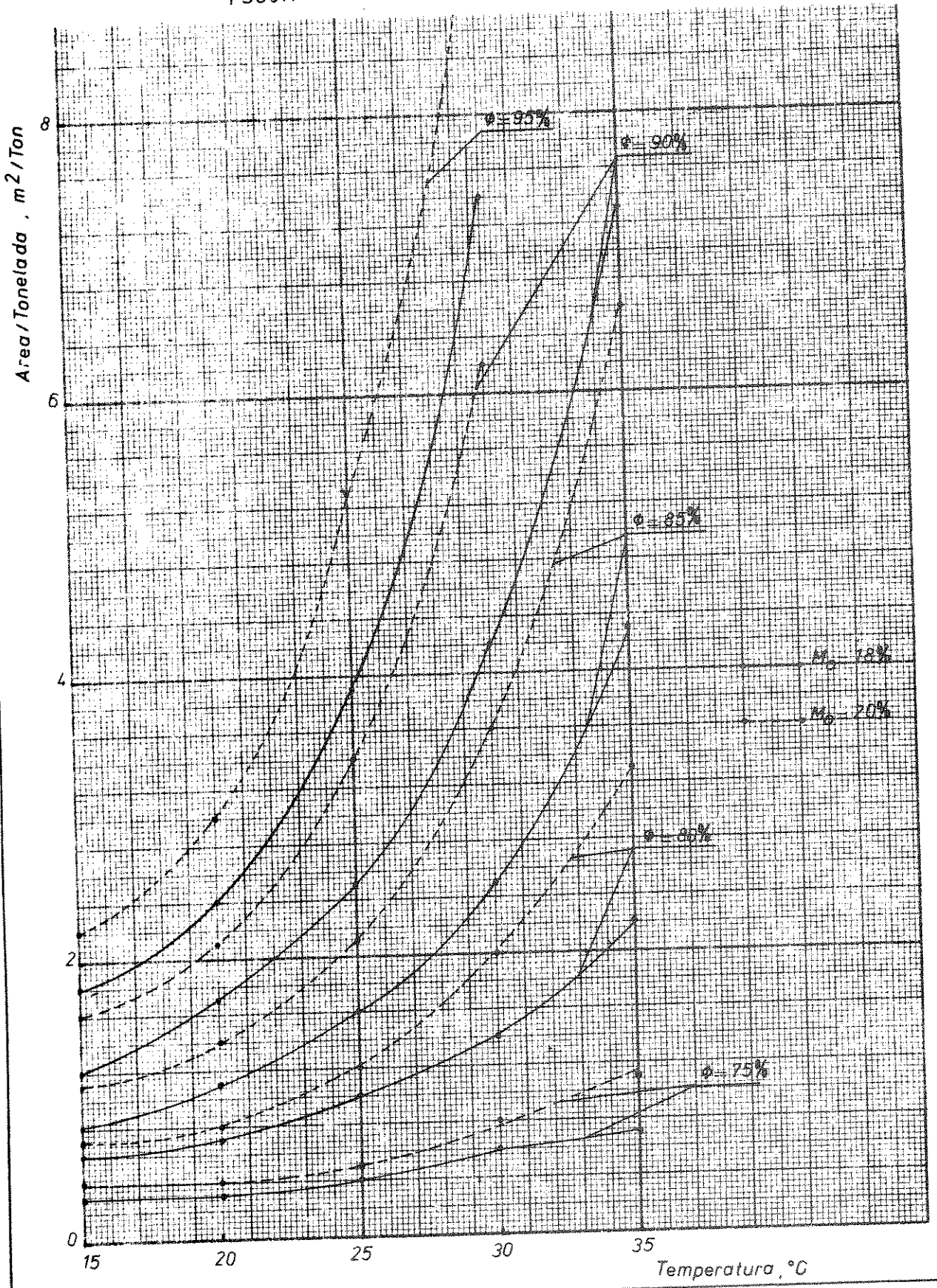


FIG. 26 AREA COLETORA DE ENERGIA SOLAR
(SOJA INDUSTRIAL - 2º NIVEL)

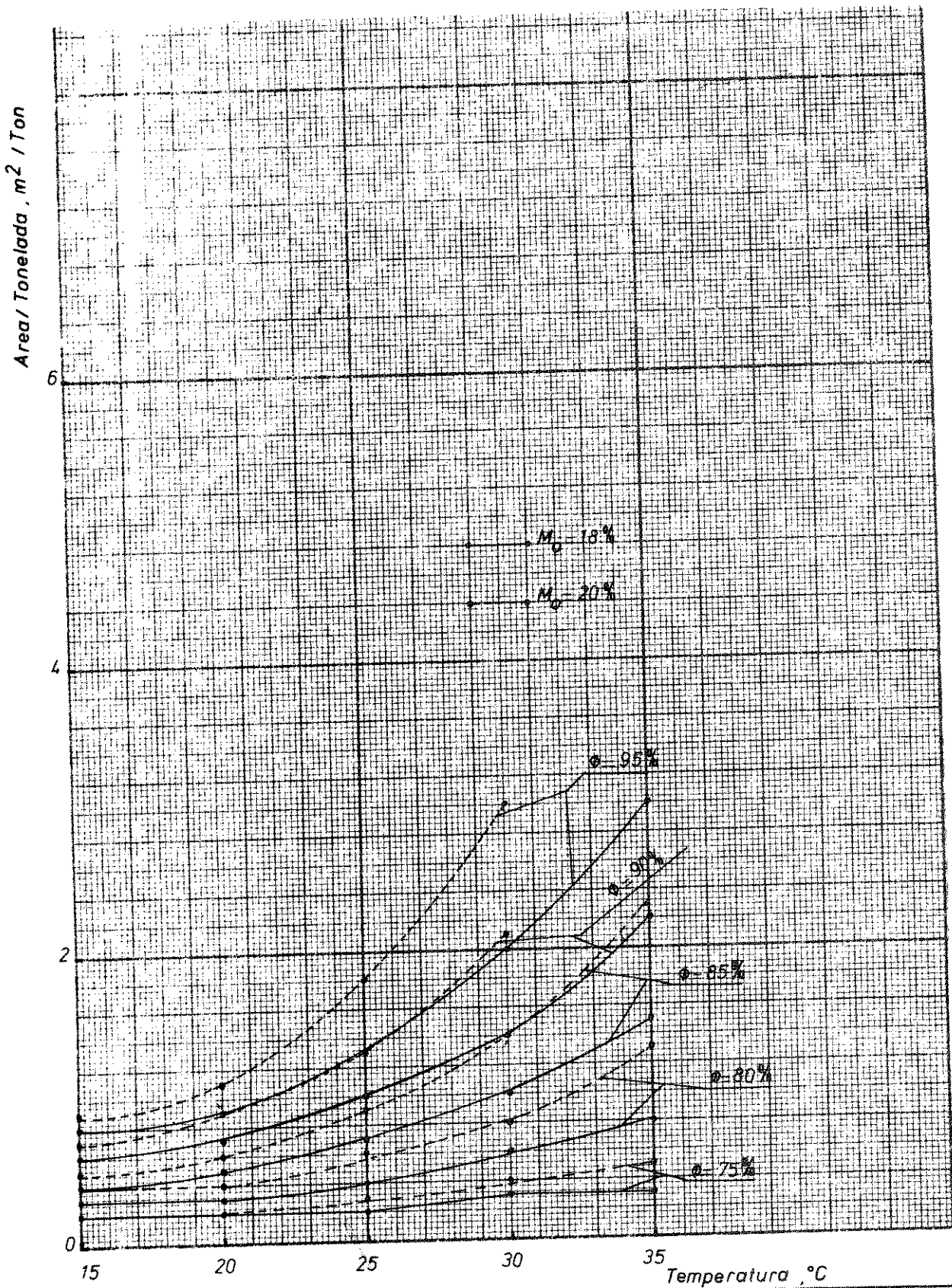


FIG. 27 AREA COLETORA DE ENERGIA SOLAR
(SOJA INDUSTRIAL - 3º NIVEL)

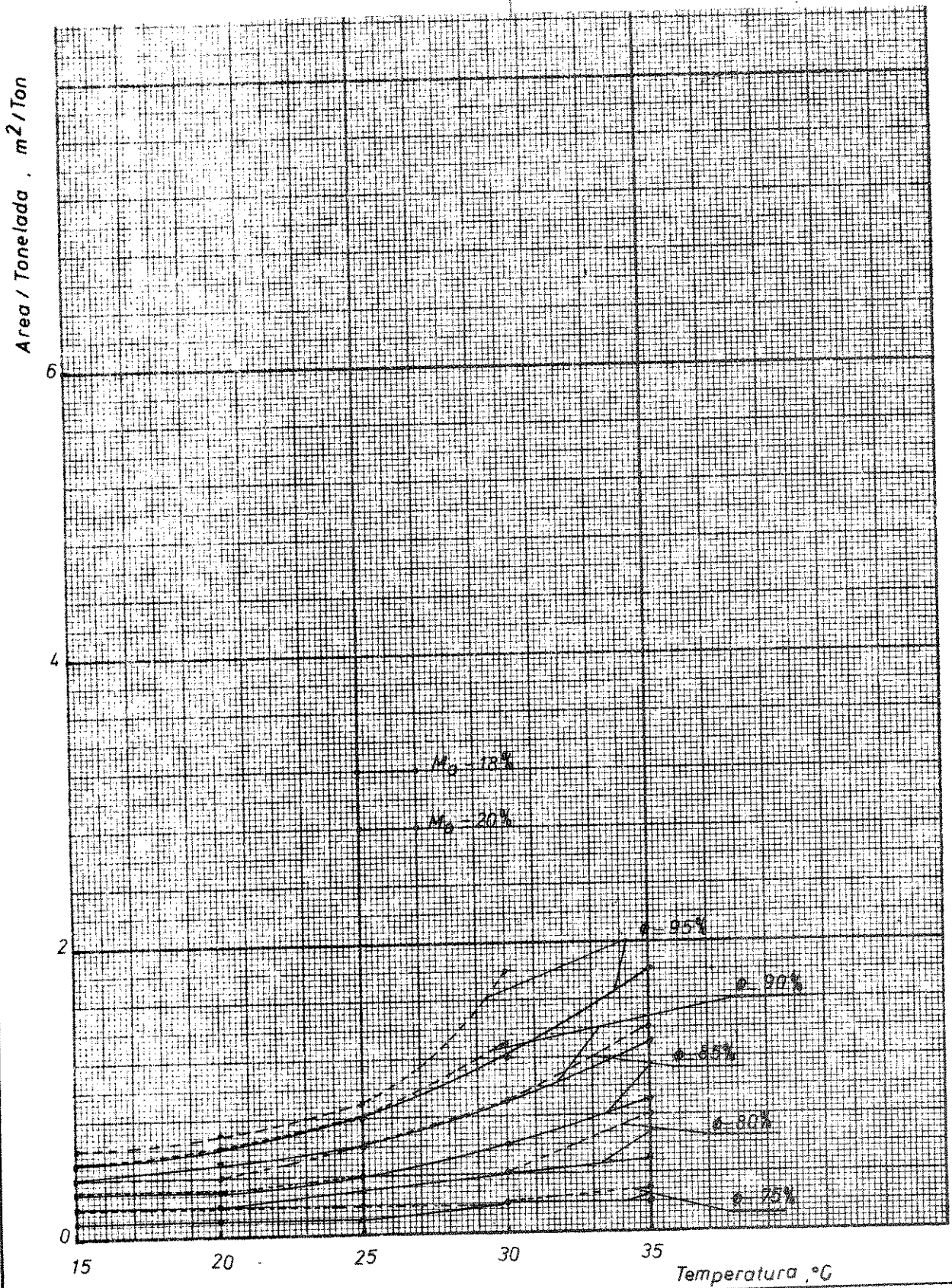


FIG 28 AREA COLETORA DE ENERGIA SOLAR
(SEMENTE DE SOJA - 1º NIVEL)

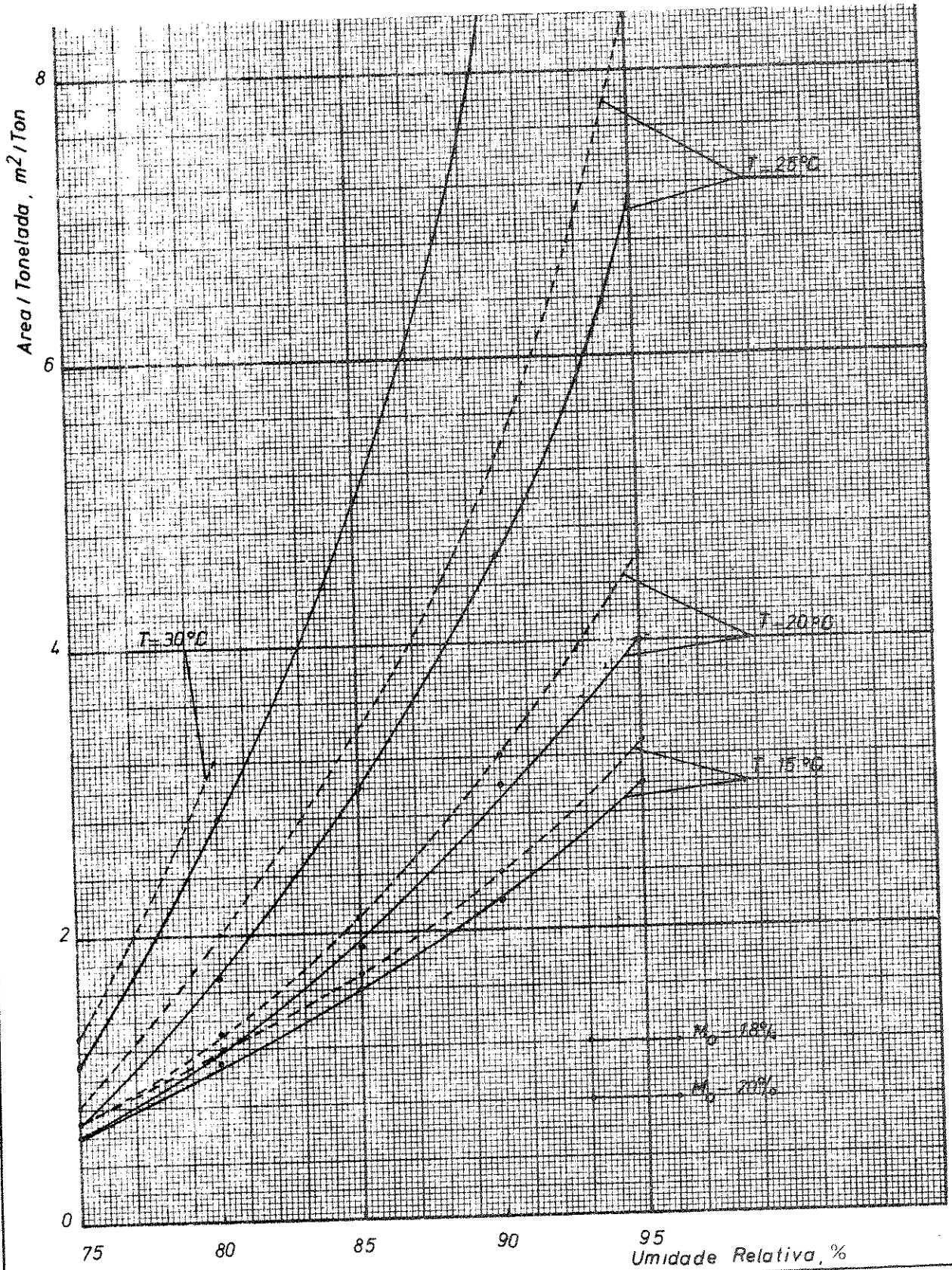


FIG. 29 AREA COLETORA DE ENERGIA SOLAR
(SEMENTE DE SOJA - 2º NIVEL)

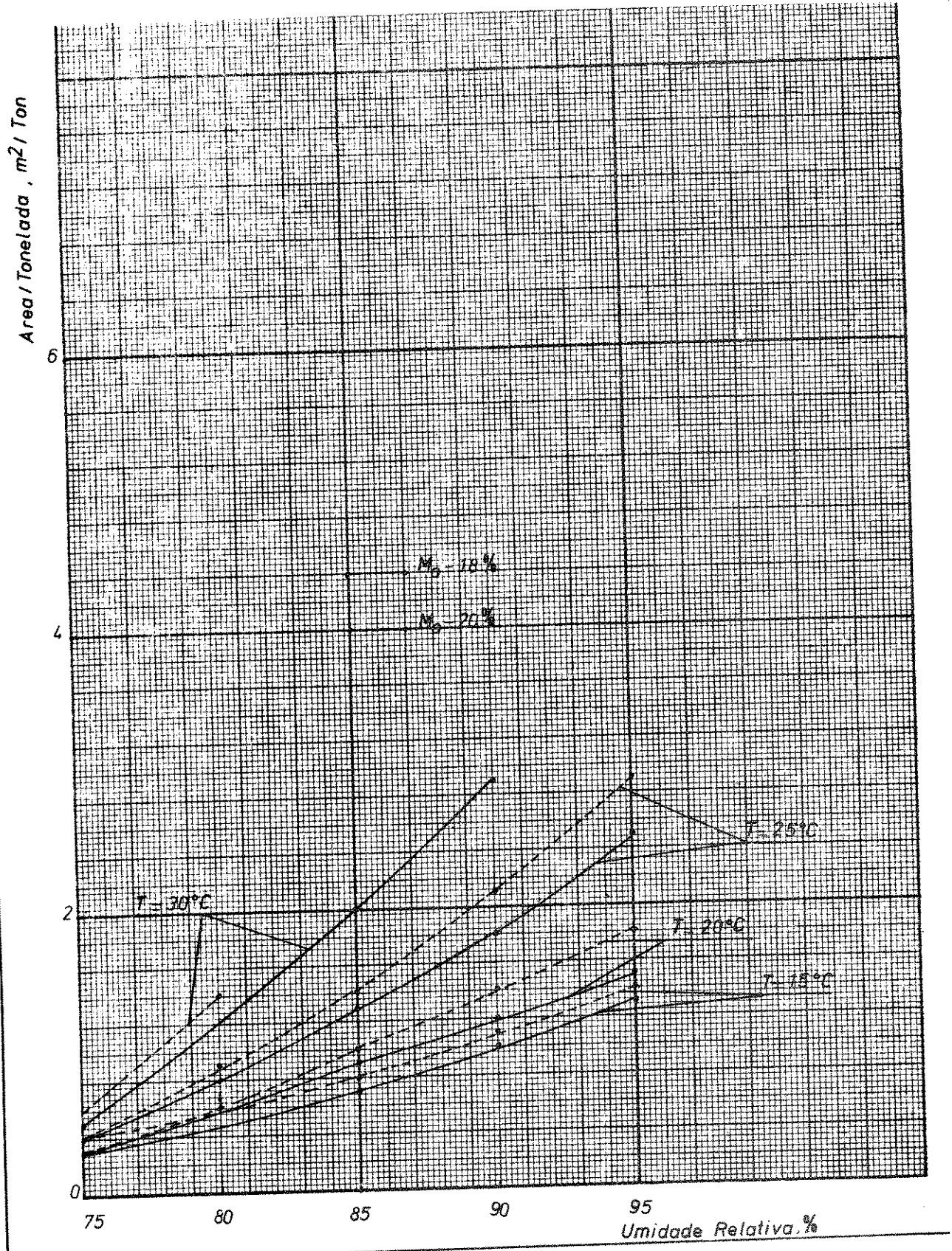


FIG.30. AREA COLETORA DE ENERGIA SOLAR
(SEMENTE DE SOJA - 3º NIVEL)

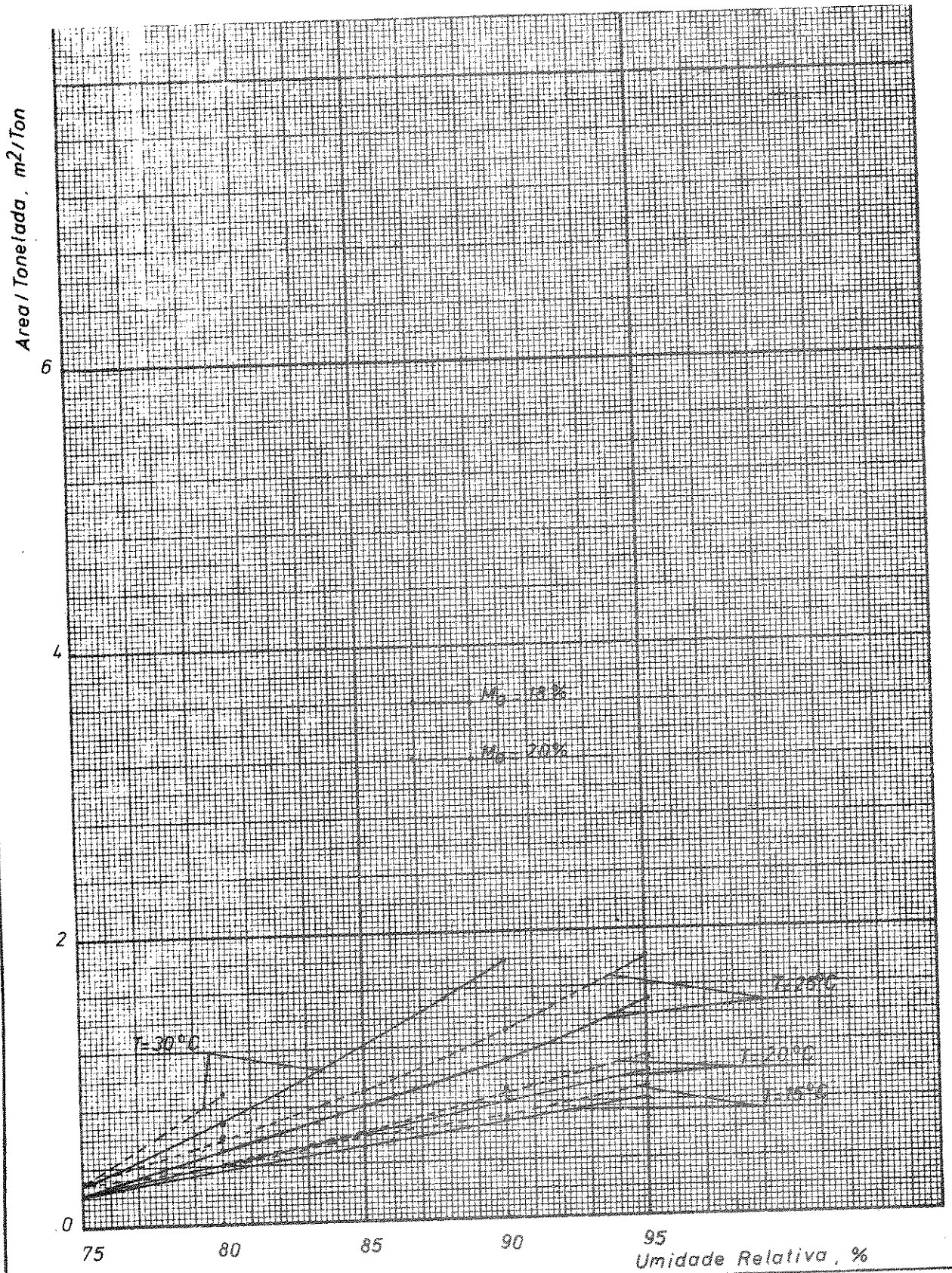


FIG.32 AREA COLETORA DE ENERGIA SOLAR
(SOJA INDUSTRIAL - 2º NIVEL)

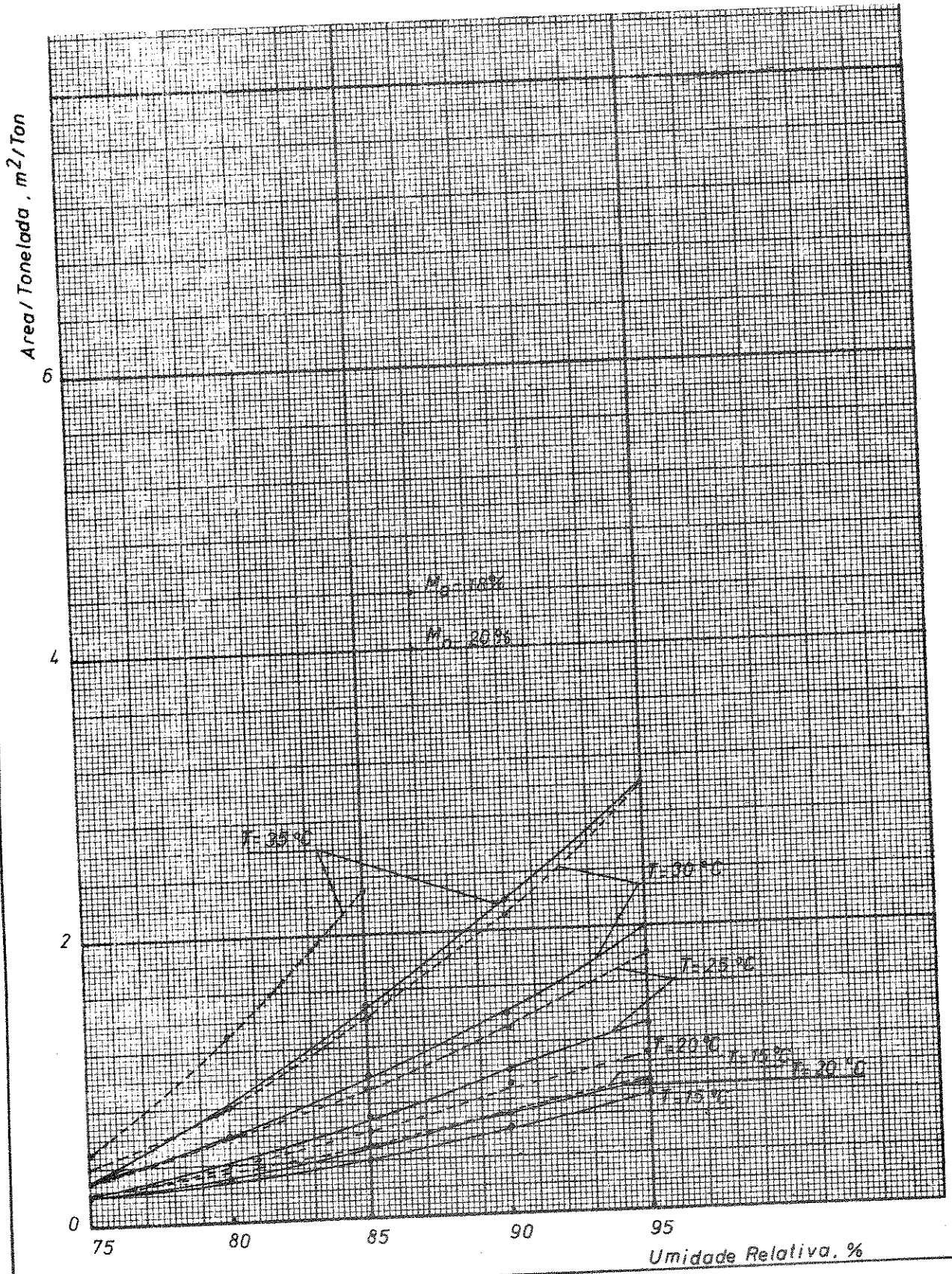
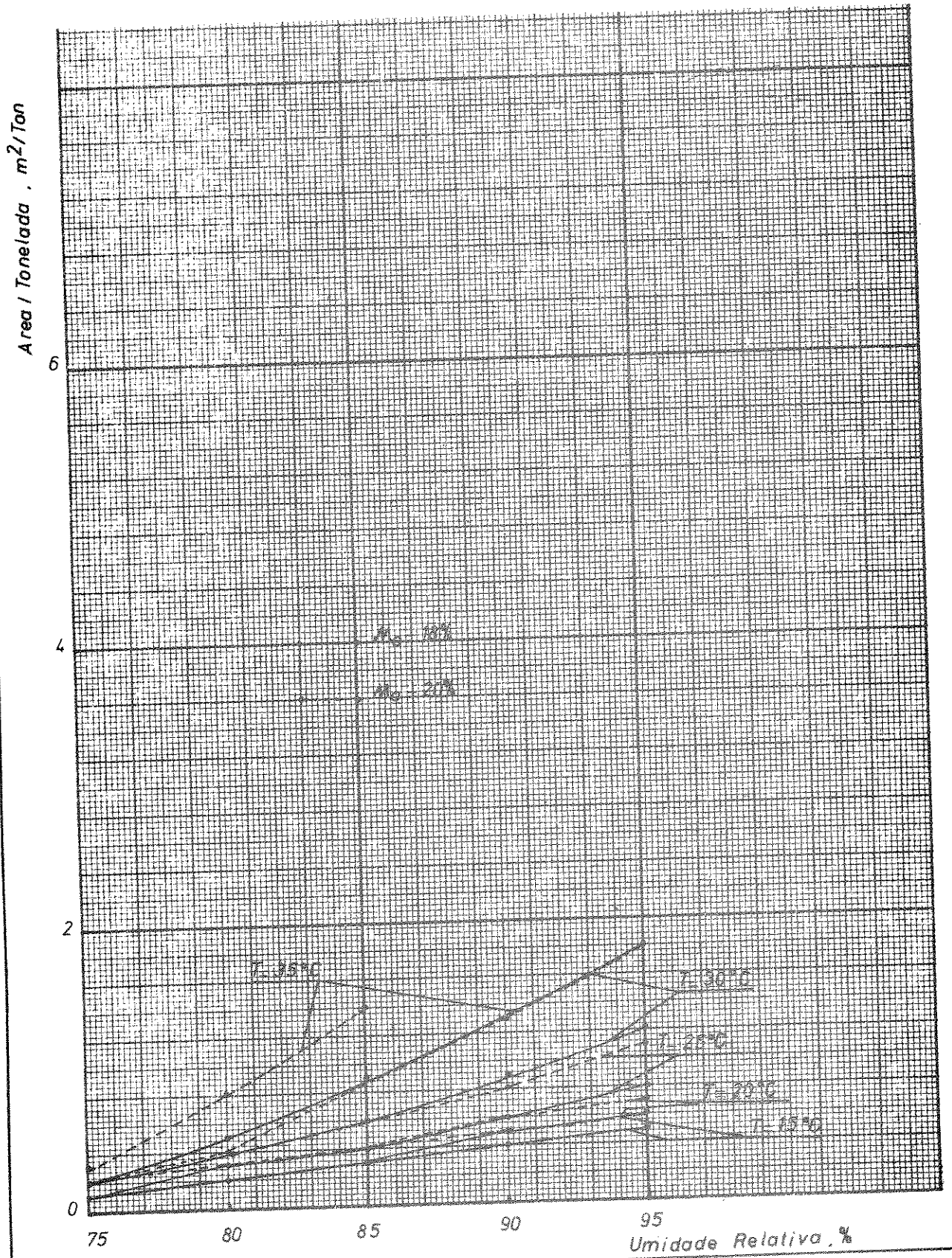


FIG. 33 · AREA COLETORA DE ENERGIA SOLAR
(SOJA INDUSTRIAL - 3º NIVEL)



5.6 Comparações entre o Coletor Armazenador e o Coletor Plano Simples.

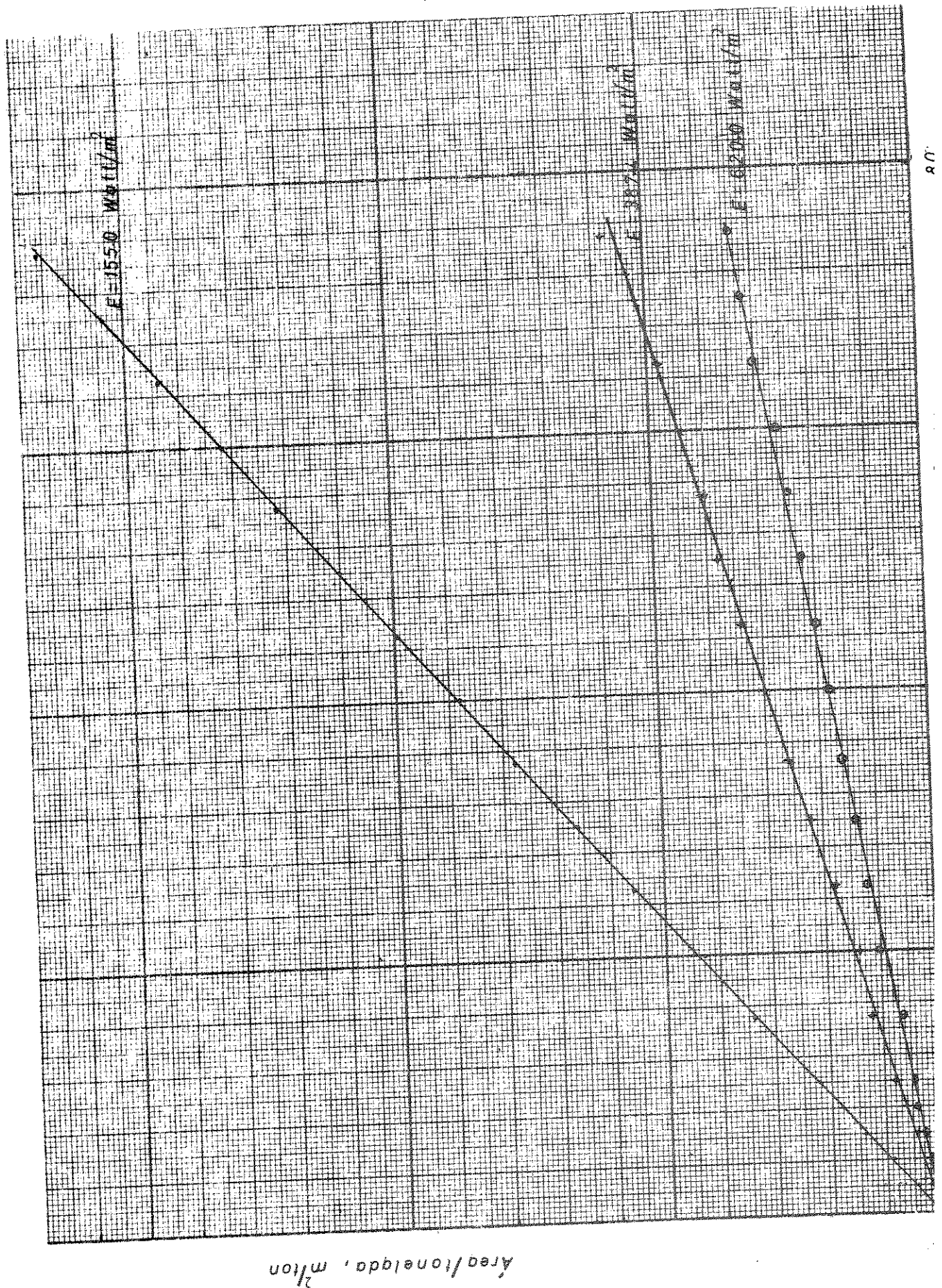
Vizando a comparar a área de coletor armazenador com a de coletor plano, necessária para aquecer determinada vazão de ar, utilizou-se o seguinte modelo para o coletor plano sem armazenamento de energia (Roa e Villa, 1977).

$$T - T_{\infty} = \frac{\alpha TH}{U_1} [1 - \exp(-U_1 A_C / \dot{m} c_a)] \quad \dots\dots (78)$$

Para o cálculo da área " A_C ", foram consideradas uma diferença $(T - T_{\infty}) = 5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ e uma temperatura ambiente de $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$. A radiação " H " foi considerada igual a: a) $155,0 \text{ watt/m}^2$; b) $387,4 \text{ watt/m}^2$ e c) $620,0 \text{ watt/m}^2$, representando estes números os valores médios dos 1^o, 2^o e 3^o níveis de radiação (Apêndice C₂ a C₄), respectivamente. A vazão de ar variou de 0,0 a 10,0 kg/s. O coeficiente U_1 foi considerado igual a $8,5 \text{ watt/m}^2 \text{ }^{\circ}\text{C}$. A figura 34 mostra a área coletora para os três níveis de radiação.

Ao se considerar, por exemplo, a secagem de cinquenta e cinco toneladas de sementes de soja com a umidade inicial de 18%, base úmida, num local onde a temperatura e umidade relativa do ambiente valem, respectivamente, $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$ e 95%, tem-se que aumentar a temperatura do ar ambiente até $30,1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (tabela 3), enquanto que a vazão de ar utilizada deverá ser de $6,7 \text{ m}^3/\text{min.ton.}$, ou seja, $7,4 \text{ kg/s}$ para as cinquenta e cinco toneladas (densidade do ar igual a $1,11 \text{ kg/m}^3$). Para o coletor plano deve-se dispor de uma área de: a) $8,4 \text{ m}^2/\text{ton}$ para o primeiro nível de radiação; b) $2,8 \text{ m}^2/\text{ton}$ pa

FIG 34 ÁREA DE COLETOR PLANO PARA DIFERENTES NÍVEIS DE RADIAÇÃO SOLAR



ra o segundo nível e c) 1,7 m²/ton para o terceiro nível. No caso do coletor armazenador deve-se dispor de: a) 7,1 m²/ton para o primeiro nível de radiação; b) 2,5 m²/ton para o segundo nível e c) 1,5 m²/ton para o terceiro nível. Assim, o coletor armazenador apresenta uma redução substancial de área nos níveis mais baixos de radiação solar.

Além da redução da área, devem ser considerados outros aspectos como: a) o custo do coletor armazenador por volta de setecentos e cinquenta cruzeiros (Cr\$ 750,00) por m², contra dois mil e quinhentos cruzeiros (Cr\$ 2.000,00 a 2.500,00) por m², em novembro de 1979⁽¹⁾, para o coletor plano e b) o aspecto do armazenamento de energia que pode chegar a mais de 1,5 horas, após o término da radiação solar.

É oportuno observar o efeito da vazão de ar e da temperatura ambiente na eficiência do coletor armazenador, para os três níveis de radiação solar. Nas figuras 35 a 37 vê-se que a eficiência varia de forma direta com a vazão de ar e de forma inversa com a temperatura ambiente, fixado o nível de radiação.

A influência da temperatura ambiente na eficiência do coletor é muito mais significativa no primeiro nível de radiação do que no segundo ou terceiro níveis, conforme se vê no gráfico nº 38.

(1) US\$1 = Cr\$ 31,90

em novembro de 1979.

FIG. 35 INFLUÊNCIA DA VAZÃO DE AR NA EFICIÊNCIA DO COLETOR ARMAZENADOR (RADIÇÃO MÉDIA = 155.0 watt/m²)

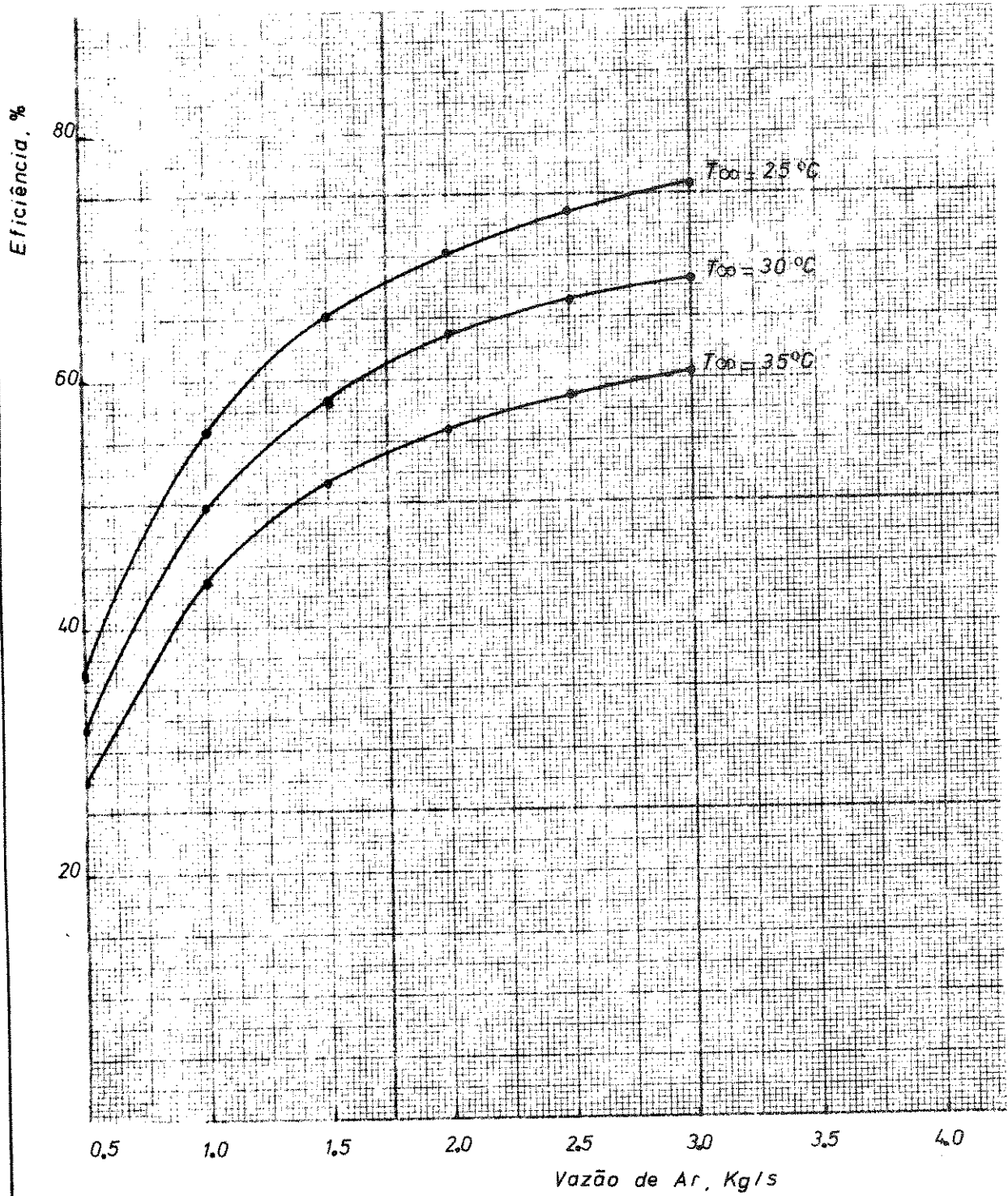


FIG. 36 INFLUÊNCIA DA VAZÃO DE AR NA EFICIÊNCIA DO COLETOR ARMAZENADOR (RADIAÇÃO MÉDIA = 387,4 watt/m²)

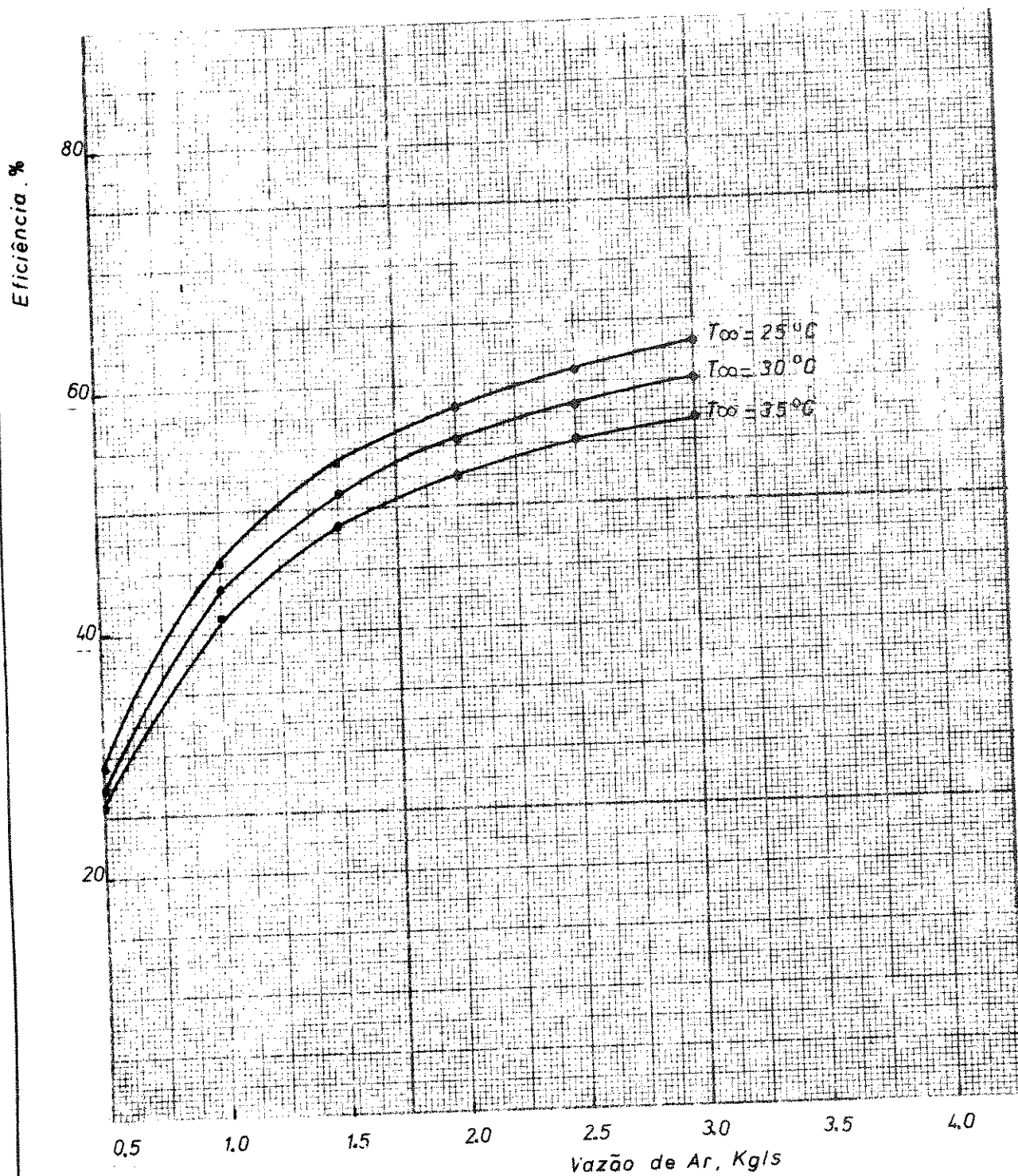


FIG 37 INFLUÊNCIA DA VAZÃO DE AR NA EFICIÊNCIA DO COLETOR ARMAZENADOR (RADIÇÃO MÉDIA = 620 watt/m²)

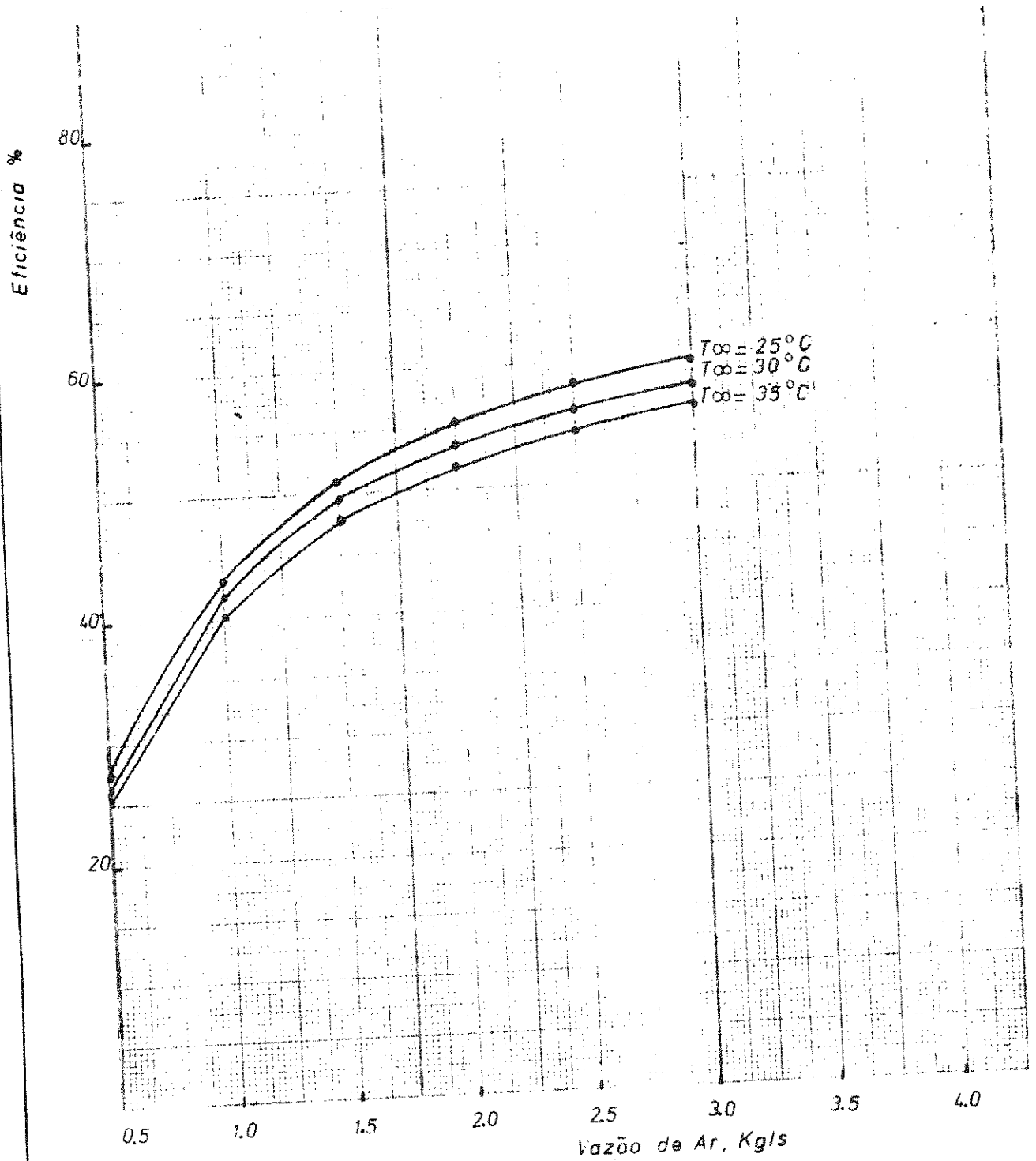
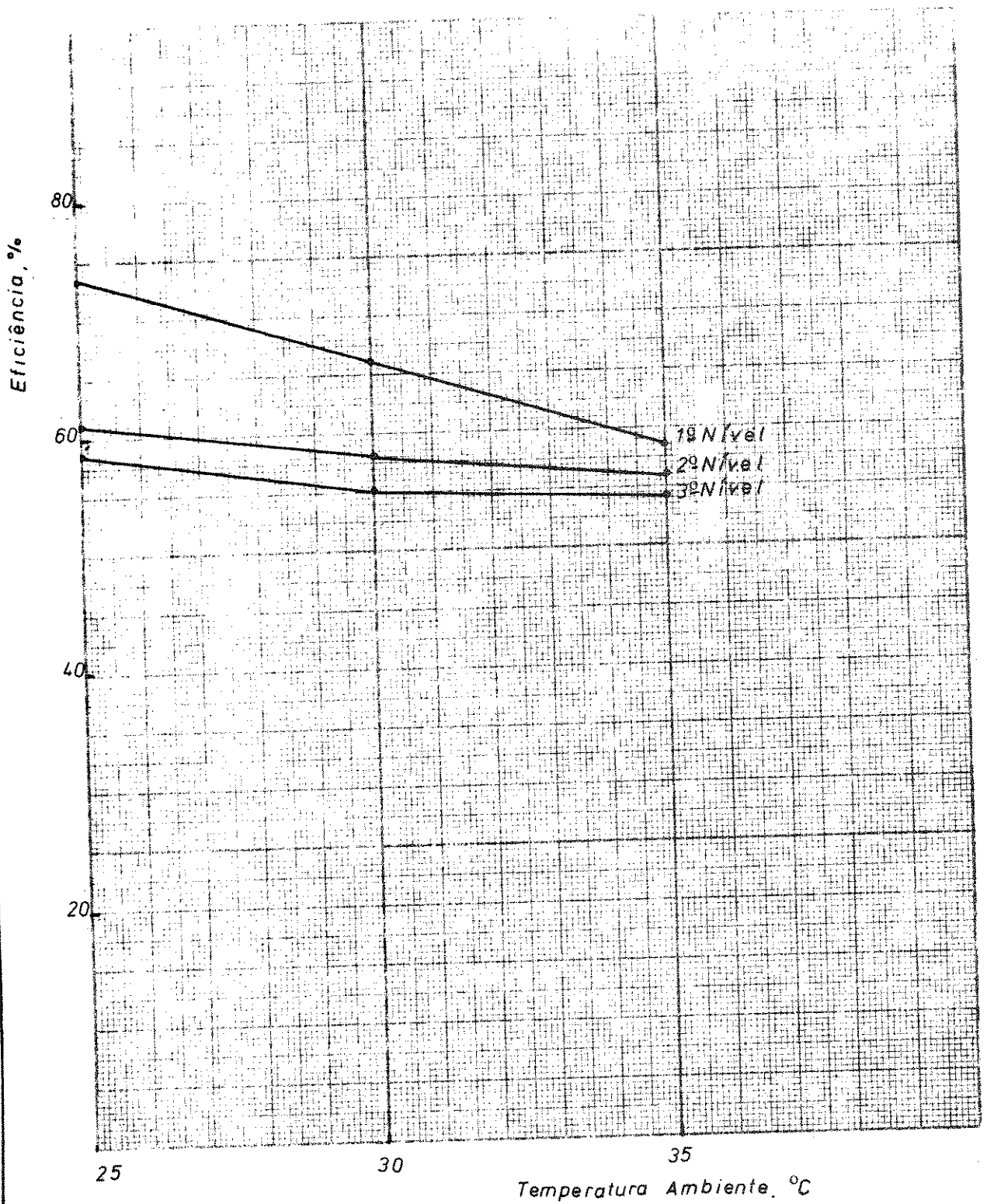


FIG 38 INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA AMBIENTE NA EFICIÊNCIA DO COLETOR ARMAZENADOR ($\dot{m} = 2,5 \text{ Kg/s}$)



6. CONCLUSÕES

A utilização da energia solar de forma criteriosa parece ser uma alternativa viável para a secagem de muitas matérias-primas agrícolas, já que os combustíveis derivados do petróleo, comumente usados, estão se tornando cada vez mais caros.

Considerando o elevado custo da secagem por processos convencionais e a possibilidade de utilização da energia solar na secagem de produtos agropecuários, construiu-se com materiais simples e baratos, como: terra, pedra britada, tijolos de cimento, plástico e madeira, um coletor armazenador de energia solar, de 60 m², de baixo custo e de fácil implementação nas fazendas brasileiras; cumprindo-se, assim, o primeiro objetivo do trabalho.

O coletor solar possui uma massa de pedra britada e tijolos que atua como armazenador de energia e como atenuador dos picos de temperatura do ar quente, muito comuns quando se aquece ar por meio de coletores solares planos, e prejudiciais à qualidade dos produtos, quando em contato com este ar quente, na operação de secagem.

Empregou-se o coletor solar para aquecimento do ar utilizado para secar cinquenta e cinco toneladas de soja "Santa Rosa", contidas num silo metálico, desde o teor inicial de umidade de 17,2% até 12%, base úmida.

Fez-se a avaliação do coletor solar através de um modelo matemático fundamentado em princípios de transferência de calor. Através: a) do modelo proposto; b) da vazão de ar necessária à secagem, até o teor de umidade de 12%, de soja com umidade inici

al de 18% e de 20%, base úmida, em diferentes condições ambientais e c) das variáveis ambientais, como: radiação solar, temperatura e umidade relativa do ar; determinou-se a área de coletor solar por unidade de massa do produto a ser secado, cumprindo-se, com isso, o segundo objetivo do trabalho.

Comparou-se o coletor armazenador com um coletor plano simples, concluindo-se que o coletor armazenador apresenta algumas vantagens como: a) menor custo por unidade de área; b) menor área para um mesmo incremento de temperatura e c) capacidade de armazenar energia em virtude da massa de pedras. Entretanto, apresenta algumas desvantagens como a impossibilidade de movimentação de um local a outro e também a dificuldade de construção na forma de módulos, como é comum nos coletores planos. Cumpriu-se, assim, o último objetivo do trabalho.

Estudou-se a influência da vazão de ar e da temperatura ambiente na eficiência do coletor solar, observando-se que a eficiência aumenta de forma direta com a vazão de ar e de forma inversa com a temperatura ambiente e com a radiação solar.

7. SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

- a) Considerar o fenômeno de difusão de energia no leito de pedras, como originalmente proposto no item 4. Com esta consideração será possível conhecer o perfil de temperatura no interior da camada de pedras.
- b) Considerar a temperatura inicial do leito de pedras como função das variáveis ambientais, o que permitirá trabalhar com condições iniciais variáveis, dando maior precisão aos parâmetros estimados.

4. RESUMO

Construiu-se, com materiais de baixo custo e facilmente encontrados no mercado, tais como: tijolos, pedra britada, madeira e plástico, um coletor solar de 60 m² (3 m de largura por 20 m de comprimento), contendo um leito de pedras capaz de funcionar como armazenador de energia. O coletor solar foi empregado para aquecer o ar ambiente que, por sua vez, foi utilizado para secar, até o teor de 12%, base úmida, cinquenta e cinco toneladas de soja "Santa Rosa", com teor inicial médio de umidade de 17,2%, base úmida, contidas num silo metálico.

Fez-se a avaliação matemática do coletor solar utilizando-se, para isso, um modelo baseado nos princípios da transferência de calor. O modelo empregado simulou, com precisão, os resultados experimentais da temperatura do ar na saída do coletor solar podendo, pois, ser utilizado para projetar novos coletores em locais diferentes de onde se realizou o experimento.

Determinou-se, posteriormente, o acréscimo de temperatura que deveria ser fornecido ao ar ambiente em diferentes condições atmosféricas, para que este ar, quando em contato com sementes de soja ou soja industrial com teor inicial de umidade de 18% ou de 20% base úmida, secasse o produto até 12%, base úmida. A vazão de ar necessário à secagem dos produtos em questão foram obtidas dos trabalhos de Villa et. al., 1978.

De posse das vazões de ar e dos incrementos de temperatura, foram realizadas simulações das áreas coletoras, necessárias para aquecer a referida vazão de ar do incremento de temperatura em

questão.

Foram efetuados cálculos das áreas dos coletores plano e armazenador, necessárias para aquecer de 5°C, diferentes vazões de ar em três níveis distintos de radiação solar.

Estudou-se a influência da vazão de ar e da temperatura ambiente na eficiência do coletor armazenador para três níveis de radiação solar.

9. SUMMARY

A 60 m² solar collector (3 m wide, 20 m long) was built using readily available construction materials such as: bricks, stones, wood and plastic. A stone bed on the base of the collector provided for heat storage capabilities.

Fifty five tons of soybeans variety "Santa Rosa", were dried from 17,2% to 12% (w.b.) using air heated by the solar collector.

A mathematical model was developed to predict outlet air temperature as a function of ambient air conditions, solar radiation and collector characteristics. The model accurately predicted the experimental values, and can be used to design solar collector for different locations.

The temperature increase to be given to ambient air under different conditions was calculated in order to dry seed and grain soybeans from 18% and 20% (w.b.) initial moisture to a final 12% moisture content. The air flows used to dry grain and seeds followed the recommendations given by Villa et. al., 1978.

Knowing the temperature increases and the air flows, solar collector areas were calculated through the mathematical model.

The collecting areas were calculated for flat plate and storage type collectors, giving a 5°C temperature increase for three levels of solar radiation and several air flows.

The efficiency of a storage type solar collector was studied for different levels of air flow, air temperature and solar radiation

10. BIBLIOGRAFIA

- ALANIS, E., SARAIVA, L. & ROVETTA, L. - Measurements of rock pile heat transfer. *Solar Energy* 19:571 - 572, 1977.
- ALTMAN, L. B. - Agricultural programs in solar energy. In: SHOVE, G. C., ed - Solar grain drying conference proceedings. Urbana-Champaign, Illinois, American Society of Agricultural Engineers, 1977. p.1 - 2.
- BAKKER-ARKEMA, F. W., BROOK, R. C. & LEREW, L. E. - Cereal grain drying. In: PÖMERANZ, Y. Advances in Cereal Science and technology. St. Paul, Minnesota, American Association of Cereal Chemists, 1978. v. 2, cap. 1, p. 1 - 90.
- BECK, J. V. - Parameter estimation in engineering and science. Preliminary edition. Dept. of Mechanical Engineering and Division of Engineering Research of Michigan State University, 1973. 501 p.
- BECKER, H. A. - A study of diffusion in solids of arbitrary shape, with application to the drying of the wheat kernel. *J. Appl. Polymer Sc.* 1:216 - 226, 1959.
- BECKMAN, W. A., KLEIN, S. A. & DUFFIE, J. A. Solar heating design by the f-chart method. New York, Wiley, 1977. 200 p.
- BROOKER, D. B., BAKKER-ARKEMA, F. W. & HALL, C. W. - Drying cereal grains. Westport, Connecticut, AVI, 1974. 265 p.

- BUELOW, F. H. - Solar energy availability. In: SHOVE, G. C., ed.
- Solar grain drying conference proceedings. Urbana-Champaign,
Illinois, American Society of Agricultural Engineers, 1977.
p. 26 - 33.
- CARNAHAN, B., LUTHER, H. A. & WILKES, T. O. - Applied numerical
methods. New York, Wiley, 1969. 298 p.
- DIGITAL EQUIPMENT CORPORATION - DECSYSTEM10. FORTRAN IV(F 40).
Programmer's Reference Manual. Maynard, Massachusetts, 1975,
74 p. (DEC-10 - LFLMA - B - D).
- DUFFIE, J. A. & BECKMAN, W. A. - Solar energy thermal processes.
New York, Wiley, 1974, 386 p.
- DYE, J. L. & NICELLY, V. A. - A general non-curvefitting and
equation solving program. Program n° 00000485. Computer
Center Michigan State University, East Lansing, Michigan, 1971.
- HALL, C. W. - Drying farm crops. Westport, Connecticut, AVI, 1957.
336 p.
- JAKOB, M. - Heat transfer. 4. ed., New York, Wiley, 1965. 625 p.
- LIU, B. Y. H. & JORDAN, R. C. - Interrelationship and characteristic
distribution of direct, diffuse and total solar radiation. Solar
Energy 3: 1 - 19, 1960.
- LÖF, G. O. G. & HAWLEY, R. W. - Unsteady-state heat transfer between
air and loose solids. Industrial and Engineering Chemistry
40: 1061 - 1070, 1948.

- MACEDO, I. C., PEREIRA, J. T. V. & MILANEZ, L. F. - Aplicação de um método indireto de solarimetria para energia incidente na região amazônica. In: Anais do Primeiro Congresso Brasileiro de Energia, Dezembro. Rio de Janeiro, 1978. p. 127 - 137.
- MEYER, J. A., VILLA, L. G., ROA, G. & ROSSI, S. J. - Energia para secagem de produtos agrícolas. Revista Brasileira de Armazenamento, Viçosa, M.G. 4: 5 - 14, 1978.
- ROA, G. - Natural drying of cassava. Michigan, 1974. 234 p. Thesis (Ph.D) - Department of Agricultural Engineering - Michigan State University.
- ROA, G., MACEDO, I. C. - Drying of "Carioca" dry beans with solar energy in stationary bin; Anual meeting of American Society of Agricultural Engineers, Lincoln, Junho. St. Joseph, 1976. 6 p. (ASAE paper 76 - 3021).
- ROA, G. & ROSSI, S. J. - Determinação Experimental de curvas de teor umidade equilíbrio mediante a medição da umidade relativa de equilíbrio. Revista Brasileira de Armazenamento, Viçosa, M. G. 2: 17 - 22, 1977.
- ROA, G., VILLA, L. G., MEYER, J. A. & MACEDO, I. C. - The UNICAMP program for solar drying and storing of agricultural products. Campinas, UNICAMP, 1979, 15 p.
- ROA, G. & VILLA, L. G. - Secagem e armazenamento de grãos e sementes em silos mediante a utilização de ar ambiente e com auxílio de coletores solares. Campinas, UNICAMP, 1977, 51 p.

ROSSI S. J. & ROA, G. - Pesquisa sobre secagem e armazenamento de matérias-primas alimentícias por meio de energia solar e ar natural. Academia de Ciência do Estado de São Paulo. (No prelo).

ROSSI, S. J. & ROA, G. - Aplicação de análise numérica e regressão não linear para estimação da condutividade e difusividade térmica para cereais; Sexto Congresso da Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 8 a 10 de setembro Sorocaba, Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 1976 10 p.

SÃO PAULO, INSTITUTO DE ECONOMIA ABRÍCOLA - Prognóstico 78/79 1978. p: 149 - 153.

SCAFFI, M. A. O. - Regressão bponderada; Um método robusto de ajuste. Campinas, 1979. 180 p. Tese (Mestrado) Instituto de Matemática Estatística e Ciência da Computação - UNICAMP.

SILVA, R. B. - Manual de termodinâmica e transmissão de calor. 4. ed. EPUSP, 1972. 178 p.

SINÍCIO, R. B. & ROA, G. - Quantificação de umidade de equilíbrio para grãos; Terceiro Seminário Nacional de Armazenagem; 9 a 13 de outubro Curitiba, Companhia Paranaense de Silos e Armazens - COPASA, 1978, 12 p.

THOMPSON, T. L., PEART, R. M. & FOSTER, G. H. - Mathematical Simulation of corn drying; A new model. Transaction of the ASAE 11: 583 - 586, 1968.

VILELA, E. R. - Secagem de café em terreiro e silo com energia solar. Campinas, 1977, 107 p. Tese (Mestrado) - Faculdade de Engenharia de Alimentos e Agrícola - UNICAMP.

VILLA, L. G., ROA, G. & MACEDO, I. C. - Minimum air flow for drying soybean seeds in bins with ambient and solar heated air. Summer meeting of the American Society of Agricultural Engineers, Logan, Utah, June 27 - 30, 1978. Utah State University, 1978. 14 p. (ASAE paper, 78 - 3017).

APÊNDICE A₁

Nomenclatura das Variáveis Empregadas no
Programa de Regressão Não-Linear

- ICONT: Utilizado ou não (é o caso), quando o modelo tem a forma
diferencial = 0
- IHOL(I): Vetor onde é armazenada qualquer mensagem
- IMETH: Escolha do método de minimização da função R = 0
- IPLT: Variável que informa se o usuário deseja ou não o gráfico
da temperatura do ar na saída do coletor vs o resíduo = 0
- IRX: Informa se a equação que calcula a temperatura na saída do
coletor está na forma algébrica ou diferencial = 2
- ISMIN: Se IRX = 1, ISMIN será o número de intervalos de integra
ção = 0
- ITMAX: Número máximo de iteração permitidas, se a convergência
não for obtida = 50
- IWT: Indica se os dados experimentais possuem pesos diferentes = 1
- KVAR: Indica o número da variável que será calculada na forma
gráfica, se IPLT = 1
- NCST: O número de constantes que serão lidas juntamente com cada
ensaio

NOVNK: Número de parâmetros a serem estimados = 7,

$$1 \leq \text{NOVNK} \leq 20$$

NOVAR: Número de variáveis envolvidas no modelo de simulação = 2

$$0 \leq \text{NOVAR} \leq 4$$

TEST: Valor de máximo de (Δ parâmetro/parâmetro) para que a convergência seja considerada satisfatória = 0,001

U(I): Valor inicial dos parâmetros

X(I, J): Matriz onde são armazenados os valores experimentais de radiação solar e temperatura ambiente.

APÊNDICE A₂

Programa de Leitura dos Dados Experimentais
Necessários à Avaliação do Coletor Solar

```
TY PROPRI
COMMON KOUNT, ITAPE, JTAPE, INT, LAP, XINCR, NOPT, NOVAR, NOUNK,
1X, U, ITMAX, WTX, TEST, ICONT, AV, FREE, IAR, EPS, ITY, XX, RXTYP,
1DX11, FOP, FO, FU, P, ZL, TO, EIGVAL, XST, DUM, VECT, NCST, CONST
COMMON/NOHE/IHOL, IPLT, KVAR, IMETH, IRX, ISMIN
COMMON/NOHE1/NARQ, FLUXO, NPON
DIMENSION X(4, 100), U(20), WTX(4, 100), XX(4), FOP(100),
1FO(100), FU(100), P(20, 21), VECT(20, 21), ZL(100), TO(20),
1EIGVAL(20), XST(100), DUM(25), CONST(16)
DIMENSION NPON(4), FLUXO(4)
DIMENSION IHOL(40)
DATA ITAPE, JTAPE/1, 3/
CALL IFILE(1, 'RADS01')
3 READ ITAPE, 800, END=4)NOUNK, NOVAR, ICONT, NCCOL, NARQ, NOPT
READ ITAPE, 801)IMETH, ITMAX, INT, IRX, ISMIN, IPLT
1, TEST, KVAR
READ ITAPE, 802) (IHOL(I), I=1, 40)
READ ITAPE, 803) (U(I), I=1, NOUNK)
READ ITAPE, 805) (NPON(I), I=1, NARQ)
READ ITAPE, 806) (FLUXO(I), I=1, NARQ)
READ ITAPE, 804) ((X(I, J), WTX(I, J), I=1, NCCOL), J=1, NOPT)
C WRITE(5, 807) (X(I, J), J=1, NOPT)
807 - FORMAT(1X, 0)
CALL SUBKIN
GO TO 3
4 CALL EXIT
800 FORMAT(6G)
801 FORMAT(8G)
802 FORMAT(40R2)
803 FORMAT(10G)
804 FORMAT(6G)
805 FORMAT(4G)
806 FORMAT(4G)
END
```

APÊNDICE A₃

Arquivo Contendo os Dados Experimentais

Necessários à Avaliação do Coletor Solar

TY RADS01.DAT						
7	2	0	3	4	92	
0	50	1	2	0	0	0.001 1
PARAMETROS DO MODELO DO COLETOR ARMAZENADOR SOLAR						
14.03	63.56	111.31	30.94	50.03	42.91	31.91
30	14	20	28			
2.63	1.64	2.69	3.19			
733.3	1.0000	28.3	1.0000	23.0	1.0000	
733.3	1.0000	29.5	1.0000	23.0	1.0000	
733.3	1.0000	30.5	1.0000	23.5	1.0000	
760.0	1.0000	31.5	1.0000	23.2	1.0000	
813.3	1.0000	32.5	1.0000	24.0	1.0000	
866.7	1.0000	33.5	1.0000	24.2	1.0000	
880.0	1.0000	34.5	1.0000	24.5	1.0000	
860.0	1.0000	35.3	1.0000	24.7	1.0000	
873.3	1.0000	36.2	1.0000	25.0	1.0000	
873.3	1.0000	37.0	1.0000	25.0	1.0000	
860.0	1.0000	37.5	1.0000	25.0	1.0000	
873.3	1.0000	37.5	1.0000	25.2	1.0000	
866.7	1.0000	37.5	1.0000	25.5	1.0000	
813.3	1.0000	37.5	1.0000	25.7	1.0000	
806.7	1.0000	37.5	1.0000	26.0	1.0000	
866.7	1.0000	37.5	1.0000	26.2	1.0000	
826.7	1.0000	37.6	1.0000	26.5	1.0000	
773.3	1.0000	37.6	1.0000	26.5	1.0000	
773.3	1.0000	37.8	1.0000	27.0	1.0000	
820.0	1.0000	37.6	1.0000	27.0	1.0000	
853.3	1.0000	36.8	1.0000	27.0	1.0000	
820.0	1.0000	36.3	1.0000	27.0	1.0000	
800.0	1.0000	35.5	1.0000	27.0	1.0000	
866.7	1.0000	34.5	1.0000	27.5	1.0000	
40.0	1.0000	32.5	1.0000	25.0	1.0000	
85.7	1.0000	32.5	1.0000	25.7	1.0000	
40.0	1.0000	31.9	1.0000	25.5	1.0000	
89.7	1.0000	30.2	1.0000	25.2	1.0000	
73.3	1.0000	28.8	1.0000	25.0	1.0000	
85.7	1.0000	27.5	1.0000	25.0	1.0000	
25.7	1.0000	42.5	1.0000	25.0	1.0000	
80.0	1.0000	42.5	1.0000	25.0	1.0000	
26.7	1.0000	41.5	1.0000	25.0	1.0000	
13.7	1.0000	40.5	1.0000	25.0	1.0000	
13.7	1.0000	29.4	1.0000	25.0	1.0000	
80.0	1.0000	37.8	1.0000	37.7	1.0000	
46.7	1.0000	26.5	1.0000	25.5	1.0000	
33.3	1.0000	25.5	1.0000	26.2	1.0000	
85.7	1.0000	24.5	1.0000	26.0	1.0000	
85.7	1.0000	23.5	1.0000	25.0	1.0000	

615.7	1.0000	30.0	1.0000	25.0	1.0000
617.7	1.0000	28.5	1.0000	24.5	1.0000
617.0	1.0000	37.5	1.0000	24.5	1.0000
97.7	1.0000	39.0	1.0000	27.0	1.0000
960.0	1.0000	38.7	1.0000	27.2	1.0000
973.7	1.0000	37.7	1.0000	27.5	1.0000
893.1	1.0000	37.0	1.0000	28.0	1.0000
640.0	1.0000	39.0	1.0000	28.5	1.0000
933.0	1.0000	39.5	1.0000	29.0	1.0000
920.0	1.0000	40.0	1.0000	29.3	1.0000
880.0	1.0000	39.8	1.0000	29.3	1.0000
813.3	1.0000	39.3	1.0000	29.0	1.0000
853.3	1.0000	38.8	1.0000	28.0	1.0000
746.7	1.0000	38.3	1.0000	27.0	1.0000
680.0	1.0000	38.2	1.0000	27.5	1.0000
720.0	1.0000	37.7	1.0000	26.0	1.0000
666.7	1.0000	35.9	1.0000	27.7	1.0000
680.0	1.0000	35.0	1.0000	27.5	1.0000
466.7	1.0000	35.0	1.0000	27.2	1.0000
426.7	1.0000	33.8	1.0000	27.0	1.0000
373.3	1.0000	32.6	1.0000	26.7	1.0000
240.0	1.0000	31.5	1.0000	26.5	1.0000
240.0	1.0000	30.5	1.0000	26.0	1.0000
746.7	1.0000	31.5	1.0000	27.0	1.0000
780.0	1.0000	32.3	1.0000	27.7	1.0000
813.2	1.0000	32.8	1.0000	28.5	1.0000
853.3	1.0000	33.5	1.0000	28.7	1.0000
866.7	1.0000	34.5	1.0000	29.0	1.0000
853.3	1.0000	35.3	1.0000	29.2	1.0000
853.3	1.0000	35.8	1.0000	29.5	1.0000
866.7	1.0000	36.4	1.0000	29.5	1.0000
866.7	1.0000	36.8	1.0000	29.5	1.0000
866.7	1.0000	37.3	1.0000	29.2	1.0000
893.3	1.0000	37.8	1.0000	29.0	1.0000
946.7	1.0000	37.8	1.0000	29.0	1.0000
586.7	1.0000	37.3	1.0000	29.0	1.0000
660.0	1.0000	37.3	1.0000	29.0	1.0000
693.3	1.0000	37.7	1.0000	29.0	1.0000
466.7	1.0000	37.5	1.0000	29.0	1.0000
426.7	1.0000	37.5	1.0000	29.0	1.0000
573.3	1.0000	36.0	1.0000	29.0	1.0000
533.3	1.0000	36.0	1.0000	29.0	1.0000
466.7	1.0000	35.7	1.0000	28.7	1.0000
533.3	1.0000	34.9	1.0000	28.5	1.0000
413.3	1.0000	34.3	1.0000	28.2	1.0000
440.0	1.0000	34.1	1.0000	28.0	1.0000
413.3	1.0000	33.5	1.0000	27.5	1.0000
386.7	1.0000	32.5	1.0000	27.0	1.0000
280.0	1.0000	31.5	1.0000	26.5	1.0000
186.7	1.0000	30.5	1.0000	26.0	1.0000
173.3	1.0000	29.5	1.0000	25.0	1.0000

APÊNDICE A₄

Rotina de Simulação do Modelo Matemático do Coletor Solar
quando Acoplada ao Programa de Regressão Não-Linear

```
SUBROUTINE CYLNUM
COMMON KOUNT, ITAPE, JTAPE, INT, LAP, XINCR, NOPT, NOVAR, NOUNK, X,
1U, ITMAX, WTX, TEST, N, AV, RESID, IAR, EPS, ITYP, XX, RXTYP, DX1I,
1FOP, FO, FU, P, ZL, TO, EIGVAL, XST, T, DT, L, M, JJJ, Y, DY, VECT, NCST,
1CONST
COMMON/NOME/IHOL, IPLT, KVAR, IMETH, IRX, ISMIN
COMMON/NOME1/NARQ, FLUXO, NPON
DIMENSION X(4, 100), U(20), WTX(4, 100), XX(4), FOP(100), FO(100), F
1U(100), P(20, 21), VECT(20, 21), ZL(100), TO(20), EIGVAL(20), XST(10
10), Y(10), DY(10), CONST(16)
DIMENSION IHOL(40)
DIMENSION NPON(4), FLUXO(4)
DIMENSION VEL(4), REY(4), U2(4), THETA1(4), THETA2(4),
1TEMP1(4), TEMP2(4)
DIMENSION TEMP(81, 40), THETA(81, 40), DIF(81), TEMP3(92), THETA3(92)
DATA ALARG, COMP, FCRI, AREA, PER, DUTOS/3. 0, 20. 0, 0. 5, 600. 0E-04,
1100 0E-02, 8. /
DATA ALFA, TAL, VISC, DENS/0. 8, 0. 8, 18. 902E-06, 1. 1098/
DATA CA, CP, DELX, DELT/1005. 0, 880. 0, 0. 25, 0 25/
DELTS=DELT*3600. 0
NX=COMP/DELX+FCRI
DH=4 *AREA/PER
DO 1 K=1, NARQ
C VEL(K)=FLUXO(K)/(DENS*DUTOS*AREA)
C REY(K)=VEL(K)*DH*DENS/VISC
C U2(K)=U(2)*REY(K)**U(3)
THETA1(K)=U(2)*DELTS
THETA2(K)=U(3)*CP-THETA1(K)
TEMP1(K)=U(2)*ALARG*DELX/(FLUXO(K)*CA)
TEMP2(K)=TEMP1(K)-1. +(ALARG*U(1)*DELX/(FLUXO(K)*CA))
1 CONTINUE
K=1
ICONTA=0
50 KK=NPON(K)
DO 2 J=1, KK
ICONTA=ICONTA+1
TEMP(1, J)=X(3, ICONTA)
TEMP3(ICONTA)=ALARG*U(1)*DELX*X(3, ICONTA)/(FLUXO(K)*CA)
THETA3(ICONTA)=X(1, ICONTA)*ALFA*TAL*DELTS
DO 3 I=1, NX
C THETA(I, 1)=U(K+3)
TEMP3(ICONTA)=ALARG*U(1)*DELX*X(3, ICONTA)/(FLUXO(K)*CA)
THETA(I, J+1)=(1. /(CP*U(3)))*(THETA3(ICONTA)+THETA2(K)*THETA(I,
1THETA1(K)*TEMP(I, J))
TEMP(I+1, J)=TEMP1(K)*THETA(I, J)-TEMP2(K)*TEMP(I, J)+
1TEMP3(ICONTA)
3 CONTINUE
```

```
RESID=TEMP(NX, J)-X(2, ICONTR)  
GO TO (114, 115, 116), IAR  
114 F0(ICONTA)=RESID  
GO TO 2  
115 F1(ICONTA)=RESID  
GO TO 2  
116 F0P(ICONTA)=RESID  
2 CONTINUE  
K=K+1  
IF(K LE. NARQ)GO TO 50  
RETURN  
END
```

*ECC

APÊNDICE A₅

Resultados Simulados da Temperatura do Ar e da Pedra em Quatro Posições ao Longo do Comprimento do Coletor Solar

EX PRO: MODEL1
FORTRAN: MODEL1
LINK: LOADING
LINKXL: PRO EXECUTIONJ

EXPERIMENTO NO. 1

	TEMPERATURA DO AR, C			
	X=0.25M	X=6.75M	X=13.5M	X=19.75M
T= 0.25H	23.0	25.9	27.5	28.3
T= 0.50H	23.0	26.1	28.3	29.7
T= 0.75H	23.5	26.5	28.9	30.6
T= 1.00H	23.2	26.5	29.2	31.3
T= 1.25H	24.0	27.0	29.7	32.0
T= 1.50H	24.2	27.5	30.3	32.7
T= 1.75H	24.5	28.0	30.9	33.5
T= 2.00H	24.7	28.3	31.5	34.2
T= 2.25H	25.0	28.8	32.2	35.0
T= 2.50H	25.0	29.1	32.6	35.7
T= 2.75H	25.0	29.2	32.9	36.1
T= 3.00H	25.2	29.4	33.1	36.4
T= 3.25H	25.5	29.7	33.4	36.7
T= 3.50H	25.7	29.7	33.3	36.6
T= 3.75H	26.0	29.7	33.2	36.4
T= 4.00H	26.2	30.0	33.5	36.6
T= 4.25H	26.5	30.2	33.6	36.8
T= 4.50H	26.2	30.0	33.5	36.6
T= 4.75H	27.0	30.4	33.6	36.5
T= 5.00H	27.0	30.4	33.6	36.5
T= 5.25H	27.0	30.3	33.4	36.2
T= 5.50H	27.0	30.1	33.1	35.8
T= 5.75H	27.0	30.2	33.1	35.8
T= 6.00H	27.5	30.2	32.8	35.3
T= 6.25H	26.0	29.2	32.0	34.5
T= 6.50H	25.7	28.4	31.0	33.4
T= 6.75H	25.5	27.4	29.5	31.6
T= 7.00H	25.2	26.8	28.6	30.4
T= 7.25H	25.0	26.2	27.6	29.1
T= 7.50H	25.0	25.9	27.0	28.2

	TEMPERATURA DA PEDRA, C			
	X=0.25M	X=6.75M	X=13.5M	X=19.75M
T= 0.25H	30.8	30.8	30.8	30.8
T= 0.50H	30.4	32.1	33.1	33.6

T= 0.75H	30.3	32.8	34.5	35.6
T= 1.00H	30.5	33.3	35.5	37.0
T= 1.25H	30.6	33.7	36.1	38.0
T= 1.50H	31.4	34.5	37.1	39.2
T= 1.75H	32.2	35.3	38.1	40.4
T= 2.00H	32.7	36.1	39.0	41.4
T= 2.25H	33.5	37.0	40.1	42.7
T= 2.50H	34.1	37.8	41.0	43.0
T= 2.75H	34.4	38.3	41.7	44.6
T= 3.00H	34.4	38.5	42.1	45.1
T= 3.25H	34.6	38.8	42.4	45.6
T= 3.50H	34.2	38.4	42.1	45.4
T= 3.75H	33.9	37.9	41.6	44.9
T= 4.00H	34.5	38.3	41.9	45.1
T= 4.25H	34.6	38.4	41.9	45.1
T= 4.50H	34.6	38.4	41.8	44.9
T= 4.75H	34.1	37.9	41.4	44.5
T= 5.00H	34.4	37.9	41.2	44.3
T= 5.25H	34.2	37.7	40.9	43.8
T= 5.50H	33.7	37.1	40.2	43.1
T= 5.75H	33.9	37.2	40.2	42.9
T= 6.00H	33.1	36.3	39.2	41.9
T= 6.25H	33.2	36.1	38.8	41.4
T= 6.50H	31.5	34.6	37.3	39.9
T= 6.75H	29.1	32.0	34.7	37.1
T= 7.00H	28.4	30.7	33.0	35.2
T= 7.25H	27.3	29.2	31.2	33.2
T= 7.50H	26.7	28.2	29.9	31.5

EXPERIMENTO NO. 2

	X=0.25M	TEMPERATURA DO AR, C		
		X=6.75M	X=13.5M	X=19.75M
T= 0.25H	26.0	38.0	42.6	44.4
T= 0.50H	26.0	34.4	39.9	42.0
T= 0.75H	26.0	31.8	36.9	40.4
T= 1.00H	26.0	30.6	35.2	38.8
T= 1.25H	26.0	29.8	33.9	37.4
T= 1.50H	26.0	29.2	32.5	36.9
T= 1.75H	26.5	31.7	34.7	37.2
T= 2.00H	26.2	30.9	33.6	36.2
T= 2.25H	26.0	29.6	32.6	35.2
T= 2.50H	25.8	28.9	31.7	34.2
T= 2.75H	25.5	27.7	30.2	32.5
T= 3.00H	25.0	26.7	28.7	30.7
T= 3.25H	24.5	25.8	27.4	29.1
T= 3.50H	24.5	25.3	26.4	27.9

	X=0.25M	TEMPERATURA DA PEDRA, C		
		X=6.75M	X=13.5M	X=19.75M
T= 0.25H	49.8	49.8	49.8	49.8
T= 0.50H	38.3	45.3	48.0	49.1
T= 0.75H	32.7	40.5	44.9	47.8
T= 1.00H	31.2	37.8	42.6	45.6
T= 1.25H	30.5	36.0	40.6	44.0
T= 1.50H	30.3	34.7	39.1	42.5
T= 1.75H	37.0	37.3	39.9	42.7
T= 2.00H	32.8	36.1	38.8	41.5
T= 2.25H	30.9	34.7	37.7	40.3
T= 2.50H	29.8	33.5	36.5	39.1
T= 2.75H	28.1	31.4	34.3	36.9
T= 3.00H	26.9	29.6	32.2	34.6
T= 3.25H	25.8	28.0	30.2	32.4
T= 3.50H	25.1	26.7	28.6	30.5

EXPERIMENTO NO. 3

	TEMPERATURA DO AR, C			
	X=0.25M	X=6.75M	X=13.5M	X=19.75M
T= 0.25H	27.0	32.6	35.0	37.6
T= 0.50H	27.2	32.2	35.0	38.4
T= 0.75H	27.5	32.0	35.0	38.8
T= 1.00H	28.0	32.2	36.0	39.2
T= 1.25H	28.5	32.4	36.0	39.2
T= 1.50H	29.0	32.2	35.4	38.4
T= 1.75H	29.5	32.9	36.1	39.1
T= 2.00H	29.3	33.1	36.5	39.5
T= 2.25H	29.0	32.9	36.4	39.5
T= 2.50H	28.0	32.1	35.7	38.9
T= 2.75H	27.0	31.3	35.1	38.4
T= 3.00H	27.5	31.1	34.6	37.8
T= 3.25H	28.0	31.2	34.3	37.2
T= 3.50H	27.7	31.0	34.0	36.9
T= 3.75H	27.5	30.7	33.6	36.4
T= 4.00H	27.2	30.4	33.3	36.0
T= 4.25H	27.0	29.7	32.4	34.9
T= 4.50H	26.7	29.1	31.5	33.8
T= 4.75H	26.5	28.6	30.7	32.8
T= 5.00H	26.0	27.8	29.6	31.5

	TEMPERATURA DA PEDRA, C			
	X=0.25M	X=6.75M	X=13.5M	X=19.75M
T= 0.25H	42.7	42.7	42.7	42.7
T= 0.50H	39.1	42.4	44.3	45.3
T= 0.75H	37.7	42.0	44.9	46.0
T= 1.00H	37.3	41.8	45.2	47.0
T= 1.25H	37.0	41.3	45.8	47.9
T= 1.50H	35.7	39.6	43.4	46.5
T= 1.75H	37.2	40.8	44.1	47.2
T= 2.00H	38.0	41.5	44.0	47.7
T= 2.25H	38.0	41.7	45.0	48.0
T= 2.50H	37.4	41.3	44.7	47.7
T= 2.75H	36.8	40.8	44.4	47.3
T= 3.00H	35.4	39.6	43.2	46.3
T= 3.25H	34.7	38.6	42.1	45.3
T= 3.50H	34.9	38.4	41.7	44.7
T= 3.75H	34.6	37.9	41.0	44.0
T= 4.00H	34.4	37.6	40.6	43.3
T= 4.25H	32.9	36.1	39.0	41.8
T= 4.50H	31.9	34.8	37.6	40.2
T= 4.75H	31.0	33.6	36.2	38.6
T= 5.00H	29.7	32.1	34.4	36.6

EXPERIMENTO NO. 4

	TEMPERATURA DO AR, C			
	X=0.25M	X=6.75M	X=13.5M	X=19.75M
T= 0.25H	27.0	28.6	29.5	30.1
T= 0.50H	27.7	29.7	31.1	32.1
T= 0.75H	28.5	30.7	32.4	33.8
T= 1.00H	28.7	31.3	33.4	35.0
T= 1.25H	29.0	31.8	34.1	36.1
T= 1.50H	29.2	32.1	34.7	36.9
T= 1.75H	29.5	32.5	35.1	37.4
T= 2.00H	29.5	32.6	35.3	37.8
T= 2.25H	29.5	32.7	35.5	38.0
T= 2.50H	29.2	32.5	35.5	38.1
T= 2.75H	29.0	32.3	35.3	38.1
T= 3.00H	29.0	32.3	35.4	38.1
T= 3.25H	29.0	32.4	35.5	38.4
T= 3.50H	29.0	31.7	34.3	36.9
T= 3.75H	29.0	32.0	34.7	37.3
T= 4.00H	29.0	31.8	34.4	36.9
T= 4.25H	29.0	31.3	33.5	35.8

T=	4.50H	29.0	29.9	32.9	34.9
T=	4.75H	29.0	31.0	33.0	34.8
T=	5.00H	28.7	30.8	32.8	34.6
T=	5.25H	28.5	30.5	32.4	34.1
T=	5.50H	28.2	30.3	32.2	34.0
T=	5.75H	28.0	29.9	31.7	33.3
T=	6.00H	27.5	29.4	31.2	32.9
T=	6.25H	27.0	28.9	30.6	32.3
T=	6.50H	26.5	28.2	29.8	31.3
T=	6.75H	26.0	27.4	28.8	30.1
T=	7.00H	25.0	26.4	27.7	29.0

		TEMPERATURA DA PEDRA, C			
		X=0.25M	X=6.75M	X=13.5M	X=19.75M
T=	0.25H	31.8	31.8	31.8	31.8
T=	0.50H	33.3	34.2	34.8	35.1
T=	0.75H	34.5	36.0	37.1	37.8
T=	1.00H	35.6	37.5	39.0	40.1
T=	1.25H	36.4	38.7	40.6	42.0
T=	1.50H	37.0	39.6	41.7	43.5
T=	1.75H	37.3	40.1	42.5	44.5
T=	2.00H	37.5	40.5	43.0	45.2
T=	2.25H	37.7	40.8	43.4	45.8
T=	2.50H	37.8	40.9	43.7	46.2
T=	2.75H	37.7	40.9	43.8	46.3
T=	3.00H	37.6	40.9	43.9	46.5
T=	3.25H	37.9	41.3	44.3	47.0
T=	3.50H	35.5	38.9	42.0	44.7
T=	3.75H	36.7	39.7	42.5	45.1
T=	4.00H	36.1	39.1	41.8	44.4
T=	4.25H	34.5	37.4	40.1	42.6
T=	4.50H	33.7	36.2	38.6	41.0
T=	4.75H	34.2	36.4	38.5	40.6
T=	5.00H	34.2	36.2	38.3	40.2
T=	5.25H	33.6	35.7	37.7	39.5
T=	5.50H	33.6	35.7	37.6	39.4
T=	5.75H	32.8	34.8	36.7	38.5
T=	6.00H	32.5	34.4	36.2	38.0
T=	6.25H	31.9	33.8	35.6	37.3
T=	6.50H	30.7	32.6	34.4	36.1
T=	6.75H	29.3	31.1	32.8	34.4
T=	7.00H	28.4	30.0	31.5	32.9

END OF EXECUTION

CPU TIME 5.18 ELAPSED TIME: 7:55.92

EXIT

APÊNDICE A₆

Programa de Simulação do Modelo Matemático do Coletor Solar

TY MODEL1

```
SUBROUTINE SUBKIN
COMMON X
COMMON/NONE1/NARQ, FLUXO, NPON
DIMENSION X(2, 400), U(20), AP(10)
DIMENSION NPON(10), FLUXO(10), A(48)
DIMENSION VEL(10), REY(10), U2(10), THETA1(10), THETA2(10),
1TEMP1(10), TEMP2(10)
DIMENSION TEMP(91, 48), THETA(91, 48), DIF(91), TEMP3(400),
1THETA3(400)
DATA ALARG, COMP, FCRI, AREA, PER, DUTOS/3. 0, 22. 5, 0. 5, 600. 0E-04,
1100. 0E-02, 8. /
DATA ALFA, TAL, VISC, DENS/0. 8, 0. 8, 18. 902E-06, 1. 1098/
DATA CA, CP, DELX, DELT/1005. 0, 880. 0, 0. 25, 0. 25/
DATA AP(1), AP(2), AP(3), AP(4)/0. 38, 0. 55, 0. 37, 0. 33/
DATA U(1), U(3), U(4), U(5), U(6), U(7)/14. 0802, 112. 711,
130. 7946, 49. 7621, 42. 6608, 31. 8498/
DELTS=DELT*3600. 0
NX=COMP/DELX+FCRI
DH=4. *AREA/PER
DO 1 K=1, NARQ
VEL(K)=FLUXO(K)/(DENS*DUTOS*AREA)
REY(K)=VEL(K)*DH*DENS/VISC
0 WRITE(5, 51)REY(K)
51 FORMAT(1X, 'REY= ', G)
U2(K)=AP(K)*0. 023*REY(K)**0. 8
THETA1(K)=U2(K)*DELTS
THETA2(K)=U(3)*CP-THETA1(K)
TEMP1(K)=U2(K)*ALARG*DELX/(FLUXO(K)*CA)
TEMP2(K)=TEMP1(K)-1. +(ALARG*U(1)*DELX/(FLUXO(K)*CA))
1 CONTINUE
K=1
ICONTA=0
50 WRITE(5, 4)K
4 FORMAT(/, 1X, 'EXPERIMENTO NO. ', 1X, I2, /)
WRITE(5, 7)
7 FORMAT(25X, 'TEMPERATURA DO AR, C')
WRITE(5, 8)
8 FORMAT(13X, 'X=0. 25M', 5X, 'X=6. 75M', 5X, 'X=13. 5M', 5X, 'X=19. 75M'
KK=NPON(K)
SOMRAD=0.
SOMDIF=0.
TOUT=0.
0 WRITE(5, 120)KK
120 FORMAT(1X, 'KK= ', I2)
DO 2 J=1, KK
A(J)=FLOAT(J)*DELT
```

```
ICONTA=ICONTA+1
TEMP(1, J)=X(2, ICONTA)
TEMP3(ICONTA)=ALARG*U(1)*DELX*X(2, ICONTA)/(FLUXO(K)*CA)
THETA3(ICONTA)=X(1, ICONTA)*ALFA*TAL*DELTS
DO 1 I=1, NX
  THETA(I, 1)=U(K+3)
  TEMP2(ICONTA)=ALARG*U(1)*DELX*X(3, ICONTA)/(FLUXO(K)*CA)
  THETA(I, J+1)=(1/(CP*U(2)))*(THETA3(ICONTA)+THETA2(K)*THETA(I, J)+
  1*THETA1(K)*TEMP(I, J))
  TEMP(I+1, J)=TEMP1(K)*THETA(I, J)-TEMP2(K)*TEMP(I, J)+
  1*TEMP3(ICONTA)
CONTINUE
WRITE(5, 118)TEMP(NX, J), NX, J
FORMAT(1X, 'TEMP(NX, J)= ', G, '/', 1X, 'NX= ', I2, '/', 1X, 'J= ', I2)
118 WRITE(5, 9)A(J), (TEMP(I, J), I=1, NX, 26)
9 FORMAT(1X, 'T= ', F5.2, 'H', 3X, 4(F4.1, 8X))
RESID=TEMP(NX, J)-X(2, ICONTA)
SOMRAD=SOMRAD+X(1, ICONTA)
SOMDIF=SOMDIF+RESID
TOUT=TOUT+TEMP(NX, J)
WRITE(5, 119)RESID, SOMRAD, X(1, ICONTA), SOMDIF, TOUT
119 FORMAT(1X, 'RESID= ', G, '/', 1X, 'SOMRAD= ', G, '/', 1X, 'X(1, ICONTA)= ', G,
1/, 1X, 'SOMDIF= ', G, '/', 1X, 'TOUT= ', G)
GO TO (114, 115, 116), IAR
C114 F0(ICONTA)=RESID
C GO TO 2
C115 F1(ICONTA)=RESID
C GO TO 2
C116 F2(ICONTA)=RESID
2 CONTINUE
RADMD=SOMRAD/FL0AT(KK)
DIFMD=SOMDIF/FL0AT(KK)
TSDMD=TOUT/FL0AT(KK)
OUTPUT=FLUXO(K)*CA*DIFMD
AINPUT=RADMD*60.
EFF=(OUTPUT/AINPUT)*100.
WRITE(5, 10)
10 FORMAT(7, 25X, 'TEMPERATURA DA PEDRA, C')
WRITE(5, 11)
11 FORMAT(13X, 'X=0.25M', 5X, 'X=6.75M', 5X, 'X=13.5M', 5X, 'X=19.75M', /)
DO 12 J=1, KK
  WRITE(5, 13)A(J), (THETA(I, J), I=1, NX, 26)
  FORMAT(1X, 'T= ', F5.2, 'H', 3X, 4(F4.1, 8X))
13 CONTINUE
12 WRITE(5, 117)FLUXO(K), EFF, TSDMD, RADMD, DIFMD, OUTPUT, AINPUT
117 FORMAT(1X, 'FLUXO= ', G, '/', 1X, 'EFF= ', G, '/', 1X, 'T. MEDIA SAIDA= ', G,
1/, 'RADMD= ', G, '/', 1X, 'DIFMD= ', G, '/', 1X, 'OUTPUT= ', G, '/', 1X,
1/'AINPUT= ', G)
K=K+1
IF(K, LE, NARO)GO TO 50
RETURN
END
```

APÊNDICE B

Programa de Cálculo das Vazões Mínimas de Ar e dos Tempos de
Secagem de Soja

```
TY MINIMO F
DATA DELTA, DELT/0.001, 0.1/
DATA P1, P2, P3, Q0, Q1, Q2, Q3/0.362614E+01, -0.627984E+01,
10 3 6125E+01, -0.539091E-02, -0.156279E-01, 0.317788E-01
1, -0.111789E-01/
900 TYPE 1
1 FORMAT(1X, 'T= ', $)
ACCEPT 20, T
20 FORMAT(G)
TYPE 2
2 FORMAT(1X, 'RH= ', $)
ACCEPT 21, RH
21 FORMAT(G)
WRITE(5, 101) T, RH
101 FORMAT(1X, 'T= ', G, /, 1X, 'RH= ', G)
PVS=1.0703*EXP(54.63-(12301.69/(1.8*T+491.69)))-5.17*ALOG(
11.8*(T+491.69))
PV=R1*PVS
5 CONST0=(Q0+Q1*RH+Q2*RH**2+Q3*RH**3)*(T+273.)
CONST1=EXP(CONST0)
CONST2=P1*RH+P2*RH**2+P3*RH**3
AME=CONST2*CONST1
AMEBU=AME/(1.+AME)
DIF=AMEBU-0.120
IF(DIF)3,3,4
4 IF(ABS(DIF).LE.DELTA)GO TO 3
T=T+DELT
PVS=1.0703*EXP(54.63-(12301.69/(1.8*T+491.69)))-5.17*ALOG(
11.8*(T+491.69))
PH=P1/PVS
GO TO 5
3 CONTINUE
C
C SOJA SEMENTE, M0=18%
C
C FMIN=5.22+0.43*(T-27.25)+0.028*(T-27.25)**2
C TMIN=15.22-1.25*(T-27.5)+0.036*(T-27.5)**2
C
C SOJA SEMENTE, M0=20%
C
C FMIN=6.02+0.55*(T-27.25)+0.036*(T-27.25)**2
C TMIN=12.8-0.987*(T-27.5)+0.011*(T-27.5)**2
C
C SOJA GRAD INDUSTRIAL, M0=18%
C
C FMIN=2.75+0.19*(T-27.25)+0.011*(T-27.25)**2
C TMIN=25.54-2.47*(T-30.0)+0.05*(T-30.0)**2
C
```

```
6 SUJA GRAD INDUSTRIAL. M0=20%
7
8 FMIN=3.73+0.32*(T-27.25)+0.02*(T-27.25)**2
9 TMIN=23.25-2.23*(T-29.0)+0.05*(T-29.0)**2
10 TYPE 6
11 FORMAT(10X,'RESULTADOS FINAIS')
12 TYPE 7,DIF,T,RH,FMIN,TMIN
13 FORMAT(1X,'DIFERENCA= ',G,/,'1X,'TEMPERATURA= ',G,/,'1X,
14 U. RELATIVA= ',G,/,'1X,'F. MINIMO= ',G,/,'1X,'T. MINIMO=
15 10)
16 TYPE 8
17 FORMAT(1X,'MAIS?',*)
18 ACCEPT 9,RESP
19 FORMAT(A3)
20 IF(Resp.EQ.'S')GO TO 900
21 CALL EXIT
22 END
```


APÊNDICE C₂

Primeiro Nível de Radiação e Temperatura Ambiente

TP	FORÇA	DR
9	7	25,0
28	7	25,0
47	7	25,0
66	1	25,0
84	1	25,0
101	1	25,0
117	1	25,0
125	1	25,0
138	1	25,0
167	1	25,0
178	1	25,0
191	1	25,0
202	1	25,0
212	1	25,0
221	1	25,0
231	1	25,0
238	1	25,0
241	1	25,0
243	1	25,0
244	1	25,0
258	1	25,0
261	1	25,0
264	1	25,0
278	1	25,0
281	1	25,0
282	1	25,0
291	1	25,0
299	1	25,0
355	1	25,0
358	1	25,0
375	1	25,0
118	2	25,0
101	3	25,0
84	3	25,0
66	1	25,0
47	3	25,0
28	3	25,0
9	3	25,0

APÊNDICE C₃

Segundo Nível de Radiação e Temperatura Ambiente

TV	FURTO	DEB
23	3	25.0
71	0	20.0
118	7	27.0
165	1	20.0
210	6	25.0
254	2	15.0
297	4	10.0
338	0	20.0
376	3	10.0
411	1	20.0
446	1	20.0
477	0	10.0
515	2	15.0
558	1	20.0
592	0	15.0
576	0	20.0
565	1	20.0
526	2	20.0
604	0	10.0
607	0	20.0
607	0	20.0
604	0	20.0
606	0	20.0
605	0	20.0
578	0	20.0
552	0	20.0
510	0	20.0
475	0	15.0
437	0	20.0
416	0	20.0
413	0	20.0
376	0	10.0
338	0	20.0
297	0	20.0
251	0	20.0
210	0	20.0
161	0	15.0
118	0	20.0
71	0	20.0
23	0	20.0

APÊNDICE C₄

Terceiro Nível de Radiação e Temperatura Ambiente

TV	FORÇA	DIR
38.2	25.0	0
114.4	25.0	0
189.9	25.0	0
264.1	25.0	0
337.8	25.0	0
407.6	25.0	0
475.7	25.0	0
540.9	25.0	0
602.7	25.0	0
660.1	25.0	0
714.9	25.0	0
764.5	25.0	0
809.5	25.0	0
849.4	25.0	0
884.1	25.0	0
913.4	25.0	0
937.0	25.0	0
954.3	25.0	0
966.8	25.0	0
972.4	25.0	0
978.0	25.0	0
966.0	25.0	0
954.3	25.0	0
937.0	25.0	0
913.4	25.0	0
884.1	25.0	0
849.4	25.0	0
809.5	25.0	0
764.5	25.0	0
714.9	25.0	0
660.1	25.0	0
602.7	25.0	0
540.9	25.0	0
475.7	25.0	0
407.6	25.0	0
337.8	25.0	0
264.1	25.0	0
189.9	25.0	0
114.4	25.0	0
38.2	25.0	0

APÊNDICE D

Programa de Simulação das Áreas Coletoras e do Tempo de
Armazenamento de Energia

```
TY SIMULA
  DIMENSION X(2,100),U(4)
  DIMENSION TEMP(1000,60),THETA(1000,60),TEMP3(60),
  THETA3(60)
  DATA ALARG,FCRI,AREA,PER,DUTOS/3.0,0.5,600.0E-04,
  1100.0E-02,8./
  DATA ALFA,TAL,VISC,DENS/0.8,0.8,18.902E-06,1.1098/
  DATA CA,CP,DELX,DELT/1005.0,880.0,0.25,0.25/
  DATA U(1),U(3),U(4)/14.0777,112.745,38.8/
  DATA PI/3.141592654/
  DATA BF/0.41/
C
C   CALL IFILE(1,'SIM1')
C   READ(1,804)((X(I,J)),I=1,2),J=1,30)
C904  FORMAT(2G)
C     TYPE 100
C100  FORMAT(1X,'COMP= ',#)
C     ACCEPT 101,COMP
C101  FORMAT(G)
C     TYPE 102
C102  FORMAT(1X,'DT0= ',#)
C     ACCEPT 103,DT0
C103  FORMAT(G)
C     TYPE 104
C104  FORMAT(1X,'FLUXO= ',#)
C     ACCEPT 105,FLUXO
C105  FORMAT(G)
C     CALL IFILE(1,'FLUXO3')
806   READ(1,805,END=333)DT0,FLUXO,TINF
805   FORMAT(3G)
      COMP=0.25
      WRITE(5,807)DT0,FLUXO,TINF
807   FORMAT(1X,'DT0= ',G,/,1X,'FLUXO= ',G,/,1X,'T. AMB. = ',G)
      OMEGA=PI/10.
C
C   "A"   CARACTERIZA O NIVEL DE RADIAÇÃO
C
C     A=3897.1
C
C   GERACAO DA RADIAÇÃO SOLAR
C
      T=0
      NTA=0
      DO 106 I=1,40,1
      NTA=NTA+1
      T=T+0.25
      X(1,I)=(A*SIN(OMEGA*T)-A*SIN(OMEGA*(T-0.25)))*.125+(A*SIN(OMEGA
      1*(T-.25)))*.25
      X(2,I)=TINF
```

```
186 CONTINUE
DELT5=DELT*3600.0
NX=COMB/DELX+FCR1
DH=4 *AREA/PER
VEL=FLUXO/(OUTOS*AREA)
REY=VEL*DH*DENS/VISC
UC(2)=AP*0.023*REY**0.8
THETA1=UC(2)*DELTS
THETA2=UC(3)*CP-THETA1
TEMP1=UC(2)*ALARG*DELX/(FLUXO*CA)
TEMP2=TEMP1-1. *(ALARG*UC(1)*DELX/(FLUXO*CA))
SOMDT=0
8 NT=NTB
TEXP=NT*DELT
DO 2 J=1,NT
TEMP(1,J)=X(2,J)
TEMP3(J)=ALARG*UC(1)*DELX*X(2,J)/(FLUXO*CA)
THETA3(J)=X(1,J)*ALFA*TAL*DELTS
114 FORMAT(1X, 'THETA3(30)= ',G)
DO 3 I=1,NX
THETA(I,1)=U(4)
THETA(I,J+1)=(1/(CP+U(3)))*(THETA3(J)+THETA2+THETA(I,J)+
1*THETA1*TEMP(I,J))
TEMP(I+1,J)=TEMP1+THETA(I,J)-TEMP2*TEMP(I,J)+
1*TEMP3(J)
3 CONTINUE
C WRITE(5,118)TEMP(NX,J),X(2,J),J,NX,TEMP3(J),THETA3(J)
118 FORMAT(1X, 'TEMP(NX,J)= ',G,/,1X, 'X(2,J)= ',G,/,1X, 'J= ',12,/,
11X, 'NX= ',G,/,1X, 'TEMP3(J)= ',G,/,1X, 'THETA3(J)= ',G)
DT=TEMP(NX,J)-X(2,J)
C WRITE(5,117)DT
117 FORMAT(1X, 'DT= ',G)
SOMDT=SOMDT+DT
2 CONTINUE
C WRITE(5,114)THETA3(30)
114 DTBAR=SOMDT/FLOAT(NT)
WRITE(5,1114)DTBAR
1114 FORMAT(1X, 'DTBAR= ',G)
DIF=DTBAR-DT0
IF(ABS(DIF).LT.0.1)GO TO 5
IF(DIF)4,5,5
4 NX=NX+1
C WRITE(5,7)NX
7 FORMAT(1X, 'NX= ',G)
GO TO 8
C
C PARTE REFERENTE AO ARMAZENAMENTO
C
C WRITE(5,108)
108 FORMAT(1X, 'ARMAZENAMENTO')
C WRITE(5,109)NX
109 FORMAT(1X, 'NX= ',G)
5 SOMDTL=0
10 NT=NT+1
X(1,NT)=0
X(2,NT)=TINF
TEMP(1,NT)=X(2,NT)
TEMP3(NT)=ALARG*UC(1)*DELX*X(2,NT)/(FLUXO*CA)
THETA3(NT)=X(1,NT)*ALFA*TAL*DELTS
C WRITE(5,111)NT,X(1,NT),X(2,NT),TEMP(1,NT),TEMP3(NT),
111 1*THETA3(NT)
FORMAT(1X, 'NT= ',G,/,1X, 'X(1,NT)= ',G,/,1X, 'X(2,NT)= ',G,/,
11X, 'TEMP(1,NT)= ',G,/,1X, 'TEMP3(NT)= ',G,/,1X, 'THETA3(NT)= ',G)
DO 107 I=1,NX
C WRITE(5,113)THETA(I,30),I,THETA3(30),TEMP(1,30)
113 FORMAT(1X, 'THETA(I,30)= ',G,1X, 'I= ',12,1X, 'THETA3(30)= ',G
1,/,1X, 'TEMP(1,30)= ',G)
THETA(I,NT+1)=(1/(CP+U(3)))*(THETA3(NT)+THETA2+THETA(I,NT)+
1*THETA1*TEMP(I,NT))
C WRITE(5,112)THETA(I,NT),I,NT
112 FORMAT(1X, 'THETA(I,NT)= ',G,1X, 'I= ',12,1X, 'NT= ',12)
TEMP(I+1,NT)=TEMP1+THETA(I,NT)-TEMP2*TEMP(I,NT)+TEMP3(NT)
107 CONTINUE
C WRITE(5,110)TEMP(NX,NT)
110 FORMAT(1X, 'TSAIDA= ',G)
DTL=TEMP(NX,NT)-X(2,NT)
C WRITE(5,115)DTL
```

```
115  FORMAT(1X, 'DTL= ', G)
      SOMDTL=SOMDTL+DTL
      DIFL=DTL-0.2
      IF (ABS(DIFL).LT.0.01)GO TO 9
      IF (DIFL)9,9,10
9     SOMDTT=SOMDT+SOMDTL
      DTBAR=SOMDTT/FLOAT(NT)
C     WRITE(5,116)DTBAR
116  FORMAT(1X, 'NOVO DTBAR= ', G)
      DIFLL=DTBAR-DT0
      IF (ABS(DIFLL).LT.0.1)GO TO 11
      IF (DIFLL)4,11,11
11   TARM=FLOAT(NT)*DELT-TEXP
      ACOL=(FLOAT(NX)*DELX*ALARG)/60.
      WRITE(5,12)TARM,ACOL,NX,NT
12   FORMAT(1X, 'TEMPO DE ARMAZ. = ', G, '/', 1X, 'AREA= ', G
1, '/', 1X, 'NX= ', I3, '/', 1X, 'NT= ', I2)
      GO TO 806
333  CALL EXIT
      END
```