

REDUÇÃO DA INÉRCIA TÉRMICA COMO MECANISMO DE AUMENTO DA TAXA DE EVAPORAÇÃO DA ÁGUA EM BANDEJAS ABERTAS

Emerson Freitas Jaguaribe

DTM/CT Campus I da UFPB – 58059 900 João Pessoa – PB -Brasil
ejaguaribe@uol.com.br

Marcos A. R. Andrade

DTM/CT Campus I da UFPB – 58059 900 João Pessoa – PB -Brasil
maraufpb@globocom.com

Fábio B. Ferraz

DTM/CT Campus I da UFPB – 58059 900 João Pessoa – PB -Brasil

Resumo. *O presente trabalho discute o uso de meios porosos como agentes redutores da inércia térmica da massa de água a ser evaporada. Para tanto vários experimentos com bandejas abertas contendo ora água, ora água com meio poroso, todas sujeitas a uma radiação constante, foram realizados. Os resultados teóricos foram obtidos a partir de uma equação semi-empírica. Foi observada uma boa aproximação entre os dados teóricos e os experimentais, para os casos de bandejas apenas com água, que resultaram em coeficientes de correlações da ordem de 0,999. Com relação às bandejas contendo meios porosos, os resultados teóricos e experimentais apresentaram maior dispersão. Mesmo assim, o coeficiente de correlação ficou acima de 0,99. Verificou-se que no caso do emprego de meios porosos o coeficiente da equação utilizada deve ser uma função, entre outras, da absorvidade do meio poroso e da redução da inércia térmica provocada por estes meios.*

Palavras chave: meios porosos, inércia térmica, efeito capilar, evaporação

1. Introdução

A evaporação faz parte de muitos processos da atividade humana. Algumas secagens industriais de minérios, como a bauxita, de produtos cerâmicos, como telhas, tijolos, na industrialização de alimentos como açúcar, macarrão, ou em operações industriais ou domésticas, ora realizadas em grandes máquinas de secar roupas, ora em varais, são exemplos do uso deste fenômeno. De uma forma geral, nas situações apresentadas acima, o interesse maior é a busca do aumento da taxa de evaporação. Em outras, como na conservação da água de piscinas ou de reservatórios que abastecem cidades, o que se pretende é a redução, ao máximo desta taxa (cf. Jamal et al., 1990; Hahne et al., 1994 e Charles et al., 1994). Uma outra circunstância onde se deve estimular a elevação da taxa de evaporação é na destilação solar. Muitos mecanismos têm sido empregados para tanto, tais como o uso de destiladores de múltiplo efeito, onde o calor liberado na condensação é aproveitado em outro estágio de evaporação, uso de concentradores solares, como o espelho parabólico, efeito pavio, etc., que podem ser observados na literatura especializada a exemplo de (Headley, 1973; Safwat et al., 1977; Sodha et al., 1981; Dunkle, 1961; Lobo and Araújo, 1977; Adhikari et al., 1995; and Sartori and Jaguaribe, 1984). Uma outra forma de aumentar a evaporação em superfícies livres de água, é através do emprego de meios porosos. Jaguaribe (1973), utilizando bandejas abertas contendo blocos de carvões vegetais constatou que a evaporação da água se processava de maneira mais rápida, quando comparou os resultados com aqueles oriundos de outras bandejas abertas, similarmente expostas à radiação solar, mas sem a presença dos meios porosos. Mais tarde, Chendo et al. (1991), fazendo uso de blocos de carvões e de outros meios porosos, igualmente constataram esta influência. Jaguaribe et al. (1995), verificaram que é a redução da pressão de vapor na altura do menisco do capilar seria uma das razões para o efeito reportado por (Jaguaribe, 1973 e Chendo et al., 1991). Todavia, como descreve indiretamente Hatsopoulos (1965), para que esta contribuição seja significativa é necessário que exista uma densa formação de vapor, o que não é, em geral, o caso em destiladores solares convencionais. Este trabalho, através do emprego de bandejas contendo água e meios poros, investiga, com base no equacionamento de cubas padrões, a

contribuição destes meios na elevação da taxa da evaporação da água, quantificando os resultados e explicando que outro componente associado ao meio poroso vem a ser mais significativo no aumento desta taxa.

2. O experimento

2.1 O aparato experimental

A montagem experimental, como mostra a Fig. (1), constou de uma fonte luminosa, composta por cinco lâmpadas incandescentes de 60 W, que produziam uma radiação constante e bem distribuída. A intensidade da radiação foi avaliada com um piranômetro de precisão Eppley em uma região de um plano de trabalho fixo, distante 0,15 m da parte inferior da lâmpada. O valor médio dessa radiação ficou em torno de 477 W/m². A radiação insidia diretamente sobre uma bandeja com 0,270 m de comprimento, 0,160 m de largura e 0,055 m de profundidade, que se encontrava sobre uma balança, a qual serviu para registrar a quantidade de massa evaporada, ao longo do tempo.

Nos vários experimentos, todas as bandejas utilizadas continham 0,5 L de água e por vezes adicionava-se um meio poroso que, aflorando a superfície livre da água garantia, pela capilaridade, que toda a superfície livre desse meio permanecesse umedecida. Como meios porosos, foram utilizados: blocos de carvão vegetal, tecido negro e algodão sintético (fibra siliconizada). O tecido negro foi montado em uma estrutura em forma de paralelepípedo, de maneira a deixá-lo tencionado, além de permitir seu enchimento com um outro material, como foi o caso do algodão sintético. Esta estrutura metálica tinha as dimensões de 0,260 m de comprimento, 0,150 m de largura e 0,045 m de altura, e ocupava, praticamente, toda a área da bandeja.

A bandeja, em todos os experimentos, bem como, a superfície dos meios porosos, foram instrumentadas com termopares tipo "T", ou seja, cobre-constantan. Nas que dispunham de meios porosos lançou-se mão de cinco termopares: um na lateral esquerda, outro na direita, um no fundo e dois outros instalados em pontos da superfície dos meios porosos, ver Fig. (1). Todos os termopares receberam uma blindagem contra a radiação direta, com uma camada de tinta branca, e apoiavam-se, com uma leve pressão às superfícies, graças à resistência à deformação dos seus fios, que haviam sido previamente fixados com uma fita adesiva às paredes externas da bandeja. Nos experimentos apenas com água, foram empregados cinco termopares: um no fundo e um em cada lateral interna da bandeja.

Os termopares foram conectados a um Datalogger, que registrava e armazenava as temperaturas a minuto a minuto, durante as quatro horas de cada ensaio. Temperaturas de bulbo seco e de bulbo úmido do ambiente, também foram registradas e posteriormente tratadas por um computador. A massa total de água na bandeja foi anotada no início e a cada trinta minutos, durante as quatro horas de observação.

A velocidade do ar circulando sobre as bandejas foi medida usando-se um anemômetro de termopar.

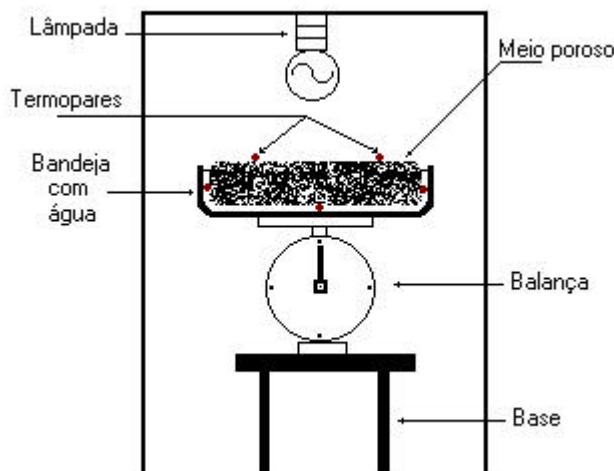


Figura 1. Esquema do aparato experimental contendo o meio poroso.

3. Modelo semi-empírico

As expressões necessárias a simular os experimentos tiveram origem nas equações empregadas para se avaliar a evaporação da água na "cuba padrão", com uma atmosfera convectivamente estável, que foi correlacionada experimentalmente, Holmam (1983), na forma,

$$E_{cs} = (3,21 + 0,0221 \bar{u}) \cdot (p_s - p_{ag})^{0,88} \quad (1)$$

onde:

E_{cs} , evaporação na cuba de superfície, mm/dia;

\bar{u} , movimento diário do vento medido a 150 mm da borda da cuba, km/dia;

p_s , pressão de saturação do vapor a temperatura de bulbo seco do ar, 1,5 m acima da superfície do solo, kN/m²;

p_{ag} , pressão de vapor do ar à temperatura e condições de umidade a 1,5 m acima da superfície do solo, kN/m^2 .

A partir da Eq. (1), e levando-se em conta as expressões clássicas de destiladores solares (cf. Duffie et al., 1980 e Kreith et al., 1978), que tomam por base as pressões parciais do vapor e da água, montou-se à correlação abaixo,

$$E_{cs} = 0,7 \cdot (3,21 + 0,0221 \cdot u) \cdot [p_{sa}(T_a) - p_{bs}(T_{bs})]^{0,88} \quad (2)$$

onde:

E_{cs} , evaporação na bandeja, mm/dia;

u , velocidade diária do vento, km/dia;

$p_{sa}(T_a)$, pressão de saturação do vapor à temperatura da água, kN/m^2 ;

$p_{bs}(T_{bs})$, pressão de saturação do vapor à temperatura de bulbo seco, kN/m^2 ;

T_a , temperatura da água, °C;

T_{bs} , temperatura de bulbo seco, °C;

0,7, coeficiente de cuba (fator utilizado para que as medidas efetuadas através da cuba sejam válidas para uma superfície natural)

A taxa de evaporação de água por unidade de área, no período de um dia, é

$$\frac{\dot{m}_{ag}}{A} = \frac{E_{cs}}{1000} \cdot r_{ag} \quad (3)$$

onde,

\dot{m}_{ag} , é taxa de evaporação de água, kg / dia;

A , área da cuba, m^2 ;

r_{ag} , densidade da água, kg / m^3 .

A Eq. (3), em geral, é utilizada considerando-se o período de todo um dia. Neste trabalho ela foi adaptada de forma a ser empregada em um intervalo de tempo qualquer $[0,t]$, gerando a Eq. (4) abaixo,

$$m_e'' = E_{cs} \cdot \frac{t}{1440} \quad (4)$$

sendo:

m_e'' , quantidade de massa evaporada por unidade de área, kg/m^2 ;

t , tempo, min.

Uma vez que a massa total evaporada em um intervalo de tempo de 0 a t , avaliada através da Eq. (4) é uma função da temperatura no tempo t , o seu valor estimado em um determinado momento poderá ser menor do que aquele calculado instantes atrás. Desta forma, alterou-se, a Eq. (3), de maneira a se calcular massas em unidades idênticas de intervalo de tempo, 1 minuto, por exemplo, sendo a massa total a soma das massas calculadas em cada intervalo de tempo, dando lugar a Eq. (5) abaixo,

$$m_e'' = \sum_{i=0}^n \frac{E_{csi}}{1440} \cdot \Delta t \quad (5)$$

sendo: E_{csi} , a evaporação na bandeja a cada instante i , em mm / dia; $\Delta t = 1$ min, o intervalo de tempo de cada medição, e n , um valor limite do intervalo total, em minutos; no caso estudado, o período total do experimento foi de 240 min (4 horas).

Analisando-se, por outro lado, as Eqs. (1) e (2) fica evidente que, em princípio, a existência de meios porosos nas bandejas poderá ser evidenciada pelos valores das temperaturas registradas. Assim, se o meio poroso é de cor negra deverá permitir taxas de evaporações mais elevadas do que as resultantes de bandejas apenas com água. Além do mais, entende-se que a presença de meios porosos deve diminuir a inércia térmica da água, uma vez que a evaporação será realizada em volumes de água muito menores - dada a formação de filmes na superfície dos meios - do que os existentes nas bandejas sem meios porosos. Outra razão da influência do meio poroso no aumento da evaporação reside no fato de

que a água retida nos poros está de certa forma isolada termicamente, ao tempo em que se diminui processos convectivos, garantindo-se assim, uma maior conservação da energia retida na água.

4. Resultados experimentais

As Figs. (2) a (5) foram construídas a partir de dados experimentais de evaporação em função do tempo, bem como de resultados teóricos calculados pela Eqs. (2) e (4), considerando dois procedimentos. No primeiro (proced. 1), a Eq. (2) é calculada em função das condições instantâneas dadas pelas pressões $p_a(T_s)$ e $p_b(T_{bs})$, no tempo t , e obtendo-se a massa evaporada, através da Eq. (4), acumulada no período 0 a t . No segundo procedimento (proced. 2), a massa evaporada é calculada a cada minuto, fazendo-se uso, na Eq. (2), dos valores de T_a e T_{bs} instantâneos, e substituindo o coeficiente 0,7, coeficiente de cuba, por 0,84, que demonstrou ser a constante, que, de uma forma geral, melhor aproxima as curvas teóricas às experimentais, neste caso. Em seguida os valores de E_{cs} , são aplicados na Eq. (5). A adição dos valores das massas evaporadas minuto a minuto, assim determinadas durante o intervalo $[0,t]$, permite o cálculo da massa total evaporada.

Na Fig. (6) são apresentados os registros temporais de temperaturas avaliados na superfície livre da água, bem como na superfície dos meios porosos dispostos nas bandejas com água, todos sob o efeito da radiação constante da fonte luminosa acima mencionada. Já na Fig. (7) aparecem as distribuições temporais de temperaturas obtidas nas superfícies dos meios porosos nas bandejas submetidas à mesma radiação, sem a presença de água.

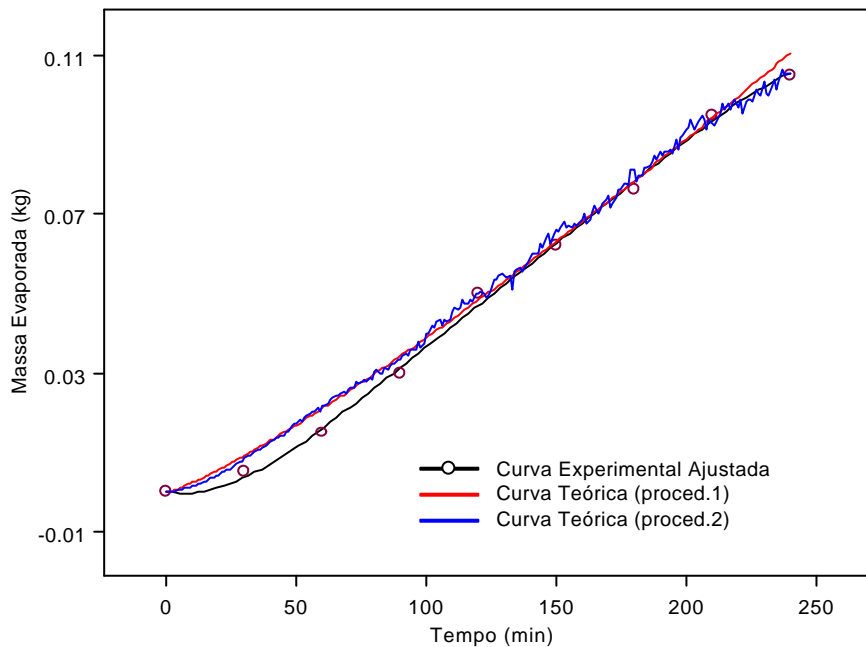


Figura 2. Massas acumuladas de água evaporada, calculadas teoricamente, pelos procedimentos 1 e 2, acima descritos, e correlacionadas com valores experimentais, ao longo de 4 horas, em bandejas contendo apenas água.

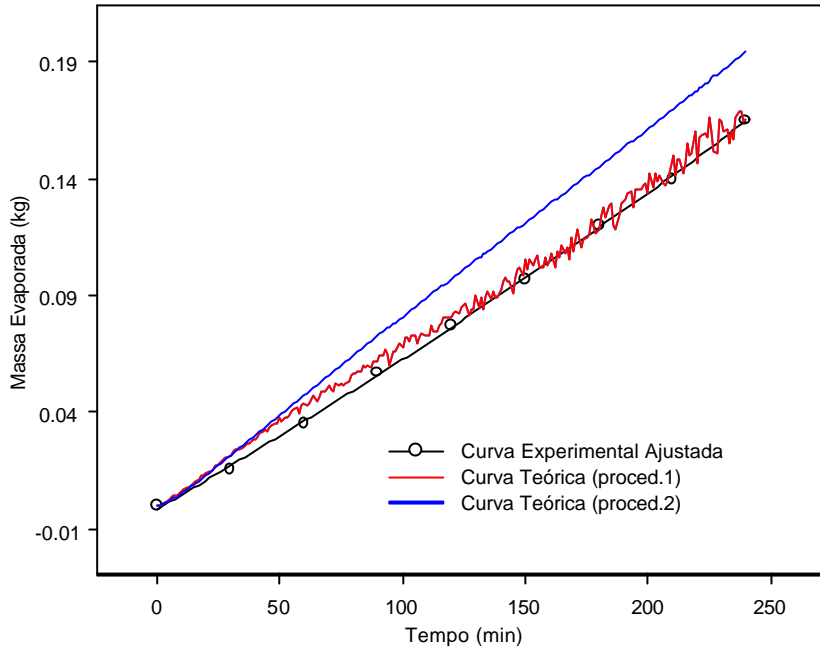


Figura 3. Massa de água evaporada em bandejas tendo como meio poroso, o tecido negro preenchido com algodão sintético, calculada teoricamente (procedimentos 1 e 2), e correlacionada com valores experimentais correspondentes.

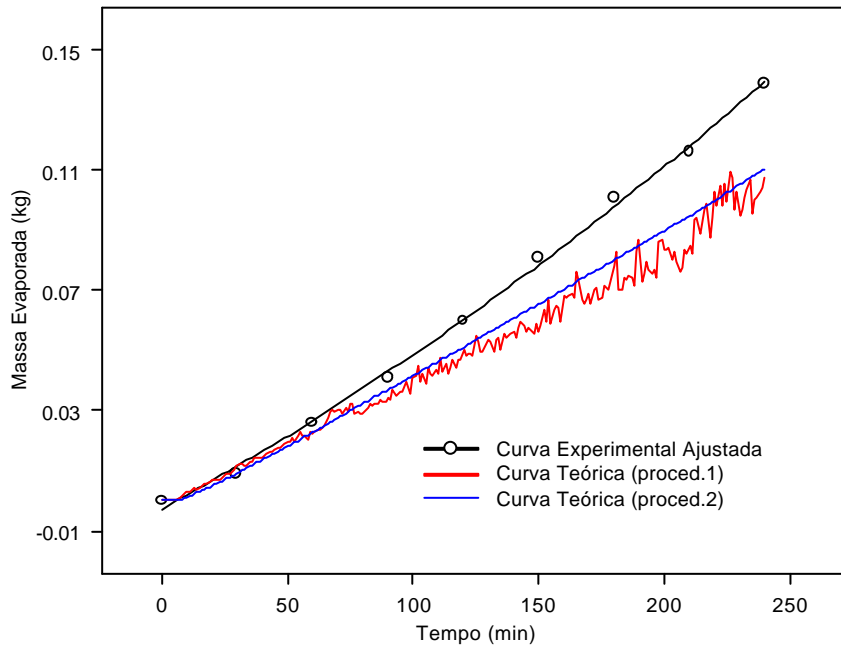


Figura 4. Massa de água evaporada em bandejas tendo como meio poroso, o tecido negro, calculada teoricamente (procedimentos 1 e 2), e correlacionada com valores experimentais correspondentes.

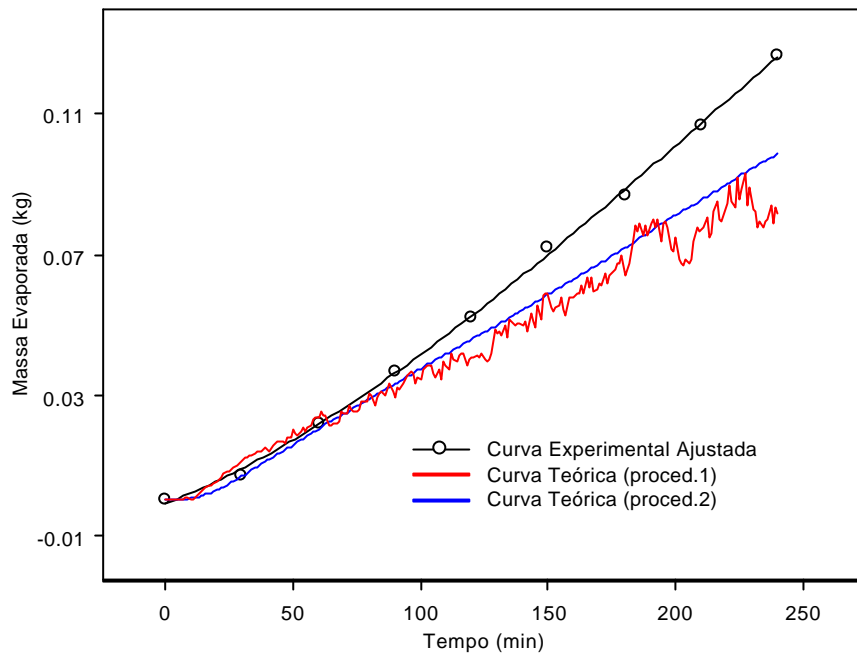


Figura 5. Massas acumuladas de água evaporada, calculadas teoricamente, procedimentos 1 e 2, e correlacionadas com valores experimentais, ao longo de 4 horas, em bandejas tendo como meio poroso o carvão vegetal.

A Fig. (6) apresenta a distribuição temporal de temperaturas medidas na superfície superior dos meios porosos, em bandejas contendo água, diretamente exposta à radiação constante, bem como na superfície livre da água. Por outro lado, a Fig. (7) dispõe distribuições de temperatura, em função do tempo, nas superfícies dos diversos meios porosos, submetidas às mesmas condições de radiação, em bandejas sem água.

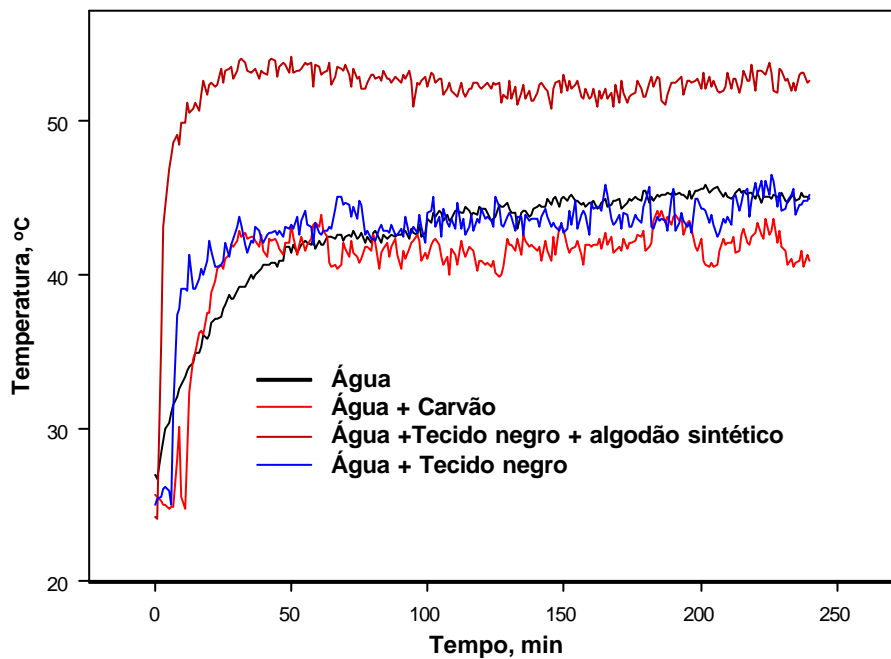


Figura 6. Distribuição de temperatura em função do tempo, nas superfícies dos diversos meios porosos.

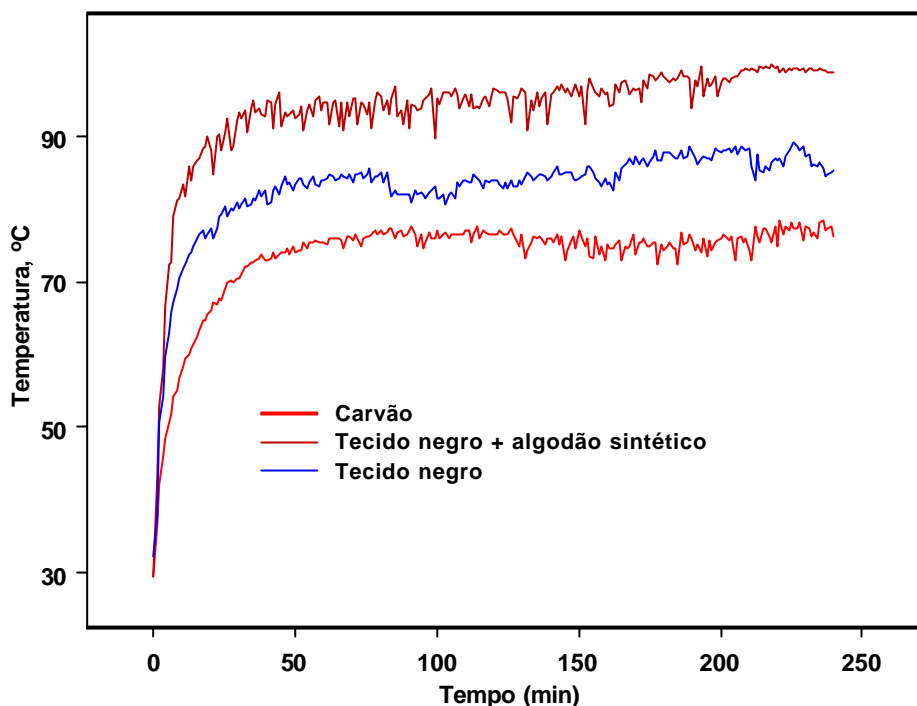


Figura 7. Distribuição temporal de temperatura medida na superfície dos meios porosos não mergulhados em água.

5. Análise de resultados

Através da Fig. (2), verifica-se que as três curvas, a duas teóricas e a experimental, praticamente se superpõem. Calculado o coeficiente de correlação entre os dados teóricos e experimentais determina-se 0,999. Deduz-se, dessa forma, que a Eq. (3) gera valores muito próximos da realidade, usando qualquer um dos procedimentos (1 e 2) indicados acima, quando a evaporação é considerada sem os meios porosos. A partir da Fig. (3), visualiza-se, também, uma forte aproximação entre os valores teóricos calculados pelo procedimento 1 e os experimentais de massa evaporada, o que gerou um coeficiente de correlação de 0,998 e um erro padrão de 0,0049. Todavia, se vê que o procedimento 2 produz resultados não tão coincidentes. De uma forma, ou de outra, nota-se que neste caso a evaporação foi estimulada pelo meio poroso. Este estímulo é percebido quando se verifica que os valores na ordenada da Fig. (3), são 50% maiores do que os correspondentes vistos na Fig. (2).

Já, a partir das Figs. (4) e (5) observa-se que a utilização de meios porosos como blocos de carvão vegetal e o tecido negro não preenchido, produzem valores que se afastam dos resultados experimentais, sobretudo após os 120 s de experimento. Constata-se, todavia, ao se examinar a Fig. (6) que mesmo nesses casos os meios porosos aumentam a evaporação, e a razão básica para tal é a existência de massa de água muito menor exposta à mesma radiação, facultada pelos meios porosos, quando comparada com aquela contida em toda a bandeja, sem meios porosos.

Levando-se em conta a Fig. (6), é identificado que a temperatura da bandeja apenas com a água, nos primeiros 7,0 minutos do experimento, esteve mais elevada do que aquelas medidas na superfície de todos os diferentes meios porosos colocados em outras bandejas com mesma quantidade de água, à exceção daquela com o tecido negro preenchido com o algodão sintético. Nota-se, por outro lado, que, praticamente, todos os meios porosos atingem a temperatura máxima antes de decorrer 70 minutos do início do experimento, revelando que a capacidade máxima de absorver calor foi alcançada naquele ponto. A partir desse momento, percebe-se um comportamento próximo do regime permanente, com pequenas variações de temperatura em função do tempo. Isto, todavia não ocorre com a água, que por todo o período experimental continuou se elevando, o que indica que parte da energia recebida está sendo usada para elevar sua temperatura. Também é visível, a partir da Fig. (6), que salvo para o caso do tecido negro com o algodão sintético, a temperatura da água, a partir de 117 min, é praticamente mais elevada do que as avaliadas em todas as outras situações. Mesmo assim, a água sem a influência de meios porosos apresentou taxa de evaporação menor do que aquelas conseguidas com o auxílio desses meios, ver Fig. (6). Comprova-se, ainda, que o tecido negro tendo o algodão sintético como enchimento, ver Fig. (3), foi o meio que induziu a maior taxa de evaporação da água, dentre todos os outros. No plano experimental o valor alcançado foi maior do que 49 %, daquele evaporado na bandeja sem meios porosos, enquanto que no plano teórico o valor ficou acima de 57%. Isto se dá em virtude das temperaturas serem neste caso, mais elevadas, tendo em vista que esse meio se mostrou mais efetivo na absorção da radiação, ver Figs.(6) e (7).

6. Conclusão

Em todos os casos examinados, à exceção do tecido negro preenchido com algodão sintético, verifica-se que o procedimento 2 de cálculo de massa evaporada apresenta-se mais próximo da realidade do que o procedimento 1, evitando-se, ainda, a grande oscilação imposta aos valores da evaporação, ao longo do tempo.

A Eq. (3) mostrou-se totalmente satisfatória na simulação do comportamento real, no caso da evaporação de água em bandeja sem meios porosos. Todavia, quando se utiliza como meio poroso o tecido negro, ou o carvão vegetal, deduz-se que tal equação, mesmo considerando o procedimento 1, não é tão eficiente em gerar dados teóricos que se aproximem tão bem da realidade como aconteceu nos casos de bandejas contendo apenas água, bem como bandejas contendo o tecido negro preenchido com algodão sintético. Deve-se entender, contudo, que não há razão para que se fixando os coeficientes na Eq. (2) as curvas se ajustassem aos dados experimentais, tendo em vista que os meios porosos modificam a condição da absorvidade da radiação, bem como a inércia térmica da própria água. Desta maneira, a Eq. (2) deve ter um coeficiente que varie em função da absorvidade do meio poroso e da inércia térmica da água a ser evaporada. Esta última pode ser avaliada através da tangente às curvas de temperatura.

O efeito da evaporação nas bandejas com superfície porosa, associado à redução no calor específico deste sistema em comparação àquele da bandeja contendo apenas água, faz reduzir a temperatura.

Foi visto, ainda, que a redução na inércia térmica provocada pelos meios porosos se deu em conseqüência da água na superfície dos meios se aquecer mais rapidamente do que a água da bandeja, exposta à mesma radiação. Isto acarreta um aumento na taxa de evaporação. O meio poroso será tão mais eficaz no aumento dessa taxa, quanto maior for sua absorvidade, menor o valor do calor específico e mais vigoroso seu efeito capilar.

7. Referências

- Adhikari, R., S., Kumar, A., Sootha, G., D., 1995, "Simulation Studies on a Multi-stage Stacked Tray Solar Still", *Solar Energy*, pp. 317-325.
- Charles, C. S., George, L., and Randy, J., 1994, "Measurement and Analysis of Evaporation from an Inactive Outdoor Swimming Pool", *Solar Energy*, Vol. 53, No. 1, pp. 3 – 7.
- Chendo, M. A. C., Egariens, S. U., 1991, "Effects of Pebbles and Wick, on the Performance of a Shallow Basin Solar Still", *Solar world Congress, Proceedings of the Biennial Congress of The International Solar Energy Society*, Denver, Colorado, U. S. A., pp. 2264-2269.
- Duffie, J. A., Beckman, W. A., 1980, "Solar engineering of thermal processes", John Wiley & Sons. U. S. A..
- Dunkle, R. V., 1961, "Solar Water Distillation: The Roof Type Still and a Multiple Effect Diffusion Still", *Int. Dev. Heat Transfer*, A.S. M. E., Part V, pp 895-902.
- Hahne, E., and Kubler, R., 1994, "Monitoring and Simulation of the Thermal Performance of Solar Heated Outdoor Swimming Pools", *Solar Energy*, Vol. 53, No. 1, pp. 9 – 19.
- Hatsopoulos, G. N. and Keenan, J. H., 1965, "Principles of General Thermodynamics", John Wiley & Sons, London, Sydney, 788 p.
- Headley, O. C., 1973, "Cascade solar still for distilled water production", *Solar Energy*, Vol. 15, pp 245-258.
- Holman, Jack Philip, 1983, "Transferência de Calor", Jack Philip Holman; tradução Luiz Fernando Milanez, Ed. McGraw-Hill do Brasil, S. Paulo, Brasil, 639 p.
- Jaguaribe, E. F., 1973, "Efeito de meios porosos na eficiência do processo de destilação solar", *Atas do 2º Congresso Brasileiro de Energia Solar*.
- Jaguaribe, E. F., Barros, S. F., and Rosa, R. A., 1995, "Using Capillary Porous Media to Improve the Water Evaporation", *Proceedings of the 1995 Annual Conference - Solar '95 - Technical Papers*, Minnesota, Estados Unidos, pp. 348-351.
- Jamal, M., A., and Muaddi, J., A., 1990, "Solar Energy at Various Depths Below Water Surface", *Intern. J. Energy Research*, 14, 859.
- Kreith, F., Kreider, F. K., 1978, "Principles of solar engineering", McGraw Hill, U. S. A, 778 p.
- Lobo, P. C., Araujo, S. R., 1977, "Design of a Simple Multi-effect Basin Type Solar Still", *Proc. International Solar Energy Congress*, New Delhi, India.
- Safwat, M. A., Brusewitz, G. H., Farmer, D. M., 1977, "Direct use of Solar Energy for Water Desalination", *National Symposium on Alternative Energy Sources*, Miami.
- Sartori, E., Jaguaribe, E. F., 1984, "Estudo Teórico-experimental de um Destilador Solar com Funcionamento Diurno e Noturno", *Proceedings of the II Iberian Solar Energy Conference*.
- Sodha, M. S., Kumar, A., Tiwari, G. N., Tyagi, R. C., 1981, "Simple Multiple Wick Solar Still: Analysis and Performance", *Solar Energy*, Vol. 26, pp 127-131.

THERMAL INERTIA REDUCTION AS A MECHANISM TO INCREASE THE WATER EVAPORATION RATE IN OPEN TRAYS

Emerson Freitas Jaguaribe

DTM/CT Campus I da UFPB – 58059 900 João Pessoa – PB -Brasil

ejaguaribe@uol.com.br

Marcos A. R. Andrade

DTM/CT Campus I da UFPB – 58059 900 João Pessoa – PB -Brasil
maraufb@globo.com

Fábio B. Ferraz

DTM/CT Campus I da UFPB – 58059 900 João Pessoa – PB -Brasil

Abstract. *This work discusses the effect of porous media to reduce the thermal inertia of water to be evaporated. Several experiments were conducted using a tray with water and others employing different porous media in an open tray, with the same amount of water and exposed to the same constant radiation. A semi-empirical correlation was used to theoretically evaluate the evaporated mass. A good agreement between the experimental and theoretical data for the evaporation in trays just containing water was reached. The resulting Pearson's correlation coefficient was about 0.999. The experiments using porous media showed a small Pearson's correlation coefficient, but still representative, i. e. superior to 0.99. It was observed in this last case that the coefficient of the correlation in use should be a function of the absorptivity of the porous medium and of the thermal inertia it provoked.*

Keywords. *porous media, thermal inertia, capillary effect, evaporation.*