

DESEMPENHO EM CAMPO DE UM DESSALINIZADOR SOLAR TÉRMICO COM RECUPERAÇÃO DE CALOR E AQUECIMENTO DIRETO

Maria Eugênia Vieira da Silva – eugenia@sol.les.ufc.br

¹Universidade Federal do Ceará, Departamento de Engenharia Mecânica

Klemens Joachim Schwarzer – schwarzer@fh-aachen.de

University of Applied Science Aachen, Juelich Division

Régio Davis Barros Alves¹ – regio@posmec.ufc.br

Ivonce Aires Campos – ivonce@gmail.com.br

Instituto de Desenvolvimento e Inovação

Amaral Vieira – amaralvieira@wirelink.com.br

Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico

2602 Outros (Conversão Térmica de Energia de Energia Solar)

Resumo. Este artigo apresenta as medições experimentais e um procedimento de cálculo baseado nas equações de conservação de massa e de energia necessários na determinação da eficiência de um dessalinizador térmico com recuperação de calor, operando com aquecimento direto. Estão apresentados: o princípio de funcionamento do dessalinizador solar com torre térmica de recuperação de calor, o procedimento para determinação da eficiência térmica máxima dos estágios (bandejas), as equações de cálculo da eficiência e da razão de ganho (gain output ratio) e as medições de temperatura, massa de água dessalinizada produzida, radiação solar. Para um dia parcialmente ensolarado, a produção medida no período de 24 horas foi de 40L, o coeficiente de desempenho da torre foi de 6,34 e a eficiência de produção da torre com recuperação de calor foi de 67%, para uma insolação no período de 74MJ.

Palavras-chave: Dessalinização, Recuperação de calor, Energia Solar.

1. INTRODUÇÃO

A idéia de se produzir água para consumo humano de água salgada ou salobra, seja do mar ou subterrânea de terrenos cristalinos, tem sido estudada por muitos anos e a utilização de energia solar para alimentar esse processo é também muito antiga.

Diferentes tipos de dessalinizadores solares térmicos podem ser encontrados na literatura (Dunkle, 1961; Malik *et al.* 1982; Zhang *et al.* 2003), entre outros. O modelo mais simples é o *dessalinizador tipo tanque* que tem como principal vantagem o baixo custo de instalação, mas as desvantagens de baixa eficiência e a acumulação de sais e algas em sua base. O dessalinizador de tanque consiste de um tanque inferior pintado de preto onde fica a água salobra e de uma superfície transparente como cobertura. A radiação solar passa através da cobertura transparente e é absorvida pela água salobra, que é então aquecida e evapora. O vapor sobe e ao entrar em contacto com a superfície transparente, mais fria, condensa tornando-se água líquida pura. O condensado escoava através a superfície transparente inclinada para ser coletado fora do dessalinizador. Suas características são a sua facilidade de construção e a sua baixa produtividade, que varia na faixa de 2-6 L/m²dia.

O objetivo deste artigo é a apresentação de um dessalinizador solar com recuperação de calor na torre e aquecimento direto, de um modelo de cálculo da produção máxima da torre, de medições experimentais realizadas em testes de campo e dos valores que caracterizam o desempenho do equipamento: eficiência e razão de ganho de produção (*gain output ratio*).

O dessalinizador térmico com recuperação de calor possui dois componentes: uma torre com múltiplos estágios e um ou mais coletores solares planos. Água salgada ou água salobra pode ser usada na alimentação da torre, que produz água dessalinizada e descontaminada nos seus estágios horizontais. Os coletores solares são usados na absorção de radiação solar, que é transferida para uma corrente de fluido, a própria água dessalinizada no processo de aquecimento direto, que transporta essa energia para a torre de dessalinização. Algumas versões desses dessalinizadores vêm sendo testadas na Alemanha, Espanha, Índia e Brasil e os testes de campo mostram dois resultados importantes: o dessalinizador pode produzir de 15 a 18 L/m².dia, que representa um fator de 5 a 6 vezes superior à produção do dessalinizador de tanque; a modularidade do equipamento, com unidades individuais produzindo cerca de 15L/dia, possibilitando a instalação de sistemas com maiores capacidades (1000 L/m².dia), (Schwarzer *et al.* 2008, 2008b, 2006, 2000; Hannich, 2000; Lima, 2000; Coutinho, 2003).

Os componentes do sistema são a torre de dessalinização e os coletores de energia solar. Na torre, estágios múltiplos de evaporação-condensação são arrançados verticalmente, um acima do outro. Cada estágio recupera calor de condensação do vapor produzido no estágio imediatamente inferior. O condensado escorre nas superfícies inclinadas e flui através de canais de escoamento para ser coletado em um tanque. Neste dessalinizador, as bandejas dos estágios são

metálicas e a radiação solar é absorvida em coletores planos de alto desempenho. A água salgada no estágio inferior é aquecida até temperaturas de 95 ~ 100 °C. O fluido de trabalho no coletor é a água dessalinizada, evitando o uso de um trocador de calor adicional. O fluxo de água salgada é de cima para baixo, em contra-corrente com o fluxo de calor. O mecanismo de alimentação de água salgada é mecânico. Figura 1 é uma fotografia do dessalinizador na base de teste, em Fortaleza.



Figura1 – Fotografia do dessalinizador solar com coletores planos e torre horizontal.

A múltipla recuperação de calor da entalpia de evaporação conduz a uma produção mais elevada de água dessalinizada por m² de área de coletor, quando compara à produção do dessalinizador de tanque. Dependendo do número de estágios, essa produção pode ser aumentada de um fator de 3 a 4 vezes. Dependendo da radiação solar incidente, a produção diária pode alcançar taxas de 10 a 17L/m².

O dessalinizador é modular, permitindo a instalação de pequenas e grandes capacidades, de até 5m³ por dia. A torre de dessalinização pode ter de 5 a 7 estágios para o processo de recuperação de calor. Uma característica importante é que não há necessidade de produtos para operação nem para a limpeza, reduzindo os custos de manutenção e rejeitos para o ambiente.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Para que o desempenho do dessalinizador pudesse ser determinado, foram necessários a realização de medições experimentais em um protótipo e o desenvolvimento de um modelo de referência para calcular a produção máxima das bandejas, e conseqüentemente da torre. As medições experimentais foram usadas na determinação do desempenho do dessalinizador em teste de campo e modelo de referência foi usado na determinação da produção máxima das bandejas para fins de comparação.

Os testes de campo incluem medições realizadas sob condições reais de operação no campo de temperatura em vários pontos pré-definidos dos coletores e da torre de dessalinização, da produção em um período de 24 horas (produções diária e noturna) e da radiação solar global.

A produção máxima das bandejas foi calculada utilizando-se um modelo desenvolvido por Silva e Schwarzer (2008) a partir de medições realizadas na Fachhochschule Aachen - Instituto Solar de Juelich, Figura 2. Foi necessária a determinação da produção de condensado em temperaturas mais elevadas, próximas a 100°C, visto que as informações disponíveis na literatura para dessalinizadores solares forneciam valores muito diferentes entre si para temperaturas superiores a 60°C.

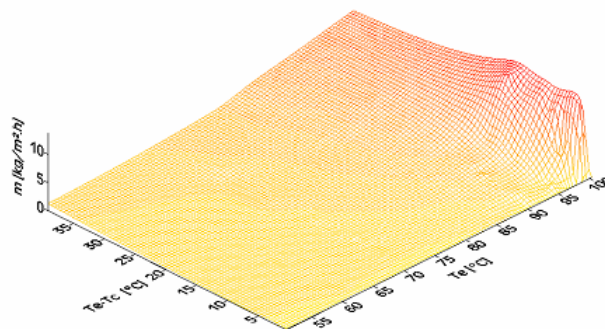


Figura 2 – Produção de água no dessalinizador de simples estágio com temperaturas de evaporação e de condensação controladas (Ref. Silva e Schwarzer, 2008).

Nos trabalhos experimentais do SIJ, um dessalinizador de simples estágio foi construído para gerar medições da produção de condensado em função dessas temperaturas e da inclinação da superfície de condensação e com temperaturas de evaporação e condensação controladas. No modelo desenvolvido, que utiliza relações psicrométricas para o ar úmido, foi possível tanto a determinação dos percentuais de calor latente e sensível no processo, quanto a determinação do fluxo de condensado a partir de medições de temperatura e das propriedades termodinâmicas e termo-físicas da água.

2.1 Eficiência e Razão de Ganho de Calor

A expressão do balanço de energia no volume de armazenamento da torre é expressa pela Eq.(1), na qual a energia para operar o dessalinizador é proveniente dos coletores planos. Essa energia é usada para vaporizar parte da água, para aquecer a água nesse volume e parte é perdida ou para o ambiente ou para a água de circulação que deixa a torre.

$$A_{col} \cdot \dot{E}_{Sol}(t) \eta_{Col} = m_w c_{p,w} \frac{dT_o}{dt} + \alpha A (T_o - T_1) + \varepsilon \sigma A (T_o^4 - T_1^4) + \dots$$

$$\dots \lambda A_{wall} (T_o - T_\infty) + \dot{m}_{circ} c_p (T_o - T_\infty) + \dot{Q}_{leak} \quad (1)$$

Nessa equação, α representa o coeficiente de transferência de calor por evaporação e convecção, ε a emissividade da superfície da água, λ a condutividade térmica do material isolante, \dot{m}_{circ} a taxa de massa que circula pelos estágios, e \dot{Q}_{leak} a taxa de energia perdida por vazamentos. Os subscritos “o” e “1” se referem ao tanque de armazenamento (nível inferior da torre) e ao primeiro estágio, e ∞ ao ar ambiente, for a da torre.

Para os outros estágios da torre, a equação do balanço de energia tem a mesma forma da Eq. (1), com a diferença que a energia entra nesses estágios por condensação, convecção e radiação do estágio inferior, não sendo proveniente do coletor solar.

Dois parâmetros importantes são usados na quantificação do desempenho do desempenho do dessalinizador: O coeficiente de desempenho (COP - *coefficient of performance*) e a razão de ganho de produção (GOR - *gain output ratio*). O COP é definido por:

$$COP = \frac{\sum_{i=1}^n m_{dest,i}}{m_{dest,1}} \quad (2)$$

na qual, $m_{dest,i}$ representa a quantidade total de água dessalinizada produzida por todos os estágio da torre e $m_{dest,1}$ a quantidade de produzida pelo primeiro estágio. O COP é usado na análise to processo de recuperação de calor e na otimização da eficiência dos estágios. O GOR é definido como:

$$GOR = \frac{\sum_{i=1}^n m_{dest,i} \cdot \Delta h}{Q_{col}} \quad (3)$$

e a entrada de energia na torre, proveniente do coletor solar, Q_{col} , como:

$$Q_{col} = A_{col} \int \eta_{col} \cdot \dot{E}(t) \cdot dt \quad (4)$$

Nessas equações, Δh representa a entalpia de evaporação da água e $\dot{E}(t)$ o fluxo de radiação solar incidente no coletor. O valor do GOR é usado na análise do desempenho do dessalinizador como um todo, de forma equivalente à eficiência térmica.

A eficiência de produção de cada estágio é expressa pela razão entre a quantidade de água produzida em condições reais de operação e a quantidade produzida no dessalinizador de simples estágio de máxima produção (Silva e Schwarzer, 2008), para as mesmas temperaturas de evaporação e de condensação,

$$\eta_{i,p} = \frac{m_{dest,i}}{m_{max,i}} \quad (5)$$

e para o dessalinizador,

$$\eta_p = \frac{\sum_{i=1}^n m_{dest,i}}{\sum_{i=1}^n m_{max,i}} \quad (6)$$

2.2 Medições Experimentais

O sistema de aquisição de dados é formado por instrumentos de medição, por um coletor de dados e por um microcomputador. O coletor possui 32 canais programáveis individualmente com intervalo de tempo de leitura (varredura dos sensores) de 10 segundos. A recepção dos dados foi feita por um microcomputador conectado ao coletor por meio de uma porta serial RS – 232.

Nas medições de temperatura foram usados termopares do tipo K, com precisão de $\pm 0,4\%$, calibrados antes do início dos testes. A calibração foi feita utilizando-se um meio termicamente estável (banho de gelo). Após a calibração dos canais dos termopares, foi feita a programação do canal do sensor de radiação, um piranômetro de precisão ($\leq \pm 0,5\%$), com a mesma inclinação do coletor solar (15°) na direção Norte. A massa de água produzida durante o dia, foi medida em uma balança digital, com precisão de 1g.

3. RESULTADOS

A Figura 3 apresenta os campos de temperatura nas bandejas da torre de dessalinização ao longo de um período de 24 horas. Os valores no tanque de armazenamento e nos primeiros estágios (inferiores) alcançaram valores próximos a 80°C , apesar de ser um com nuvens ($18,5 \text{ MJ/m}^2$), visto que em Fortaleza o valor médio da radiação diária pode chegar a ($19,3 \text{ MJ/m}^2$).

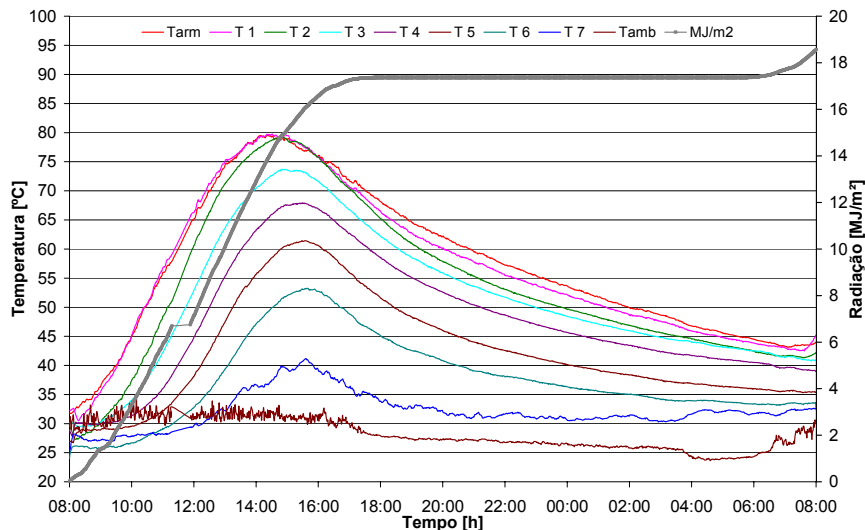


Figura 3 – Campos de temperatura nos estágios da torre de dessalinização em um período de 24 horas.

No período do gráfico, a produção de água dessalinizada foi de 40 L. Na temperatura média de operação do coletor e o gráfico da eficiência térmica dos coletores, o ganho de calor na torre pode ser calculado. O valor encontrado para Q_{col} foi de 29,7 MJ e o valor da razão de ganho de produção, GOR, equivalente à eficiência térmica do dessalinizador, foi de 3,21. O valor superior à unidade ocorre porque a produção da torre é a soma das produções dos estágios.

Com os valores das temperaturas nas bandejas e o modelo de produção máxima (Silva e Schwarzer, 2008), o coeficiente de desempenho – COP, Eq. (2), foi determinado. O valor encontrado foi de 6,34 e é uma indicação da produção da torre de múltiplos estágios em relação à produção de uma torre de simples estágio.

Usando o valor medido da produção diária, a produção máxima usando os valores das temperaturas medidas e o modelo de produção máxima, a eficiência de produção do dessalinizador foi de 0,67.

Os resultados apresentados e as características de simples operação e manutenção mostram o dessalinizador solar térmico com recuperação de calor é uma opção para o problema de produção de água para o consumo humano a partir de água salgada e salobra, em especial para localidades no semi-árido, embora sejam possíveis otimizações no presente protótipo, como também o desenvolvimento de outras variantes com o mesmo princípio de operação, como está ocorrendo nas duas universidades parceiras.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Petrobrás (Petróleo Brasileiro S. A.) pelo financiamento do projeto através da sua carteira de Pesquisa e Desenvolvimento em Energias Renováveis, ao BMBF (Ministério da Educação e Pesquisa, da Alemanha) pelo financiamento do projeto AQUASOL. Agradecem também à CAPES por um bolsa de mestrado através do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, UFC.

REFERÊNCIAS

- Coutinho, L. D. E. 2003. Protótipo experimental de um dessalinizador solar com recuperação de calor. Dissertação de Mestrado, PPEQ, UFC, Brasil.
- Dunkle, R. V. 1961. Solar water distillation: The roof type still and a multiple effect diffusion still. Int. Devel. Heat Transfer, A.S.M.E., Part 5, p. 895-902.
- Hannich, K. 2000. Bau Vermessung und thermodynamische Charakterisierung einer solarbetriebenen Mehrstufendistille mit Waermerueckgewinnung zur Trinkwasserversorgung, Diplomarbeit, FH Aachen, Deutschland.
- Lima, C. A. 2000. Dessalinizador solar térmico com recuperação de calor – análise térmica e resultados experimentais. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Saneamento Ambiental, UFC.
- Malik, M. A. S.; Tiwari, G. N.; Kumar, A.; Sodha, M. S. 1982. Solar distillation - a practical study of a wide range of stills and their optimum design, construction and performance. Pergamon Press, Great Britain.
- Schwarzer, K. J., Silva, M. E. V., Hoffschmidt, B., Schwarzer, T. 2008. A new solar desalination system with heat recovery. Proceedings of the Water and Sanitation in International Development and Disaster Relief, Edinburgh.
- Schwarzer, K. 2008. Desalination Systems with Renewable Energy. DME Seminar – Desalination and Renewable Energies, SIJ, Germany.
- Schwarzer, K.; Hoffschmidt, B.; Müller, C.; Schwarzer, T., Silva, M. E. V., 2006. Solarthermisches Entsalzungssystem mit Wärmerückgewinnung -Erste Feldtestergebnisse. 16. Symposium. Thermische Solarenergie, Deutschland.
- Schwarzer, K.; Vieira, M. E.; Farber, C. 2000. Solar thermal desalination system with heat recovery. Euromed 2000, Jerbas, Tunisia.
- Silva, M. E. V., Schwarzer, K. 2008. Heat and Mass Transfer Rates in a Solar Thermal Desalination Unit Using Psychrometric Properties. DME Seminar – Desalination and Renewable Energies, SIJ, Germany.
- Zhang, L., Zheng, H. & Wu, Y. 2003. Experimental study on a horizontal tube falling film evaporation and closed circulation solar desalination system. Pergamon: Renewable Energy, v.28, p. 1187-1199.

DESEMPENHO EM CAMPO DE UM DESSALINIZADOR SOLAR TÉRMICO COM RECUPERAÇÃO DE CALOR E AQUECIMENTO DIRETO

Abstract. *This article presents the experimental measurements and a calculation procedure, based on the mass and energy conservation equations, needed to determine the efficiency of thermal desalination equipment with heat recovery, operating with direct heating. The topics presented are: the principle of operation of the desalination equipment with a thermal, heat recovery tower; the procedure to determine the maximum possible thermal efficiency using the trays (stages of the tower); the expressions to calculate efficiency and the gain output ratio; and the field measurements of temperature, mass of desalinated water produced and global solar radiation. For a partly sunny day, the production of desalinated water in a period of 24 hours was 40L, the thermal tower coefficient of performance was 6,34 and the heat recovery tower production efficiency was 0,67, for a total insolation of 74 MJ.*

Key words: Solar Desalination Equipment, Heat Recovery