

## VALORES DE TAXA DE EVAPORAÇÃO OBTIDAS EM UM EVAPORADOR SOLAR EM DIFERENTES CIDADES

BARTMER, L.<sup>1</sup>, LAUERMANN, B.<sup>2</sup>, FURMAN, L.P.<sup>3</sup>, MESSA, A.<sup>4</sup>, MELO, P. F. S.<sup>5</sup>,  
RODRIGUES, L. M.<sup>6</sup>, SOUZA, T. R.<sup>7</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA) – Bagé – RS – Brasil

<sup>2</sup> Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA) – Bagé – RS – Brasil

<sup>3</sup> Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA) – Bagé – RS – Brasil

<sup>4</sup> Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA) – Bagé – RS – Brasil

<sup>5</sup> Faculdade de Tecnologia de Sorocaba (FATEC) – Sorocaba – SP – Brasil

<sup>6</sup> Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA) – Bagé – RS – Brasil

<sup>7</sup> Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA) – Bagé – RS – Brasil

### RESUMO

Alternativas de obtenção de energia mais razoáveis do ponto de vista ambiental, até agora pouco utilizadas, passam a ser vistas como prováveis alternativas à substituição dos combustíveis fósseis. Uma dessas alternativas é o uso da energia solar, que se mostra eficaz em indústrias que apresentam alto consumo de energia em diversas etapas do processo produtivo, tais como: evaporação, secagem, cozimento, limpeza, extração e dessalinização. A porcentagem de evaporação solar de soluções diluídas nos meses mais quentes do ano chega a 25% e nos meses de inverno a 15%, na cidade de São Paulo (Souza, 2008). Visando essa tendência, o objetivo deste trabalho é desenvolver um evaporador solar tipo placa plana para concentrar soluções. A metodologia utilizada emprega um planejamento fatorial, com as variáveis de entrada: vazão de líquido que escoar sobre a placa ( $1,5 \cdot 10^{-3}$  kg/s a  $4,5 \cdot 10^{-3}$  kg/s) e inclinação da placa (de 20° a 60°), obtendo como resposta a porcentagem de evaporação da solução. Os experimentos de evaporação solar foram realizados na cidade de Bagé – RS e posteriormente comparados com experimentos realizados na cidade de São Paulo – SP. Os melhores resultados foram obtidos mantendo-se a inclinação da placa plana de 20° e vazão de alimentação de  $1,5 \cdot 10^{-3}$  kg/s, tanto na cidade de Bagé, quanto em São Paulo. A taxa de evaporação mais elevada, em ambas as cidades, foi verificada por volta do meio dia, sendo os valores médios de  $23 \pm 2\%$  em Bagé e  $15 \pm 3\%$  em São Paulo.

Palavras-chave: energia solar; evaporação; efluente.

### 1 INTRODUÇÃO

Os órgãos de controle ambiental têm estabelecido padrões cada vez mais rigorosos para o lançamento de efluentes líquidos ao meio ambiente, obrigando a implantação de eficientes tecnologias de tratamento. Os efluentes líquidos quando submetidos a um processo de pré-tratamento, tem facilitado o seu tratamento final, diminuindo o tempo de operação, e custo total (Aldabó, 2002).

Um exemplo de pré-tratamento muito utilizado é a evaporação, que consiste numa operação unitária que tem por finalidade concentrar soluções constituídas de solventes voláteis e solutos considerados não-voláteis, pela evaporação parcial do solvente. (Incropera e Witt, 1992).

O uso da evaporação solar para concentrar soluções diluídas (na maioria dos casos efluentes industriais) mostra-se eficaz com solutos prejudiciais à saúde ou ao meio ambiente (Macedo, 1996). A evaporação solar também pode ser usada na concentração de soluções visando apenas uma redução de volume, que segue para a destinação final ou descarte.

A técnica de evaporação com aquecimento direto pode empregar a energia solar como combustível, pois consiste em fonte energética renovável e limpa, não emitindo poluente. Existem diferentes formas de utilizar a energia solar no aquecimento, concentração ou tratamento de águas. A principal delas é o aproveitamento da radiação solar como energia térmica em um evaporador solar. Souza et al. (2008) apresentaram a aplicação térmica da energia solar na concentração de soluções diluídas (efluentes industriais) como uma forma de uso de energia alternativa.

Como o evaporador solar já apresentou resultados promissores em São Paulo - SP, o objetivo deste trabalho é desenvolver um evaporador de filme descendente, em escala de laboratório, similar e realizar experimentos, comparando os resultados obtidos nas duas cidades.

## 2 METODOLOGIA (MATERIAIS E MÉTODOS)

Foi desenvolvido e construído um evaporador solar, instalado no laboratório de Fenômenos de Transporte da Universidade Federal do Pampa – UNIPAMPA, campus Bagé, cuja foto pode ser visualizada na Figura 1. Tomou-se o cuidado de construir um equipamento solar similar com o equipamento montado na cidade de São Paulo-SP.



**Figura 1.** Foto do equipamento.

A placa plana foi feita de madeira, impermeabilizada (com neutrol) e pintada com tinta preta fosca, para aumentar a absorção da radiação solar que incida sobre ela. A madeira foi o material escolhido, pois apresenta preço acessível, fácil aquisição em qualquer localização do país e baixa condutibilidade térmica. Esse evaporador solar pode ser considerado um evaporador ecologicamente correto.

Os experimentos de São Paulo – SP foram realizados no mês de julho de 2003 na Universidade de São Paulo - USP e na cidade de Bagé – RS no mês de julho do ano de 2014, na UNIPAMPA. Ambos, realizaram um planejamento fatorial,

sendo do tipo 2<sup>2</sup> com 6 pontos centrais, onde as variáveis de entrada foram: a vazão do fluido de alimentação (nível mínimo de  $1,5 \cdot 10^{-3}$  kg/s, ponto central de  $3,0 \cdot 10^{-3}$  kg/s e nível máximo de  $4,5 \cdot 10^{-3}$  kg/s) e a inclinação da placa (nível mínimo de 20°, ponto central de 40° e nível máximo de 60°) e a variável de saída foi a taxa de evaporação. Foi realizado um planejamento fatorial para cada horário do dia (9:00h, 10:00h, 11:00h, 12:00h, 13:00h, 14:00h, 15:00h, 16:00h e 17:00h).

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores de radiação solar global e difusa, utilizados nesse trabalho, foram obtidos no Instituto de Meteorologia da Universidade de São Paulo – SP e na Estação Meteorológica da Universidade de Santa Maria – RS, pois Bagé não dispõe desses dados. Mesmo com a distância de 250 km entre Bagé e Santa Maria, os valores de radiação podem ser utilizados com uma boa aproximação.

Os valores das médias mensais de radiação solar global e difusa para São Paulo, foram 11,310 MJ/m<sup>2</sup>.dia e 3,904 MJ/m<sup>2</sup>.dia, respectivamente e para o mês de julho de 2014 em Bagé foram os valores de 10,96 MJ/m<sup>2</sup>.dia e 2,444 MJ/m<sup>2</sup>.dia. Nota-se que os valores das radiações para as duas cidades, distantes de 1500 km, são próximos, esta fato ocorreu, pois em 2014 Bagé apresentou um inverno atípico, apresentando valores de radiação e temperaturas acima da média de anos anteriores.

Os resultados obtidos, seguindo o planejamento fatorial, podem ser visualizados na Tabela 1 e 2.

Vazão Cod.	Inclinação Cod.	%Evap (9:00 hs)	%Evap (10:00 hs)	%Evap (11:00 hs)	%Evap (12:00 hs)	%Evap (13:00 hs)	%Evap (14:00 hs)	%Evap (15:00 hs)	%Evap (16:00 hs)
-1	-1	8,9	15,2	16,5	23	18,4	16,8	13,5	11,0
+1	-1	4,5	3,9	6,1	6,4	6,5	7,0	6,2	5,9
-1	+1	3,8	7,6	10,9	13,3	13,9	13,6	10,5	8,6
+1	+1	1,2	3,2	5,7	6,9	6,8	9,9	7,2	6,9
0	0	4,3	8,6	6,9	7,4	8,1	7,6	6,7	6,4
0	0	4,8	7,1	7,5	12,0	9,3	6,7	6,6	8,5
0	0	4,9	5,0	6,1	11,7	10,1	9,4	6,4	5,0
0	0	4,3	8,2	5,6	8,9	9,9	8,6	7,3	6,4
0	0	4,5	5,4	6,8	10,2	9,8	8,4	8,0	7,2
0	0	3,2	4,9	6,1	10,9	10,0	8,7	7,9	6,8

Tabela 1 - Planejamento experimental e resultados obtidos para o mês de julho de 2003 em Bagé.

Vazão Cod.	Inclinação Cod.	%Evap (9:00 hs)	%Evap (10:00 hs)	%Evap (11:00 hs)	%Evap (12:00 hs)	%Evap (13:00 hs)	%Evap (14:00 hs)	%Evap (15:00 hs)	%Evap (16:00 hs)
-1	-1	10,0	14,2	16,5	20,7	16,7	16,4	12,8	11,97
+1	-1	4,5	4,2	6,0	6,7	7,0	9,7	9,5	7,0
-1	+1	4,7	7,4	11,8	15,2	15,1	14,7	8,8	10,8
+1	+1	1,1	2,0	5,2	6,4	5,3	10,7	6,1	5,1
0	0	4,6	8,0	7,9	6,7	6,5	8,0	6,4	5,6
0	0	5,0	6,8	7,3	10,8	9,6	4,7	5,8	9,2
0	0	4,9	4,6	5,6	11,1	9,6	7,2	6,4	5,0
0	0	4,3	7,9	5,6	8,2	9,9	10,6	7,8	4,6
0	0	4,7	6,3	7,7	9,7	9,3	8,4	8,1	5,8
0	0	3,4	4,7	5,9	11,1	7,0	8,4	6,6	5,6

Tabela 2 - Planejamento experimental e resultados obtidos para o mês de julho de 2014 em São Paulo.

Dentre todos os experimentos realizados, o que apresentou maiores valores de porcentagem de evaporação, ao longo de todo o dia, foi o experimento que manteve uma inclinação da placa plana de 20° e uma vazão de alimentação de 1,5. 10-3 kg/s, tanto na cidade de Bagé, quanto na cidade de São Paulo. Estes resultados seriam esperados por análise física, uma vez que, vazões baixas implicam em menor espessura do filme e maior temperatura na interface beneficiando a evaporação (lembrando que valores de vazão abaixo de 1,5. 10-3 kg/s não formam um filme estável sobre toda a superfície). Quanto à inclinação da placa, valores próximos a horizontal acarretam em uma menor velocidade de escoamento do líquido, aumentando o tempo de residência do líquido em contato com a superfície aquecida da placa plana, beneficiando a troca térmica e consequentemente elevando os valores de %Evap, devido à inclinação dos raios solares.

Os maiores valores de porcentagem de evaporação ocorreram das 11:00 horas as 15:00 horas em todos os experimentos. Isso ocorre devido à influência dos altos valores de irradiância direta e baixos de irradiância difusa e das variáveis ambientais, pois neste horário o ambiente geralmente apresenta-se com baixos valores de umidade relativa ( $45,3 \pm 8,2$  % para Bagé e  $32,7 \pm 12,5$  % para São Paulo) e maiores valores de temperatura ambiente ( $18,5 \pm 6,2$  para Bagé e  $21\% \pm 7,5$  para São Paulo).

Os resultados mostraram uma taxa de evaporação mais elevada as 12:00 horas, sendo valores médios de  $23\% \pm 2$  para a cidade de Bagé e valores de  $20,7\% \pm 3$  para a cidade de São Paulo. Essa diferença pode ser explicada, pois Bagé apresentou um inverno de 2014, com comportamento atípico, com valores de temperatura ambiente e radiação solar incidente elevados, quando comparado com anos anteriores. Outro fato que aumenta a taxa de evaporação é quanto a velocidade do vento, que na região sul apresenta valores médios de  $8,2 \pm 3,1$  m/s enquanto na região sudeste este valor foi de  $4,3 \pm 1,2$  m/s.

#### **4 CONCLUSÃO**

O equipamento solar construído em Bagé apresentou melhores taxas de evaporação, quando comparado com as taxas de evaporação obtidas em equipamento similar instalado na cidade de São Paulo, para experimentos realizados no mês de julho. O principal resultado obtido foi à obtenção de taxas de evaporação consideráveis, o que nos leva a acreditar num futuro promissor para uso desse equipamento, não só nas cidades de teste como em todo o território nacional, uma vez que trata-se de um equipamento barato, de fácil instalação e manutenção e ecologicamente correto para evaporar soluções diluídas a partir da energia solar.

Um fato interessante a ser destacado é que alguns autores não recomendam a instalação de equipamentos solares em cidades localizadas no sul do Brasil e esse trabalho mostra exatamente o contrário, que mesmo na região sul e em mês de inverno a evaporação solar ainda é promissora.

#### **5 REFERÊNCIAS**

ALDABÓ, R. (2002) Energia Solar. Artliber: São Paulo.

- INCROPERA, F. P.; WITT, D. P. D. (1992) *Fundamentos de transferência de calor e massa*. Rio de Janeiro: Editora Guanabara Koogan S. A., 455.
- MACEDO, H. (1996) *Tratamento de águas com altas concentrações de cloretos*. 1996. 79f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica e Sanitária) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- SOUZA, T. R., SALVAGNINI, W. M., CAMACHO, J. L. P., TAQUEDA, M. E. S. (2008) Performance Of A Solar Energy Powered Falling Film Evaporator With Film Promoter. *Energy Conversion and Management*, 49, 3550 – 3559.