

DESSALINIZAÇÃO DE ÁGUA DO MAR: Comparação do desempenho de dois destiladores.

A. Joyce, D. Loureiro, M. Collares Pereira,

M. Moreira **

INETI-DER-Azinhaga dos Lameiros à Estrada do Paço do Lumiar, 1699 LISBOA CODEX- PORTUGAL

** INSTITUTO POLITÉCNICO DE SETÚBAL — Setúbal.

I-INTRODUÇÃO.

A utilização de energia solar na dessalinização de água do mar é uma das aplicações conhecidas e de grande interesse daquela forma de energia renovável. O destilador de efeito simples é, na gama das pequenas produções (até 1 m³ por dia), o de maior utilização devido fundamentalmente ao seu baixo custo mas a sua produção é baixa (tipicamente 3 a 4 l/m² por dia), entre outras razões por não haver recuperação do calor latente da condensação. Para além deste facto este tipo de dessalinizador apresenta problemas quer de fragilidade (o vidro quebra-se frequentemente) quer de manutenção (limpeza, desenvolvimento de algas, etc.).

Várias outras soluções têm sido propostas no intuito de melhorar a produção e de facilitar a manutenção.

Uma solução possível é a utilização de destiladores de efeito múltiplo em que o calor latente da condensação é recuperado no aquecimento de andares sucessivos. Um sistema deste tipo foi proposto por Saravia et al [1] e um protótipo idêntico foi construído no Departamento de Energias Renováveis (DER) do INETI em que o aquecimento da água do primeiro andar é obtido por um concentrador CPC assimétrico[2].

Uma outra possibilidade é a de aumentar a área de permuta da transferência de massa através da pulverização da solução salina previamente aquecida. Neste sentido foi idealizada e construída uma câmara de destilação deste tipo [3]. Este protótipo pode utilizar como fonte de aquecimento ou uma área de colectores solares ou um Lago Solar.

O presente trabalho descreve os dois protótipos construídos, apresenta os resultados obtidos nos ensaios efectuados e compara-os quer do ponto de vista da produção de água destilada quer do ponto de vista dos respectivos custos e manutenção.

O destilador testado tem a configuração que se mostra na Figura 1.

A câmara de destilação constituída por três andares sucessivos é aquecida na sua base por um concentrador CPC assimétrico. A água aquecida evapora e vai condensar na chapa inclinada que constitui o tecto do primeiro andar, libertando o calor latente de condensação para a água de alimentação que escorre num tecido absorvente por cima da chapa. Ao absorver o calor latente a água contida no tecido vai, por sua vez, sofrer um processo de evaporação/condensação idêntico, e assim sucessivamente para os três andares.

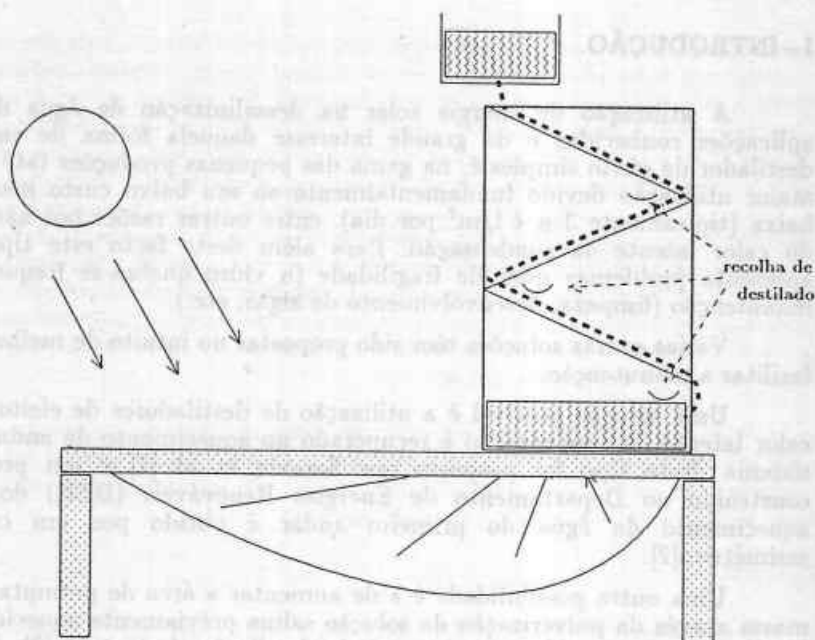


Fig. 1 - Esquema do destilador multi-efeito com iluminação por CPC assimétrico.

Uma câmara deste tipo, com uma área da base de 0.5 m^2 e uma altura de 1 m foi construída e testada no DER [2] mostrando-se na Figura 2 uma vista do sistema completo.

A câmara é de forma paralelepípedica e foi construída com painéis do tipo sandwich de 52 mm de espessura constituídos por 2 chapas de aço galvanizado com revestimento exterior de PVC entre as quais existe uma camada de isolamento (lã mineral).

A base da câmara é constituída por um depósito construído em latão com um volume total de 50 l.

O volume interior é dividido em três andares, tendo uma chapa de latão com uma inclinação de 22° a separá-los. Cada uma destas chapas possui no fundo uma calha por onde é recolhida a água condensada.

A configuração construtiva permite um fácil acesso aos diferentes andares.

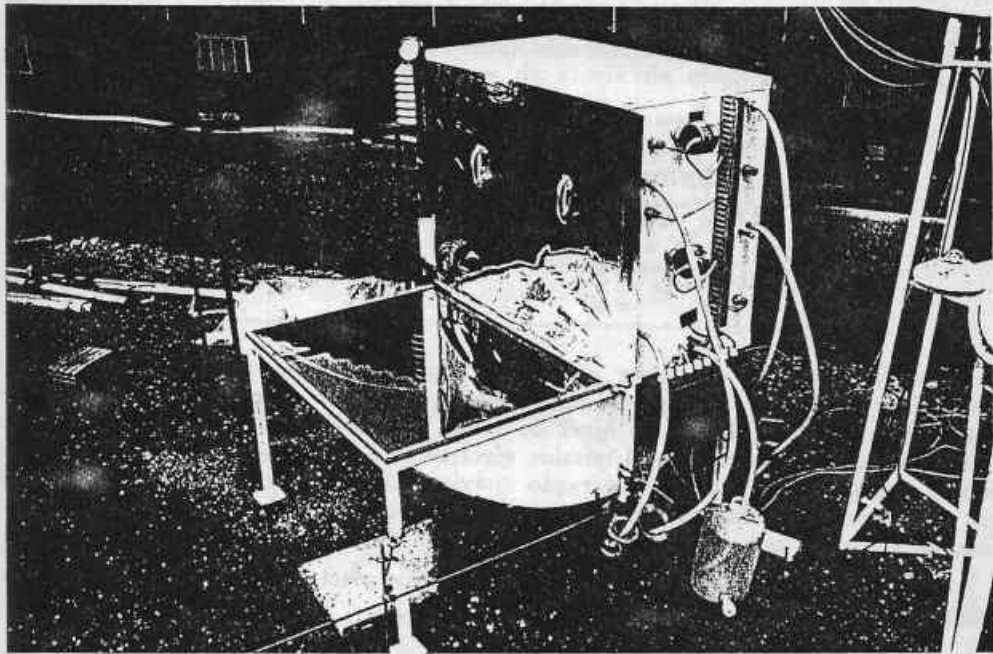


Fig.2 - Fotografia da câmara acoplada a um concentrador CPC assimétrico.

O aquecimento do primeiro andar é proporcionado por um concentrador CPC assimétrico.

Este tipo de concentrador não produtor de imagem, ao contrário dos CPC simétricos não possui, como o próprio nome indica, uma simetria em torno do seu eixo óptico. Este facto confere-lhe propriedades distintas do CPC simétrico, nomeadamente uma maior dependência sazonal e uma variação da concentração com o ângulo de incidência expressa por:

$$C(\theta) = C_{\max} \frac{\sin(\theta_m - \theta)}{\sin \theta_m} \frac{1}{\cos \theta} \quad (1)$$

onde θ é o ângulo de incidência, θ_m o ângulo de aceitação e C_{\max} a concentração máxima definida por:

$$C_{\max} = \frac{2}{\tan\left(\frac{\theta_m}{2}\right)} \quad (2)$$

O aumento da concentração máxima é obtido à custa de uma redução do ângulo de aceitação, tornando o concentrador sazonalmente dependente. De notar também que este facto vem acompanhado da já referida variação da concentração com o ângulo de incidência.

No entanto a dessalinização pode ter um carácter sazonal justificando a utilização deste tipo de concentrador.

A ligação entre a parábola que constitui o CPC assimétrico e o depósito da câmara destiladora é feita por uma curva involuta cuja concentração é 1 (um quarto de circunferência de raio igual à distância focal do CPC assimétrico $f=0.5$ m).

O concentrador e a involuta foram moldados em chapa de ferro galvanizado tendo-se colado sobre esta chapa um filme reflector de alumínio (3M YS-41) com uma reflectividade, no estado novo, de $\rho = 0.86$.

O sistema foi construído de forma a poderem ser testadas, facilmente, três configurações possíveis:

$$\text{Configuração 1} - \begin{matrix} C_{\max} = 2 \\ \theta_m = 90^\circ \end{matrix}$$

$$\text{Configuração 2} - \begin{matrix} C_{\max} = 2.9 \\ \theta_m = 70^\circ \end{matrix}$$

$$\text{Configuração 3} - \begin{matrix} C_{\max} = 3.5 \\ \theta_m = 60^\circ \end{matrix}$$

Não foi utilizada qualquer cobertura transparente ao nível da abertura do concentrador. No entanto utilizou-se uma cobertura da base do receptor com um vidro comum colocado 5 cm abaixo do nível do fundo do depósito de forma a diminuir as perdas térmicas por radiação. Os ensaios efectuados até ao momento dizem respeito apenas à configuração com concentração máxima de 2.9, mostrando-se em seguida alguns dos resultados obtidos durante o período de Junho e Julho de 1993 ou seja o período de Verão no hemisfério norte.

Na Figura 3 mostram-se os resultados do ensaio efectuado em 18/06/93 (perto do solstício de Verão).

Ensaio com iluminação natural (18/06/93) Concentração 2.9

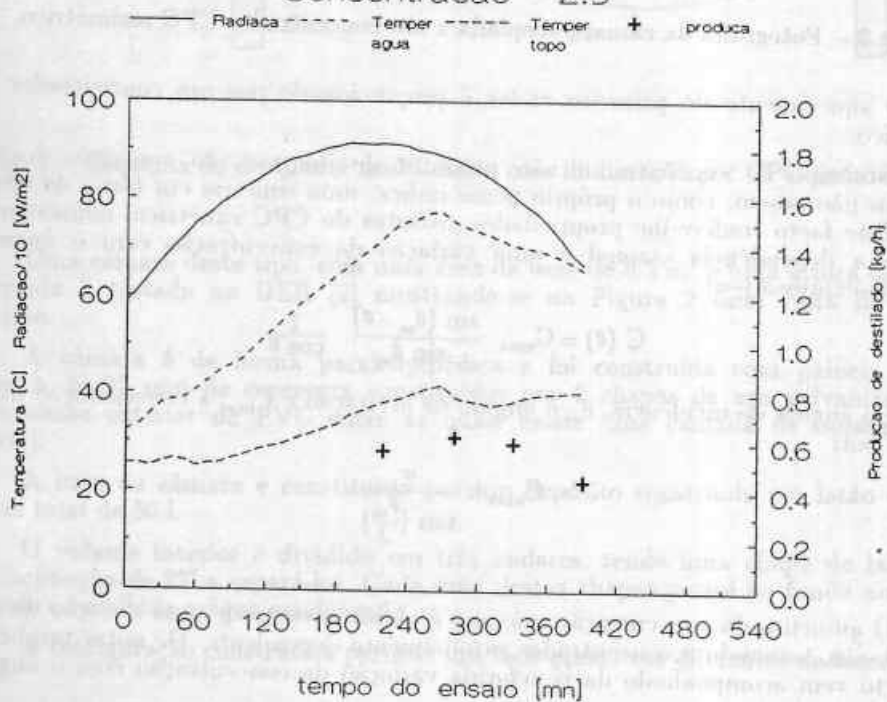


Fig.3- Ensaio em 18/06/93.

Pode verificar-se que a água no depósito subiu até cerca de 75 °C e que existe um desfazamento entre o pico de radiação e a temperatura máxima atingida, que reflecte a inércia da câmara.

A produção evoluiu de acordo com a temperatura da água no depósito tendo atingido um máximo de cerca de 600 g/h, equivalente a um consumo específico de 6320 kJ/kg.

Com base nos resultados experimentais obtidos desenvolveu-se um modelo de simulação da câmara multi-efeito [4] e do sistema iluminador (CPC assimétrico) tendo a radiação solar sido simulada por um modelo de céu limpo [5].

Na Figura 4 apresentam-se os resultados obtidos, podendo ver-se a evolução da temperatura da água e da temperatura da chapa da câmara 3, juntamente com a evolução da produção de água destilada.

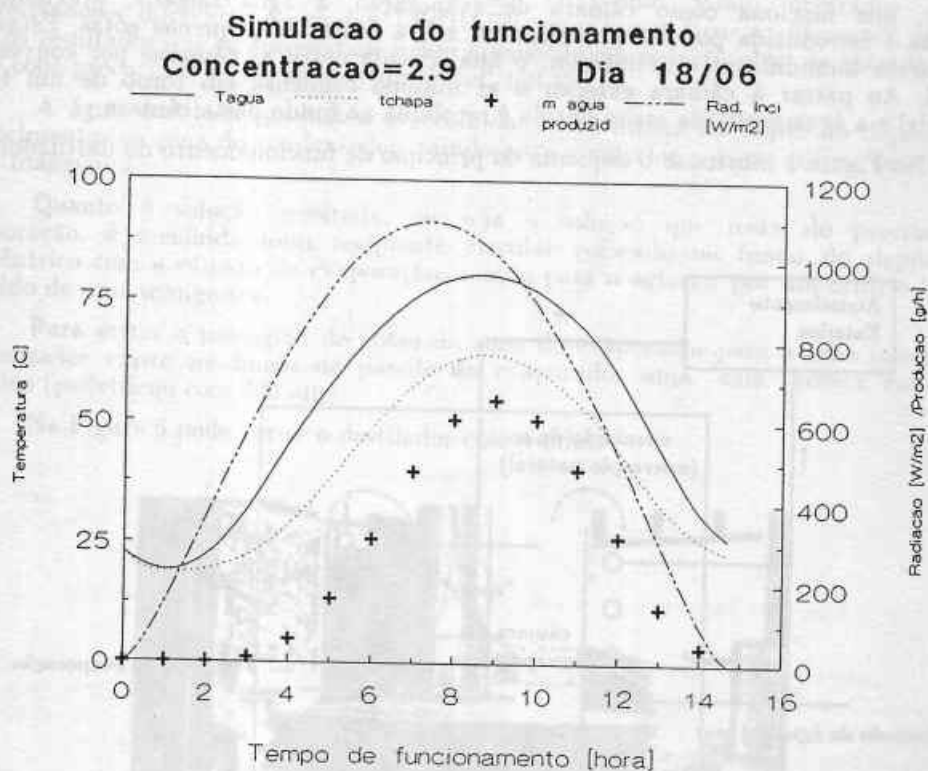


Fig.4 – Simulação do cusaio de 18/06/93.

Pode verificar-se que os resultados desta simulação são aproximados dos resultados obtidos experimentalmente, representados na Figura 3, quer no que se refere à temperatura máxima da água quer do ponto de vista das produções obtidas.

Desta simulação obteve-se uma produção total de água de 3.2 kg/dia e um consumo específico diário de 9549 kJ/kg.

De notar que esta produção é baixa essencialmente porque foram considerados os dados climatológicos de Lisboa (38.75 ° latitude) e que em locais em que, quer a temperatura ambiente quer a radiação solar sejam mais elevados aquela produção poderá aumentar significativamente.

A produção aumenta significativamente com a temperatura da água no primeiro andar pelo que também é de supor que a produção aumente quando se utilizar a concentração mais elevada, embora nessa situação o ângulo de aceitação venha diminuído e o período de funcionamento do sistema seja menor.

Durante os ensaios detectaram-se também alguns problemas relacionados com a manutenção do dispositivo nomeadamente a oxidação das chapas de latão a qual dificulta o escoar da água pelas mesmas.

II – Destilador com evaporação por "spray".

A ideia base por trás deste tipo de destilador é a de aumentar significativamente a área de transferência de massa fazendo a introdução da solução salina numa câmara de evaporação através de pequenas gotas, continuando a fazer a recuperação do calor latente da condensação.

O destilador consiste em duas câmaras cilíndricas concêntricas. Na câmara interior, que funciona como câmara de evaporação, a água salgada, previamente aquecida é introduzida por um pulverizador, sob a forma de pequenas gotas. Estas ao evaporarem humidificam o ar interior, o qual circula entre as câmaras por convecção natural. Ao passar à câmara exterior o ar húmido condensa em torno de um tubo helicoidal e a água destilada assim obtida é recolhida no fundo desta câmara

Na Figura 1 mostra-se o esquema do princípio de funcionamento do destilador.

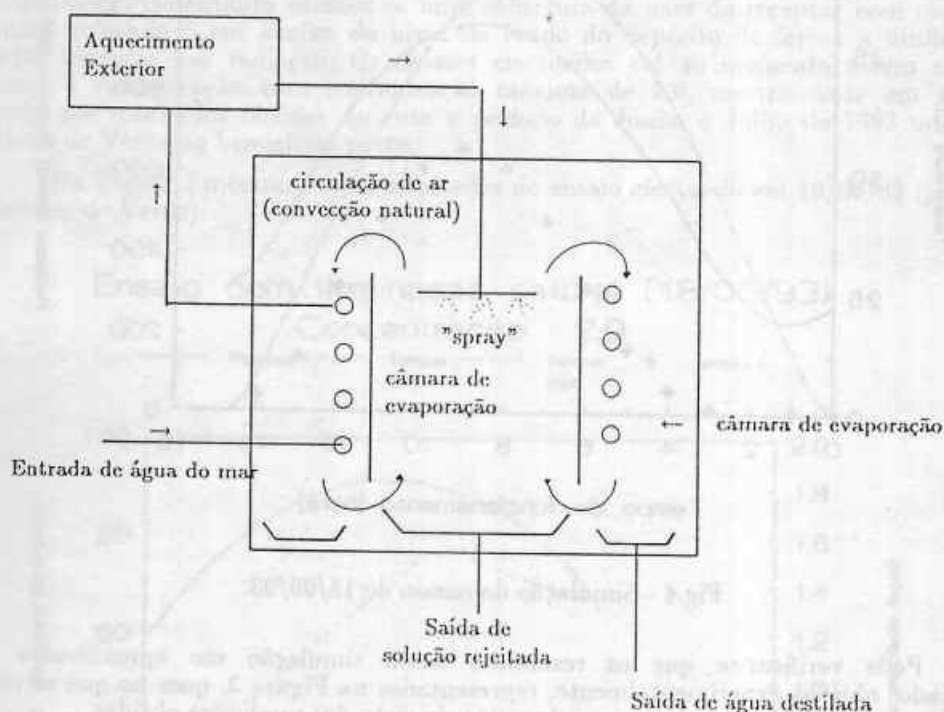


Fig.5 – Esquema da câmara de destilação.

O protótipo foi idealizado de forma a proporcionar uma fácil manutenção e nele foram utilizados materiais resistentes à corrosão salina nomeadamente o Polipropileno (PP) e o cloreto de polivinil (PVC).

O destilador é constituído exteriormente por um depósito em fibrocimento com a capacidade de 1000 l sendo as duas câmaras interiores formadas a partir de um divisória cilíndrica que é uma sanduiche de um material isolante (espuma de poliâmida) com 5 cm de espessura, entre duas lâminas de polipropileno de 1 mm de espessura. Esta parede divisória é sustentada por quatro chapas de PVC de 1 cm de espessura, as quais têm

também a função de sustentar o tubo do condensador. Desta forma todo o conjunto interior ao depósito de fibrocimento, incluindo o tubo condensador, pode ser removido para manutenção.

O tubo do condensador é de plástico alietado (polipropileno) com 20 mm de diâmetro médio interior e uma parede fina.

A água salgada é introduzida na câmara interior através de um tubo de polipropileno que atravessa a tampa do destilador e termina num pulverizador que produz o "spray" de gotas.

Os pulverizadores utilizados podem ser de vários tipos consoante a forma como a solução é introduzida, tangenciais ou axiais, consoante a geometria da nuvem produzida podendo ser de cone oco ou de cone preenchido ou ainda seguido o ângulo de abertura do cone.

Nos ensaios que têm vindo a ser efectuados foram utilizados quatro pulverizadores diferentes da marca LECHLER com características diferentes, se bem que os resultados que se apresentam sejam apenas de um pulverizador de entrada axial, com cone preenchido e 120° de abertura (Ref. 460.408.).

A água destilada produzida é recolhida directamente no fundo do depósito de fibrocimento, na zona do condensador, saindo para o exterior por um orifício provido de uma mangueira.

Quanto à solução rejeitada, ou seja a solução que resta do processo de evaporação, é recolhida num recipiente circular colocado no fundo do depósito e concêntrico com a câmara de evaporação, saindo para o exterior por um orifício lateral provido de uma mangueira.

Para evitar a passagem de gotas da zona do evaporador para a zona inferior do condensador existe no fundo da parede do evaporador uma "saia" cônica em filme plástico (polietileno com 200 μ m).

Na Figura 6 pode ver-se o destilador construído.

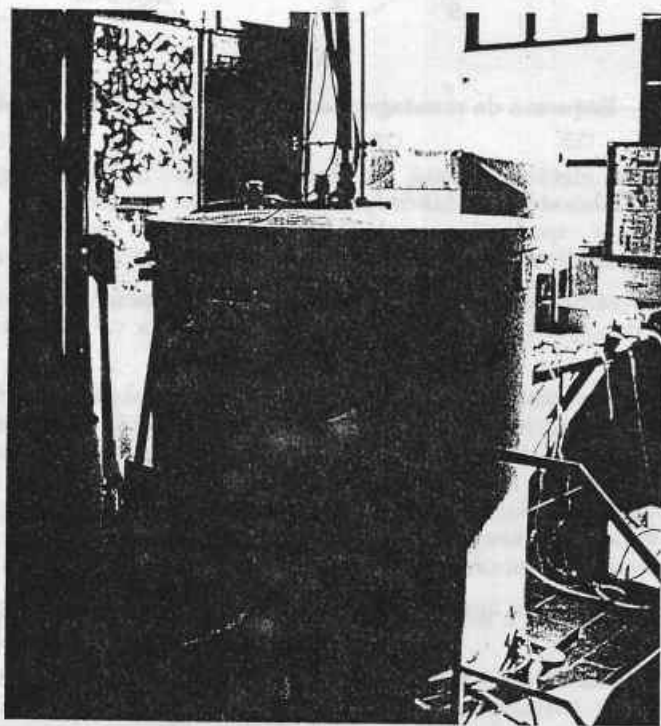


Fig. 6 - Destilador construído.

A câmara tem vindo a ser testada em laboratório com a finalidade de medir a produção de destilado para diferentes pulverizadores e para diferentes condições de caudal e temperatura de entrada.

O circuito utilizado nos ensaios encontra-se representado na Figura 7.

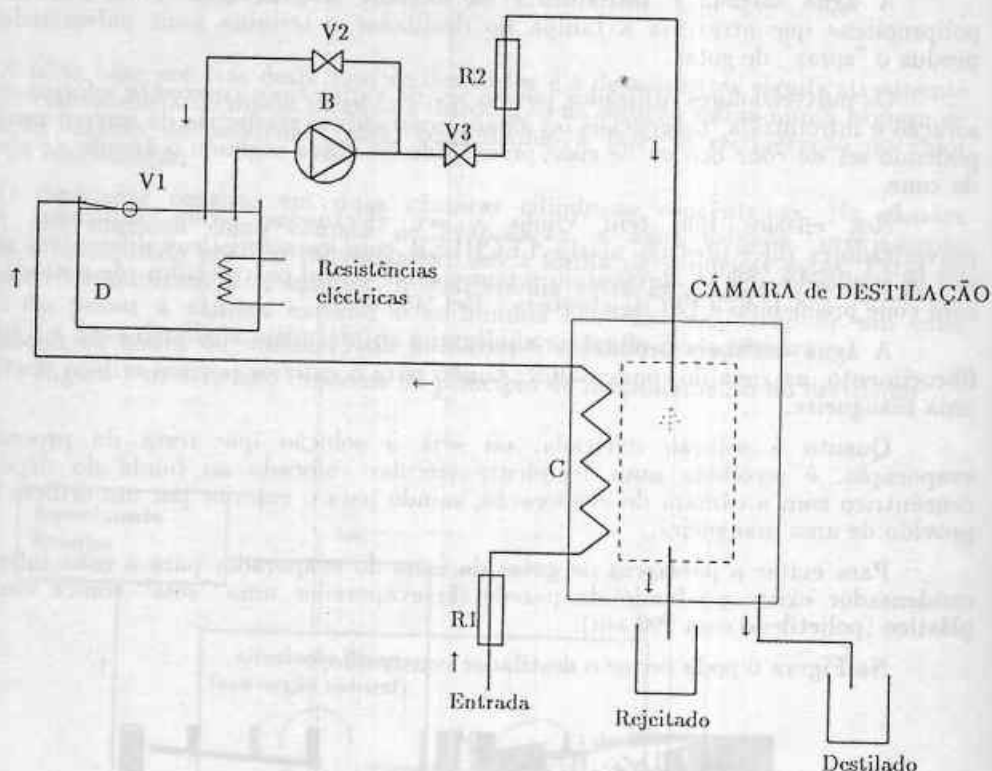


Fig. 7- Esquema de montagem dos ensaios da câmara destiladora.

Nos ensaios efectuados até ao momento foi utilizada água da rede de abastecimento do laboratório estando previsto efectuar ensaios com água salgada no sentido de verificar qual a manutenção necessária a um sistema deste tipo nomeadamente a periodicidade de remoção de sal do interior do evaporador.

A água entra para o condensador C depois de passar no rotâmetro R1 e é introduzida num depósito termostatzado D através de uma válvula que mantém o nível de D constante.

A água é aquecida neste depósito por meio de resistências eléctricas T até à temperatura previamente regulada. Uma pequena bomba B de corrente contínua (24 V) usualmente utilizada em sistemas fotovoltaicos aspira água do depósito introduzindo-a no pulverizador da câmara através de um rotâmetro R2. Desta forma assegura-se que os caudais de introdução na câmara e de circulação no condensador são iguais e que o calor latente de condensação é recuperado. O caudal pode ser regulado através das válvulas V2 e V3. Os rotâmetros dão uma indicação do valor deste caudal.

A água destilada e a água rejeitada são recolhidas periodicamente em copos e a sua massa é medida.

Diversos sensores de temperatura permitem medir quer as temperaturas nos diferentes pontos de entrada e saída do sistema, quer ainda as temperaturas do ar interior das câmaras de evaporação e de condensação a diferentes níveis.

Foram efectuados ensaios com duas temperaturas de entrada diferentes, 55 °C e 65 °C, e com quatro caudais distintos 10 g/s, 12 g/s, 16 g/s e 18 g/s.

A produção em regime estacionário para cada um dos ensaios pode ser representada em termos da taxa de conversão definida como o quociente entre o caudal mássico de destilado produzido e o caudal mássico total de solução injectada.

$$r_c = \frac{\dot{m}_d}{\dot{m}_t} = \frac{\dot{m}_d}{\dot{m}_d + \dot{m}_r} \quad (3)$$

Na Figura 8 apresentam-se os resultados obtidos em termos da taxa de conversão em função do diferencial de temperatura entre a fonte quente (entrada no pulverizador) e a fonte fria (entrada no condensador).

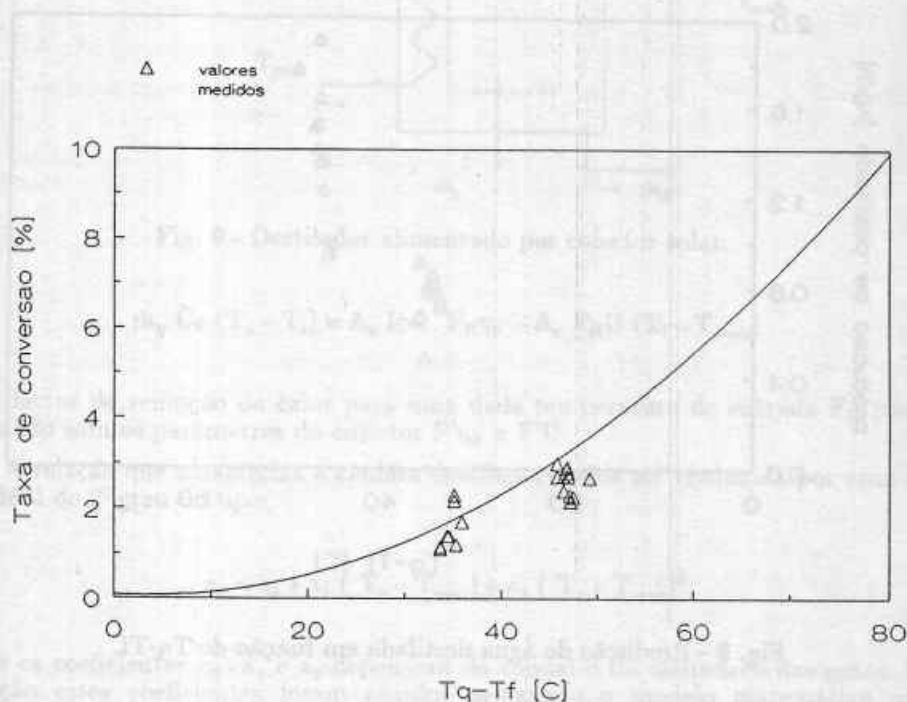


Fig. 7 - Taxas de conversão obtidas nos ensaios efectuados.

Representa-se também a curva da taxa de conversão em função do diferencial de temperaturas, obtida de um modelo da câmara que se encontra em desenvolvimento [6]. Desta Figura pode concluir-se:

- As taxas de conversão, para o pulverizador ensaiado e para as características dimensionais do protótipo e às temperaturas ensaiadas são pequenas, inferiores a 3%.
- A taxa de conversão tem um aumento significativo com a temperatura.
- A taxa de conversão aumenta com a diminuição do caudal de injeção.
- Do modelo matemático pode obter-se que a taxa de conversão aumenta com a diminuição do diâmetro das gotas, para um mesmo caudal de injeção.

Os resultados do modelo que se apresentam correspondem a um caudal de 18 g/s e a um diâmetro das gotas de 800 μm .

De notar que apesar das taxas de conversão serem baixas as produções de água destilada para os caudais testados são significativas tendo em conta que as temperaturas de entrada não são muito elevadas. Na Figura 8 representam-se os valores obtidos em função do diferencial de temperatura entre a fonte quente e a fonte fria.

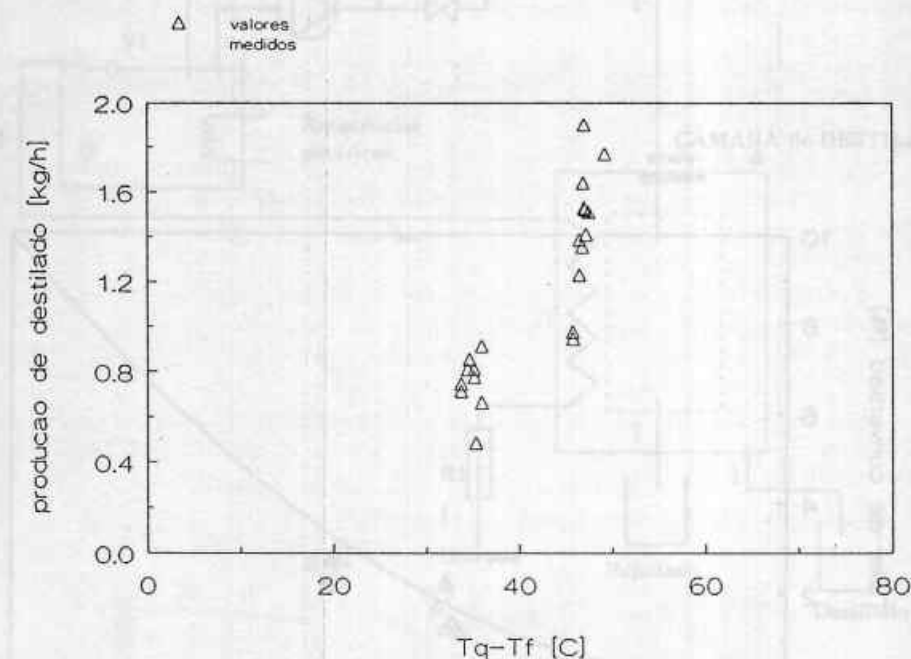


Fig. 8 – Produção de água destilada em função de Tq-Tf.

Pode constatar-se que as produções obtidas são apreciáveis mesmo às temperaturas baixas. Como termo de comparação pode referir-se que a água produzida pelo sistema multi-efeito referido anteriormente funcionando à temperatura de cerca de 65 °C foi de 555 g/h enquanto que o sistema por spray mesmo sem estar optimizado produziu 1640 g/h à temperatura de 65 °C (ensaio em 20/10/93) com um caudal de entrada de 57.6 kg/h.

O consumo específico da câmara de "spray" a esta temperatura foi de 4507 kJ/kg e o consumo da bomba foi de 253 kJ/kg pelo que o consumo total foi de 4760 kJ/kg, enquanto que a câmara multi-efeito teve um consumo específico à mesma temperatura de 6320 kJ/kg.

Dos ensaios efectuados conclui-se que é importante para aumentar a taxa de conversão ter um caudal baixo e um pequeno diâmetro das gotas. Estas duas condições exigem a utilização de uma bomba que possa fornecer um caudal baixo a uma pressão elevada. A bomba a escolher terá também que ter um baixo consumo para poder ser alimentada por um módulo fotovoltaico de forma a que todo o sistema dependa apenas de energia solar.

A produção diária esperada de um sistema deste tipo, alimentado por um colector solar pode ser obtida através de um modelo simples em que a câmara é representada pela curva de taxa de conversão em função do diferencial de temperatura entre a fonte quente e a fonte fria e o colector é representado pela equação da energia

fornecida em cada instante. Assim e recorrendo à Figura 9 que representa o esquema da instalação pode escrever-se:

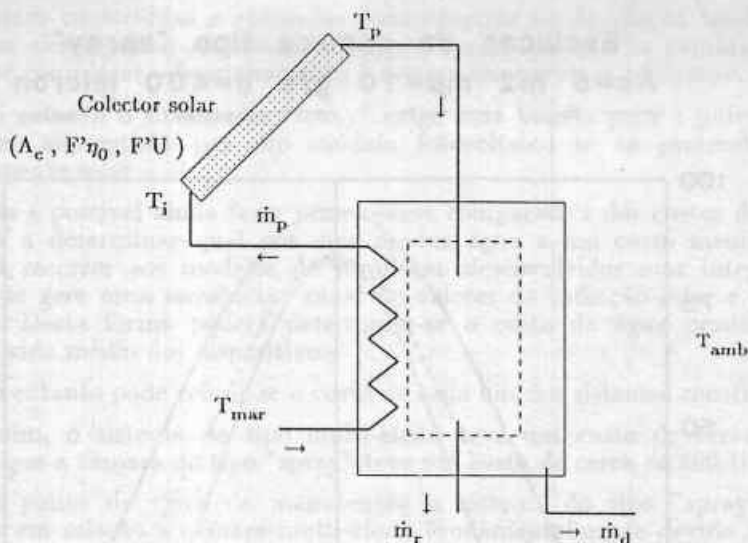


Fig. 9 – Destilador alimentado por coletor solar.

$$\dot{m}_p C_p (T_p - T_i) = A_c I_{col} F_R \eta_0 - A_c F_R U (T_i - T_{amb}) \quad (4)$$

onde o factor de remoção de calor para uma dada temperatura de entrada F_R pode ser relacionado com os parâmetros do coletor $F' \eta_0$ e $F' U$.

A relação que caracteriza a câmara destiladora pode ser traduzida por uma curva polinomial do 2º grau do tipo:

$$\tau_c = a_0 + a_1 (T_p - T_{mar}) + a_2 (T_p - T_{mar})^2 \quad (5)$$

em que os coeficientes a_0 , a_1 e a_2 dependem do caudal e do diâmetro das gotas. Nesta simulação estes coeficientes foram obtidos utilizando o modelo matemático que se encontra em desenvolvimento.

Se se admitir que existe uma conversão total do calor latente de condensação em aquecimento do fluido que circula no condensador pode obter-se também:

$$\tau_c = \frac{\dot{m}_d}{\dot{m}_p} = \frac{C_p (T_i - T_{mar})}{\lambda} \quad (6)$$

em que λ é o calor latente de evaporação.

O sistema de equações (4), (5) e (6) pode ser resolvido em ordem a T_p uma vez conhecidas as características do coletor solar, da câmara destiladora e a radiação incidente.

Para a obtenção da radiação incidente utilizou-se o modelo de céu limpo anteriormente referido na análise do comportamento do destilador multi-efeito com iluminação por CPC assimétrico.*

Na resolução daquele sistema utilizou-se o método de Newton-Raphson.

Os resultados obtidos mostram-se na Figura 10 onde se representa a evolução das temperaturas de entrada e saída do coletor e a produção de água destilada, em função do tempo solar verdadeiro, no melhor dia do ano (solstício de Verão) para Lisboa e

utilizando uma área colectora de 5 m^2 .

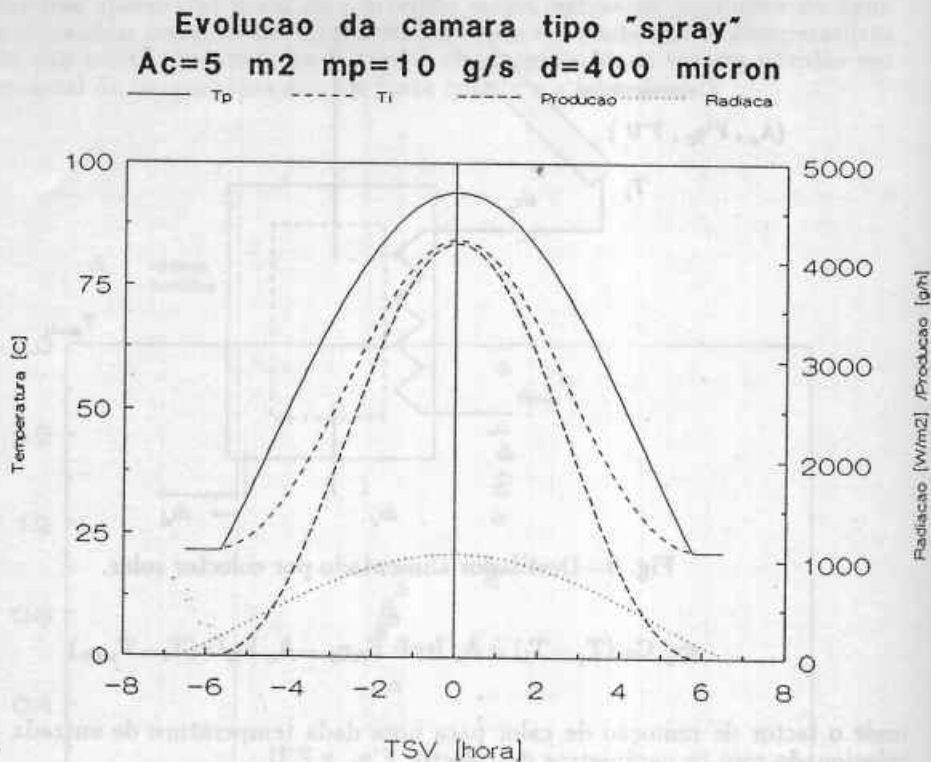


Fig. 10 - Resultados da simulação para 5 m^2 .

A produção diária de água é de 23.6 kg ou seja cerca de 4.72 kg/m^2 e o consumo específico (energia incidente no plano horizontal/massa de água produzida) é de 7203 kJ/kg .

A produção por unidade de área do colectador é baixa mas novamente há que ter em conta que a simulação foi efectuada utilizando os dados climatológicos de Lisboa. No entanto verificou-se que a produção deste tipo de destilador é cercade 2.5 vezes superior à do destilador multi-efeito para a mesma temperatura (comparação efectuada a cerca de $65 \text{ }^\circ\text{C}$).

Por outro lado tendo-se considerado colectores solares para o aquecimento, a temperatura obtida é baixa durante grande parte do dia. Este facto permite concluir que este tipo de dispositivo terá um melhor desempenho se for acoplado a um processo de aquecimento em que a temperatura se mantenha aproximadamente constante ao longo do dia como por exemplo um Lago Solar.

VI - CONCLUSÕES.

Foram construídas e ensaiadas duas câmaras de destilação tendo-se conseguido um melhor desempenho na câmara do tipo "spray" do que na câmara do tipo multi-efeito se se considerar o funcionamento à mesma temperatura constante.

No entanto o sistema de "spray" exige uma bomba para a pulverização, a qual poderá ser alimentada por um módulo fotovoltaico se se pretender um sistema exclusivamente solar.

Não é possível ainda fazer uma análise comparativa dos custos dos dois sistemas com vista a determinar qual dos dois produz água a um custo menor. Para o fazer poder-se-á recorrer aos modelos de simulação desenvolvidos mas integrados com um modelo que gere uma sequência anual de valores da radiação solar e da temperatura ambiente. Desta forma poderá determinar-se o custo da água produzida durante o tempo de vida médio dos dispositivos.

No entanto pode referir-se o custo de cada um dos sistemas construídos.

Assim, o sistema do tipo multi-efeito teve um custo de cerca de 1700 USD enquanto que a câmara do tipo "spray" teve um custo de cerca de 600 USD.

Do ponto de vista da manutenção o sistema do tipo "spray" tem também vantagens em relação à câmara multi-efeito fundamentalmente devido à sua concepção simples.

AGRADECIMENTOS.

Os autores desejam expressar o seu agradecimento à estagiária Amélia Capítulo pelo auxílio prestado nos ensaios dos destiladores e na recolha dos dados para informatização.

REFERÊNCIAS.

- [1] - "Multistage solar still" - J. Franco, L. Saravia - Universidad Nacional de Salta (Argentina) (1992).
- [2] - "Destilador Multi-efeito aquecido por um concentrador CPC assimétrico: Relatório de resultados experimentais." - D. Loureiro, A. Joyce, M. Collares Pereira, A. Leão, L. Carlos. - Reunião do Grupo CYTED-D em S. José da Costa Rica (Abril 1993).
- [3] - Câmara de destilação com evaporação por "spray". Resultados dos ensaios efectuados. - A. Joyce, D. Loureiro, M. Collares Pereira, M. Moreira - Reunião do projecto "Purificação de água para consumo humano" do programa CYTED-D - S. C. Bariloche (Novembro 1993).
- [4] - "Modelo de simulação de um destilador multifeito" - A. Joyce - Reunião do Grupo CYTED-D em S. José da Costa Rica (Abril 1993).
- [5] - "The modeling of daily sequences of hourly radiation through autoregressive methods" - R. Aguiar, M. Collares Pereira - Proc. Solar World Congress ISES Kobe Japão (1989).
- [6] - Tese de Mestrado em Energia - Miguel Moreira - a ser publicada. (1993):