



USO DE MEIOS POROSOS NO AUMENTO DA TAXA DE EVAPORAÇÃO DA ÁGUA EM BANDEJAS ABERTAS

Emerson Freitas Jaguaribe

Departamento de Tecnologia Mecânica – Centro de Tecnologia – Campus I da UFPB- 58059 900
João Pessoa – PB – Brasil – e-mail: ejaguaribe@uol.com.br

Marcos A. R. Andrade

Departamento de Tecnologia Mecânica – Centro de Tecnologia – Campus I da UFPB- 58059 900
João Pessoa – PB – Brasil – e-mail: maraufpb@globocom.com

Pio Caetano Lobo

Escola Federal de Engenharia de Itajubá – EFEI – Cx. Postal 50 - 37500 000 – Itajubá – MG –
Brasil – e-mail: pclobo@iem.efei.br

Fábio B. Ferraz

Departamento de Tecnologia Mecânica – Centro de Tecnologia – Campus I da UFPB- 58059 900
João Pessoa – PB – Brasil.

Resumo. *Com vistas a se estudar a influência capilar no aumento da taxa de evaporação, vários experimentos foram desenvolvidos usando uma bandeja contendo apenas água, e outras, com a mesma quantidade de água, mas com diferentes meios porosos aflorando à superfície. Todas as bandejas foram expostas, durante um período de quatro horas, a uma radiação constante da ordem de 477 W/m^2 . No decorrer deste tempo registrou-se as temperaturas da água, da superfície do meio poroso e do ambiente, bem como a massa de água evaporada e a umidade relativa do ar. Usando-se uma equação semi-empírica avaliou-se a quantidade de água evaporada das bandejas, em todos os casos examinados. Foi observada uma boa aproximação entre os dados teóricos e experimentais oriundos da bandeja com apenas o líquido, bem como da que utilizava, como meio poroso, o algodão sintético envelopado com um tecido negro, com um coeficiente de correlação acima de 0,99. Nos demais casos, os valores experimentais para as bandejas que continham os meios porosos apresentaram maiores magnitudes do que aqueles estimados teoricamente. A partir dos valores das temperaturas ao longo do tempo, pode-se induzir que a principal razão para o aumento na taxa de evaporação, nos vários casos examinados, adveio da redução da inércia térmica da água propiciada pelo efeito capilar.*

Palavras-chave: Meios porosos, inércia térmica, efeito capilar, evaporação.

1. INTRODUÇÃO

Destiladores Solares Convencionais, DSC, têm sido pouco empregados, em virtude dos investimentos iniciais elevados e de suas produtividades diárias muito limitadas, isto é, abaixo de 5 litros/m² (Jaguaribe et al., 1995, e Joyce et al., 1994). Por estas razões, muitos pesquisadores vêm tentando aumentar a capacidade produtiva dos DSC. Uma das formas seria fazendo-se aumentar a taxa de evaporação da água. Jaguaribe (1973) verificou que blocos de carvão emergindo à superfície da água na bandeja podem aumentar a taxa de evaporação em DSC, mas também, em

bandejas abertas. No presente trabalho, diferentes meios porosos aflorando à superfície livre da água, são utilizados com o objetivo de reduzir a inércia térmica¹ da água que está sendo evaporada em bandejas, tendo em vista a formação de uma fina camada superficial, induzida pelo efeito capilar desses meios.

2. INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL

Na Fig. (1) se vê um esquema do aparato experimental empregado. A montagem é composta, basicamente, de um suporte da fonte radiante, e uma bandeja que ora contém apenas água, ora água com o meio poroso. Esta bandeja de 270 mm de comprimento, 160 mm de largura e 55 mm de profundidade, é disposta sobre uma balança através da qual se avalia a perda temporal de água, por evaporação. A bandeja é analisada em duas situações distintas: a primeira, com 500 ml de água e uma outra, semelhante à primeira, com a mesma quantidade de água, contendo um meio poroso aflorando à superfície do líquido. Nos dois casos, tanto a água, isoladamente, como a água e o meio poroso, foi exposto, por um período de quatro horas, a uma radiação artificial constante, aproximadamente igual a 477 W/m^2 , determinada por um piranômetro de precisão Eppley.

As bandejas foram instrumentadas com termopares tipo "T", ou seja, cobre-constantan, devido ao baixo custo, confiabilidade e a ampla faixa de temperatura para a qual podem ser usados (- 262 a 350 °C). Nas bandejas que continham os meios porosos foram colocados cinco termopares: um na lateral esquerda, outro na direita, um no fundo e dois foram afixados em pontos da superfície dos meios porosos, como pode ser observado na Fig. (1). Conectou-se os termopares a um Datalogger, equipamento utilizado para registrar e armazenar sinais analógicos, ou digitais, de circuitos, ou sensores de temperatura. Os sinais, captados a cada minuto, inclusive valores de bulbo seco e de bulbo úmido do ambiente, foram posteriormente tratados por um computador. Desta forma, foi possível monitorar, com precisão, as variações das temperaturas durante todo o experimento. A massa total de água na bandeja foi coletada no início e a cada trinta minutos, durante as quatro horas de observação.

Na bandeja apenas com água, havia cinco termopares; um no fundo e um em cada lateral.

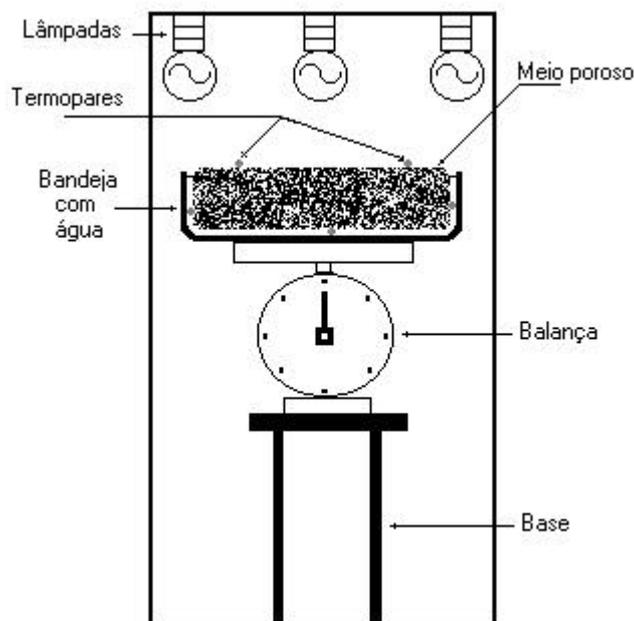


Figura 1. Esquema do aparato experimental contendo o meio poroso.

¹ Definida por Hirschmann et. al. (1970), como o atraso de tempo entre a máxima radiação solar e a máxima taxa de produção de massa de água evaporada, submetidas a uma radiação artificial constante.

2.1. Meios Porosos

Utilizou-se diferentes meios porosos, dentre eles, blocos de carvão vegetal, tecido negro e tecido negro preenchido com algodão sintético. Para que o tecido negro estivesse sempre tencionado, e detivesse uma geometria que permite o preenchimento com um meio poroso, foi montada uma estrutura na forma de um paralelepípedo, com 260 mm de comprimento, 150 mm de largura e 45 mm de altura, de modo a ocupar toda a área da bandeja.

O carvão vegetal foi obtido a partir de madeiras com baixa massa específica, empregando-se um forno elétrico tubular rotativo. As madeiras foram cortadas em cubos e aquecidas a uma temperatura de 450 °C, e uma razão de aquecimento de 5 °C por minuto. Foi utilizado no experimento o carvão vegetal que apresentou maior porosidade efetiva, isto é veios contínuos que conectam duas faces opostas.

3. EQUACIONAMENTO

No caso de uma “cuba padrão”, a equação teórica utilizada na literatura, para uma cuba de superfície e com uma atmosfera convectivamente estável, a taxa de evaporação foi correlacionada experimentalmente, Holman (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 médio 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/m².

Partindo da Eq. (1), e levando-se em consideração a pressão de saturação do vapor à temperatura da água, e a pressão de saturação do vapor à temperatura de bulbo seco, obtém-se a equação análoga 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 média diária do vento, km/dia;

$p_{sa}(T_a)$ => pressão de saturação do vapor à temperatura da água, kN/m²;

$p_{bs}(T_{bs})$ => pressão de saturação do vapor à temperatura de bulbo seco, kN/m²;

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 quantidade de massa evaporada por unidade de área, Holman (1983), é dada por

$$m_e'' = E_{cs} \cdot r_{ag} \cdot \frac{t}{1440 \times 10^3} \quad (3)$$

sendo:

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

$\rho_{\text{ag}} \Rightarrow$ massa específica da água, kg/m^3 ;

$t \Rightarrow$ tempo, min.

No caso da água, a Eq. (3) se reduz a,

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

4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Os gráficos apresentados nas Figs. (2) a (5) abaixo, mostram o grau de identidade entre valores teóricos da massa de água evaporada, calculada pela Eq. (3), e aqueles obtidos experimentalmente. Nestas figuras aparece uma reta de 45° , que possibilita a observação do nível de semelhança desses valores.

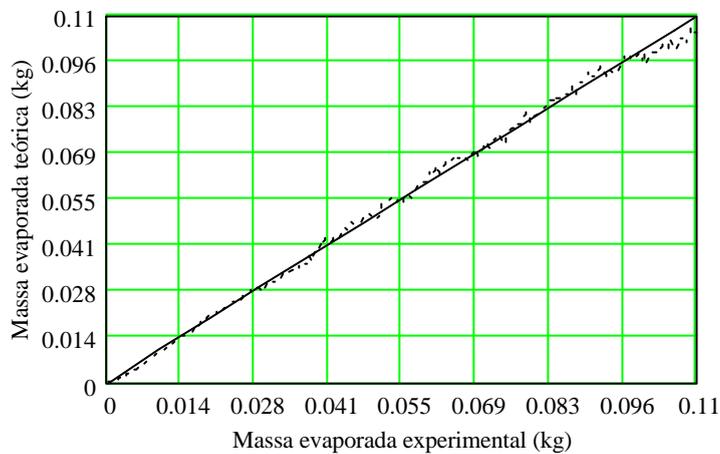


Figura 2. Massa de água evaporada acumulada, calculada teoricamente, correlacionada com valores experimentais correspondentes, ao longo de 4 horas, em bandejas contendo apenas água.

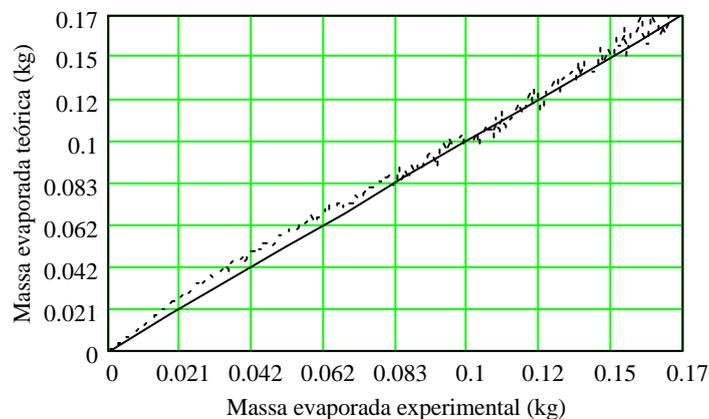


Figura 3. Massa de água evaporada acumulada, calculada teoricamente, correlacionada com valores experimentais correspondentes, ao longo de 4 horas, em bandejas tendo como meio poroso o tecido negro preenchido com algodão sintético.

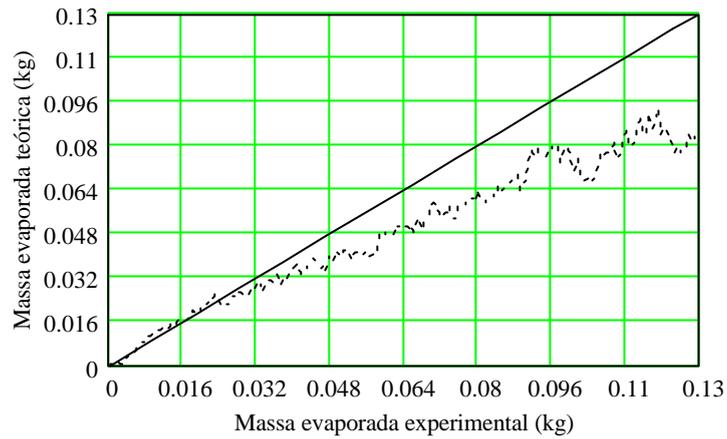


Figura 4. Massa de água evaporada acumulada, calculada teoricamente, correlacionada com valores experimentais correspondentes, ao longo de 4 horas, em bandejas tendo blocos de carvão vegetal como meio poroso.

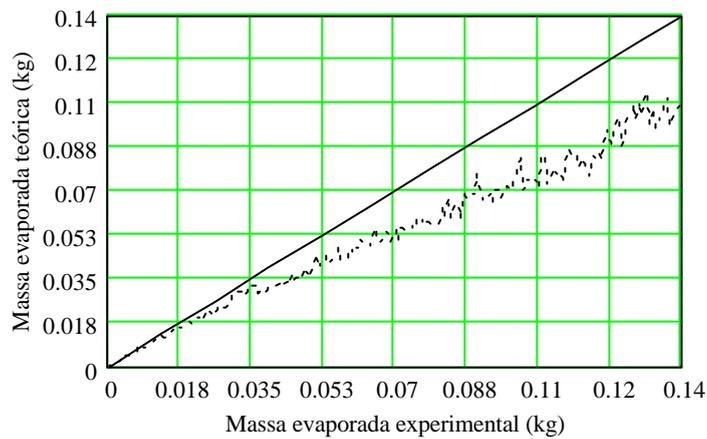


Figura 5. Massa de água evaporada acumulada, calculada teoricamente, correlacionada com valores experimentais correspondentes, ao longo de 4 horas, em bandejas tendo como meio poroso o tecido negro sem preenchimento.

Através da Fig. (6) se observa a quantidade de massa de água evaporada, experimental, com e sem a influência capilar, em função do tempo.

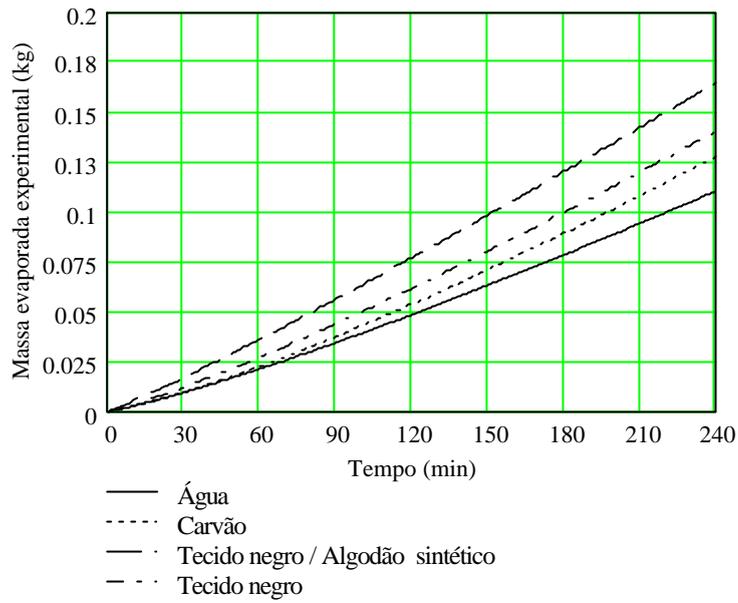


Figura 6. Massa acumulada experimental de água evaporada em bandejas, em função do tempo.

Na Fig. (7) aparece a evolução das temperaturas nas superfícies dos meios porosos, em função do tempo.

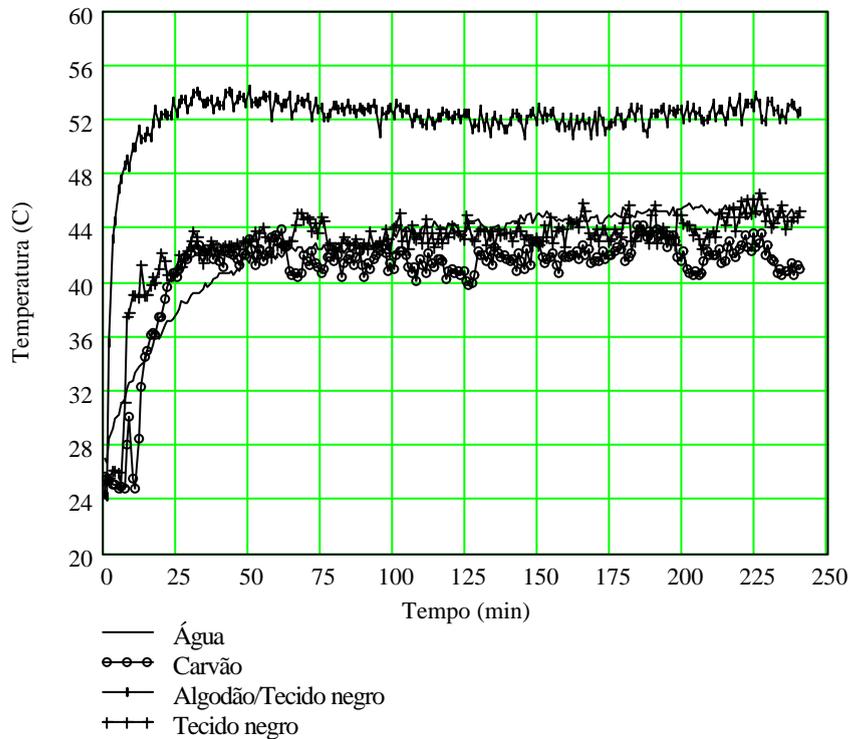


Figura 7. Distribuição de temperatura em função do tempo, nas superfícies dos diversos meios porosos.

5. ANÁLISE DE RESULTADOS

Constata-se através da Fig. (2), no caso da água sem a influência capilar, a existência de uma grande semelhança entre os valores teóricos e os experimentais, visto que os pontos discretos estão praticamente superpondo à reta de 45° ; apresentando um coeficiente de correlação de 0,999. Deduz-se, desta forma, que a Eq. (4) gera valores muito próximos da realidade. Observando-se, ainda, a Fig. (3), visualiza-se, também, uma forte aproximação entre os valores teóricos e experimentais da massa evaporada, o que produziu um coeficiente de correlação de 0,998 e um erro padrão de 0,0049. Nota-se, ainda que, neste caso, a evaporação foi estimulada pelo meio poroso, isto é, o tecido negro preenchido com o algodão sintético. Este estímulo é percebido quando se verifica que os valores na abscissa (ou ordenada) de formação do gráfico da linha reta da Fig. (3), são 50% maiores do que os correspondentes vistos na Fig. (2).

Já, a utilização de meios porosos como blocos de carvão vegetal e o tecido negro não preenchido, produzem valores discretos, como se vê nas Figs. (4) e (5), praticamente coincidentes com a linha reta até o primeiro reticulado da diagonal, mas, com uma forte tendência a se afastar das retas de referência à medida que o tempo passa. Nestes casos os valores de coeficientes de correlação relacionados com as Figs. (4) e (5), respectivamente, são iguais a 0,988 e 0,994. Nota-se, ainda, que os pontos discretos com valores de abscissa acima de 0,024 - na Fig. (4) - e de 0,018 - na Fig. (5), estão abaixo da reta de referência. Percebe-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 massa de água muito menor exposta à mesma radiação, facultada pelos meios porosos, quando comparada com a massa contida em toda a bandeja, sem meios porosos.

Da análise das Figs. (4) e (5), também se deduz que a Eq. (4) não é tão eficiente em gerar dados teóricos que se aproximem tão bem da realidade como aconteceu nos casos das Figs. (2) e (3).

Levando-se em consideração a Fig. (7), pode-se destacar 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 a mesma quantidade de água, à exceção daquela com o tecido negro preenchido com o algodão sintético. Observa-se, por outro lado, que, praticamente, todos os meios porosos atingem a temperatura máxima antes de decorrer 68 minutos do início do experimento, o que indica que a capacidade máxima de absorver calor foi atingida até este ponto. Isto, todavia não ocorre com a água, que por todo o período experimental continuou se elevando. Desta maneira, parte da energia recebida está sendo usada para elevar a temperatura da massa de água. Também da Fig. (7) se constata, que a temperatura da água a partir de 125 min, é praticamente mais elevada do que aquelas avaliadas com a presença de meios porosos, excetuando-se o caso do tecido negro preenchido com o algodão sintético. Não obstante, a água sem a influência de meios porosos apresentou taxa de evaporação menor do que a obtida com auxílio desses meios, como pode ser observado na Fig. (6). Em todos os casos estudados, 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. Maior do que 49 %, quando se comparam dados experimentais, e acima de 57%, quando os dados teóricos são relacionados. Este resultado é consequência de temperaturas mais elevadas, tendo em vista que esse meio se mostrou mais efetivo na absorção da radiação.

O efeito da evaporação nas bandejas com superfície porosa faz reduzir a temperatura. Assim, salvo em situações onde esta redução não é significativa, tendo em vista a elevada absorção da radiação provocada pela superfície porosa, como ocorreu com o tecido negro recheado com o algodão sintético, a Eq. (4) tende a gerar valores que se afastam da linha reta de referência, como pode ser visto nas Figs. (4) e (5).

6. CONCLUSÕES

A Eq. (4) utilizada para estimar a taxa de evaporação teórica, mostrou-se satisfatória não apenas no caso da bandeja, sem superfície porosa, mas também quando a temperatura da superfície porosa não é tão significativamente afetada pela evaporação, como aconteceu com a bandeja que dispunha do algodão sintético recoberto com o tecido negro. Também foi neste caso onde se percebeu a menor inércia térmica e temperaturas mais elevadas, dentre todos os examinados, conforme pode ser visto na Fig. (7).

Pode-se deduzir, ainda, que os meios porosos mais eficazes no aumento da taxa de evaporação da água, devem possuir superfície de elevada absorvidade, excelente efeito capilar, e baixo valor do calor específico.

Do ponto de vista prático se constata que os meios porosos, através do efeito capilar, são responsáveis pela formação de uma fina camada superficial, de baixa inércia térmica. Essa redução na inércia térmica se dá em consequência da água na superfície do meio poroso se aquecer mais rapidamente do que se toda a água da bandeja estivesse sendo exposta diretamente à mesma radiação, acarretando um aumento na taxa de evaporação e consequentemente na produtividade, de um destilador solar, por exemplo. De fato, Chendo et al. (1991), verificaram experimentalmente que o uso de carvão vegetal, e pavios na bandeja de DSC aumentam a taxa de evaporação dos destiladores. Mais recentemente, Bouchekima et al. (1999), usam o efeito capilar em um destilador de múltiplo efeito, com vistas a aumentar a produtividade.

7. REFERÊNCIAS

- Bouchekima, B., Gros, B., Ouahes, R., and Diboun, M., 1999, "Theoretical Study and Practical Application of the Capillary Film Solar Distiller", Elsevier Science Ltda, Pergamon, Renewable Energy, pp 795-799.
- 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.
- Hirshcman, J. and Roffler, S., 1970, "Thermal inertia of solar stills and its influence on performances", I. S. E. S. Conf., Melbourne, Australia.
- Holman, Jack Philip, 1983, "Transferência de Calor", Jack Philip Holman; tradução Luiz Fernando Milanez- São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 639 p.
- Jaguaribe, E., 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, Minesota, Estados Unidos, pp. 348-351.
- Joyce, A., Loureiro, D., Pereira, M. C., Moreira, M., 1994, "A spray Evaporation Type Solar Still", Renewable Energy, Vol. 5, Part I, pp 517-519.

USING POROUS MEDIA TO INCREASE THE WATER EVAPORATION RATE IN OPEN AIR TRAYS

Emerson Freitas Jaguaribe

Departamento de Tecnologia Mecânica – Centro de Tecnologia – Campus I da UFPB- 58059 900
João Pessoa – PB – Brazil – e-mail: ejaguaribe@uol.com.br

Marcos A. R. Andrade

Departamento de Tecnologia Mecânica – Centro de Tecnologia – Campus I da UFPB- 58059 900
João Pessoa – PB – Brazil – e-mail: maraufpb@globocom.com

Pio Caetano Lobo

Escola Federal de Engenharia de Itajubá – EFEI – Cx. Postal 50 - 37500 000 – Itajubá – MG – Brazil – e-mail: pclobo@iem.efei.br

Fábio B. Ferraz

Departamento de Tecnologia Mecânica – Centro de Tecnologia – Campus I da UFPB- 58059 900 João Pessoa – PB – Brazil

Abstract. *Several experiments using a tray containing just water, and trays with the same amount of water plus different porous media partially submersed in the liquid, were carried out to study the influence of porous media on water evaporation rate. All the trays were exposed to the same constant radiation flux (477W/m^2), for a four-hour period. During this time the porous media surface and the water temperature, as well as, the relative humidity and the amount of water evaporated, were measured. A semi-empirical correlation was used to evaluate the evaporated amount of water in all cases examined. A very good agreement was reached between theoretical and experimental data, for plain water and for the porous media formed by a black fabric bag filled with a kind of synthetic cotton. In both cases, the correlation factors were superior to 0.99. For the remaining cases the experimental data had magnitudes greater than the theoretical results.*

Checking the temperature temporal profiles it was possible to conclude that the main reason for the evaporation rate increase, in all cases considered, came from the reduction in the water thermal inertia, induced by the capillary effect.

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