

CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL DO FUNCIONAMENTO DE UM DESTILADOR DE ÁGUA DO TIPO ATMOSFÉRICO REGENERATIVO

André Gustavo de Figueiredo Melo

Centro Federal de Educação Tecnológica de Pernambuco

Naum Fraidenraich

Departamento de Energia Nuclear da Universidade Federal de Pernambuco

***Resumo.** Foi desenvolvido e testado um protótipo de destilador atmosférico regenerativo de condensadores e evaporadores planos, verticais e paralelos. Com vistas a caracterizar experimentalmente seu funcionamento, foram medidas as temperaturas em vários pontos das superfícies de evaporação e condensação, o fluxo de energia de alimentação e a produção de destilado formado em cada uma das placas condensadoras e nas paredes internas do destilador, separadamente. Os resultados dos ensaios, realizados em regime estacionário, mostram que a relação de economia, ou seja a relação entre o calor de evaporação e o insumo energético por kg de água destilada, tende a crescer quando a vazão de alimentação de água salina diminui, sendo limitada, no entanto, pelas perdas térmicas relativas para o ambiente. A máxima relação de economia medida foi de 2,3, com uma taxa de produção de água destilada de 1,2 kg/h. Já com uma Relação de Economia igual a 2 a taxa de destilado aumenta para 1,8 kg/h.*

Palavras –chave: destilação; água, energia; transferência de calor.

1 INTRODUÇÃO

Equipamentos para desalinização de água tem sido amplamente estudados ao longo dos anos. Tais facilidades podem prover água para uso humano e animal em locais onde a mesma se apresenta com considerável grau de salinidade. Particularmente, o Nordeste do Brasil é uma região onde, apesar de sua abundância, as águas de origem subterrânea são bastante salinas.

O presente trabalho apresenta os resultados experimentais obtidos em regime permanente com um modelo de destilador de água cuja característica principal é sua elevada produtividade combinada com uma boa eficiência energética. O equipamento, denominado destilador atmosférico regenerativo, promove a recuperação do calor de condensação, trabalha a pressão atmosférica e opera a temperaturas no intervalo de 80 a 90 °C. Devido aos atributos mencionados, aliados a sua simplicidade construtiva e versatilidade em matéria do tipo de fonte de energia ou combustível com o qual pode operar, solar, lenha, bagaço, biogas, gas liquefeito, os destiladores atmosféricos regenerativos tem sido estudados por diversos autores, Baumgartner et. al, (1991), Fraidenraich et al. (1995), Heschl and Sizmann (1987), Roman et. al (1993), entre outros.

Nas próximas seções são descritas as características operacionais do destilador, apresentados e discutidos os resultados experimentais e sugeridas alternativas para melhorar seu rendimento energético.

1.1 Características operacionais do destilador

O destilador está composto pelo evaporador, formado por um conjunto de telas de algodão verticais e paralelas, e dois condensadores, dispostos nas laterais da câmara de destilação. Cada condensador está constituído por uma placa vertical de cobre na qual estão soldados uma série de tubos, também de cobre, conforme o arranjo da Fig. 1 (b). O conjunto formado por evaporador e condensadores fica dentro de uma caixa, isolada termicamente.

O processo se inicia quando a água salobra, proveniente do reservatório, ingressa, pela parte inferior, nos tubos do condensador, à temperatura T_3 (Fig. 1 (a)). O intercâmbio de calor com o vapor que condensa na superfície das placas de cobre, por fora dos tubos, aumenta sua temperatura até T_4 , na região de saída. Em seguida, no aquecedor, sua temperatura é elevada até T_1 , dirigindo-se então para o evaporador, onde ao escorrer ao longo dos tecidos, uma parcela evapora (absorvendo calor sensível do restante da água). O gradiente de temperatura existente entre evaporador e condensador promove correntes convectivas na câmara de destilação. Devido à evaporação, a temperatura da parcela de água salobra não evaporada diminui até T_2 , sendo rejeitada. Apenas uma parte da vazão de água de alimentação é destilada. A relação entre água destilada e água salina de alimentação é definida como taxa de conversão (TC) do destilador.

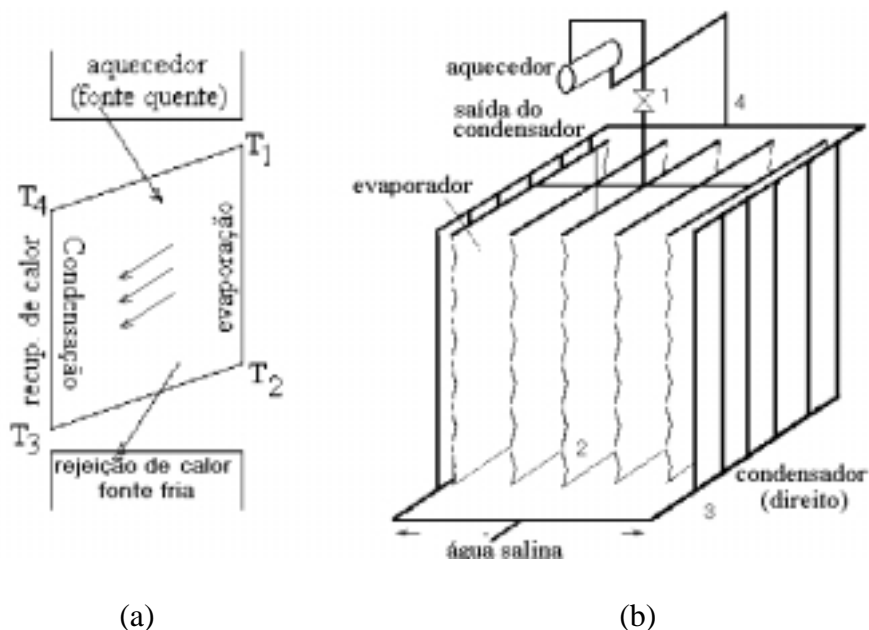


Figura 1 (a) Diagrama de temperaturas do destilador atmosférico regenerativo, e (b) Configuração física dos componentes do destilador [Fraidenraich et al., 1995].

O diagrama de temperaturas mostrado na Fig. 1 (a) corresponde a uma câmara de destilação adiabática, ou seja, não existe troca de calor entre câmara e meio ambiente. Todo o calor é transferido do evaporador para o condensador. Nessas condições, a diferença entre as temperaturas do evaporador e do condensador é constante em toda a sua extensão. Caso existam perdas térmicas para o ambiente, a diferença de temperaturas deixa de ser constante,

deformando o paralelogramo das temperaturas (indicado esquematicamente na Fig. 1a), que passa a ter um salto de temperatura entre entrada e saída do aquecedor, (T_1-T_4), maior que a diferença entre saída do evaporador e a entrada da água no condensador ($T_2 -T_3$). A quantidade de calor que o condensador recebe, neste caso, é menor que a quantidade que sai do evaporador. O balanço de energia da câmara de destilação não adiabática é dado por:

$$M \cdot c_p \cdot (T_1 - T_2) = M \cdot c_p \cdot (T_4 - T_3) + Q_{PERDAS} \quad (1)$$

O símbolo M denota a vazão mássica de água salina que alimenta o destilador, C_p o calor específico da água e Q_{perdas} o fluxo de calor perdido pela câmara de destilação para o ambiente externo. Para a câmara adiabática ($Q_{perdas} = 0$), teremos:

$$M \cdot c_p \cdot (T_1 - T_2) = M \cdot c_p \cdot (T_4 - T_3) \quad (2)$$

o que resulta em

$$T_2 - T_3 = T_1 - T_4 \quad (3)$$

A Eq. (3) expressa a “condição de adiabaticidade”.

A relação de economia se define como o benefício energético, na forma de água destilada, por unidade de insumo energético. Ou seja

$$RE = \frac{m_d \cdot \lambda}{M \cdot C_p \cdot \Delta T_{1-4}} \quad (4)$$

onde (m_d) denota a taxa de produção de água destilada, (λ) o calor latente de vaporização e com o símbolo (ΔT_{1-4}) representa-se a diferença (T_1-T_4). O calor liberado no processo de condensação ($m_d \lambda$) pode ser calculado como a energia transferida entre evaporador e condensador

$$m_d \cdot \lambda = h_{ev} \cdot A \cdot \Delta T_{1-4} \quad (5)$$

(h_{ev}) é o coeficiente de transferencia de calor entre evaporador e condensador e (A) a área de referencia, escolhida neste caso como a área de evaporação, ou seja a área total das telas evaporadoras.

Substituindo a Eq. (5) em (4), a relação de economia fica, portanto, igual a

$$RE = \frac{h_{ev}}{C_p} \cdot \frac{1}{M/A} \quad (6)$$

A análise da Eq. (6) mostra que a relação de economia depende de dois fatores: do coeficiente (h_{ev}), determinado pela configuração geométrica e os materiais que integram a câmara de destilação e de (M/A), parâmetro que permite controlar as condições de operação do destilador. Para serem atingidas elevadas relações de economia serão necessários valores reduzidos da vazão de água de alimentação por unidade de área de evaporação (M/A). A

transferência de calor entre evaporador e condensador depende, entretanto, da vazão de água, sendo menos eficaz quando esta diminui. Assim, deverá existir uma vazão, dependente das características construtivas do destilador, em que a relação de economia seja máxima.

1.2 Influência das Perdas de Calor na Relação de Economia

A condensação do vapor nas paredes internas da câmara de destilação significa transferência (perda) de calor para a parte externa (ambiente). O líquido condensado pode ser recolhido e aproveitado, já que não está contaminado pela água de alimentação (salobra). Assim, a parcela de água destilada nas paredes (m_{dp}) colabora com o incremento da taxa de destilado total (m_d), mas influencia negativamente a relação de economia, uma vez que o calor de condensação oriundo desta parcela de destilado não participa do processo de regeneração de calor. Assim, na análise do desempenho do destilador, a relação de economia real (RE), obtida experimentalmente, pode ser corrigida levando em consideração a perda de calor através das paredes.

A relação de economia corrigida é definida como a relação que seria obtida caso a câmara de destilação fosse adiabática, e pode ser calculada como (Melo, 1997):

$$RE_{corr} = \frac{m_{dc} \cdot \lambda}{MC_p \Delta T_{1-4} - Q_{perdas}} \quad (7)$$

onde m_{dc} é a taxa de produção de água destilada apenas nos condensadores (sem considerar a condensação nas paredes da câmara de destilação). As perdas térmicas representam o calor proveniente do evaporador que não foi transferido para o condensador e, de acordo com a Eq. (1), podem ser escritas como

$$Q = MC_p ((T_1 - T_4) - (T_2 - T_3)) = MC_p (\Delta T_{1-4} - \Delta T_{2-3}) \quad (8)$$

proporcionais à diferença entre ΔT_{1-4} e ΔT_{2-3} , que são as diferenças de temperatura entre evaporador e condensador medidas na parte superior e inferior da câmara, respectivamente (ver Fig. 1). A eq. (7) pode ser reescrita como:

$$RE_{corr} = \frac{m_{dc} \cdot \lambda}{M \cdot c_p \cdot \Delta T_{1-4} - M \cdot c_p \cdot (\Delta T_{1-4} - \Delta T_{2-3})} \quad (9)$$

ou ainda:

$$RE_{corr} = \frac{m_{dc} \cdot \lambda}{M \cdot c_p \cdot \Delta T_{2-3}} \quad (10)$$

Considerando, no entanto, que o mecanismo dominante de transferência de calor entre a câmara de destilação e o ambiente externo é a condensação do vapor nas paredes da câmara, pode-se admitir que

$$Q_{perdas} = M \cdot c_p \cdot (\Delta T_{1-4} - \Delta T_{2-3}) \cong m_{dp} \cdot \lambda \quad (11)$$

Desta forma, a relação de economia corrigida pode ser escrita como

$$RE_{cor} = \frac{(m_d - m_{dp}) \cdot \lambda}{[M \cdot c_p \cdot \Delta T_{1-4}] - m_{dp} \cdot \lambda} \quad (12)$$

onde (m_d) é igual à taxa de destilado total (soma de m_{dc} e m_{dp}), no condensador e nas paredes

Caso as perdas nas paredes fossem nulas, todo o calor liberado pelo evaporador teria como destino o condensador, de forma que (m_{dp}) seria nulo. Nesse caso a Eq.(12) reproduz a forma original da Relação de Economia (Eq. (4)) (*RE* sem perdas, destilador adiabático).

Concluindo, para a caracterização experimental do desempenho do destilador é necessária a determinação da taxa de destilado total (m_d) e a relação de economia (*RE*). Para isto, as grandezas físicas a serem medidas são: vazão de água salobra de alimentação (M), as taxas de produção de destilado nos condensadores (m_{dc}) e nas paredes do destilador (m_{dp}) e as temperaturas na entrada do condensador (T_3), na entrada do aquecedor (T_4), na saída do aquecedor (T_1) e na saída do evaporador (T_2).

A determinação do líquido condensado nas paredes da câmara (m_{dp}) permite estimar as perdas de calor para o ambiente. Já, a relação de economia corrigida, permite prever qual seria o desempenho do destilador nas condições de uma câmara de destilação adiabática e, quando comparada com a relação de economia real, avaliar, em termos de custo benefício, as vantagens que resultariam caso fossem introduzidas modificações para melhorar o desempenho do destilador.

2 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS

O destilador ensaiado consta de um evaporador formado por onze telas de algodão de 0,72 m x 0,84 m, totalizando 13,3 m² de superfície de evaporação. Os condensadores (dois), estão constituídos por uma placa de cobre, de 1,0 m x 0,7 m, com 06 tubos verticais soldados nas mesmas. O conjunto está inserido em uma caixa isolada termicamente, de 0,80 m x 0,80 m x 1,10 m. Um filme reflexivo, aderido às paredes interiores, contribui para a redução das perdas térmicas do sistema.

Para facilitar a comparação com os resultados de outros trabalhos, usaremos os conceitos propostos por Fraidenraich e Barbosa (1996). Com tal fim os resultados experimentais para a vazão de alimentação de água salina (M) e taxa de produção de água destilada (m_d) serão divididos pela área de evaporação, e denominados respectivamente como densidade de vazão mássica de água salina (M/A) e densidade da taxa de produção de água destilada (m_d/A).

O destilador foi ensaiado durante 10 dias, funcionando em torno de 5 horas por dia. O tempo necessário para a estabilização das temperaturas internas do destilador foi de 1 hora, em média. Foram aproveitados os resultados cuja temperatura de saída do aquecedor (entrada do evaporador) ultrapassou 85 °C, totalizando 103 pontos de medição. Foram considerados os resultados com flutuações da vazão de alimentação menores que 10%, em relação à vazão média no período, e temperatura da água na saída do aquecedor, dentro dos limites ajustados

no sistema de controle termostático (entre 85 e 95 °C). Nas próximas Seções são discutidos os resultados obtidos para a Relação de Economia (RE) e a taxa de produção de destilado (m_d).

A Tab. 1 apresenta um resumo dos resultados experimentais, constituídos pelas médias dos principais parâmetros, obtidas nos ensaios com funcionamento contínuo de forma relativamente estável.

Tabela 1 Resultados experimentais obtidos em regime permanente (média em período estável).

Dia	M (kg/h)	m_d (kg/h)	M/A (kg/h.m²)	m_d/A (kg/h.m²)	RE	RE_{corr}	Δt_{sup} (°C)	Δt_{inf} (°C)
05/11/96	15,9	1,2	1,2	0,09	2,3	3,2	24,9	17,3
11/11/96	5,9	0,4	0,4	0,03	1,5	1,9	28,0	10,8
12/11/96	14,9	1,3	1,1	0,10	2,4	3,8	22,1	18,4
13/11/96	16,5	1,3	1,2	0,10	2,2	3,1	20,8	20,2
07/01/97	45,6	2,7	3,4	0,20	1,5	1,7	21,8	19,0
08/01/97	30,7	2,1	2,3	0,16	1,8	2,1	21,6	15,1
08/01/97	25,7	1,8	1,9	0,14	2,0	2,4	20,1	14,6
09/01/97	16,1	1,3	1,2	0,10	2,0	2,9	22,2	10,2
10/01/97	10,5	0,9	0,8	0,07	2,1	3,5	22,5	8,6
14/01/97	5,5	0,3	0,4	0,02	1,0	1,0	27,5	4,2
14/01/97	4,2	0,3	0,3	0,02	1,5	2,3	27,1	4,7
14/01/97	2,8	0,2	0,2	0,02	1,4	2,6	28,2	5,1
15/01/97	3,7	0,3	0,3	0,02	1,2	1,5	31,5	3,6
15/01/97	2,9	0,2	0,2	0,02	1,3	2,1	30,1	4,0

2.1 Relações de economia (real e corrigida) em função da densidade de vazão mássica de água salina (M/A)

Na Fig. 2 mostra-se o comportamento da relação de economia real e corrigida em função da densidade de vazão da água de alimentação. No que se refere à relação de economia real, (RE), na região de pequenas densidades de vazão, entre 0 e 0,2 kg/h.m², não foi possível estabilizar o funcionamento do destilador. Para valores maiores que 0,2 kg/h.m² verifica-se um crescimento rápido da relação de economia, atingindo um máximo em torno de 2,3, para densidades de vazão da ordem de 1,2 kg/h.m² e taxa de produção de destilado igual 1,2 kg/h (Tab. 1).

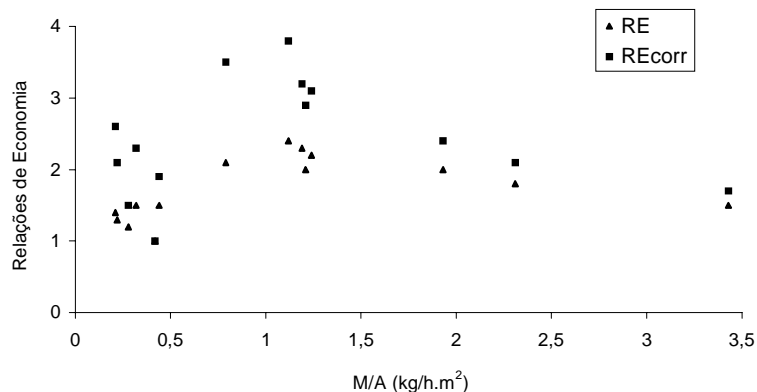


Figura 2 Comportamento das Relações de Economia real e corrigida em função de M/A .

O comportamento da relação de economia corrigida, (RE_{corr}), é similar ao da (RE) real, mas sempre com valores maiores, para um dado valor de (M/A). Na região de máxima (RE_{corr}), a maioria dos resultados situam-se entre 3 e 4, um acréscimo entre 27 e 38% com respeito à (RE) real, melhora que pode ser obtida, basicamente, através da redução das perdas térmicas.

2.2 Taxas de produção e conversão de água destilada.

A produção de água destilada, como esperado, é sempre crescente com a vazão (M), como mostra a Fig. 3. Entretanto, observa-se que a velocidade de crescimento da taxa de produção de água destilada (m_d) diminui com o aumento da vazão (M). A quantidade de vapor d'água na câmara de destilação aumenta com o aumento da vazão de água salina, até que o ar úmido atinge, localmente, condições de saturação, limitando o aumento da taxa de produção de destilado.

Cabe mencionar também que só foi possível realizar ensaios com densidades de vazão menores que $4,01 \text{ kg/h.m}^2$ (54 kg/h), devido a limitações operacionais (insuficiência de pressão manométrica para vencer as perdas de carga na tubulação de alimentação de água).

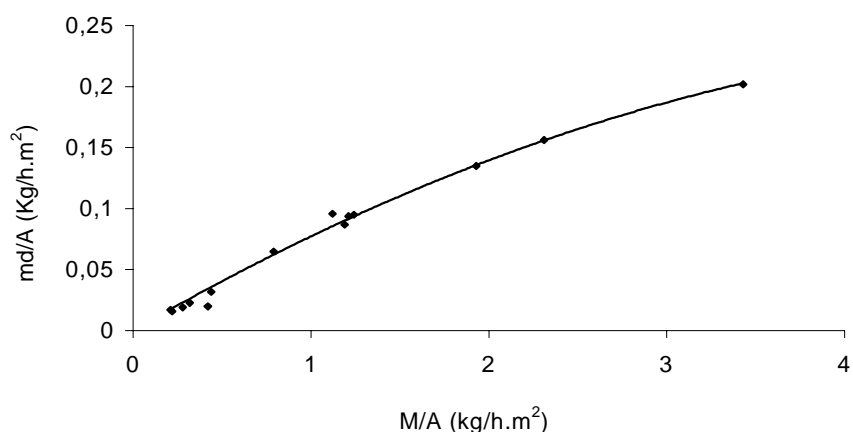


Figura 3 Densidade da taxa de produção de destilado (m_d/A) em função da densidade de vazão de água salina (M/A).

Os resultados relativos à taxa de produção de destilado, mostrados na Fig. 3, podem ser ajustados em função da densidade de vazão, pela expressão

$$\frac{m_d}{A} = -0,0073 \cdot \left(\frac{M}{A}\right)^2 + 0,0837 \cdot \frac{M}{A} \quad (13)$$

e a taxa de conversão (m_d/M) pode, portanto, ser escrita como uma função linear

$$TC = -0,0073 \cdot \frac{M}{A} + 0,0837 \quad (14)$$

Tal como comentado anteriormente, a taxa de conversão de água destilada (m_d/M), diminui, ainda que lentamente, a medida que a densidade de vazão cresce (Eq. (14)). O comportamento linear da taxa de conversão é, de fato, observado nos resultados experimentais, para densidades de vazão acima de 1 kg/h.m^2 (Fig. 4). Abaixo desse limite, a taxa de conversão é influenciada pela distribuição de água não uniforme nas telas do evaporador, distanciando-se do comportamento linear.

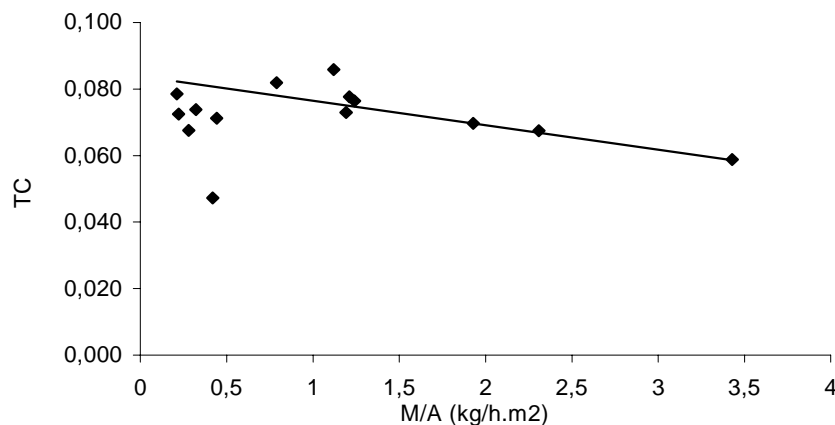


Figura 4 Comportamento da taxa de conversão de água destilada (m_d/M) em função da densidade de vazão.

2.3 Perdas térmicas para o ambiente

O coeficiente de perdas térmicas para o ambiente (U_L) pode ser calculado em função de três processos de transferência de calor, associados em série: a) A transferência de calor por radiação, convecção e condensação na superfície interna da câmara de destilação, b) A transferência de calor por condução através das paredes da câmara, formadas pelas paredes propriamente ditas e pelo isolamento térmico presente e c) A transferência de calor por convecção livre da superfície externa do destilador para o ambiente.

Os dois últimos processos são praticamente independentes da vazão de água salina, e consequentemente da quantidade de vapor presente na câmara de destilação, de modo que

$$L = \frac{h_p \cdot h_{cp}(M)}{h_p + h_{cp}(M)} \quad (15)$$

onde $(h_{cp}(M))$ é o coeficiente de transferência de calor da câmara de destilação para a parede interna da mesma (em função da vazão) e h_p representa o coeficiente de transferência de calor por condução nas paredes da câmara e por convecção entre a superfície externa do destilador e o ambiente.

Considerando que $(h_{cp}(M))$ seja crescente com a vazão, seu aumento faz com que o coeficiente de perdas globais tenda a (h_p) . A resistência térmica das paredes e da camada convectiva externa passam a controlar o processo de perdas térmicas o que significa a diminuição da parcela de água condensada nas paredes da câmara com relação à quantidade de água condensada na superfície dos condensadores. Este efeito é mostrado na Fig. 5, onde se representa a relação entre água condensada nas paredes e no condensador (m_{dp}/m_{dc}) , versus a densidade de vazão de água de alimentação (M/A) .

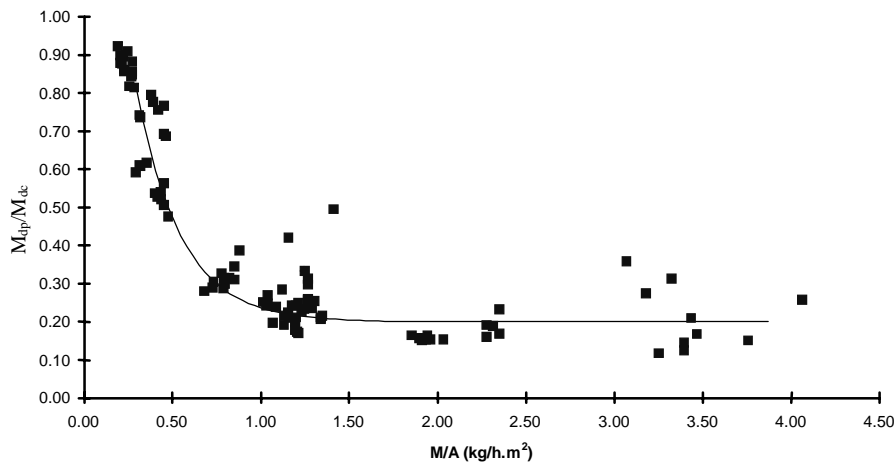


Figura 5 Relação entre as taxas de produção de água destilada nas paredes da câmara e nos condensadores, respectivamente.

4. SUMÁRIO E COMENTÁRIOS

As experiências realizadas e os resultados obtidos permitem concluir que

- 1 O protótipo desenvolvido é de fácil operação. Conseguiu-se manter o funcionamento estável sem utilização de bombas d'água, com a movimentação da água salina de alimentação por gravidade, o que eliminou a obrigatoriedade de uso de energia elétrica.
- 2 A temperatura máxima do processo é da ordem de 95 °C, permitindo o uso de qualquer fonte combustível de energia, além de energia solar (coletores de baixa concentração, aptos para aquecer fluidos a temperaturas em torno dos 100 °C) e calor residual de outros processos térmicos.
- 3 Para densidades de vazão de alimentação de água salina (M/A) maiores que 0,2 kg/h.m² o comportamento da relação de economia (RE) é crescente com a vazão, atingindo o máximo em torno de 1 kg/h.m². O crescimento de (RE) até 1kg/h.m² é explicado pela

- rápida diminuição da influência das perdas térmicas e pela distribuição mais uniforme da água salina nas telas do evaporador.
- 4 A relação de economia média atingida na região de máximo é da ordem de 2,3. Os resultados da relação de economia corrigida para as perdas térmicas, no entanto, mostram que seria possível atingir valores de RE próximos ao intervalo entre 3 e 4, modificando-se apenas o isolamento térmico da câmara de destilação.
 - 5 A taxa de produção de água destilada é crescente, porém não linear com a vazão, alcançando valores de 1,2 kg/h na região de máxima (RE) (RE = 2,3). A taxa de conversão é máxima na região de máxima RE, decrescendo com o crescimento da vazão de forma aproximadamente linear.

REFERÊNCIAS

- Baugartner, T., Jung, D. , Kossinger, F. E Sizmann, R., “Multi-Effect Ambient Pressure Dessalination with Free Circulation of Air”. Anais do ISES Solar World Congress, Vol. 2, Part II, pgs. 2259-2263. Denver, Co, USA (1991).
- Fraidenraich, N., Costa, G. K. e Barbosa, E. M. de S., “Análisis and Design Criteria For Regenerative Atmospheric Water Distillers”. Anais da XIX Reunión Anual de Energia Solar de la Asociación Nacional de Energia Solar (México), pgs.111-116, La Paz, Baja Califórnia, México, outubro (1995).
- Fraidenraich, Naum e Barbosa, Elielsa M. de S., “Desempenho Experimental de Um Destilador de Água Atmosférico do Tipo Regenerativo”. Anais do VI Encontro Nacional de Ciências Térmicas ENCIT/LATCYM 96, Florianópolis - Brasil, novembro, (1996).
- Heschl, O. e Sizmann, R., Solar sea water desalination with a high efficiency multi-effect solar still, Proceedings of ISES Solar World Congress, Hamburgo (1987).
- Melo, André Gustavo de, “Estudo experimental de um destilador do tipo atmosférico regenerativo”. Tese de mestrado, Departamento de Energia Nuclear da Universidade Federal de Pernambuco (1997).
- Román, R., Corvalán, R., Ponce, D. e Doria, J., Sistemas Multiefecto de Una Etapa para Purificación de Aguas Salobres, Anais da “XXVI Reunión da Asociación Argentina de Energía Solar-ASADES” e “7º Congresso Latino-Americano de Energia Solar-ALES”, La Plata, Argentina (1993).

EXPERIMENTAL CHARACTERIZATION OF PERFORMANCE OF A WATER DISTILLER OF THE REGENERATIVE ATMOSPHERIC TYPE

It was studied the performance of a prototype of a regenerative atmospheric distiller, formed by a set of vertical and parallel condensers and evaporators. In order to determine the characteristic behavior of the distiller a set of experiments were undertaken. Temperatures at several points of the distiller, thermal energy input, water flow input and production rate of distilled water in the condenser and in the internal walls of the distillation camera, were measured. Results show that the Gained Output Ratio (relation between water evaporation heat and thermal input per kg of distilled water) (GOR or RE), reaches a maximum value of 2.3 and, under these conditions, the distilled water production rate is equal to 1.2 kg/h. If the Gained Output Ratio goes down to 2 the distilled water output becomes equal to 1.8 kg/h.

Word-keys: distillation, water, energy, heat transfer.