

# AVALIAÇÃO DE COLETOR ARMAZENADOR INFLÁVEL DE ENERGIA SOLAR PARA AQUECIMENTO DE AR\*

Roberto Sinício\*\*  
G. Roa\*\*\*

## RESUMO

*Construiu-se, para futura avaliação matemática, um coletor armazenador inflável de energia solar, através de balanços de energia.*

*Apresenta-se alguns resultados experimentais mostrando viabilidades econômicas e tecnológicas de sua construção.*

## SUMMARY

*An inflate storage-collector of solar energy has been developed for a future mathematical evaluation through balances of energy.*

*This paper presents some experimental data, showing technological and economical viability of its construction and utilization.*

## INTRODUÇÃO

Desde há muito tempo a maior parte dos grãos é seca na própria planta ou terreiro. Embora este processo cause grandes perdas devido à deterioração do produto, mostra-se economicamente viável, em virtude das condições climáticas médias serem satisfatórias.

A produção agrícola cresceu bastante nos últimos anos; no entanto, não se observa igual crescimento na infra-estrutura de secagem e armazenamento dos produtos na própria fazenda.

O uso de secador contínuo, para grande quantidade de produtos, tem sido usado como, por exemplo, nos entre-postos graneleiros, apesar de possuir baixa eficiência na secagem e rendimento na queima do óleo combustível.

Devido às possibilidades de esgotamento dos combustíveis derivados de petróleo, tem-se intensificado, nos últimos anos, as pesquisas de aproveitamento da energia solar.

Estudos experimentais e teóricos mostram que uma das aplicações da energia solar mais viáveis a curto prazo seria no aquecimento do ar para secagem de diversos produtos biológicos, especialmente no caso de grãos, devido ao enorme volume produzido no Brasil.

O uso de coletor solar, numa tentativa de minimizar tais problemas, apresenta inúmeras vantagens, como: a) Simplicidade de construção e baixo custo; b) Pequenas quantidades de aumento de energia requeridos; c) Consumo mínimo de energia; e d) Uniformidade de aquecimento dispensável.

(\*) Contribuição do Departamento de Engenharia Agrícola, FEA, da Universidade Estadual de Campinas, UNICAMP, Campinas - SP.

(\*\*) Eng<sup>o</sup> de Alimentos, Professor do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas, UNICAMP, Campinas - SP.

(\*\*\*) Chefe de Pesquisas do Centro Nacional de Treinamento em Armazenagem, CEN TREINAR - Campus Universidade Federal de Viçosa - Viçosa - MG.

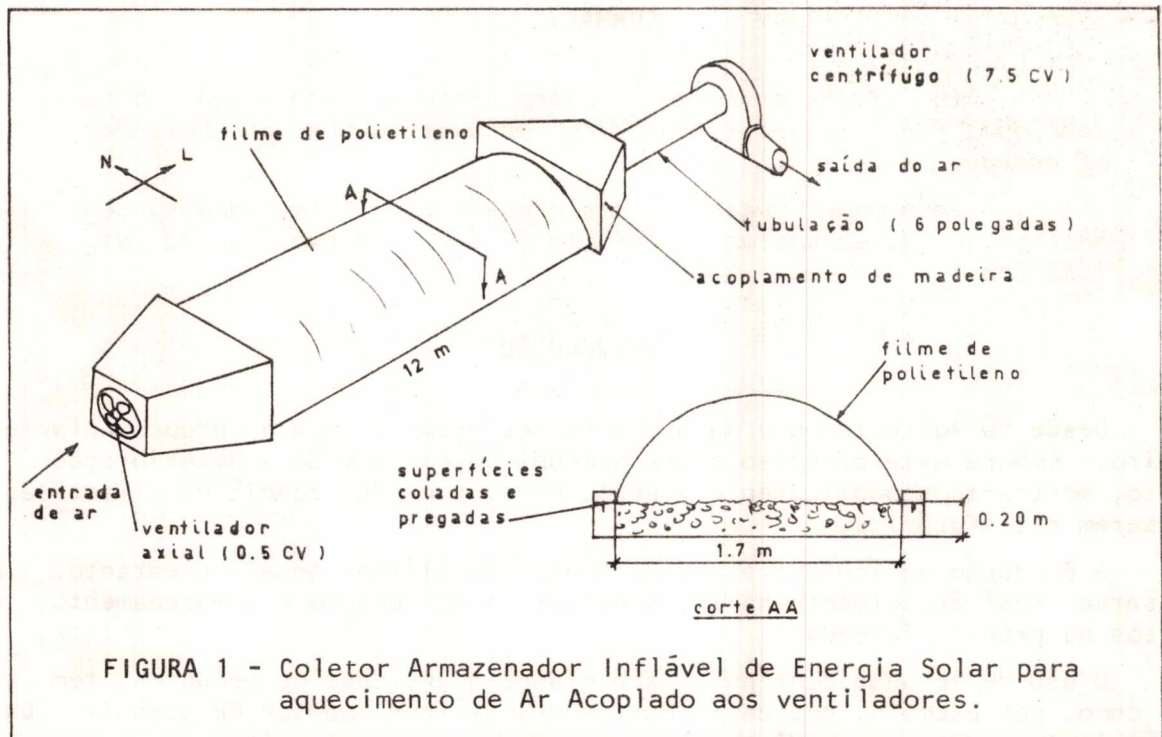
O presente trabalho objetiva:

- Apresentar, preliminarmente, um coletor armazenador inflável de energia solar.
- Apresentar modelamento matemático para posterior avaliação do coletor.

## MATERIAIS E MÉTODOS

### A. EXPERIMENTO

O coletor armazenador inflável, mostrado na Figura 1, possui comprimento de 12.0m por 1.7m de largura ( $20m^2$ ).



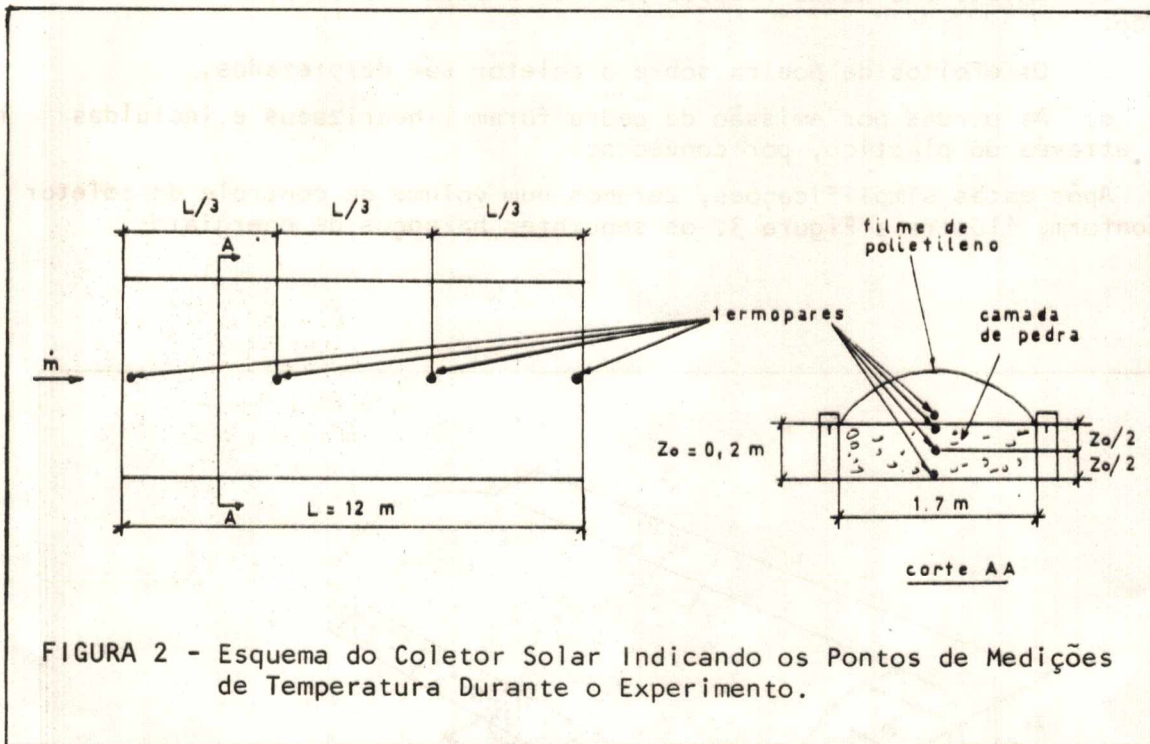
Para sua construção, fez-se um leito na terra, orientado na direção leste-oeste, de aproximadamente 20 cm de profundidade.

Fixou-se caibros de madeira nas laterais do leito e se colocou, no mesmo uma camada de pedra britada nº 2, de 20 cm de altura. A superfície exposta das pedras foi pintada de preto fosco para, assim, conseguir maior absorvibilidade da radiação solar. Pregou-se nos caibros, juntamente com cola, um filme de polietileno de 2m de largura, que cobria todo o leito de pedra.

Foram acoplados dois ventiladores no coletor por meio de dutos de madeira. Um ventilador axial de 0,5 CV na entrada de ar do coletor, e o outro, um ventilador centrífugo de 7,5 CV na saída de ar do coletor. O diâmetro da tubulação utilizada é de 6 polegadas.

Para medições de temperatura ambiente e no coletor, utilizou-se um medidor registrador "Speedomax W" que fornecia as temperaturas em quatro seções do coletor ( $X = 0$ ,  $X = L/3$ ,  $X = 2/3L$  e  $X = L$ ) para a temperatura do ar e também nas mesmas seções, as temperaturas da camada de pedras em diferentes alturas ( $Z = 0$

$Z = Z_0/2$  e  $Z = Z_0$ ), conforme vemos na Figura 2.



Foi instalada na tubulação uma válvula borboleta, entre o ventilador centrífugo e o acoplamento do coletor, que permitia variar a vazão até o máximo de  $46.2\text{m}^3/\text{min}$ .

Na mesma tubulação foi colocado um orifício previamente calibrado, mediante leituras de pressão de velocidade, através de um tubo de pitot colocado em diferentes posições para diferentes fluxos de ar. Assim, com o uso de uma coluna de água em "U" e da curva característica do ventilador, podia-se medir o fluxo de ar durante o experimento. Os dados de radiação solar foram obtidos de estação meteorológica local. A velocidade do vento foi medida durante os experimentos com um aerômetro de pás.

A construção do coletor foi um trabalho simples, não necessitando de mão-de-obra especializada. Os materiais utilizados são de baixo custo e facilmente encontrados em uma fazenda.

O custo atual desse coletor solar está em torno de  $\text{CR}\$500,00/\text{m}^2$  inclusive com o ventilador axial, enquanto que um coletor metálico custa  $\text{CR}\$2.500,00/\text{m}^2$ .

O coletor inflável apresenta uma grande vantagem, que é a economia de espaço, pois pode ser desmontado facilmente no término da safra.

## B. ANÁLISE MATEMÁTICA

A análise matemática do coletor tem, como objetivo, a obtenção de equações que nos possibilitem prever o comportamento do coletor solar (aumento de temperatura em qualquer posição, armazenamento de energia e eficiência térmica) para qualquer conjunto de variáveis independentes, como radiação solar, temperatura ambiente e vazão de ar.

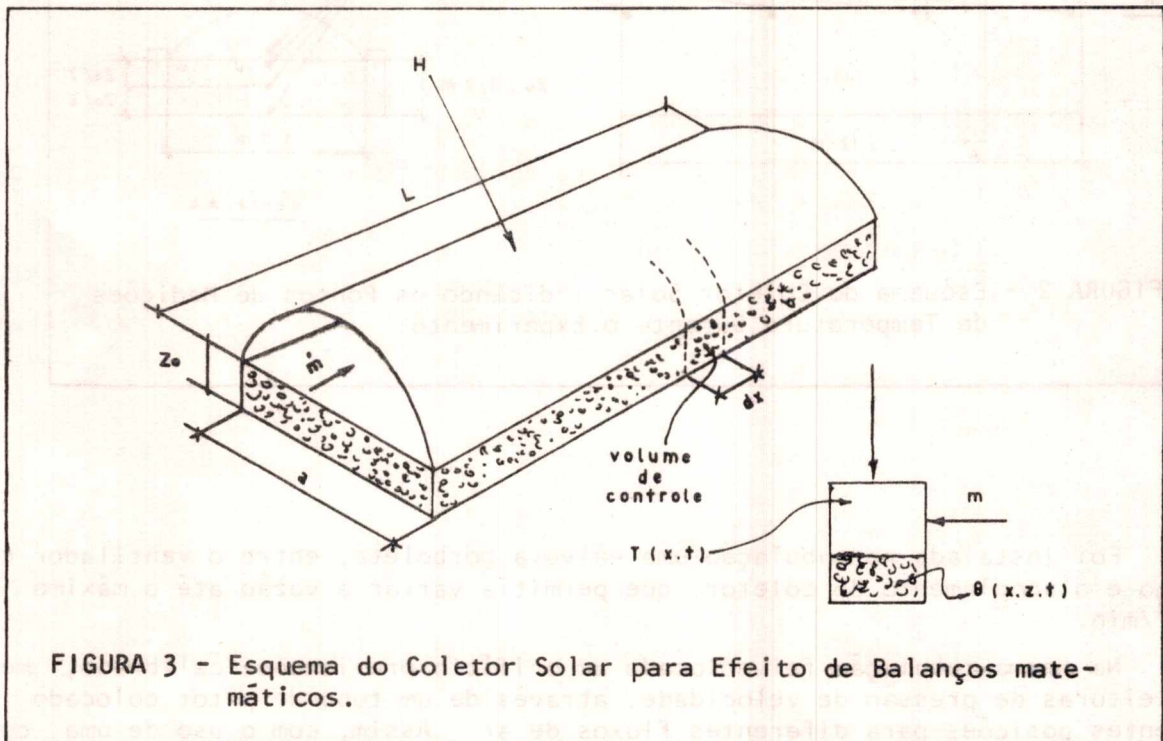
Para a construção do modelo matemático, conforme resultados obtidos com

sucesso por SANTOS et alii (1978), podemos fazer algumas simplificações sem que seja alterada a situação real.

Estas simplificações são:

- O fenômeno ocorre em regime permanente
- Existe uma queda desprezível de temperatura através da cobertura de plástico.
- Os efeitos de poeira sobre o coletor são desprezados.
- As perdas por emissão da pedra foram linearizadas e incluídas nas perdas através do plástico, por convecção.

Após estas simplificações, teremos num volume de controle do coletor so lar, conforme ilustra a Figura 3, os seguintes balanços de energia.



Energia absorvida pelas pedras = Energia cedida aos blocos por condução + Energia cedida ao ar por convecção.

MATEMATICAMENTE, TEREMOS:

$$H\alpha\zeta(adx) = -K(adx) \frac{\partial\theta}{\partial z}(x,0,t) + U_2(adx) \{\theta(x,0,t) - T(x,t)\} \quad (1)$$

onde:

H = Radiação solar incidente no plano coletor, watt/m<sup>2</sup>

$\alpha$  = Absortividade da pedra, adimensional

$\zeta$  = Transmissividade do plástico, adimensional

a = Largura do coletor solar, metros

dx = Elemento infinitesimal de comprimento do coletor, metros

K = Condutividade térmica aparente do conjunto pedra e ar intersticial

watt/m<sup>0</sup>C

$\Theta(x.z.t)$  = Temperatura da pedra como função da posição e do tempo, °C

$T(x,t)$  = Temperatura do ar como função do comprimento e do tempo, °C

Energia cedida ao ar por convecção = Aumento da energia interna do ar + Perdas por convecção para o ambiente, através do plástico.

MATEMATICAMENTE, TEREMOS:

$$U_2(adx) \{ \Theta(x.o.t) - T(x,t) \} = mCar \frac{\partial T}{\partial X}(x,t) dx + (adx) U_1 T(x,t) - T^\infty \quad (2)$$

onde:

$U_2$  = Coeficiente global de transmissão de calor entre pedra e ar, watt/m<sup>2</sup> °C.

$m$  = Fluxo máximo de ar, Kg/s

$Car$  = Calor específico do ar, J/Kg °C.

$U_1$  = Coeficiente global de transmissão do calor entre o plástico e o ambiente, Watt/m<sup>2</sup> °C.

$T^\infty$  = Temperatura ambiente, °C.

A difusão de energia através da camada de pedra, KREITH (1969) é dada por:

$$\frac{\partial \Theta}{\partial t}(x,z,t) = \frac{D}{\partial z^2} \frac{\partial^2 \Theta}{\partial z^2}(x.z.t) \quad (3)$$

$$\frac{\partial \Theta}{\partial t}(x.z_0.t) = 0 \quad (4)$$

$$\Theta(x.z.0) = \Theta_0 \quad (5)$$

$$T(o.t) = T^\infty \quad (6)$$

onde:

$D$  = Difusividade térmica aparente do conjunto pedra e ar intersticial, m<sup>2</sup>/h.

$\Theta_0$  = Temperatura da pedra em qualquer posição do coletor solar, no instante  $t = 0$ , °C.

Algumas aproximações foram efetuadas nas equações acima, CARNAHAN et ali (1969).

$$\frac{\partial \Theta}{\partial z}(x.o.t) = \frac{\Theta(x,\Delta z.t) - \Theta(x.o.t)}{\Delta z} \quad (7)$$

$$\frac{\partial T}{\partial x}(x.t) = \frac{T(x+\Delta x,t) - T(x.t)}{\Delta x} \quad (8)$$

$$\frac{\partial \Theta}{\partial z}(x,z_0.t) = \frac{\Theta(x,z_0 - \Delta z.t) - \Theta(x,z_0.t)}{\Delta z} \quad (9)$$

$$\frac{\partial \Theta}{\partial t}(x.z.t) = \frac{\Theta(x.z.t + \Delta t) - \Theta(x.z.t)}{\Delta t} \quad (10)$$

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} (x, z, t) = \frac{\theta(x, z - \Delta z, t) - 2\theta(x, z, t) + \theta(x, z + \Delta z, t)}{(\Delta z)^2} \quad (11)$$

Substituindo as equações (7), (8), (9), (10) e (11) nas equações (1) a (6), obteremos três equações que nos fornecem a temperatura da pedra e do ar, como função de parâmetros conhecidos. As equações resultantes são:

$$\theta(x, 0, t) = C_1 + C_2 \theta(x, \Delta z, t) + C_3 (I) T(x, t) \quad (12)$$

onde:

$$C_1 = \frac{K}{K + U_2 \Delta z}$$

$$C_2 = \frac{U_2 \Delta z}{K + U_2 \Delta z}$$

$$C_3 = \frac{H \alpha \zeta \Delta z}{K + U_2 \Delta z}$$

O parâmetro (I) constitui apenas um índice da constante  $C_3(I)$  pois, dependendo do valor da radiação incidente (H), a constante  $C_3(I)$  assume um valor diferente.

A segunda equação obtida é dada por:

$$T(x + \Delta x, t) = B_5 \theta(x, 0, t) + B_4 T(x, t) + B_6 (I) \quad (13)$$

onde:

$$B_4 = \frac{m C_{ar} - a U_2 \Delta x - a U_1 \Delta x}{m C_{ar}}$$

$$B_5 = \frac{a U_2 \Delta x}{m C_{ar}}$$

$$B_6 (I) = \frac{a U_1 \Delta x T^\infty}{m C_{ar}}$$

O parâmetro (I), como foi dito anteriormente, constitui apenas um índice da constante  $B_6(I)$ , pois esta é função da temperatura ambiente ( $T^\infty$ ).

A terceira equação é dada por:

$$\theta(x, z, t + \Delta t) = \theta(x, z, t) \left[ 1 - 2B_t \right] + B_7 \left[ \theta(x, z - \Delta z, t) - \theta(x, z + \Delta z, t) \right] \quad (14)$$

onde:

$$B_7 = \frac{D \cdot t}{(\Delta z)^2}$$

Uma vez obtidas as equações (12) a (14) numa forma apropriada à programação, desenvolveu-se um algoritmo para o cálculo da Temperatura do ar e da pedra em qualquer posição do coletor e em qualquer instante t. Este algoritmo foi programado em FORTRAN IV, Mc CRAKEN et al. (1966), para ser executado num computador PDP-10/ da UNICAMP.

## RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Variando a razão de ar no coletor, realizamos cinco experiências, em dias consecutivos.

Nos Quadros 1 e 2 estão apresentados os resultados de dois experimentos fornecendo as temperaturas ambientes e na saída do coletor e radiação solar, no tempo.

Nas Figuras 4 e 5 mostram-se as curvas de radiação solar, temperatura ambiente e temperatura do ar na saída do coletor, para os mesmos experimentos.

No cálculo da eficiência do coletor (definida como sendo o aumento de entalpia do ar dividido pela radiação incidente no plano do coletor solar) encontramos 68,5% e 54,5%. Os acréscimos médios da temperatura do ar foram  $9,2^{\circ}\text{C}$  e  $9,5^{\circ}\text{C}$  acima da temperatura ambiente para vazões de ar  $45,5$  e  $35,0\text{m}^3/\text{min}$ , respectivamente.

Observa-se, na Figura 4, dada a descontinuidade das curvas de radiação solar, a atuação do leito de pedras no armazenamento de energia, atenuando os picos de temperatura.

QUADRO 1 - Resultados de radiação solar, temperatura ambiente e temperatura na saída do coletor durante o primeiro experimento.

TEMPO (hs)	RADIAÇÃO ( $\text{Kcal}/\text{m}^2$ )	TEMPERATURA AMBIENTE AMBIENTE ( $^{\circ}\text{C}$ )	TEMPERATURA NA SAÍDA DO COLETOR ( $^{\circ}\text{C}$ )
0.5	330	20.8	26.0
1.0	420	21.1	27.3
1.5	260	21.9	30.4
2.0	500	21.4	29.9
2.5	350	22.1	32.5
3.0	310	21.8	32.3
3.5	160	22.9	33.9
4.0	250	23.4	34.4
4.5	210	22.9	32.2
MÉDIA		22.0	31.2

Fluxo =  $45,5\text{ m}^3/\text{min}$

Eficiência = 68.0%

Acréscimo médio na temperatura do ar =  $9,2^{\circ}\text{C}$

DIA: 10.07.79

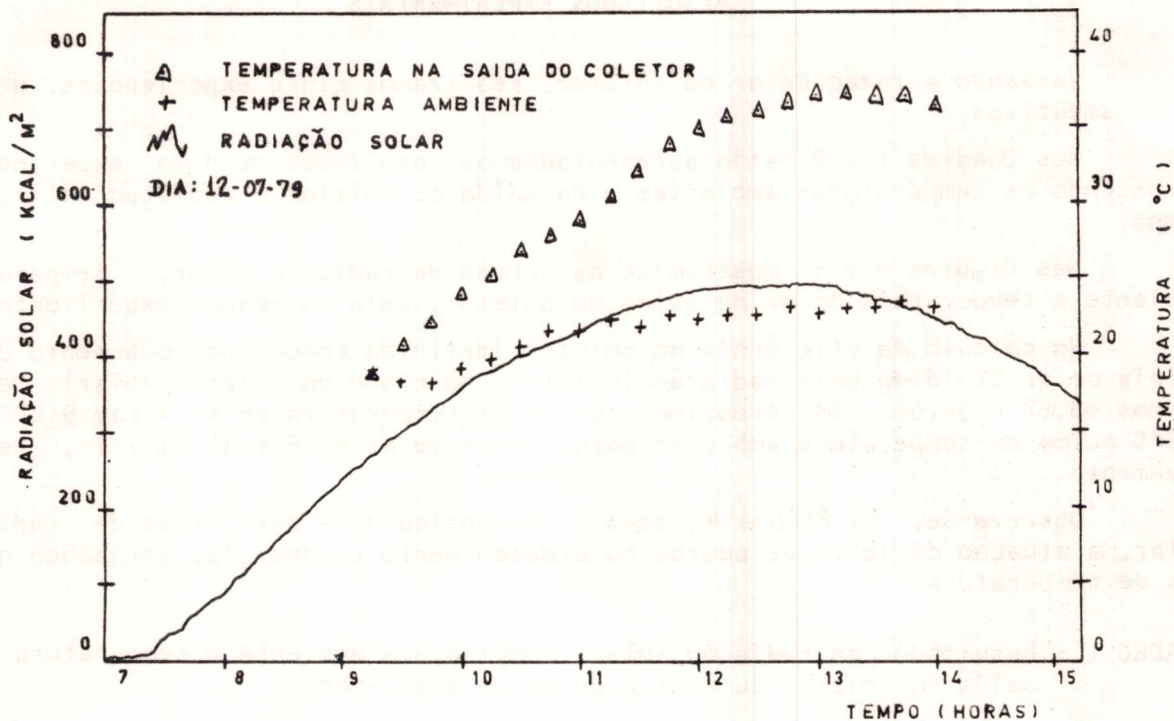


FIGURA 4 - Curva de radiação incidente, temperatura ambiente, temperatura do ar na saída do coletor versus tempo para o primeiro experimento com o coletor solar.

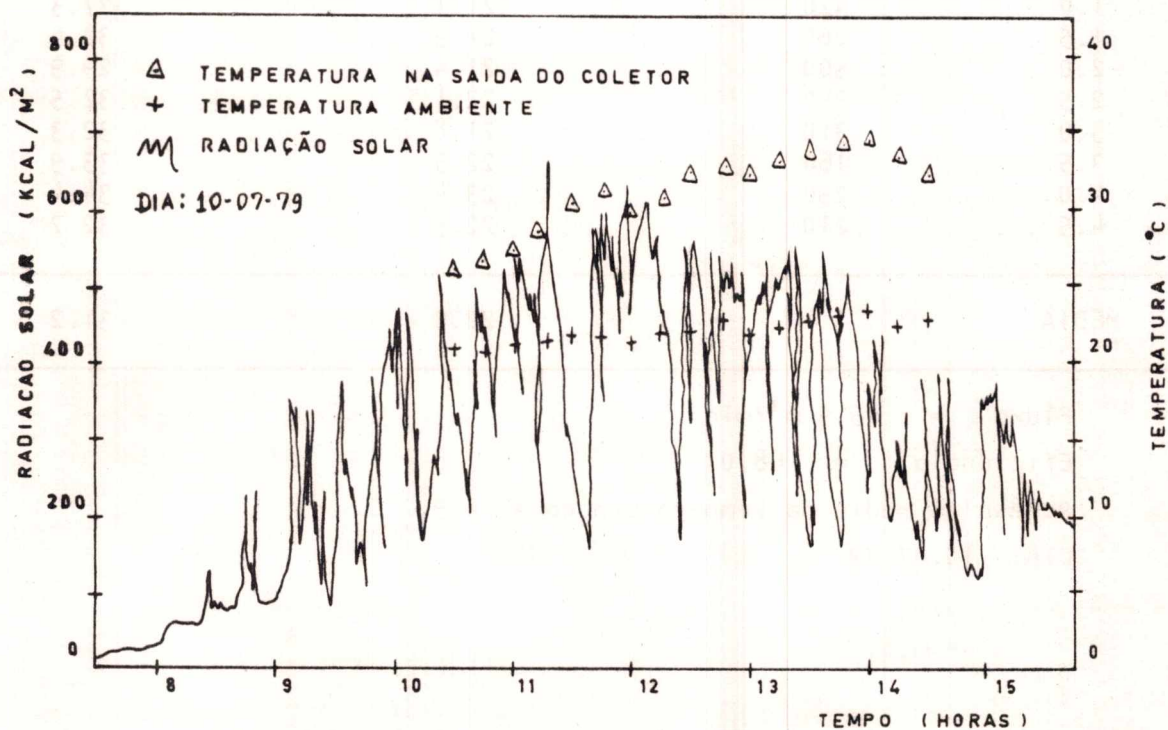


FIGURA 5 - Curva de radiação incidente, temperatura ambiente, temperatura do ar na saída do coletor versus tempo para o segundo experimento com o coletor solar.



QUADRO 2 - Resultados de radiação solar, temperatura ambiente e temperatura na saída do coletor durante o segundo experimento.

TEMPO (hs)	RADIAÇÃO (Kcal/m <sup>2</sup> )	TEMPERATURA AMBIENTE (°C)	TEMPERATURA NA SAÍDA DO COLETOR (°C)
0.5	300	18.1	20.9
1.0	360	19.1	23.9
1.5	400	20.6	26.8
2.0	432	21.6	29.1
2.5	465	21.9	32.0
3.0	475	22.4	35.0
3.5	490	22.6	36.2
4.0	490	22.9	37.1
4.5	471	23.1	37.1
5.0	450	23.1	36.3
MÉDIA		21.7	31.2

Fluxo = 35.0 m<sup>3</sup>/min.

Eficiência = 54.5%

Acréscimo médio na temperatura do ar = 9.5

DIA: 12.07.79

#### CONCLUSÕES

- Construiu-se um coletor armazenador inflável de energia solar, de custo reduzido, com materiais facilmente disponíveis numa fazenda (pedra, madeira e plástico).

- Faremos a avaliação matemática do coletor solar para que o modelo simule a temperatura do ar na saída do coletor, mostrando, com isto, ser possível sua utilização para simulação de novos coletores em regiões diferentes daquela onde foi realizado o experimento.

- A massa de pedras atua como armazenador de energia e propicia a diminuição dos picos de temperaturas, fator este importante na secagem de produtos biológicos, pois evita, deste modo, o ressecamento do produto, causado geralmente por coletores metálicos.

- O coletor pode ser empregado na secagem de diversos produtos agropecuários, e tem a vantagem de se poder desmontá-lo no término de sua utilização, desocupando área para outros fins.

#### LITERATURA CITADA

CARNAHAN, B., LUTHER H. A., WILKES J.O. *Applied Numerical Methods*. John Willey & Sons, Inc. 1969.

KREITH, F. *Principles of Heat Transfer*, 2nd Edition. International Textbook Company. 1969.

Mc CRAKEN D. and DORN W. *Numerical Methods and FORTRAN Programming*. A Willey International Edition. Londres 1966.

SANTOS, LUIZ A; ROA, GONZALO E VILLA, LUIZ GABRIEL *Avaliação de um coletor armazenador de energia solar empregado para aquecimento de ar na secagem de soja em silos*. Trabalho apresentado no III Seminário Nacional de Armazenagem, Curitiba - PR. 1978.