

# PRODUÇÃO DE ÁGUA PARA CONSUMO HUMANO COM DESTILADOR DE MULTIEFEITO

N. Fraidenraich., E.M.S. Barbosa, C. Tiba  
Universidade Federal de Pernambuco DEN/UFPE  
Av. Prof. Lutz Freire, 1000 - CDU  
FAX: 081 271 82 50

## SUMÁRIO

Com o objetivo de desenvolver uma tecnologia de dessalinização utilizando energias renováveis e direcionada à regiões áridas e com escassez de água doce como o Nordeste do Brasil, um protótipo de destilador de multiefeito foi construído. O projeto prevê que o equipamento deve funcionar com o combustível renovável mais disponível na localidade (energia solar, lenha, carvão). Os testes iniciais mostram que o valor típico de 1 l/h para 700W de potência é obtido quando o destilador funciona com 4 estágios. Utilizando lenha ou carvão vegetal poderia se contar com uma produção diária de 24 l/dia de água pura, quantidade suficiente para o consumo médio de 6 pessoas.

## 1. INTRODUÇÃO

Entre os diversos problemas existentes no abastecimento de água para consumo humano, a grande ocorrência de águas salobras é um dos mais preocupantes. Menos de 3% de água do mundo é doce, da qual 78% apresenta-se congelada nas regiões polares ou em rios e lagos subterrâneos, o que dificulta sua utilização pelo homem (Gutierrez, 1992).

Uma alternativa de suprimento seria a dessalinização da água dos mares, no entanto o uso da dessalinização em larga escala pode contribuir substancialmente para o aumento da demanda energética. Os processos de dessalinização se resumem em separar o sal em excesso através de eletricidade, calor, congelamento dos cristais de sal ou submetendo a água a altas pressões. Em todos esses procedimentos, o elemento crítico é o consumo de energia. O custo da água produzida é determinado basicamente pelo custo da energia consumida no processo de dessalinização. Tirar o sal da água ainda é um processo muito caro e inviável para a maioria das nações do mundo.

Por outro lado existem localidades onde a aridez e escassez de recursos de água doce levam a que praticamente toda a água para consumo deva ser dessalinizada. Muito particularmente, nas regiões semi-áridas como o Nordeste do Brasil, com baixo nível médio de precipitação (400mm), chuvas mal distribuídas durante 2 a 3 meses no ano e com a grande maioria dos poços com índices de salinidade superiores ao limite máximo permitido de 1000ppm de sólidos totais dissolvidos, o fornecimento de água para consumo humano torna-se um problema crítico.

O Nordeste do Brasil (NE) de clima tropical semi-árido é a área de maior incidência de períodos de seca (escassas ou nulas precipitações). Pode-se caracterizar esta região, particularmente o sertão de Pernambuco, pelos seguintes aspectos gerais pertinentes à dessalinização da água, com energias renováveis:

### • Recurso Hídrico

Os principais rios do sertão pernambucano são o Ipanema, o Moxotó, o Pajeú, o Brigida e o Pontual, todos de fluxo temporário e tributários do rio São Francisco, principal responsável pelo sistema hidroelétrico do Nordeste.

A escassez de mananciais hídricos de superfície tem posto em evidência a importância das águas subterrâneas. A exploração dessas águas se acha limitada pela natureza dos seus terrenos, predominantemente cristalinos, pela vazão (média de 3000 l/h) e mais nitidamente pela qualidade, apresentando altos índices de salinidade, em muitos casos acima de 6000ppm, limite extremo de salinidade para animais (Leal, 1980). A Tabela 1 mostra alguns exemplos de poços salinos da região Nordeste.

Tabela 1 - Amostragem de poços salinos no Nordeste (CISAGRO - S. TEC).

Localidade	N°. Habitantes	Características		
		Profundidade (m)	Vazão (l/h)	Res. Total (ppm)
Serra Talhada	300	50	500	5500
Arcoverde	100	50	2000	4390
Trindade	115	30	50	12379
Sertânia	240	40	1000	3250

### • Recurso Energético

Quanto aos energéticos renováveis, os recursos florestal e solar representam os únicos disponíveis durante todo ano, capazes de serem aproveitados pela população rural a curto prazo.

#### Recurso Florestal

A vegetação básica é a caatinga, plantas adaptadas à seca que acumulam água e se revestem de proteção para evitar a evaporação demasiada (xique-xique, mandacaru, palma...). Esta vegetação nativa desempenha um papel predominante na conservação dos solos e como fonte forrageira permanente para a pecuária extensiva tradicional. A nível do estado de Pernambuco, segundo Diagnóstico do Setor Florestal de Pernambuco, a região do sertão demonstra, em certas localidades, um potencial para produção florestal superior a sua demanda (Sec. Agricultura de PE).

A lenha e o carvão representam 23% da demanda energética estadual (base 1988) e em conjunto constituem o segundo energético mais importante do Estado, superado apenas pela energia elétrica e igualando-se ao petróleo.

#### Recurso Solar

Quanto ao recurso solar a região do Nordeste do Brasil apresenta-se com níveis médios anuais de irradiação solar em torno de 2000 horas/ano. O mapa de isolinhas mostra que todo o Nordeste apresenta alto índice de insolação, sendo que as áreas de maior nível de insolação são as definidas pelas isolinhas de 500 cal/cm<sup>2</sup> dia ou seja 5800 Wh/m<sup>2</sup>, (Fraidenraich et al, 1981).

Apesar deste quadro, clima semi-árido, escassez de água doce e riqueza de recursos energéticos renováveis, no Brasil, especificamente no Nordeste a dessalinização da água tem tido um campo de aplicação restrito. Com o objetivo de desenvolver a tecnologia da dessalinização utilizando energias renováveis, iniciou-se um programa de pesquisa visando o desenvolvimento de um destilador multiefeito para produção de água para o consumo humano, a ser utilizado em regiões áridas e com escassez de água doce como a região Nordeste do Brasil.

O projeto do destilador multiefeito pretende atender aos seguintes critérios básicos:

**Versatilidade:** o equipamento deve ser capaz de funcionar com o combustível renovável mais disponível na localidade (radiação solar, lenha, carvão).

**Competitividade:** o custo da água produzida deve ser menor ou igual ao custo da água fornecida por outros meios, abastecimento por caminhão, por exemplo.

**Compactividade:** ocupar a menor área possível ou seja maior volume de água produzida por m<sup>2</sup> de área ocupada.

**Produtividade:** maior volume de água produzida por unidade de energia fornecida.

**Economia de água:** O fluxo de água de alimentação não deve ser superior a três ou quatro vezes a produção de água destilada.

## 2. DESTILAÇÃO POR MULTIEFEITO

O destilador solar clássico de cobertura de vidro e de simples efeito tem baixo rendimento (cerca de 5000 kJ para 1 kg de água pura produzida). Entre os diversos motivos para esse rendimento pode-se mencionar:

A diferença de temperatura entre a água a evaporar e a cobertura de vidro é muito pequena, já que na condensação, o calor liberado aquece a cobertura de vidro.

O calor latente de condensação não é recuperado.

No desenvolvimento do destilador em estudo consideraram-se os limites do destilador simples, aproveitando o calor liberado na condensação para evaporar uma maior quantidade de água salobra, aumentando assim, o rendimento do processo para uma mesma quantidade de energia fornecida. A temperatura de evaporação deve ser baixa (60 a 80°C) para que o uso do coletor solar plano seja viável, além de outros combustíveis renováveis (lenha, carvão).

Baseado no conceito do destilador multiefeito (Saravia, 1991), o destilador proposto pode ser conceituado como um destilador simples do tipo batelada e um destilador multiefeito de fluxo contínuo. Entre ambos destiladores existe também transferência de massa já que a fração de líquido que alimenta o fluxo contínuo do destilador e não evapora ao longo dos N-1 estágios é injetada no banho térmico.

No projeto do destilador os seguintes critérios foram observados:

O banho deve ter a temperatura mais uniforme possível.

O destilador deve funcionar à pressão atmosférica.

A configuração interna do destilador deve permitir o estabelecimento de um gradiente de temperatura ao longo dos diversos estágios

### • Descrição do Protótipo do Destilador

Construído em fibra de vidro e isolado termicamente com poliuretano rígido, o destilador protótipo é composto por 5 bandejas metálicas de 0,5m<sup>2</sup> inclinadas a 22° e cobertas com tecido de algodão, o qual conduz a água salobra como mostra o esquema da Fig. 1.

A alimentação da água salobra é feita através de um dosador localizado acima da última bandeja e introduzida em cada estágio através do tecido de algodão, que funciona como condutor de fluxo de água e que permite uma boa distribuição da camada de água salobra e refrigeração em toda superfície da placa.

A água do banho térmico é aquecida eletricamente e atinge a maior temperatura do sistema para cada potência fornecida, transformando-se em vapor de água o qual condensa ao entrar em contato com a primeira placa metálica. O calor liberado na condensação é recuperado no aquecimento de uma parcela da água salgada de alimentação que percorre o tecido na parte superior da primeira placa. Nos estágios seguintes 2, 3, 4 e 5 repete-se o mesmo processo. A água doce produzida é recolhida em canaletas de alumínio situadas em cada estágio como mostra a Fig. 2

### • Procedimento Experimental

O procedimento experimental seguido envolveu seis conjuntos de testes. Foram efetuados ensaios com 5, 4 e 3 estágios sem e com ventilação forçada na última placa, através do uso de um ventilador. A circulação forçada tem como finalidade facilitar o fluxo de calor entre o estágio superior e o meio ambiente. Na prática, esse efeito pode ser obtido posicionando-se o reservatório da água salobra de alimentação imediatamente acima do último estágio do destilador. Todos os testes foram realizados variando-se a potência fornecida na faixa de 200 a 800W e para alguns casos, também 1200 e 1600W.

O volume inicial na câmara do banho térmico, onde as resistências elétricas (1500W, 220V) estavam mergulhadas, era de 30 litros. Para a alimentação utilizou-se água pública com vazões variáveis, visando encontrar a vazão adequada a cada potência fornecida. O acompanhamento térmico foi realizado por 12 termopares de cobre-constantan distribuídos na forma de 2 por cada estágio e 2 no banho térmico. O destilado produzido em cada estágio foi recolhido e medido em intervalos de 60 minutos. Cada ponto experimental representado expressa a média das medidas das últimas três a quatro horas de operação depois que o regime

permanente foi atingido, cerca de 6 a 7 horas após o início de cada teste (Fraidenraich et al, 1992).

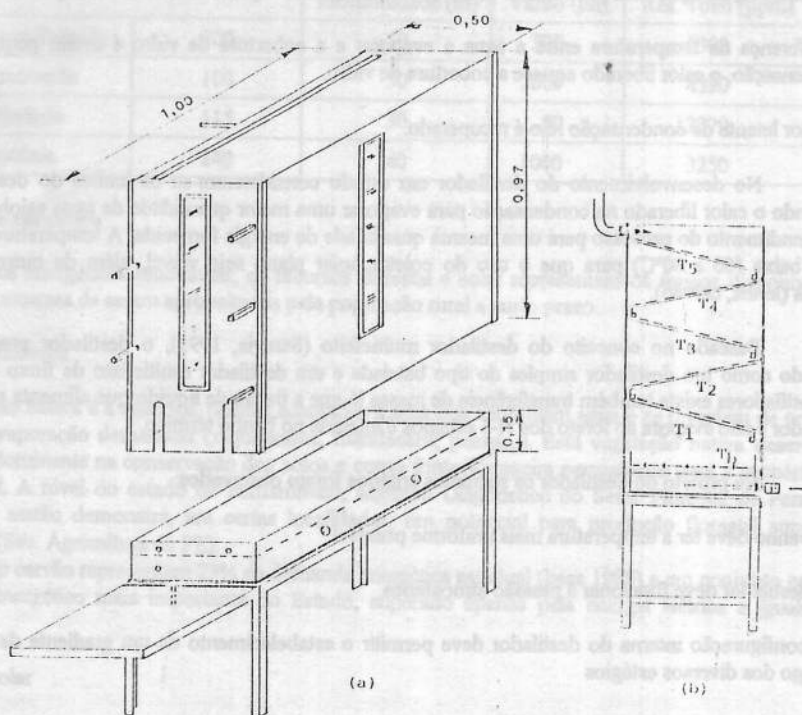


Figura 1 - Esquema do destilador de multiefeito com 5 estágios.

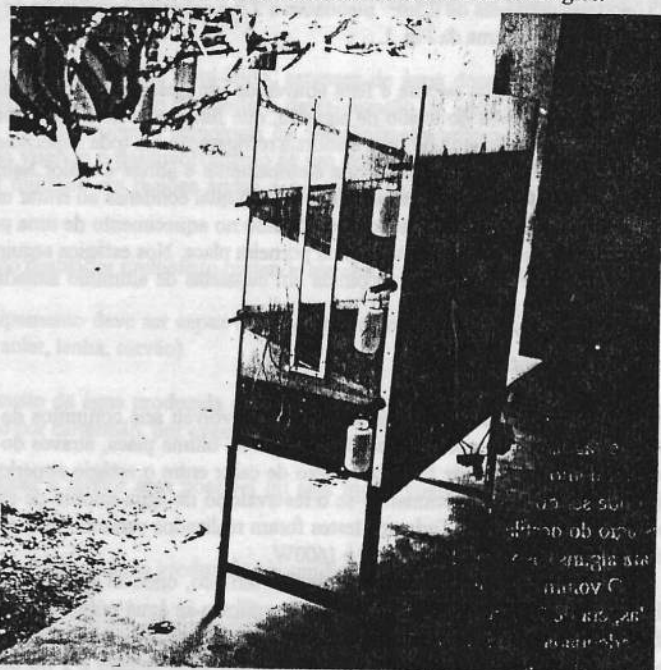


Figura 2 - Protótipo de destilador de multiefeito.



### 3. RESULTADOS EXPERIMENTAIS E DISCUSSÃO

A influência da vazão da água de alimentação ( $\dot{M}_a$ ) na produção do destilado ( $\dot{M}_d$ ), para várias potências de aquecimento ( $P$ ), foi avaliada mediante testes com o destilador de 5 estágios. Valores compreendidos entre 1,2 e 13,0 l/h foram testados e, segundo os resultados mostrados na Fig. 3, verifica-se uma moderada sensibilidade à variação desse parâmetro. No entanto, como tendência, pode-se observar a presença de um máximo na produção do destilado. O aumento do fluxo de água a partir de pequenos valores aumenta a diferença de temperatura existente entre a última bandeja e o banho térmico, diferença que determina o gradiente médio de temperatura entre estágios. Valores elevados do fluxo de água de alimentação retiram, para o seu aquecimento, uma fração importante da energia fornecida ao banho térmico. Pode-se admitir portanto que existe uma vazão ótima que maximiza a produção do destilado. De acordo com os resultados da Fig. 3 esta vazão situa-se na faixa de dois a quatro vezes  $\dot{M}_d$ . Para a faixa de potência estudada as vazões adequadas situam-se na faixa de 2,0 a 4,0 l/h.

A produção de destilado em função do número de estágios do destilador e da potência de aquecimento fornecida ou da diferença de temperatura entre o banho térmico e o ambiente ( $\Delta T = T_b - T_m$ ) são mostrados nas Figs. 4 a 6.

Os resultados apresentados referem-se aos testes com ventilação forçada no último estágio, o que aumentou a produção em cerca de 15 a 60% dependendo da potência fornecida e do número de estágios do destilador. Isto pode ser observado nas Figs. 4 e 5 que mostram o aumento na temperatura do banho térmico e na produção do destilado pelo efeito da ventilação forçada para o destilador com cinco estágios.

A produção de água em função da potência de aquecimento com a variação do número de estágios do destilador pode ser vista no gráfico da Fig. 6. Observa-se que, para uma dada potência, a diferença entre a produção de água para o destilador com cinco e com quatro estágios é muito pequena. Em todos os casos 3, 4 e 5 estágios, existe uma potência mínima necessária para que água destilada possa ser produzida, de 200, 180 e 90W, respectivamente.

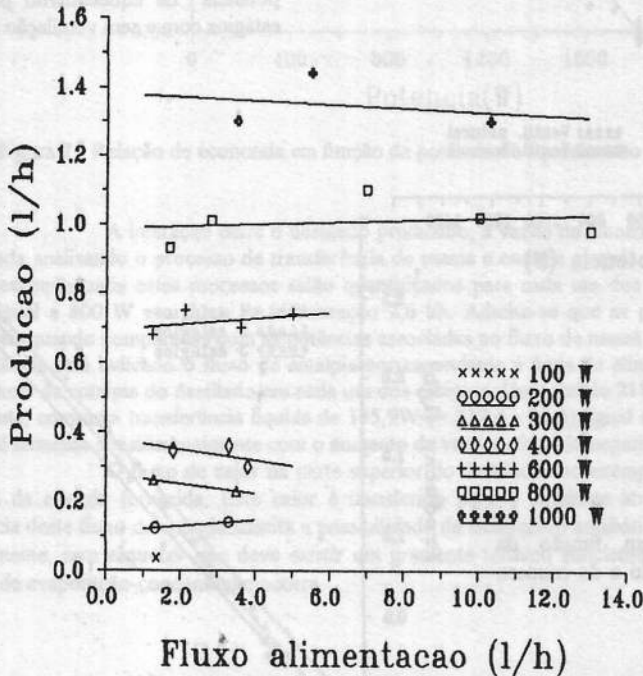


Figura 3 - Produção do destilado em função do fluxo de água de alimentação para diversa potência

Figura 4 - Temperatura do banho térmico em função da potência de aquecimento para 5 estágios, com e sem ventilação forçada.

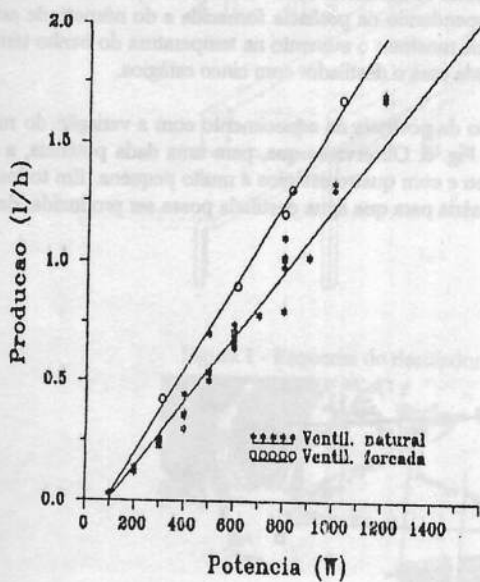
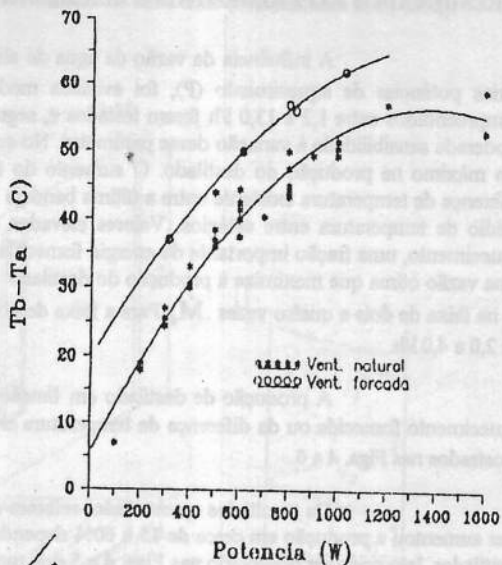


Figura 5 - Produção de água em função da potência de aquecimento para cinco estágios com e sem ventilação forçada.

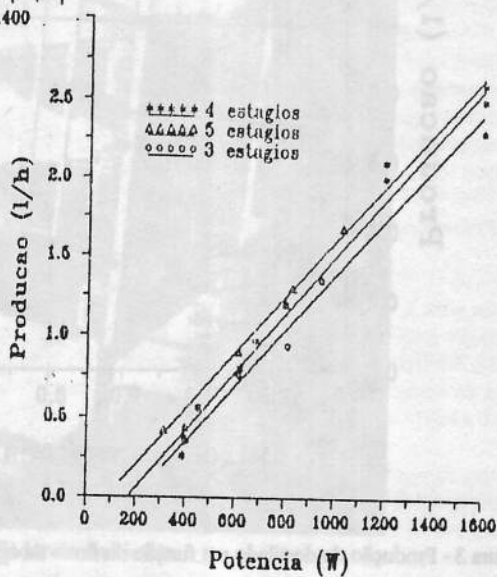


Figura 6 - Produção de água em função da potência de aquecimento e do número de estágios.

relação entre a produção de destilado e a potência de aquecimento.

$$RE = \dot{M}_d \frac{h_{fg}}{P} \quad (1)$$

onde  $h_{fg}$  é a entalpia do vapor de água à temperatura do banho térmico. Esta relação expressa a economia energética pelo uso do multiefeito e pode ser observada no gráfico da Fig. 7 para as três opções de número de estágios estudadas. Para todos os casos 5, 4 e 3 estágios, esta relação tem um limite máximo na faixa de 1,2 a 1,3.

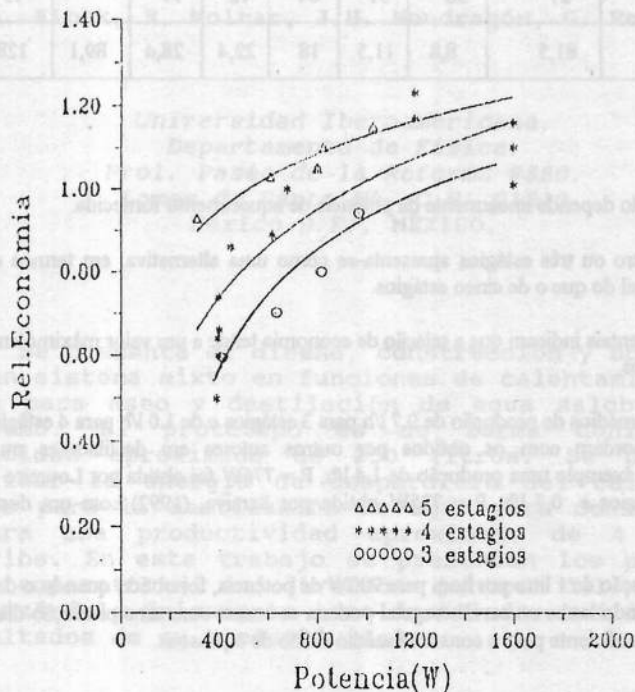


Figura 7 - Relação de economia em função da potência de aquecimento e do número de estágios.

A interação entre o destilado produzido, a vazão de alimentação e a energia consumida pode ser estudada analisando o processo de transferência de massa e energia através do destilador. Na Tabela 1 consta um caso-exemplo onde estes processos estão quantificados para cada um dos estágios. A potência entregue ao banho é igual a 800 W e o fluxo de alimentação 2,6 l/h. Admite-se que as perdas através das superfícies são desprezíveis quando comparadas com as potências associadas ao fluxo de massa e energia do destilador. Na última linha da tabela está indicado o fluxo de entalpia correspondente à água de alimentação (referência a 0°C), assim como o fluxo de entalpia do destilado em cada um dos estágios. Um total de 218,4W sai do destilador na forma de água quente, com uma transferência líquida de 135,9W (= 217,4 - 81,5), igual a 17% da potência fornecida. Este percentual aumenta consideravelmente com o aumento da vazão, afetando negativamente a produção do destilado.

O fluxo de calor na parte superior do destilador no exemplo analisado é igual a 663,1W ou seja 83% da energia fornecida. Este calor é transferido para o ambiente através de diversos mecanismos. A importância deste fluxo de energia suscita a possibilidade de isolamento adiabático na parte superior do destilador. Evidentemente, sem esquecer que deve existir um gradiente térmico suficiente dentro do destilador para que o processo de evaporação-condensação ocorra.

Tabela 1. Balanço de massa e energia. Destilador com 5 estágios. P = 800W

Estágios	Entrada	Saída						
	-	1°	2°	3°	4°	5°	Total	Rejeito
Vazão ml/h	2600	200	195	240	268	318	1221	1400
T °C	27	38	51	64	72	77	-	79
Q (W)	81,5	8,8	11,5	18	22,4	28,4	89,1	128,3

#### 4. CONCLUSÕES

- A produção de destilado depende linearmente da potência de aquecimento fornecida.
- O destilador com quatro ou três estágios apresenta-se como uma alternativa, em termos da relação custo-benefício, mas favorável do que o de cinco estágios.
- Os resultados experimentais indicam que a relação de economia tende a um valor máximo entre 1, 2 a 1,3 para cinco ou quatro estágios.
- Os resultados típicos, médios de produção de 0,7 l/h para 3 estágios e de 1,0 l/h para 4 estágios com potências de 700-800 W, concordam com os obtidos por outros autores em destiladores multi-estágios com aquecimento elétrico. exemplo uma produção de 1,4 l/h, P = 776W foi obtida por Loureiro et al. (1993) num destilador de três estágios e 0,7 l/h, P = 735W obtida por Saraiva, (1992) com um destilador de quatro estágios..
- O valor típico de produção de 1 litro por hora para 700W de potência, foi obtido quando o destilador funciona com 4 estágios. Utilizando lenha ou carvão vegetal poderia se contar com uma produção diária de 24 l/dia de água pura, quantidade suficiente para o consumo médio diário de 6 pessoas.

#### REFERÊNCIAS

- Fraidenraich, N.; Costa, H.S.; "Estimativa da Componente Direta da Radiação Solar no Nordeste". Ciência e Cultura 33(5), maio
- Fraidenraich, N., Barbosa, E.M. de S., Tiba, C.; "Relatório de atividades - Produção de água para consumo humano", Encontro do Programa CYTED-D, S. José da Costa Rica, 1993.
- Gutierrez, Don M. A.; "Recursos y necesidades de agua para el desarrollo de zonas aridas". Curso: Uso de las energias renovables para la desalinizacion de agua de mar. Instituto de Estudios de la Energia, Madrid, 1992.
- Leal, J. de M.; "Zoneamento hidroquímico das águas subterrâneas do estado de Pernambuco." SUDENE
- Loureiro, D.; Joyce, A.; Collares-Pereira, M.; Leão, A.; Carlos, L; "Destilador Multi-efeito aquecido por um concentrador CPC assimétrico". Encontro do Programa CYTED-D, S. José da Costa Rica, 1993.
- Saravia, J.F.; "Multistage solar still", Universidade Nacional de Salta, Argentina.