

Energías Limpias en Progreso

*Libro de Actas
del
VII Congreso Ibérico de Energía Solar
30 de Mayo - 1 de Junio, 1994
Vigo-España*

Editado por

MANUEL VÁZQUEZ VÁZQUEZ
JORGE CARLOS MORÁN GONZÁLEZ

Area de Máquinas y Motores Térmicos
Universidad de Vigo

Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y de Minas
Lagoas-Marcosende s/n
36200 Vigo- España

Volumen 1



Desta Figura pode concluir-se que o sistema tem um nível crítico de radiação a partir do qual começa a funcionar.

A produção diária de água é de 23.6 kg ou seja, cerca de 4.72 kg/m² e o consumo específico diário é de 7203 kJ/kg. Se a área de collector aumentasse para cerca de 10 m², a temperatura subiria rapidamente podendo obter-se uma produção diária de água de 39 kg ou seja, cerca de 3.9 kg/m² de área colectora e um consumo específico de 8718 kJ/kg.

Pode concluir-se que nestas condições a produção por unidade de área será baixa e que consequentemente os consumos específicos são elevados. Este facto poderá ser atribuído quer à falta de isolamento da câmara, anteriormente referida, quer à não optimização das suas dimensões e características. Num modelo computacional do funcionamento da câmara (Moreira et al. 1994) são analisados os parâmetros que permitem obter aquela optimização.

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.

CONCLUSÕES.

Foi construída uma câmara de dessalinização com evaporação por spray que permitiu obter produções de água destilada de 1640 g/hr a uma temperatura de 65 °C. Verificou-se que a produção aumenta com a temperatura e com a diminuição do diâmetro das gotas.

A pressão que é necessária para produzir o spray poderá ser um aspecto limitador da utilização deste dispositivo em locais remotos, a menos que se possam instalar módulos fotovoltaicos para a alimentação da bomba.

As baixas taxas de conversão obtidas poderão também ser uma desvantagem destes sistemas. No entanto é de notar que a câmara ensaiada não estava isolada exteriormente nem optimizada quer do ponto de vista das dimensões, quer do pulverizador a utilizar, quer ainda do caudal a utilizar. Uma câmara de maior altura poderá ser mais interessante do ponto de vista da evaporação uma vez que aumenta o percurso das gotas no ar e este será um dos tópicos de desenvolvimento futuro, conjuntamente com o estudo de qual caudal mínimo que é possível utilizar na câmara.

O sistema pode ser acoplado a colectores solares, se bem que a produção por unidade de área de collector que se obtive por simulação não seja elevada. O desempenho poderá ser superior quando o sistema estiver acoplado a uma fonte com temperatura aproximadamente constante como por exemplo um Lago solar.

Em última análise é o custo final da água produzida o critério a ter em conta na decisão final de qual o melhor sistema a utilizar para a dessalinização de água e no caso concreto do destilador em estudo este custo vai depender fundamentalmente do sistema de aquecimento a utilizar, uma vez que o custo da câmara construída é baixo, cerca de 600 USD, podendo produzir até cerca de 40 kg/dia.

REFERÊNCIAS.

- Saravia, L., J.Franco (1992). Multistage solar still. *Universidad Nacional de Salta*, Franco, Argentina.
- Joyce, A., D. Loureiro, M. Collares Pereira (1993). Destilador multi-efeito com iluminação por CPC assimétrico. Resultados dos ensaios com iluminação natural. *Resumo grupo CYTED-D em San Carlos de Bariloche - Argentina.*
- Aguiar, R., M. Collares Pereira (1989). The modeling of daily sequences of hourly radiation through autoregressive methods. *Proc. Solar World Congress ISES Kobe (Japão)*
- Moreira, M., A. Joyce, H. Pina (1994). Modelação computacional dum destilador com evaporação por "spray" para dessalinização de água do mar. *Séptimo Congresso Ibérico de Energia Solar Vigo (Espanha).*

MODELAÇÃO COMPUTACIONAL DUM DESTILADOR COM EVAPORAÇÃO POR "SPRAY" PARA DESSALINIZAÇÃO DE ÁGUA DO MAR

Moreira, M., A. Joyce**, H. Pina***

*IPS-Escola Superior de Tecnologia-Rua Vale de Chaves, Estafamilha, 2900 Setúbal, Portugal

Telefone - 065 76 16 21 Telefex - 065 72 18 69

**INETI-Atinhaga dos Lameiros a Estrada do Paço do Lumiar, 1699 Lisboa Codex, Portugal

*** IST-Instituto Superior Técnico - Lisboa, Portugal

RESUMO

O desenvolvimento dum evaporador com evaporação por "Spray" motivou a elaboração dum seu modelo computacional. A comparação dos resultados da simulação com resultados experimentais revelou um idêntico comportamento qualitativo e erros relativos de 20%. Simulações computacionais posteriores evidenciam a possibilidade de atingir desempenhos energeticamente atractivos.

ABSTRACT

A computational model was developed to study a desalting system based on the process of spray evaporation. The simulation agreed qualitatively and quantitatively (with relative errors of 20%) with experiment. Posterior simulations show that it is possible to improve the system performance towards an energetic attractive level.

KEYWORDS

Desalination, Evaporation, Spray, Distillation, Simulation

MOTIVAÇÃO

A escassez de água potável tem determinado o aperfeiçoamento de diferentes processos de dessalinização (Baumgartner et al., 1991). É neste quadro que se encontra em desenvolvimento, no INETI, o protótipo dum destilador por evaporação por "spray", para dessalinização de água do mar (Joyce et al., 1993). Este sistema, é constituído por uma câmara cilíndrica, de eixo vertical, que aloja no seu interior uma região cilíndrica e concêntrica, nas condições da figura seguinte:

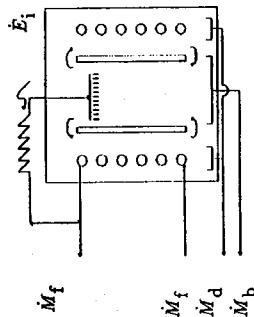


Fig. 1. Sistema de Destilação em Estudo

Na câmara interior desenvolve-se o processo de *humidificação* (por dispersão de gotas de água salgada à temperatura da fonte quente). Na câmara anular cilíndrica exterior, na qual existe uma serpentina helicoidal, ocorre o processo de *condensação* (e de recuperação da energia utilizada na vaporização). A *circulação* do ar húmido entre as diferentes regiões, desenvolve-se por convecção natural e arrastamento de ar produzido pelo "spray". Na base da região de humidificação, terá lugar a recolha de água salgada rejeitada e na base da região de condensação, a recolha de destilado.

A optimização do seu desempenho serviu de motivação à elaboração dum modelo computacional, baseado no modelo físico-matemático, adiante descrito.

MODELAÇÃO FÍSICO-MATEMÁTICA

Os grupos de fenómenos que se consideraram no estudo do processo de dessalinização foram os processos de *humidificação*, de *condensação* e de *circulação* natural do ar. Nos dois primeiros, a realização de balanços mássicos e energéticos, em volumes elementares das regiões de humidificação e de condensação, permitiram obter equações que relacionam a variação espacial de entalpia, do escoamento de ar húmido, com a variação espacial de temperatura no escoamento de água salgada. Da integração espacial das equações obtidas, tendo em conta as condições de fronteira conhecidas, obtiveram-se as distribuições espaciais dos parâmetros referidos. Nestes processos considerou-se que a humidade absoluta do ar em qualquer ponto correspondia à humidade de saturação à temperatura

desse ponto, facto evidenciado experimentalmente. No processo de circulação do ar, considerou-se que a força motriz, por ele responsável, resultava da diferença dos pesos das colunas de ar na região de humidificação e de condensação. O seu balanço com o somatório das forças viscosas verificadas em cada região, permite obter as velocidades médias, nestas.

No processo de *humidificação*, estimou-se a área de permuta de massa e energia com base na existência duma distribuição espacialmente uniforme de gotas dispersas. Distribuição esta, resultante da queda à velocidade terminal dum caudal mássico conhecido, de gotas com diâmetro médio imposto. Os coeficientes de transferência de massa e de energia, foram estimados com base em correlações e analogias disponíveis na literatura (Clift et al., 1978), e associadas a escoamentos no exterior de objectos com geometria esférica. O facto de não se disporem de correlações caracterizadoras do fenómeno de transferência de energia e de massa associadas a um "spray", na ausência de convecção forçada, ditou a adopção das simplificações atrás indicadas.

O cálculo da área de permuta, associada ao processo de *condensação*, consistiu na estimativa da área exterior duma serpentina helicoidal de eixo vertical. Os coeficientes de transferência de energia e de massa do ar húmido para a serpentina resultaram da utilização de correlações e de analogias aplicáveis a escoamentos forçados (de pequena velocidade) exteriores a tubos horizontais de secção circular (Collier, 1972; Churchill et al., 1977). A caracterização da geometria helicoidal do problema foi considerada recorrendo à escolha dum diâmetro equivalente apropriado ao processo (Patil, 1982). O coeficiente de transferência de energia, da parede interior da serpentina para o escoamento interior de água salgada, estimou-se utilizando uma correlação adequada (McLaughlin et al., 1963).

O processo de *circulação* do ar está associado à combinação do processo de convecção natural e do processo de arrastamento de ar produzido pelo "spray" (Walker, 1988). Se bem que as características locais do processo de convecção natural associado à geometria do problema, não sejam abarcadas pelo modelo adoptado, a complexidade da sua modelação rigorosa, na presença de condensação fílmica a temperatura variável (numa geometria helicoidal), do fenómeno de transferência de energia e de massa e de arrastamento de ar provocado, pelo "spray", não sugere a existência de outras alternativas.

ENSAIOS COMPUTACIONAIS E EXPERIMENTAIS - COMPARAÇÃO DE RESULTADOS

Com o objectivo de testar a validade do modelo computacional elaborado, apoiado no anterior modelo físico-matemático, foram efectuados diversos ensaios computacionais preliminares que tiveram em conta a escolha de parâmetros geométricos, condições de fronteira e outros dados iniciais comuns aos ensaios experimentais realizados com o protótipo do dessalinizador desenvolvido. Seguidamente apresentam-se, sob a forma gráfica, alguns dos resultados comparativos obtidos.

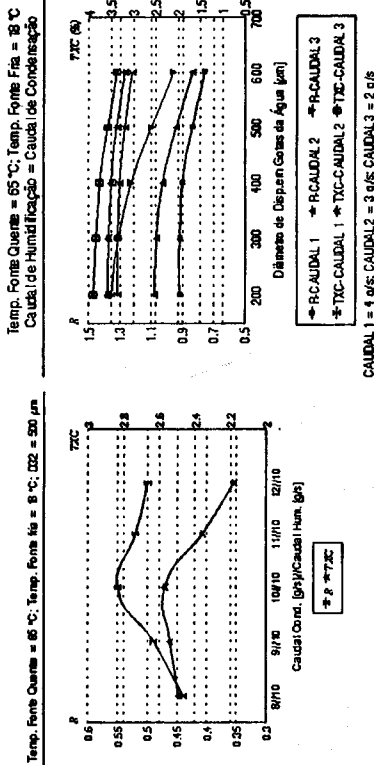


Fig. 4. Efeito da Diferenciação dos Caudais

Fig. 5. Efeito da Variação dos Caudais e do Diâmetro

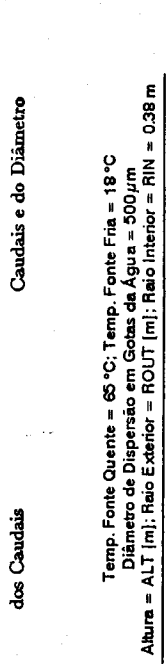


Fig. 4. Efeito da Diferenciação dos Caudais

Fig. 5. Efeito da Variação dos Caudais e do Diâmetro

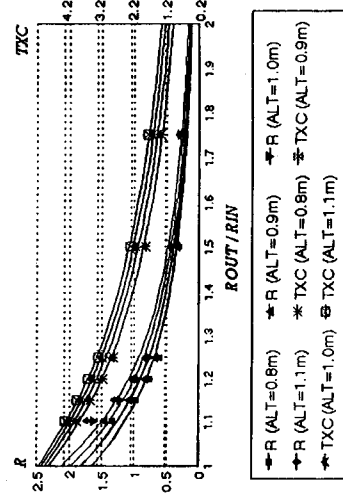


Fig. 6. Efeito da Variação do Raio Exterior e da Altura sobre o Desempenho e a Taxa de Conversão

CONCLUSÕES

A necessidade de utilizar pressões de pulverização mais elevadas compatíveis com a produção de gotas menores e a utilização pulverizadores com orifícios diminutos (e susceptíveis de obstrução) capazes de garantir, os pretendidos, pequenos caudais/pressões elevadas, constituem a principal dificuldade na optimização do processo em estudo. Na situação mais favorável ilustrada na Figura 6, deduzem-se

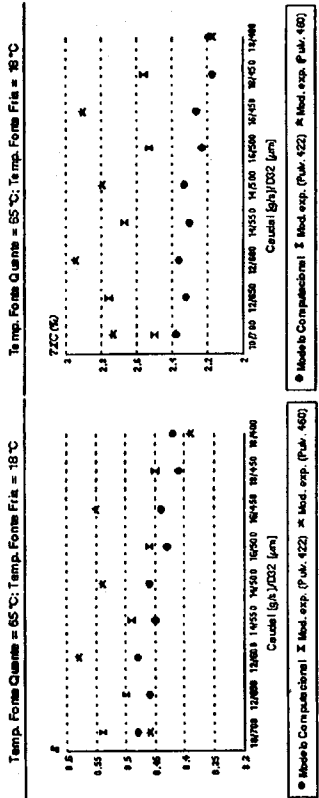


Fig. 2. Comparação dos Desempenhos

Fig. 3. Comparação das Taxas de Conversão

Podem observar-se que o comportamento qualitativo do modelo computacional, é idêntico ao do modelo experimental, no tocante à variação dos parâmetros manipulados. Este resultado é acompanhado, também por erros relativos, por defeito, na ordem de 20 % (podendo atingir 30 % em situações limites). Tendo em conta as simplificações adoptadas face à complexidade dos fenómenos intervenientes, os resultados computacionais quantitativamente inferiores aos experimentais não são considerados reveladores de erros evitáveis. A resposta qualitativa e quantitativa pode considerar-se satisfatória. De referir que ensaios computacionais e experimentais realizados a uma temperatura da fonte quente inferior (53 °C), evidenciam comportamentos semelhantes aos anteriormente descritos, se bem que termodinamicamente menos favoráveis, como seria de esperar. A obtenção de desempenhos (R) inferiores à unidade, motiva a necessidade de otimizar o sistema.

PROJEÇÕES COMPUTACIONAIS

Nos gráficos seguintes, estabelecem-se os resultados de algumas simulações computacionais, realizadas com o objectivo de determinar algumas direcções de optimização, possíveis.

Observando a Figura 4, pode concluir-se não haver interesse na promoção da diferenciação dos caudais de humidificação e de condensação. Por outro lado a diminuição do diâmetro de dispersão em gotas de água de humidificação, bem como a promoção da diminuição dos caudais mássicos de água saída intervenientes, melhora o desempenho global do processo, como se pode concluir da Figura 5. Se bem que os resultados da Figura 6, devam ser encarados com reserva, na ausência de um comportamento assintótico limitado, do desempenho (R) e da taxa de conversão (TXC), face à variação de R/ROUT/RIN, indicam a existência de vantagens em aumentar a altura do equipamento e restringir a área efectiva de circulação de ar na região de condensação. O aumento da altura do equipamento acima de cerca de 1,2 m, não apresenta interesse devido à inevitável coalescência (Coulson e al, 1968).

desempenhos energeticamente atractivos ($R=1,73$; $TXC=4\%$) associados a produções de cerca de 40 kg/dia de água destilada. Esta produção ocorre nas condições da simulação efectuada, com caudais de água salgada de 10 g/s, diâmetros médios de dispersão em gotas de 500 μm e temperaturas da fonte quente e fria de 65 °C e 18 °C.

Terá especial interesse a determinação do diâmetro mínimo prático de pulverização em que não ocorra a obstrução sistemática na presença de água salgada e a exploração de métodos alternativos de humedificação por contacto directo compatíveis com pequenos caudais. A exploração de mecanismos de condensação mais eficazes ("dropwise condensation", ou condensação, também, por contacto directo, por exemplo), constituem direcções propostas para o desenvolvimento deste tipo de sistemas.

SIMBOLOGIA UTILIZADA

ALT - Altura do desalinizador; D32 - Diâmetro médio de Sauter; \dot{E}_i - Potência dissipada no processo; L_f - Calor latente de vaporização da água salgada de alimentação; \dot{M}_b - Caudal mássico de água salgada rejeitada (brine); \dot{M}_f - Caudal mássico de água salgada de alimentação (feed); \dot{M}_d - Caudal mássico de água destilada produzida (distillate); $\frac{L_f \dot{M}_d}{\dot{E}_i}$, [Adimensional]; RIN (ROUT) - Razo interno (externo) da região de condensação; TXC - Taxa de conversão mássica, $\frac{\dot{M}_d}{\dot{M}_f} \times 100$, [%];

REFERÊNCIAS

- Baumgartner, T., D. Jung, F. Kossinger and R. Sizman (1991). Multi-effect Low Temperature Process for Solar Desalination. *New Technologies for the use of Renewable Energy Sources in Water desalination*, Athens, No. 26.
- Churchill, S. W., and M. Bernstein (1977). A Correlation Equation for Forced Convection From Gases and Liquids to Circular Cylinder in Crossflow, *Journal of Heat Transfer*. Vol. 99.
- Clift, R., J. R. Grace and M. E. Weber (1978). Bubbles, Drops and Particles. *Academic Press*.
- Collier, J. G. (1972). Convective Boiling and Condensation. *McGraw-Hill*.
- Coulson, J. M. and J. F. Richardson (1968). *Tecnologia Química*, Vol. 2, pp. 512. *Fundação Calouste Gulbenkian*.
- Joyce, A., e al., (1993). Destilador com Evaporação por "spray" para Dessalinização de Água do Mar. INETI.
- McLangling, E. F. and R. A. Seban (1963). Heat Transfer in Tube Coils with laminar and Turbulent Flow. *Int. J. Heat Mass Transfer*. Vol. 6, pp. 387-395.
- Patil, R. K., B. W. Shende and P. K. Ghosh (1982). Designing a Helical Coil Heat Exchanger. *Chemical Engineering*, December 13.
- Walker, J. (1988). Does Convection or the Bernoulli Principle make the Shower Curtain Flutter Inward?. *Scientific American*. June.