

## FABRICAÇÃO DE UM DESSALINIZADOR TÉRMICO COM PARÂMETROS OPERACIONAIS CONTROLÁVEIS

Francisco Nascelio Pinheiro, nascelio@hotmail.com<sup>1</sup>  
Maria Eugênia Vieira da Silva, eugenia@sol.les.ufc.br<sup>1</sup>  
Sávio Bezerra de Aguiar, saviobaguiar@gmail.com<sup>1</sup>  
Erilson de Sousa Barbosa, erilson@sol.les.ufc.br<sup>1</sup>  
Isaias Silva da Costa, isaiasmundya@gmail.com<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal do Ceará, Campus do Pici, s/n, CEP 60451-970 - Fortaleza - CE

### Código

CONEM2012-1362

**Resumo:** Dessalinizadores solares térmicos operam com fonte variável de calor, a radiação solar, o que dificulta a identificação da influência das variáveis de processo e dos parâmetros geométricos construtivos. Em seu funcionamento, água salobra ou salgada é aquecida em um tanque de armazenamento, onde evapora e condensa nas paredes inferiores de uma bandeja metálica (primeiro estágio) instalada acima do tanque. Ao condensar, o vapor transfere calor para a água salgada desse primeiro estágio e o condensado é coletado no exterior do tanque. O presente trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de um novo protótipo de dessalinizador térmico com parâmetros operacionais controláveis para funcionamento em regimes transiente e permanente. No protótipo, o aquecimento da água a ser dessalinizada é feito por resistência elétrica com fonte de tensão controlável, permitindo a variação desejável da potência de aquecimento. Além desse controle, é possível a substituição das resistências para facilitar o estudo com potências e geometrias variadas. As paredes laterais e inferior são isoladas com placa de poliuretano revestido com alumínio, de forma a minimizar as perdas de calor para o ambiente. Foram instalados sensores do tipo PT-100, especialmente especificados para as dimensões do tanque de armazenamento, para medições de temperaturas da água em diferentes posições no tanque. A massa de água no tanque é medida por balança de precisão. Com as medições realizadas, foram contruídos gráficos de temperatura da água do tanque durante os regimes transientes de aquecimento e resfriamento. Foram também medidas as vazões mássicas do tanque, de água evaporadas e a potência térmica dissipada na resistência.

**Palavras-chave:** Dessalinizador, Resistência elétrica, Aquecimento

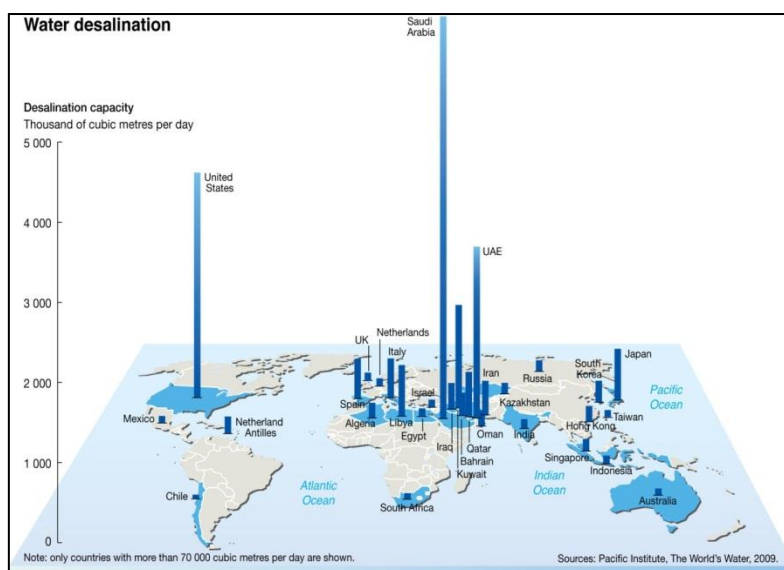
### 1. INTRODUÇÃO

Com o crescimento populacional e industrial, aumenta também a necessidade de recursos básicos como a água. Água esta que, já vem de uma super exploração dos recursos disponíveis, principalmente, para o uso doméstico. Vários procedimentos têm surgido para resolver este problema de escassez de água potável, dentre eles, a dessalinização de águas salobras, salgadas ou poluídas.

Já em 1991 encontravam-se, distribuídas por 120 países, cerca de 8.800 usinas de dessalinização em plena eficiência, produzindo mais de 15 milhões de metros cúbicos diários de água dessalinizada, chegando a uma média nominal de 25 L/s. Dois terços desta produção decorriam da água do mar para consumo humano e, principalmente, industrial, pois as indústrias não necessitavam de um rigoroso tratamento especial para a água (Projeto de Integração do Rio São Francisco com Bacias Hidrográficas do Nordeste Setentrional. 2007).

Atualmente, a Arábia Saudita é responsável por aproximadamente 27% da produção mundial de água dessalinizada. A maior parte de sua produção provém do processo de dessalinização fundada em petróleo e gás, utilizando quase que exclusivamente a água do mar. Os Estados Unidos da América aparecem em seguida, com 12% do total produzido no mundo, com usinas de Osmose Reversa (RO), tendo como matéria prima a água salobra. Segundo a Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente N°20, a água é salobra quando seu total de sólidos dissolvidos estiver entre 500 e

30.000 ppm e salgada quando seu total de sólidos dissolvidos for igual ou superior a 30.000 ppm. A Fig. (1) mostra a distribuição do volume de água por dia dessalinizada no mundo em 2009 (Projeto de Integração do Rio São Francisco com Bacias Hidrográficas do Nordeste Setentrional. 2007).



**Figura 1. Distribuição do volume de água por dia dessalinizada no mundo em 2009 (GLEICK; COOLEY; HORIKAWA, 2009)**

A tendência mundial tem sido o crescimento anual de 7 a 10% na produção de água dessalinizada. A China prevê que, até 2020, terá quadruplicado a sua produção de água dessalinizada, passando de 680 mil metros cúbicos para três milhões de metros cúbicos diários, o equivalente a 12 usinas de 200 mil metros cúbicos. O investimento chinês será de US\$ 31 bilhões, no qual especialistas neste assunto especulam ser insuficiente, pois estudos afirmam que a demanda de água na China deverá crescer 63% até 2030 (Wines, M 2011).

Com o aumento anual de dessalinização há um aprimoramento e surgimento de processos de dessalinização cada vez mais seguros e econômicos. Os principais tipos de tecnologia de dessalinização são a Osmose Reversa (RO), a destilação de múltiplos efeitos (MED), Destilação Solar Térmica (STD) e a Térmica com Recuperação de Calor. Este trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de um novo protótipo de dessalinizador térmico com parâmetros operacionais controláveis para funcionamento em regimes transiente e permanente, de forma a possibilitar o estudo mais preciso da influência das suas variáveis operacionais e parâmetros construtivos. Foi fabricado um tanque para armazenamento de água a ser dessalinizada, com isolamento nas paredes laterais e inferior, com aquecimento controlado por resistências elétricas. O arranjo experimental possui também balança de precisão com saída analógica contínua, um conjunto de sensores de temperatura do tipo PT-100, sensor de temperatura de bulbo seco e umidade relativa do ar com saída analógica e um coletor de dados.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Schwarzer *et al.* (2001) fizeram um dessalinizador solar térmico com recuperação de calor. Utilizou-se um dessalinizador composto de um ou mais coletores e torre de dessalinização. Os coletores tinham área de 2 m<sup>2</sup>, a torre de dessalinização tinha seis estágios com bandejas de dimensão 0,8m X 0,8m e a distância entre as fases de 0,1m. Foi utilizado um fluxo de óleo térmico para transferência de calor dos coletores para a torre. O abastecimento do experimento foi com água salgada do mar, água salobra de poços e água poluída. Obtiveram resultados experimentais que são comparados com resultados de simulações numéricas para a produção de água potável. Os resultados mostraram que o equipamento apresentou eficiência térmica média de 0,5 e alcançou uma taxa de produção de água de 25 L/m/d para um valor de 4,8 kWh/m<sup>2</sup>/d de radiação solar. Testes em laboratórios mostraram a dessalinização da água pelos valores medidos de condutividade elétrica da água após o processo, como também, a pureza pela eliminação de coliformes fecais.

Alves (2009) apresentou um sistema de captação de energia solar fabricado para o aquecimento da torre térmica de dessalinização com recuperação de calor de Schwarzer *et al.* (2001). O sistema consistia na captação de energia solar por coletores solares térmicos de placa plana, transformando energia solar em térmica para aquecer água nos coletores e por sua vez na torre de dessalinização. O dessalinizador era formado por duas unidades: dois coletores solares de alto desempenho e uma torre de dessalinização com um tanque e sete estágios. O trabalho consistiu numa adaptação na distribuição uniforme de água no tanque de armazenamento de calor. Obtendo uma temperatura de aproximadamente 100°C no tanque, 80°C no primeiro estágio e uma média de 31,0 litros de água por dia. Sua eficiência experimental global foi de 0,62 e o valor de razão de ganha na saída foi de 1,54.

Rodrigues (2010) apresentou um estudo do desempenho de uma torre de recuperação de calor para operar com uma versão modificada do dessalinizador solar de Schwarzer *et al.* (2001). O dessalinizador solar utilizado possuía duas unidades básicas: a unidade de aquecimento (coletores solares) e a unidade de dessalinização (torre de recuperação de calor com canais sintéticos de poliuretano). Os resultados obtidos pelo autor mostraram a adequação dos perfis de poliuretano como ótima eficiência, tanto para o escoamento de água, quanto para o isolamento de calor. A produção foi de 35 litros por dia. Os parâmetros de desempenho foram calculados e alcançados os valores de 1,26 para a Razão de Ganho de Saída (GOR) do dessalinizador e 4,78 para o Coeficiente de Desempenho (COP).

### 3. MATÉRIAS E MÉTODOS

O tanque do novo protótipo experimental com variáveis controladas, Fig. (2), foi construído de forma a minimizar as perdas de calor para o ambiente, com isolamento térmico nas paredes laterais e inferiores. A quantidade de água no tanque era continuamente medida por uma balança de precisão. O tanque foi fabricado em quatro partes: o tanque interno, constituído com chapas de aço inoxidável AISI 304 de 1,2mm e com a parte interna de 280 mm de largura, 520 mm de comprimento e 100 mm de profundidade; a resistência e a parte elétrica (resistência circular com potência de 2000 W e conectada a um variador de voltagem, *varivolt*, com multímetro); o isolamento, constituído por uma placa de poliuretano revestido com alumínio, caracterizado por sua boa resistência a compressão, baixo coeficiente de condutibilidade térmica, baixo peso específico, ou seja, um bom isolante térmico rígido; a estrutura de sustentação, feita com canaletas de ferro e soldadas com solda elétrica.



Figura 2. Foto do tanque do dessalinizador

O suporte para a bandeja do estágio superior foi fabricado de poliuretano para minimizar as perdas de calor para o ambiente. Foram cortados com intuito de formarem unidades retangulares de 62 cm de comprimento por 37 cm de largura com corte de 45° nas extremidades, como mostra a Fig. (3). Há duas calhas no perfil, uma onde é apoiada a bandeja desse estágio e a outra para o escoamento de condensado. A Fig. (3) mostra também, o corte transversal do perfil, no qual é possível observar as duas calhas. As bandejas têm 52 cm de comprimento; 27,5cm de largura e 4,5cm de altura. As bandejas metálicas foram fabricadas em aço inoxidável AISI 304. As chapas de aço inoxidável foram cortadas, dobradas e soldadas.

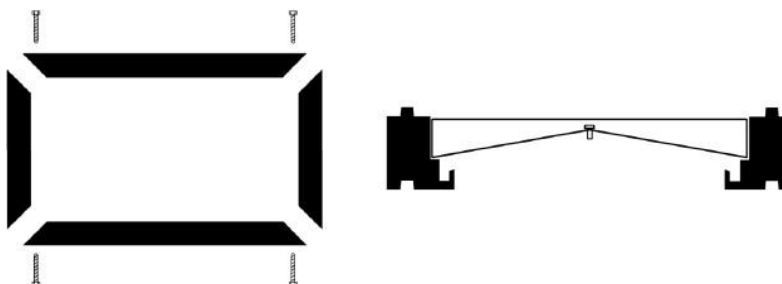


Figura 3. O estagio de poliuretano com a bandeja de aço (adaptado de RODRIGUES, F. P. 2010)

Para os testes foram utilizados, além do tanque e do primeiro estágio, um computador, um multímetro, um variador de voltagem (*vativolt*), um coletor de dados (*datalogger*) de modelo OPUS 208, cinco sensores do tipo PT 100 e uma balança de precisão (modelo *GP 100K da A&D Company Ltd*).

Primeiramente, foi concebido e desenhado o tanque de armazenamento de água quente num programa de desenho assistido para facilitar as etapas de montagem. Em seguida, foi instalada a resistência no tanque de aço numa altura de 2 cm da parede inferior de forma a ficar totalmente submersa na água. O volume (relação área/profundidade) do tanque possibilitava a realização de testes para variados níveis de água, ou seja, cinco, sete ou dez litros. Posteriormente, foram colocados os isolantes na estrutura de sustentação, não tendo sido utilizado nenhum tipo de cola ou fixador, pois a estrutura de sustentação foi projetada com o intuito de diminuir novos materiais no sistema. Por fim, foram ligados o variador de voltagem e o multímetro.

O tanque-resistência foi posicionado numa balança de alta precisão para medição contínua da massa de água. Os cinco sensores de temperatura PT100 foram localizados na água do tanque de armazenamento, em suas paredes laterais e externa, e no ambiente externo próximo ao tanque. Os sensores foram ligados ao coletor de dados que utiliza o programa *Smart Control 1.4*, desenvolvido pelo fabricante (*K-soft Haustechnik-Management*) para fazer a coleta das temperaturas e o tratamento dos dados no computador.

O sistema era aquecido com energia elétrica, que era transformada em energia térmica, aquecendo a água do tanque. O sistema é caracterizado na literatura como sendo *resistor puro*, pois só existe uma resistência. A potência média do sistema é definida pela multiplicação da voltagem eficaz  $V_{q-m}$  com a corrente eficaz ( $I_{q-m}$ ) que é fornecida pelo multímetro, Eq. (1).

$$P_m = V_{q-m} \cdot I_{q-m} \quad (1)$$

O calor que entra no experimento é a potência média dividida pelo tempo, Eq. (2),

$$Q_{ele} = \frac{P_m}{t} \quad (2)$$

e a Equação (3) mostra a eficiência do tanque,

$$\eta = \frac{Q_{ele} - Q_p}{Q_{ele}} \quad (3)$$

A energia perdida pode ser calculada por um balanço de energia, ou a 1ª Lei da Termodinâmica, considerando-se um volume ao redor do tanque de armazenamento. Assim, a energia de perdas  $Q_p$  é definida por,

$$Q_p = Q_{ele} - Q_s - Q_L \quad (4)$$

na qual  $Q_s$  e  $Q_L$  representam o calor sensível (aquecimento da água no tanque de armazenamento) e o latente (evaporação da água a ser condensada). Substituindo suas expressões na balance de energia, a energia de perdas pode ser determinada por,

$$Q_p = \frac{P_m}{t} - \dot{m}_t \cdot c_p \cdot (T_f - T_i) - \dot{m}_v \cdot h_{fg} \quad (5)$$

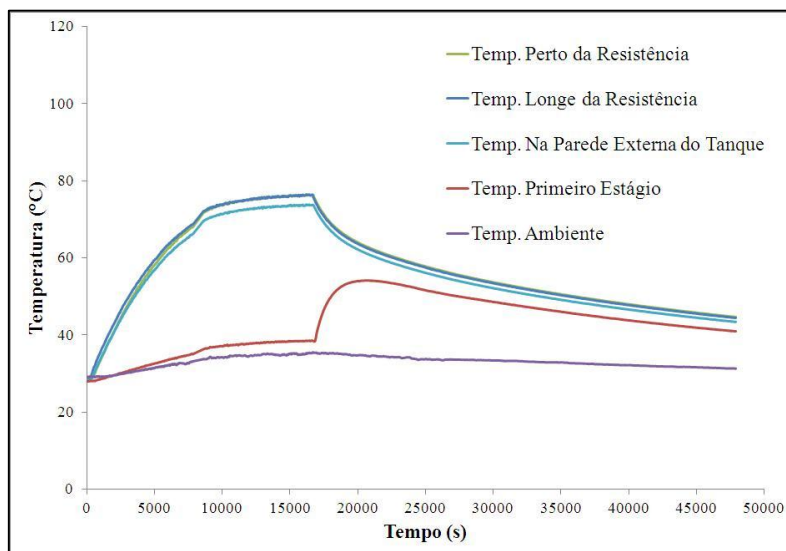
na qual  $P_m$  é a Potência fornecida,  $t$  é o tempo do regime,  $\dot{m}_t$  e  $\dot{m}_v$  representam o fluxo de massa da água e vapor respectivamente,  $c_p$  é o calor específico da água,  $(T_f - T_i)$  representa a diferença de temperatura entre o início e o fim do regime e  $h_{fg}$  é o calor latente de evaporação. Os valores de energia podem ser convertidos em taxas pela divisão com o intervalo de tempo apropriado.

#### 4. RESULTADOS

Foram produzidos três experimentos variando a voltagem com o equipamento de *varivolt*. A voltagem da rede utilizada foi de 220,0 V e os experimentos foram respectivamente com 40%, 50% e 75% desta voltagem. Foi usado apenas um estágio e 10000,0 g de água para os três experimentos.

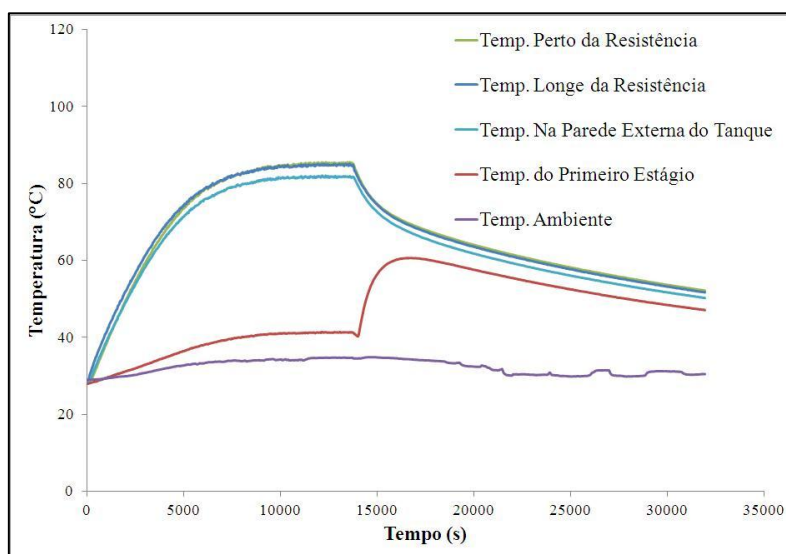
As Figuras (4), (5) e (6) apresentam as medições de temperatura na água do tanque (próxima e afastada da resistência), entre o tanque e o isolante, na água do primeiro estágio e a temperatura ambiente. Esses resultados foram obtidos com uma variação da voltagem da rede elétrica para 88, 110 e 165 V. Tal variação representou um controle da potência térmica dissipada utilizando-se uma resistência circular que, embora não distribuísse igualmente o calor no tanque, apresentou diferença de temperatura de apenas 1 a 3 °C dentro do mesmo. Em função do controle de potência dissipada, o experimento levou diferentes tempos para alcançar o estado de regime permanente, como também, diferentes taxas de produção.

O primeiro experimento, Fig. (4), alcançou temperatura de regime de 75°C para uma potência fornecida de 264,0 W (voltagem e amperagem foram respectivamente de 88,0 V e 3,0 A). A produção durante o regime permanente foi de 325 mL e nos regimes transientes de aquecimento e resfriamento de 220 mL e 75 mL, respectivamente. A medição da condutividade elétrica da água dessalinizada foi de 1,38  $\mu\text{S}$ .



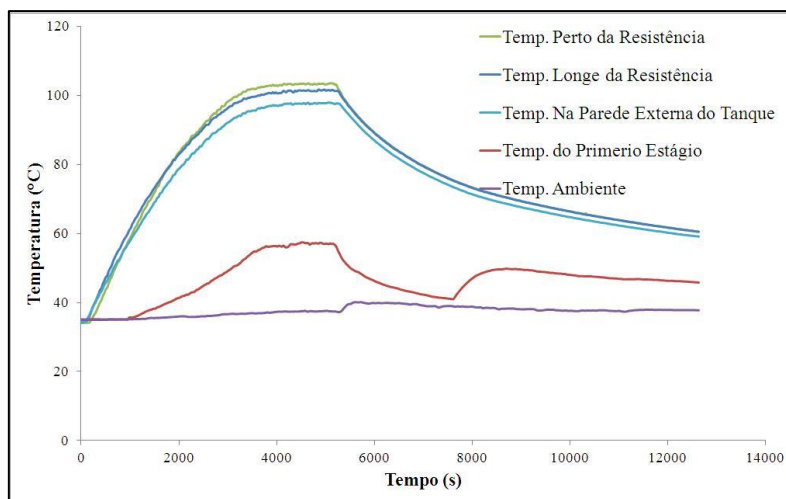
**Figura 4. Distribuição de temperatura do experimento com um estágio utilizando a voltagem de 88 V.**

A Figura (5) mostra o segundo experimento que alcançou temperatura de 84°C no regime permanente, para uma potência fornecida de 495 W (voltagem e amperagem foram, respectivamente, de 110,0 V e 4,5 A). A produção durante o regime permanente foi de 620,0 mL e nos regimes transientes de aquecimento e resfriamento de 500 mL e 80 mL, respectivamente. A medição da condutividade elétrica da água dessalinizada foi de 4,35  $\mu\text{S}$ .



**Figura 5. Distribuição de temperatura do experimento com um estágio utilizando a voltagem de 110 V.**

No terceiro experimento, para uma potência fornecida de 1257,3 W, a temperatura média da água do tanque no regime permanente foi de 103,54 °C (próximo a resistência, de 101,69 °C e afastada da resistência, de 97,66 °C), A produção durante o regime permanente foi de 420,0 mL e nos regimes transientes de aquecimento e resfriamento de 400 mL e 96 mL, respectivamente. Esta menor produção no terceiro experimento, quando comparada à produção do segundo experimento, foi devido ao menor tempo de operação do equipamento durante o regime permanente, tendo sido de 3000s no segundo experimento e de 1110s no terceiro. A medição da condutividade elétrica da água dessalinizada foi de 4,35  $\mu\text{S}$ .



**Figura 6. Distribuição de temperatura do experimento com um estágio utilizando a voltagem de 165 V.**

Como exemplo dos cálculos que podem ser realizados com os dados experimentais, usando as equações apresentadas na metodologia, encontra-se o valor para o calor de perda ( $Q_p$ ) de 153,85 Wh de um valor da energia elétrica ( $Q_{ele}$ ) fornecida de 419,1 Wh durante o regime permanente do segundo experimento. A eficiência com apenas um estágio foi de 63% no mesmo período. Os testes de ionização da água coletada mostraram uma redução de 98,9 % da água do tanque, que possui uma quantidade aproximada 440 ppm de sais.

## 5. CONCLUSÃO

O novo protótipo do dessalinizador térmico com recuperação de calor permitiu o controle da taxa de aquecimento da água do tanque de forma precisa, pelo controle da potência elétrica da resistência elétrica e, conseqüentemente, do calor de aquecimento da água no tanque.

O sistema de medição mostrou-se adequado para o aparato experimental, visto que, as variáveis importantes para o estudo e otimização do sistema (temperaturas e massas) puderam ser medidas com instrumentos de precisão.

Destacou-se ainda, o ótimo desempenho do isolante mostrando uma variação de temperatura acima dos 40 °C entre os sensores de temperatura instalados entre o lado interno do tanque e o ambiente externo. A utilização de uma resistência circular mostrou-se uma diferença de 1 a 3 °C no interior do tanque e, embora este valor seja pequeno quando comparado às temperaturas na água do tanque (de 75°C a 100°C), a utilização de outras geometrias poderão apresentar ainda melhores resultados. O dessalinizador elétrico pode chegar a um bom desempenho térmico, como uma eficiência de 63 %.

## 6. LISTA DE SÍMBOLOS

$c_p$	- Calor Específico da Água, cal/g.°C
$h_{fg}$	- Calor Latente, cal/g
$I_{q-m}$	- Amperagem Eficaz, A
$\dot{m}_t$	- Fluxo de Massa de Água, g/s
$\dot{m}_v$	- Fluxo de Massa de Água Evaporada, g/s
$P_m$	- Potência, W
$Q_{ele}$	- Quantidade de Calor Fornecido Pela Resistência, J
$Q_L$	- Quantidade de Calor Latente, J
$Q_p$	- Quantidade de Calor Cedido Para o Ambiente, J
$Q_s$	- Quantidade de Calor Sensível, J
$t$	- Tempo do Regime, s
$T_f$	- Temperatura no Fim do Regime, °C
$T_i$	- Temperatura no Início do Regime, °C
$V_{q-m}$	- Voltagem Eficaz, V

## GREGOS

$\eta$	- Eficiência do Dessalinizador
--------	--------------------------------

## 7. AGRADECIMENTOS

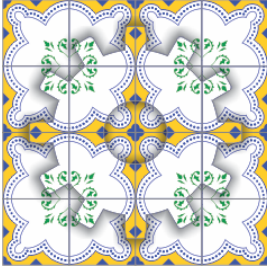
Mestrado de engenharia mecânica da Universidade Federal do Ceará, Laboratório de Energia Solar e Gás Natural, a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes) e o Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq)

## 8. REFERÊNCIAS

- Alves, R. D. B. Sistema De Captação De Energia Solar Para Uma Torre De Dessalinização Térmica Com Recuperação De Calor, 2009. 56p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – UFC, Fortaleza.
- Gleick, P.H.; Cooley, H.; Horikawa, M. The World's Water: The Biennial Report On Freshwater Resource. Island Press, 2008-2009. 432 p.
- Projeto de Integração do Rio São Francisco com Bacias Hidrográficas do Nordeste Setentrional, Consolidação Dos Estudos Ambientais. 2007. Disponível em: [http://siscom.ibama.gov.br/licenciamento\\_ambiental/Recursos\\_Hidricos/Integração\\_São\\_Francisco/EIA/Textos/EIA\\_Consolidado\\_Item\\_3\\_Análise\\_das\\_Alternativas.pdf](http://siscom.ibama.gov.br/licenciamento_ambiental/Recursos_Hidricos/Integração_São_Francisco/EIA/Textos/EIA_Consolidado_Item_3_Análise_das_Alternativas.pdf). Acesso em: 20 de jan. 2012.
- Rodrigues, F. P. Desempenho De Uma Torre De Recuperação De Calor Com Canais Sintéticos De Poliuretano Para Um Dessalinizador Solar Térmico, 2010.69p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – UFC, Fortaleza.
- Schwarzer, K; Vieira, M. E.; Faber, C.; Müller, C. Solar thermal desalination system with heat recovery. ELSEVIER, desalination, vol.137, p. 23-29, 2001.
- Wines, M. China investe em projetos de dessalinização e reciclagem para superar a escassez de água 2011. Tradução de Anna Capovilla. The New York Times/ O Estado de S.Paulo. Disponível em: <http://www.agsolve.com.br/noticia.php?cod=5457>. Acessado em: 10 de janeiro de 2012.

## 9. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluídos neste trabalho.



## MANUFACTURE OF A THERMAL DESALINATION OPERATING PARAMETERS WITH CONTROLLABLE

Francisco Nascelio Pinheiro, [nascelio@hotmail.com](mailto:nascelio@hotmail.com)<sup>1</sup>  
Maria Eugênia Vieira da Silva, [eugenia@sol.les.ufc.br](mailto:eugenia@sol.les.ufc.br)<sup>1</sup>  
Sávio Bezerra de Aguiar, [saviobaguiar@gmail.com](mailto:saviobaguiar@gmail.com)<sup>1</sup>  
Erilson de Sousa Barbosa, [erilson@sol.les.ufc.br](mailto:erilson@sol.les.ufc.br)<sup>1</sup>  
Isaias Silva da Costa, [isaiasmundya@gmail.com](mailto:isaiasmundya@gmail.com)<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal do Ceará, Campus do Pici, s/n, CEP 60451-970 - Fortaleza - CE

### Código

CONEM2012-1362

**Abstract.** Solar thermal desalination systems operate with a variable heat source, such as solar radiation, which makes it difficult to identify the influence of process variables and constructive geometric parameters in their performance. In operation, brackish or salt water is heated in a storage tank, where it evaporates and condenses on the lower walls of a metal tray (first stage) installed above this tank. The steam flows upwards to transfers its heat to the salt water in the above stage, where it condenses and flows to be collected outside the tank. The present work presents the development of a new prototype of the thermal desalination system with a controllable heat source, which allows transient and steady state operations. In the prototype, brackish or salty water is heated up by electrical resistance with controllable voltage source, allowing variations of the desirable heating power. Besides the electrical control, the electrical resistance can be easily changed to allow heating in other power levels. The side and bottom walls are insulated with polyurethane coated with aluminum, to minimize heat losses to the environment. PT-100 temperatures sensors were installed in different positions in the storage tank and stages. They were specially made to adjust to the system dimensions. The mass of water in the tank was measured by a precision balance. With the experimental data, temperature charts were plotted for the steady state and transient operation during heating and cooling periods. The data were used in the calculation of performance parameters. Water mass measurements were used to experimentally determine the evaporation rate from the storage tank.

**Keywords:** Dessalinizador, Resistência elétrica, Aquecimento