



## X Congresso Brasileiro de Engenharia Química Iniciação Científica

*"Influência da pesquisa em Engenharia Química no desenvolvimento tecnológico e industrial brasileiro"*

Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro  
Universidade Severino Sombra  
Vassouras – RJ – Brasil

### ESTUDO E DESENVOLVIMENTO DE ADIMENSIONAL PARA ANÁLISE DE DADOS DE EVAPORAÇÃO DA ÁGUA UTILIZANDO ENERGIA SOLAR

DAVID\*<sup>1</sup>, G. R.; SILVA<sup>2</sup>, J. P. S.; VIEIRA<sup>3</sup>, L.G. M.

<sup>1</sup>Bolsista de Iniciação Científica - CNPq <sup>2</sup>Aluno de Iniciação Científica <sup>3</sup>Docente - FEQUI/UFU  
Faculdade de Engenharia Química – UFU  
Av. João Naves de Ávila, 2121, Bloco 1K do Campus Santa Mônica. Uberlândia - Minas Gerais -  
Brasil – CEP 38408-144  
email: luizgustavo.ufu@gmail.com

**RESUMO** - A água é um elemento fundamental à vida. Todavia, nem sempre esse recurso natural encontra-se em condições físico-químicas disponíveis e apropriadas para o consumo humano, principalmente naqueles casos em que a concentração de sais prejudica sua potabilidade. A separação destes sais pode ser realizada por processos evaporativos que requerem uma fonte de calor. A energia solar pode ser perfeitamente utilizada por se tratar de um agente térmico limpo, disponível e renovável. Após a realização de ensaios e coleta de dados experimentais, deparou-se com um problema de como analisar e relacionar os diversos fatores que influenciam o processo de purificação da água, como área de calha disponível à coleta solar, localidade de captação da energia, concentração de sais dissolvidos, radiação média diária, produção diária de água potável e, além disso, tem-se a influência do efeito coligativo. A solução foi a elaboração de um número adimensional, utilizando a metodologia do teorema  $\pi$ -Buckingham, o qual relaciona esses fatores e fornece um resultado coerente e de fácil interpretação e análise.

**Palavras chave:** energia renovável, Teorema  $\pi$ -Buckingham, efeito coligativo.

### INTRODUÇÃO

Água em quantidade suficiente e de boa qualidade é essencial para a vida. Porém, no começo de 2000 um sexto da população do mundo, 1.1 bilhão de pessoas, não tinha acesso a suprimentos de água e outros mais não tinham acesso à água potável (WHO/UNICEF/ WSSCC, 2000).

Segundo Cravo e Cardoso (1996), o consumo de água doce no mundo aumenta a ritmo superior ao do crescimento da população, restando como uma das saídas para

satisfazer as necessidades hídricas, a produção de água doce retirando-a do mar ou das águas salobras dos açudes e poços.

Grande parte do semiárido brasileiro caracteriza-se por apresentar limitada e irregular disponibilidade de recursos hídricos, além de elevados níveis de salinidade nos solos e na água, principalmente em áreas cristalinas. Em algumas regiões a carência extrema de água de boa qualidade força as populações a consumirem águas com elevados níveis de contaminação biológica e química (sais), com consequentes danos à saúde.

No passado, os governos dos países em desenvolvimento investiram muito esforço na instalação de sofisticadas aparelhagens para o tratamento de água, sistemas de abastecimento e sistemas públicos de distribuição de água. Entretanto, as aparelhagens convencionais de tratamento frequentemente falham na produção de água boa para consumo. A falta de operadores treinados, fornecimento confiável de substâncias químicas e peças de reposição, como também limitação financeira, por vezes atrapalha a operação e a manutenção correta do sistema. Desse modo, muitas vezes isto fica sob a responsabilidade exclusiva dos indivíduos da família.

Este sistema pode ser aplicado em regiões carentes, onde geralmente tem-se a utilização de água de poços para suprimento das necessidades pessoais, em regiões com baixo fornecimento de eletricidade e pouca disponibilidade de água potável, como em regiões isoladas, em ilhas, em vilarejos próximos a áreas desérticas e em proximidade ao mar.

As atividades referentes a esse trabalho foram realizadas, portanto, utilizando-se o simples método de evaporação e recondensação para dessalinização da água salobra. Apesar de ser o processo mais antigo, apresenta-se como possível solucionador dos problemas. Grosso modo, o método consistiu em aproveitar a incidência de luz solar para separar a água dos sais, evaporando-a e convertendo, logo em seguida, por condensação, o vapor em água líquida potável.

Para que a retirada dos dados experimentais fosse realizada, inicialmente projetou-se um condensador solar de baixo custo, constituído basicamente de duas bandejas de tamanhos diferentes e um teto de vidro removível devidamente encaixado sobre a bandeja maior. Trata-se de um equipamento de fácil instalação, manutenção e higienização com base nos artigos publicados por Barreto (2009) e Soares (2004). O condensador solar é mostrado na Figura 1 a seguir.



**Figura 1 - Condensador Solar**

Na bandeja menor foi depositada a salmoura e a bandeja maior foi levemente inclinada para que a água condensada escoasse através de um pequeno orifício na mesma, levando a água diretamente a um reservatório.

Para que se alcançasse maior eficiência no processo de evaporação e condensação da água, foi instalado um trocador de calor no interior da bandeja menor, com a passagem de água quente por entre o tubo de alumínio. O aquecimento dessa água foi realizado com a instalação de um concentrador solar, apresentado na Figura 2, também de baixo custo de construção.



**Figura 2 - Concentrador Solar**

O concentrador solar trata-se de uma calha parabólica espelhada, que converge os raios solares sobre o foco da parábola, onde foram instalados três passes de tubos para o aquecimento da água circulante Concentrador-Evaporador.

## METODOLOGIA

Como se tratavam de dias diferentes na coleta dos dados experimentais, as condições climáticas variavam e, conseqüentemente, a comparação dos dados experimentais sem antes um tratamento seria inapropriado. Portanto, para que uma análise coerente dos dados fosse feita, foi proposta pelos autores do artigo a criação de um adimensional através do Teorema  $\pi$ -Buckingham, que congregasse em si todos principais efeitos envolvidos no processo de evaporação solar, sendo eles a produção de água (P) no dia, a radiação solar média de Uberlândia (R), a concentração de sal na salmoura (C) e a área de espelho d'água exposto à radiação (A).

Ao adimensional, foi dado o nome de Número de Evaporação (NE), que pôde ser escrito genericamente sob a forma da Equação (1).

$$NE = P \cdot R^a \cdot A^b \cdot C^c \quad (1)$$

Cada fator (P, R, A e C) foi decomposto genericamente nas dimensões absolutas de massa (M), comprimento (L) e tempo (T), como é mostrado na Tabela 1.

**Tabela 1 – Dimensões Absolutas**

Fator	Unidade	Dimensão Absoluta
NE	$\text{kg}^0 \text{m}^0 \text{s}^0$	$\text{M}^0 \text{L}^0 \text{T}^0$
P	$\text{kg}/(\text{m}^2 \text{s})$	$\text{M}/(\text{L}^2 \text{T})$
A	$\text{m}^2$	$\text{L}^2$
R	$\text{J}/\text{m}^2$	$\text{MT}^{-2}$
C	$\text{kg}/\text{m}^3$	$\text{ML}^{-3}$

A partir da Equação (1) e com os dados de dimensões absolutas na Tabela 1, obteve-se a Equação (2) a seguir.

$$\text{M}^0 \text{L}^0 \text{T}^0 = (\text{M}^1 \text{T}^{-1} \text{L}^{-2}) \cdot (\text{MT}^{-2})^a \cdot (\text{L}^2)^b \cdot (\text{ML}^{-3})^c \quad (2)$$

Desse modo, as constantes “a”, “b” e “c” puderam ser correlacionadas por um sistema

de equações lineares, como é mostrado na Equação (3).

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

$$\begin{cases} a = -0,50 \\ b = +0,25 \\ c = -0,50 \end{cases}$$

Sendo a forma final do Número de Evaporação mostrada na Equação (4).

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

## PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Para observação da produtividade em diferentes condições de salinidade, as concentrações de sal experimentais foram definidas de acordo com as faixas de salinidade presentes na Resolução CONAMA N° 357 (17 de março de 2005), onde “águas doces” são águas com salinidade igual ou inferior a 0,5‰, “águas salobras” são águas com salinidade superior a 0,5‰ e inferior a 30,0‰ e “águas salinas” apresentam salinidade igual ou superior a 30‰. Com relação à composição das soluções, sabe-se que a água dos oceanos da Terra tem uma salinidade média de 35‰ e que aproximadamente 96% dos sais são constituídos de cloreto de sódio (NaCl). Com isso, as concentrações escolhidas foram: zero (sem adição de sal na água); 0,50; 0,75; 1,00; 2,00; 3,00 e 4,00% de NaCl.

A cada sai ensolarado e sem nuvens foi realizado um experimento a uma concentração diferente. Às oito horas começava-se a montagem do sistema, dos equipamentos, da preparação da salmoura e da pesagem dos reservatórios. Às nove horas a água salobra era despejada sobre a bandeja menor e o teto de vidro era cuidadosamente encaixado sobre a bandeja maior.

É importante ressaltar que, através de um sistema de travas e rodinhas presentes nos quatro cantos da base do concentrador solar, foi possível ajustar o seu posicionamento em relação ao sol, sendo necessário corrigi-lo de quinze em quinze minutos. Foi necessária

também a instalação de uma pequena bomba na base no concentrador para que a água aquecida por ele circulasse no sistema.

Apenas para registro e monitoramento, as temperaturas da solução, do ambiente dentro e fora da estufa, da água circulante na entrada e na saída do concentrador e na entrada e na saída do evaporador foram medidas de hora em hora. A massa de água condensada contida no reservatório também era aferida em intervalos de uma hora e, ao final de sete horas de exposição (exatamente às dezesseis horas), eram somadas. Desse modo, a massa total de água doce, para determinada concentração salina, era obtida.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 2 a seguir, são mostradas as temperaturas médias durante as sete horas de exposição (9:00 às 16:00) para cada concentração.

**Tabela 2 – Dados de temperatura média ( $T_i$ ) para cada concentração (C)**

C (kg/m <sup>3</sup> )	T1 (°C)	T2 (°C)	T3 (°C)	T4 (°C)	T5 (°C)	T6 (°C)	T7 (°C)
0,00	52,1	57,9	31,0	52,4	55,4	54,1	53,9
5,00	47,5	51,6	30,1	48,2	50,4	50,0	49,4
7,50	47,9	51,0	31,2	47,4	49,0	48,6	48,1
10,00	48,1	51,9	31,6	47,5	49,5	49,0	48,8
20,00	53,5	58,7	34,7	53,8	56,2	55,6	55,2
30,00	54,2	58,6	30,7	53,3	56,0	55,2	54,9
40,00	48,6	52,8	30,5	47,0	49,6	49,0	48,8

Em que,

T1 - Temperatura da amostra;

T2 - Temperatura ambiente na estufa;

T3 - Temperatura ambiente fora da estufa;

T4 - Temperatura da água circulante na entrada do concentrador;

T5 - Temperatura da água circulante na saída do concentrador;

T6 - Temperatura da água circulante na entrada do evaporador;

T7 - Temperatura da água circulante na saída do evaporador.

Sabendo-se que a área de espelho d'água com sais exposta à radiação solar (A) foi de 0,135m<sup>2</sup> e que um dia de exposição equivale a sete horas de exposição, ou 25200s, foi construída a Tabela 3 com os dados experimentais de massa de água diária potável produzida (MAD), em kg, e os dados de produtividade (P) dados em kg/(s.m<sup>2</sup>).

**Tabela 3 - Dados Experimentais de Massa de Água Diária (MAD) e de Produtividade (P) para cada Concentração (C)**

C (kg/m <sup>3</sup> )	MAD (kg)	P (kg/(dia.m <sup>2</sup> ))
0,01	0,38452	2,848
5,00	0,23947	1,774
7,50	0,18186	1,347
10,00	0,19128	1,417
20,00	0,38316	2,838
30,00	0,38059	2,819
40,00	0,20499	1,518

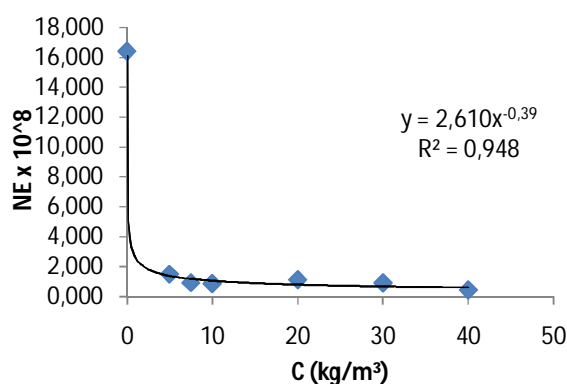
Os dados de radiação (R) necessários para o cálculo do Número de Evaporação (NE) foram retirados do site do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e são mostrados na Tabela 4 a seguir, assim como os valores de produtividade em kg/s.m<sup>2</sup> e, finalmente, os valores adimensionais do Número de Evaporação para cada concentração de solução de sal.

**Tabela 4 -Dados de Produtividade (P), Radiação (R) e Número de Evaporação (NE) para cada Concentração (C).**

C (kg/m <sup>3</sup> )	P (kg/s.m <sup>2</sup> )	R (J/m <sup>2</sup> )	NEx10 <sup>-8</sup>
0,01	1,130.10 <sup>-4</sup>	1742759	16,412
5,00	7,039.10 <sup>-5</sup>	1613763	1,502
7,50	5,345.10 <sup>-5</sup>	1611493	0,932
10,00	5,622.10 <sup>-5</sup>	1540277	0,868

C (kg/m <sup>3</sup> )	P (kg/s.m <sup>2</sup> )	R (J/m <sup>2</sup> )	NEx10 <sup>-8</sup>
20,00	1,126.10 <sup>-4</sup>	1802694	1,137
30,00	1,119.10 <sup>-4</sup>	1831483	0,915
40,00	6,026.10 <sup>-5</sup>	1729049	0,439

Os dados de Número de Evaporação e concentração foram dispostos em um gráfico e uma curva de tendência foi criada, ajustando os pontos de maneira eficiente, como é mostrado na Figura 3.



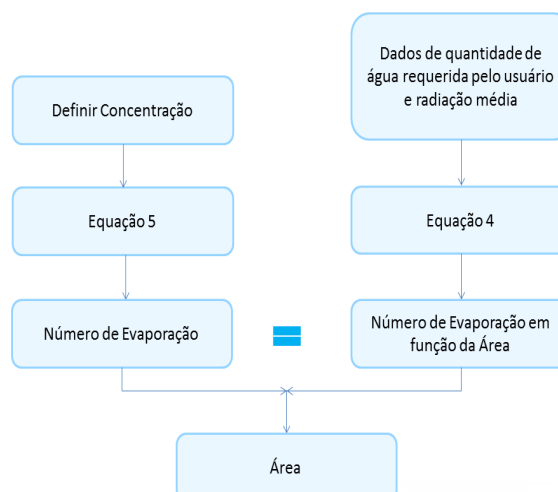
**Figura 3 – Gráfico Número de Evaporação (NE) versus Concentração (C)**

Observa-se que o ajuste realizado na Figura 3 obteve um coeficiente de correlação de 0,9482, indicando que a curva representa bem os dados e que, dentro dessa faixa de concentrações. Nota-se a tendência da curva, mostrando que, com o aumento da concentração salina, o adimensional tende a zero, evidenciando a queda na produtividade de água potável.

Conforme é mostrado na Figura 3, a correlação encontrada que ajusta bem os dados é reescrita conforme mostrado na Equação (5).

$$NE \cdot 10^8 = 2,6108C^{-0,395} \quad (5)$$

Desse modo, com o uso das Equações (4) e (5), é possível serem feitas previsões sobre a área de espelho d'água com sais na construção do evaporador que é necessária para que determinada quantidade de água seja produzida. Esse procedimento de projeto é mostrado na Figura 4 a seguir.



**Figura 4 – Procedimento de Projeto**

## CONCLUSÕES

O projeto tem grande potencial para atender populações que não têm acesso à água própria para o consumo devido ao seu baixo custo de investimento; à facilidade de limpeza, operação e manutenção; por utilizar de energia solar, que é abundante, limpa e renovável; e por apresentar bons resultados tendo em vista a simplicidade de projeto.

Pela construção do adimensional foi possível observar que com o aumento da concentração salina houve um decréscimo de água dessalinizada. Isso já era esperado, devido ao efeito coligativo das moléculas de sal e a água. Além disso, o agrupamento adimensional agrega simultaneamente os principais efeitos envolvidos na evaporação solar, permitindo ao usuário uma ferramenta de *scale-up* e a previsão do tamanho dos evaporadores, a partir da concentração salina das águas disponíveis para seu consumo, da quantidade de água que será requerida e por uma média da radiação solar.

## REFERÊNCIAS

- BARRETO, J. A., Comparação de Eficiência de Evaporadores de Urina e Estudo da Variação das Propriedades da Urina Durante o Ciclo.
- BIRD, R. B., STEWART, W.E., LIGHTFOOT, E.N., Transport Phenomena, 2004.
- BRASIL, Resolução CONAMA nº357, de 17

- de março de 2005. Classificação de águas, doces, salobras e salinas do Território Nacional. Publicado no D.O.U.
- CRAVO, J. G.; CARDOSO, H. E. Projeto de dessalinização de solos e água. Nota Técnica nº1 Brasília/DF: SRH/MMA, 1996.
- Desinfecção solar da água: Guia de Aplicações do Sodis, Instituto Federal Suíço de Ciência e Tecnologia Aquática, 2002, Disponível em:  
[http://www.sodis.ch/methode/anwendung/ausbildungsmaterial/dokumente/material/manual\\_p.pdf](http://www.sodis.ch/methode/anwendung/ausbildungsmaterial/dokumente/material/manual_p.pdf), Acesso: 16/11/2013.
- SOARES, C. Tratamento de Água Uni Familiar Através de 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.
- WHO/ UNICEF/ WSSCC (2000): Global Water Supply and Sanitation Assessment 2000 Report.

### **AGRADECIMENTOS**

Os autores agradecem à Universidade Federal de Uberlândia e a Faculdade de Engenharia Química. Assim como ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo apoio financeiro e ao X Congresso Brasileiro de Engenharia Química Iniciação Científica (COBEQ IC) pela oportunidade de exposição desse trabalho.