

TRATAMENTO DE EFLUENTES SALINOS POR EVAPORAÇÃO SOLAR VISANDO AO REAPROVEITAMENTO DA ÁGUA

DAVID, G.R.¹, SILVA, J.P.S.², VIEIRA, L.G.M.³

¹Universidade Federal de Uberlândia. gabriele.david@gmail.com

²Universidade Federal de Uberlândia. joaopaulosiqueirasilva@gmail.com

³Universidade Federal de Uberlândia. luizgustavo@feq.ufu.br

RESUMO

A água é um elemento essencial à vida. Todavia, nem sempre esse recurso natural encontra-se em condições físico-químicas disponíveis para as necessidades humanas, especialmente naqueles casos em que a concentração de sais prejudica sua potabilidade. A separação destes sais é ordinariamente realizada por processos evaporativos que requerem necessariamente uma fonte de calor. Neste aspecto, a energia solar pode ser perfeitamente utilizada por se tratar de um agente térmico limpo, disponível e renovável. Isto posto, este trabalho teve como objetivo tratar efluentes salinos mediante evaporação solar convencional para reaproveitamento da água. De acordo com os principais resultados experimentais, foi possível verificar que a produção de água dessalinizada por evaporação solar pode ser uma interessante alternativa técnica, principalmente para a realidade de pequenas comunidades nas quais a água é escassa ou inadequada ao consumo, com possibilidade de obtenção de até 2 L por metro quadrado por dia de exposição à radiação solar. O estudo mostrou ainda que a produção de água potável, além de depender da área disponível à coleta solar e da localidade de captação da energia solar, também sofreu forte influência do efeito coligativo devidos aos sais presentes no efluente.

PALAVRAS-CHAVE: evaporação; energia solar; efluente salino; água; potabilidade.

ABSTRACT

Water is an essential element of life. However, this feature is not always naturally found in physicochemical conditions available for human needs, especially in those cases in which the salt concentration affect its potability. The separation of these salts is ordinarily accomplished by evaporative processes that necessarily require a heat source. In this aspect, solar energy can be used perfectly for being an agent thermal clean, affordable and renewable. That said, this study aimed to treat saline wastewater by solar evaporation conventional water reuse. According to the main experimental results, we found that the production of desalinated water by solar evaporation can be an interesting alternative technique, especially for the reality of small communities where water is scarce or inadequate consumption, with the possibility of obtaining to 2 L per square meter per day of exposure to solar radiation. The study also showed that the production of drinking water, besides depending on the area available for solar collection and location capitation solar energy, also was strongly influenced by the effect coligativo due to the salts present in the effluent.

KEYWORDS: evaporation; solar energy; saline effluent; water; potability.

1. INTRODUÇÃO

Desde o surgimento da humanidade, o homem busca a descoberta de novas fontes de energia que podem ser renováveis ou não renováveis. A primeira descoberta foi o fogo e em seguida vieram as diversas outras fontes de energia que são conhecidas hoje como: petróleo, carvão, energia elétrica, eólica, biomassa, solar, entre outras.

A fonte energética de interesse nesse trabalho é a luz advinda do sol, por ser uma fonte renovável, abundante e até onde se sabe inesgotável, podendo ser perfeitamente convertida em calor e utilizada no tratamento de efluentes salinos visando à recuperação da água.

Uma maneira de se utilizar a energia solar é através do evaporador solar. Neste estudo, partiu-se da concepção simples de um evaporador solar visando à recuperação de água advinda de efluentes salinos. Esta simplicidade de construção e operação refletem-se em baixo custo, sendo uma alternativa interessante para a produção de água potável naquelas localidades remotas ou nas quais os seus recursos hídricos são escassos ou inadequados para o consumo direto.

Isto posto, este trabalho teve como principal objetivo estudar a produção de água potável a partir do tratamento de soluções salinas com a energia térmica advinda da luz do sol. Objetivou-se ainda para este tipo de evaporador, obter uma correlação físico-matemática, a fim de disponibilizar a pretensos usuários meios para previsão de possíveis produções de água potável em face de possíveis concentrações salinas contidas em águas salobras ou salinas.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Nesse projeto, foi construído um evaporador solar de simples efeito e baixo custo, utilizando duas bandejas de aço inoxidável de tamanhos diferentes, serpentina de aquecimento para um possível acoplamento de outras fontes de calor (tais como concentradores solares do tipo calha) e uma cúpula de vidro, como mostra a Figura 1. As duas maiores faces da cúpula de vidro foram dispostas de modo a perfazerem entre si um ângulo de 25° , cuja angulação é indicada pela literatura (SOARES, 2004) como a ideal para proporcionar uma boa taxa de condensação, escoamento e coleta das gotas de evaporado frente às taxas de insolação verificadas ao longo de todo o território nacional. Por sua vez, a base da cúpula de vidro tinha praticamente a mesma área da bandeja inferior, a fim de que a primeira pudesse ser encaixada nas abas da segunda.



Figura 1. Evaporador solar de simples efeito e baixo custo.

As dimensões das bandejas de aço inoxidável foram de 0,30 m de largura por 0,45 m de comprimento para a bandeja superior, responsável pelo armazenamento do efluente salino; e de 0,40 m de largura por 0,55 m de comprimento para a bandeja inferior, responsável pela coleta das gotas condensadas na bandeja inferior e respectivo direcionamento delas a um recipiente coletor (béquer graduado). As bandejas de aço inoxidável foram afixadas uma dentro da outra de modo a permanecer entre o fundo delas uma distância de pelo menos 0,05m, sendo que a bandeja superior permanecia nivelada, ao passo que à bandeja inferior foi lhe dada uma inclinação de 2° para que o condensado pudesse escoar por gravidade ao recipiente coletor (béquer graduado).

A água presente no efluente salino era evaporada da bandeja menor (superior) mediante aquecimento pela luz do sol e ao entrar em contato com a cúpula de vidro se condensava e escorria por ela até alcançar a bandeja maior (inferior). Uma vez na bandeja inferior, o evaporado/condensado, devido à inclinação, escoava gravitacionalmente até o recipiente de armazenamento. De acordo com a massa de água potável que era retirada do sistema por evaporação/condensação, uma mesma quantidade de água destilada líquida era injetada no efluente salino por intermédio de uma bomba peristáltica, a fim de manter ao longo de cada experimento a mesma concentração salina (efeito coligativo constante).

Os testes foram conduzidos com efluentes salinos constituídos por soluções aquosas de cloreto de sódio (NaCl) a diversas concentrações mássicas. No caso em epígrafe, as concentrações mássicas salinas foram manipuladas de 0 a 4%, o que corresponderam à salinidade das águas destilada e marítima (litoral brasileiro), respectivamente. Somente para fins de esclarecimentos, a faixa de salinidade mencionada anteriormente foi escolhida neste trabalho porque está de acordo com aquelas definidas na Resolução CONAMA N° 357 (17 de março de 2005) que traz as seguintes definições: “*águas doces* - águas com salinidade igual ou inferior a 0,5 ‰; *águas salobras* - águas com salinidade superior a 0,5 ‰ e inferior a 30 ‰ e *águas salinas* - águas com salinidade igual ou superior a 30 ‰”. Vale lembrar que o símbolo ‰ significa partes por mil.

Em cada uma das concentrações salinas definidas para este trabalho, 2 L de solução aquosa de NaCl eram preparados e transferidos para a bandeja superior para formar uma fina lâmina de fluido de aproximadamente 0,02 m de espessura para favorecer o aquecimento da solução e respectiva evaporação do fluido. Este sistema era diariamente exposto à luz solar durante um período de 7 h, compreendido das 9:00 às 16:00 horas. Somente para fins de registro, as temperaturas do efluente, do interior da estufa e do meio-ambiente eram monitoradas a cada hora de experimento por termopares devidamente calibrados. A massa de água potável era armazenada num béquer graduado e este, por sua vez, permanecia sobre o prato de uma balança digital para registrar e, posteriormente, avaliar aquela determinada produção.

Espera-se que a produção de água potável em evaporadores convencionais de simples efeito, similarmente ao utilizado neste trabalho, dependa de diversos fatores (físicos, químicos e geométricos), tais como a temperatura do meio-ambiente, a área de espelho *d'água* exposta à luz solar, a radiação solar média incidente naquela localidade, a salinidade do efluente e o tempo de exposição. Para correlacionar e explicar a influência destes diversos fatores sobre a produção de água potável no evaporador solar proposto neste trabalho, foi proposta pelos autores deste trabalho uma grandeza física denominada de *Número de Evaporação* (N_E). O *Número de Evaporação* consiste em um agrupamento adimensional que relaciona o fluxo mássico de água ou produção (P) ao longo do período de exposição, a radiação solar média da localidade (R) incidente sobre o evaporador, área do espelho *d'água* exposto à radiação (A) e a concentração mássica de sal do efluente (C), podendo ser escrito genericamente sob a forma da Equação (1).

$$N_E = PR^a A^b C^c \quad (1)$$

Os valores das constantes “a”, “b” e “c” podem ser avaliados analogamente à aplicação do *Teorema π -Buckingham* (BIRD *et al.*, 2003), nas quais as grandezas físicas do segundo membro da Equação (2) são decompostas genericamente nas dimensões absolutas de massa (M), comprimento (L) e tempo (T). Considerando que o *Número de Evaporação* (N_E) é um agrupamento adimensional ($M^0L^0T^0$), pode-se perfeitamente constatar que tais constantes devem estar necessariamente correlacionadas por um sistema de equações lineares, nos termos da Equação 2.

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 0 & 2 & -3 \\ -2 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -1 \\ 2 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

Por fim, vale mencionar que os testes experimentais foram realizados no *Campus Santa Mônica* da Universidade Federal de Uberlândia, aleatoriamente em relação à concentração salina, no período de 24 de agosto a 05 de setembro de 2012. Os dados de Radiação Solar Incidente referentes a este período foram consultados no *site* do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).

3. RESULTADOS

Preliminarmente, a análise dimensional permitiu a avaliação dos valores dos expoentes da equação que regem o *Número de Evaporação* (N_E), cujos valores são apresentados pela Equação (3).

$$\begin{pmatrix} a \\ b \\ c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -0,50 \\ +0,25 \\ -0,50 \end{pmatrix} \quad (3)$$

Por conseguinte, uma vez avaliados os expoentes da definição do *Número de Evaporação* (N_E), este adimensional pôde tomar a forma algébrica estabelecida pela Equação (4).

$$N_E = \frac{PA^{\frac{1}{4}}}{\sqrt{RC}} \quad (4)$$

Superada a etapa de definição do *Número de Evaporação* (N_E), as principais informações experimentais levantadas no evaporador solar para cada dia de experimento (período de 7 h de exposição diária à luz solar), tais como a concentração salina (C), a radiação média incidente no período (R), a temperatura média do efluente salino (T_{M1}), a temperatura média no interior da cúpula transparente (T_{M2}), a temperatura média do meio-ambiente (T_{M3}) e a massa de água dessalinizada produzida (M) são apresentadas na Tabela I.

Tabela I. Dados experimentais referente ao desempenho do evaporador solar.

Data	C (kg/m ³)	R (kJ/m ²)	T _{M1} (°C)	T _{M2} (°C)	T _{M3} (°C)	M (kg)
04/09/2012	0,0	1964	51,2	56,1	33,8	0,27987
03/09/2012	5,0	1922	54,5	59,0	36,0	0,28269
31/08/2012	7,5	1979	52,8	57,9	34,0	0,27057
30/08/2012	10,0	1946	50,7	55,1	32,5	0,26354
29/08/2012	20,0	1884	48,1	52,2	31,5	0,18206

24/08/2012	30,0	1911	46,9	48,8	29,3	0,23241
05/09/2012	40,0	1973	51,8	56,4	33,1	0,28246

Nas condições operacionais utilizadas para o evaporador solar, foi possível constatar que este equipamento, apesar de sua simplicidade estrutural, foi capaz de produzir diariamente (7 h de exposição ao sol) um volume médio de água potável de aproximadamente 2 L por metro quadrado de espelho de solução exposta à radiação solar da cidade de Uberlândia (agosto/setembro/2012). Também foi possível observar que os *Números de Evaporação* (N_E) estão fortemente correlacionados com a concentração de sal do efluente, conforme se vislumbra da Figura 2.

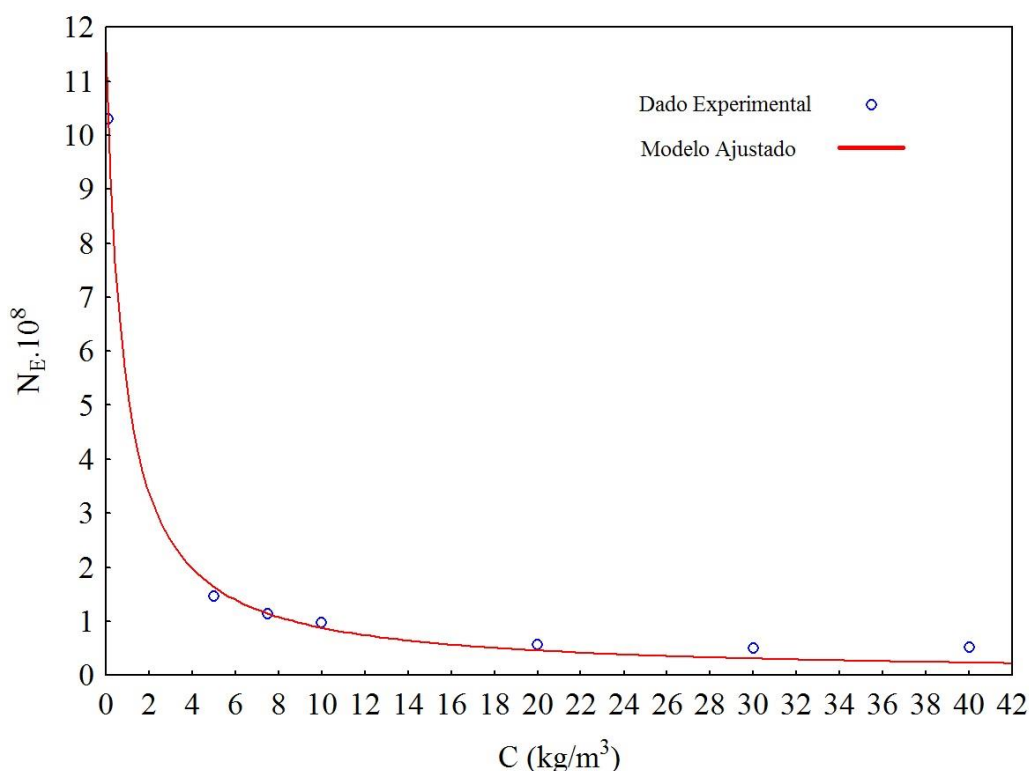


Figura 2. Comportamento do Número de Evaporação (N_E) com a concentração de sal do efluente.

Por sua vez, a Equação 5 representa o modelo físico-matemático ajustado ao comportamento do *Número de Evaporação* (N_E) com a concentração salina (C) com uma variância de 99,79%.

$$N_E \cdot 10^8 = \frac{1}{0,086628 + 0,104882C} \quad (5)$$

De acordo com o modelo físico-matemático ajustado para o fenômeno em estudo, pôde-se verificar que o *Número de Evaporação* sofreu intensamente a influência dos efeitos coligativos causados pelo soluto no efluente. Desta forma, quanto maior for a presença de sais em determinado efluente, maior será a dificuldade de evaporação do fluido e, portanto, menor também será a produção de água para consumo humano.

É interessante notar que a partir das Equações (4) e (5) - definição do *Número de Evaporação* (N_E) e correlação deste com a concentração de sal ($N_E \times C$), respectivamente, é possível propor a pretensos usuários uma metodologia de previsão da área de espelho d'água requerida para alcançar a

meta de produção de determinada massa de água potável em um evaporador solar similar ao empregado neste trabalho. Genericamente, o algoritmo poderia ser sistematizado pela Figura 3.

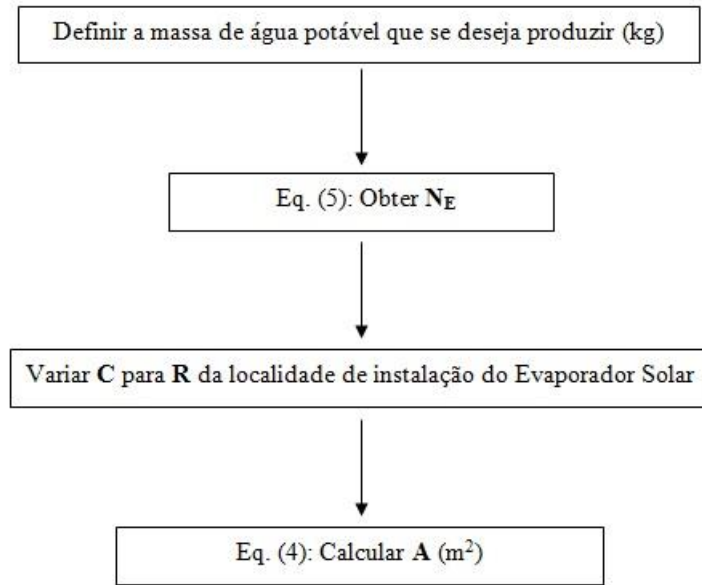


Figura 3. Algoritmo para a estimativa de área de espelho d'água a partir das necessidades de pretensos usuários.

Considerando que a radiação média de radiação solar no território brasileiro está por volta de 2000 kJ/(h.m²), foi possível, por intermédio do algoritmo apresentado anteriormente e seu respectivo equacionamento, estimar a área necessária de espelho d'água para que o evaporador solar tenha condições de fornecer diariamente uma determinada quantidade de massa estipulada pelo consumidor, cuja representação gráfica está disposta na Figura 4.

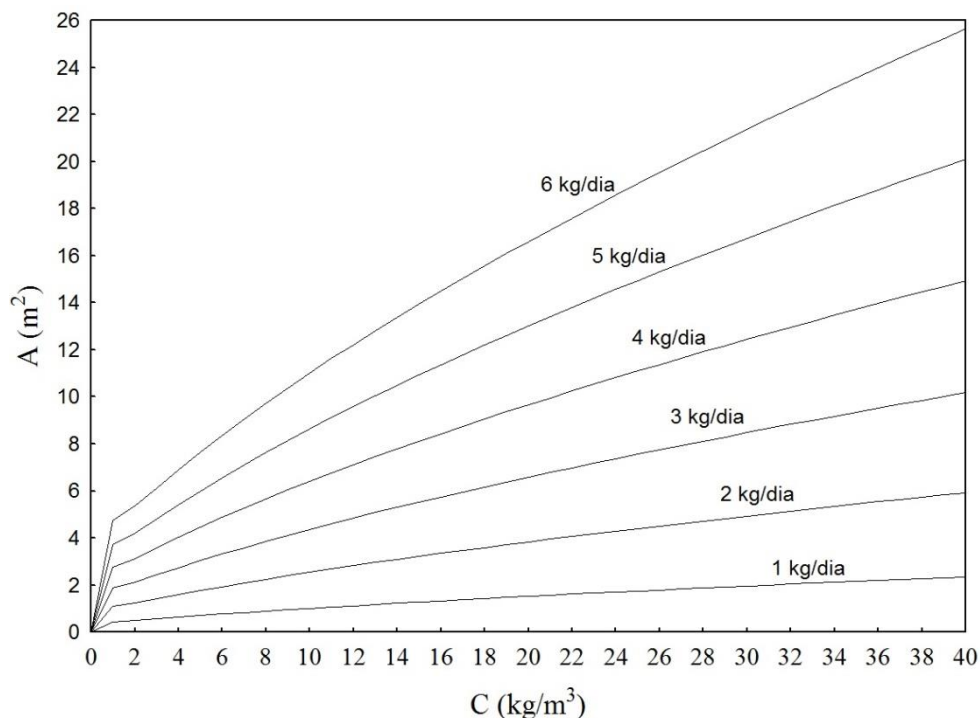


Figura 4. Área de espelho d'água de solução salina para garantir determinada produção de água potável em um evaporador solar.

Acredita-se que o evaporador solar de simples efeito, como o proposto neste trabalho, representa uma interessante alternativa para a produção de água potável a partir de efluentes salobros ou salinos, principalmente para as pequenas comunidades ou núcleos familiares. Pela metodologia desenvolvida neste trabalho, ficou evidente que a concentração salina dos efluentes desempenhou um forte efeito coligativo de modo a diminuir a taxa de produção de condensado, requerendo, portanto, uma crescente demanda de área a ser diretamente exposta à luz do sol.

Assim, considerando que um indivíduo adulto necessite de aproximadamente 2 L de água diários para manter sua integridade físico-biológica, que o subsolo do semi-árido brasileiro possui abundância de águas salobras ($0,5 \leq C (\%) \leq 3,0$), somente a título ilustrativo, poder-se-ia afirmar que para uma família constituída por três pessoas, uma área de aproximadamente 22 m² seria suficiente para satisfazer a sede deste núcleo familiar (informação baseada na Figura 4). Por fim, sob a óptica industrial, a dessalinização da água poderia ser perfeitamente factível por esta metodologia, desde que o fator limitante ao processo não fosse a indisponibilidade de áreas para a instalação dos evaporadores solares.

4. CONCLUSÕES

Após a análise das principais informações experimentais acerca do evaporador solar, foi possível concluir que este equipamento pode consistir em uma interessante alternativa para dessalinização de águas salobras ou salinas, a partir de poucos investimentos e mediante a utilização de uma fonte de energia renovável e abundante que é a luz solar.

A dessalinização de água a partir da energia solar permitiu desenvolver uma metodologia consistente baseada na propositura de um agrupamento adimensional, denominado de *Número de Evaporação* (NE), cuja vantagem foi agregar simultaneamente todos os efeitos presentes no fenômenos de evaporação/condensação, bem como permitir ao usuário uma ferramenta de *scale-up*, conforme suas reais necessidades. Em tese, a metodologia desenvolvida neste trabalho permitiu avaliar a área dos evaporadores a partir de outros fatores que são praticamente imutáveis sob a óptica do usuário e muito bem-postos pela natureza, tais como a salinidade que depende das características geológicas do solo e da radiação solar incidente que depende do clima daquela localidade.

Em se tratando de evaporação solar, foi possível constatar que o aumento da área de espelho d'água (A) ou da radiação média diária (R) favoreceu o incremento da produção diária de água dessalinizada (P). Já o aumento da concentração de sal (C) foi um fator que desfavoreceu a produção de condensado porque elevou o ponto de ebulição da água devido aos efeitos coligativos causados pelo soluto.

5. SIMBOLOGIA

A - área do espelho d'água exposta à luz solar (m²)

C - concentração mássica de NaCl em solução aquosa (kg/m³)

M - massa de água dessalinizada produzida pelo evaporador solar (kg)

N_E - *Número de Evaporação* (-)

P - fluxo mássico de água dessalinizada (kg/m²s)

R - Radiação solar média na cidade de Uberlândia (MG) entre agosto e setembro de 2012 (kJ/m²)

T_{M1} - Temperatura média do efluente contido na bandeja superior do evaporador solar (°C)

T_{M2} - Temperatura média da parte interna da cúpula transparente do evaporador solar (°C)

T_{M3} - Temperatura média do meio-ambiente ($^{\circ}\text{C}$)

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pelos recursos concedidos no Projeto de Participação Coletiva em Evento Científico ou Tecnológico (PCE-00019-13), bem como ao CNPq e à FAPEMIG pelo apoio financeiro para concepção e execução deste projeto.

7. REFERÊNCIAS

BIRD, R. B., STEWART, W.E., LIGHTFOOT, E.N, Transport Phenomena, 2004.

SOARES, C. Tratamento de água uni familiar através da destilação solar natural utilizando água salgada, salobra e doce contaminada. Dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária e Ambiental) – Curso de Pós-graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina, SC, 2004.