

DESTILACION DE AGUA CON SISTEMAS  
POZA SOLAR - MEMBRANAS ESPECIALES: PROPUESTA

Graciela Lesino\*

INENCO - Universidad Nacional de Salta-CONICET  
Calle Buenos Aires 177, 4400 - Salta, Argentina

RESUMEN

Cuando se revisan los análisis internacionales de costos de agua destilada se encuentra que para capacidades de producción del orden de algunos metros cúbicos por día las alternativas existentes no son claras y los costos altos. La producción media diaria de los destiladores solares de batea es de 2 a 4 litros por metro cuadrado por día, según la radiación (1). Para la producción mencionada, las áreas de destiladores son del orden de 400 metros cuadrados en adelante. La experiencia internacional indica que esas instalaciones son difíciles de manejar y no han sido siempre exitosas. Por otra parte, los precios de los equipos solares de destilación flash multietapa o de ósmosis inversa con celdas fotovoltaicas crecen muy rápidamente para capacidades por debajo de los 300 metros cúbicos por día. En el presente trabajo se proponen sistemas compuestos de pozas solares e intercambiadores de masa con membranas especiales, hidrófobas e hidrófilas, que trabajan a presión atmosférica, para esas capacidades.

1. INTRODUCCION

¿Porqué proponer pozas solares como fuente térmica? Las pozas solares son sistemas colectores-acumuladores de bajo costo cuya extensión puede modularse desde tamaño mediano a grande. En general, la parte más cara del sistema es la unidad de destilación y el contar con acumulación a bajo costo permite usarlo las veinticuatro horas del día, mientras que en otras propuestas solares se usa solamente una parte del día o deben adicionarse acumuladores que incrementan los costos.

¿Porqué usar membranas especiales? La destilación mediante membranas tiene algunas características favorables para esta aplicación. Se puede trabajar a presión atmosférica, a bajas temperaturas, 50 a 90 °C, y es posible recobrar el calor latente, obteniéndose altas eficiencias. La investigación relativa a estas membranas es un área muy activa donde se están produciendo mejoras en tipo, calidad y precio permanentemente. El hecho de que en estas aplicaciones las membranas trabajan a presión atmosférica debiera disminuir el costo de los módulos frente a los usados en la filtración a presión.

\* Investigador CONICET

## 2. PROCESOS

### 2.1 Membranas

#### 2.1.1 Membranas hidrófobas

Existen dos tipos de procesos posibles: aquél en que la membrana separa dos fases líquidas, agua y solución a distinta temperatura y otro en el que la membrana separa la solución del aire. El proceso de evaporación del agua sucede en la superficie de una membrana porosa. Las características básicas del proceso son: a) la membrana porosa separa dos fases, ya sea solución-agua o solución-aire, b) la presión en cada líquido es menor que la presión capilar en la membrana; una fase gaseosa queda inmobilizada en los poros de la membrana, c) la diferencia entre las presiones de vapor del agua de los dos lados de la membrana produce su difusión. Se pueden usar varios tipos de membranas, por ejemplo: fibras de vidrio tratadas para repeler el agua, membranas de polipropileno y de politetrafluoroetileno (PTFE).

#### Aspectos teóricos

a) Dos fases líquidas Las membranas se pueden caracterizar por un umbral de diferencia de temperatura teórico  $\Delta T_0$

$$\Delta T_0 = \frac{RT_m^2}{\Delta m} \frac{x_w - x_c}{1 - x_m} \quad [1]$$

donde R es la constante universal de los gases,  $T_m$  la temperatura media del proceso,  $\Delta m$  un valor medio del calor latente de cambio de fase,  $x$  es la suma de todas las fracciones molares de todas las especies iónicas y moleculares disueltas, los subíndices w, c, y m indican respectivamente caliente, frío y medio. Para  $\Delta T > \Delta T_0$  el flujo se produce desde el lado caliente al frío y viceversa. La presión osmótica es vencida por  $\Delta T$  muy pequeños. El flujo másico de agua a través de la membrana por unidad de área, N, está dado por

$$N = K [\Delta T - \Delta T_0] \quad [2]$$

$$K = \frac{\epsilon M}{R^2 \chi \Delta} \left( \frac{P_g \Theta}{T^b} \right)_m \Delta m T_m^{b-3} \frac{P_m^x}{P_{Alu}} (1 - x_m) \quad [3]$$

donde  $\epsilon$  es la fracción de huecos, M el peso molecular,  $P_g$  es la presión del gas,  $\chi$  es el factor de tortuosidad,  $\Delta$  es el espesor

de la membrana,  $D$  es el coeficiente de difusión generalmente debido a la difusión y al transporte de Knudsen,  $b$  es un exponente ajustable para el par aire-agua y  $P_{A_{lm}}$  es la presión parcial del gas ocluido. La transferencia de masa es una función creciente de la temperatura media. También se incrementa disminuyendo la presión del gas incondensable, pero este aspecto no es de interés para la presente aplicación.

Es necesario relacionar los valores sobre la membrana con los valores globales externos, accesibles a la medición y control. Se suponen coeficientes de transferencia térmica  $U$  y  $U_l$ , global y de la fase líquida respectivamente. En la ecuación [2],  $K$  es sustituido por un valor efectivo,  $K_{ef}$ ,

$$\frac{1}{K_{ef}} = \frac{k_p}{K U D} + \frac{1}{U_l} \quad [4]$$

El flujo local de energía a través de la membrana por unidad de flujo del agua pura es, entonces,  $E$ ,

$$E = \eta \left[ 1 + \frac{U}{U_l} \frac{\Delta T_b^o}{\Delta T_b - \Delta T_b^o} \right] + \frac{k_p}{K d} \frac{\Delta T_b}{\Delta T_b - \Delta T_b^o} \quad [5]$$

donde  $k_p$  es la conductividad efectiva de la membrana (paralelo del sólido y el gas),  $\Delta T$  es la diferencia de temperatura, el subíndice  $b$  indica los valores globales, el superíndice  $o$  indica el valor umbral para los parámetros globales a vencer para tener flujo positivo,  $U$  y  $U_l$  son los coeficientes de transferencia de calor global y de la fase líquida.

Debe notarse que  $E$  es siempre mayor que el calor latente por lo que la recuperación de la energía es fundamental.

A continuación se muestran los resultados experimentales obtenidos por Sarti et al (3) para membranas PTFE de Gelman Instruments T1000 y T200, de tamaño nominal de poro 1 y 0.2 micrones respectivamente. Para la T200 no se observa flujo de líquido a través de ella hasta los 3 bar y para la T1000 hasta 0.5 bar. La membrana está siempre colocada en posición horizontal. El fluido caliente circula por la parte inferior de la celda de prueba. En la parte superior se encuentra el agua

fría. El control de temperatura se obtiene por intercambio con fluidos termostatzados. Con esta configuración se obtienen valores de 4 a 6 veces mejores que con la inversa debido al efecto favorable de la convección natural.

Tabla 1. Datos relevantes de las membranas

espesor	60 micrones
fracción de huecos	0.60
factor de tortuosidad	2.0
coeficiente de difusión (a 1 atm y 40 °C)	0.288 10(E-4) m <sup>2</sup> /s
conductividad térmica de la membrana kp	0.04 w/m K

Las figuras 1, 2 y 3 muestran los valores obtenidos del flujo de masa en función de la diferencia de temperatura global, parametrizados en el valor de la temperatura media para agua pura, solución de NaCl 0.1 M y para 0.5 M del lado caliente. Estos valores corresponden a concentraciones típicas del agua salobre y de mar. Del lado frío siempre es agua pura.

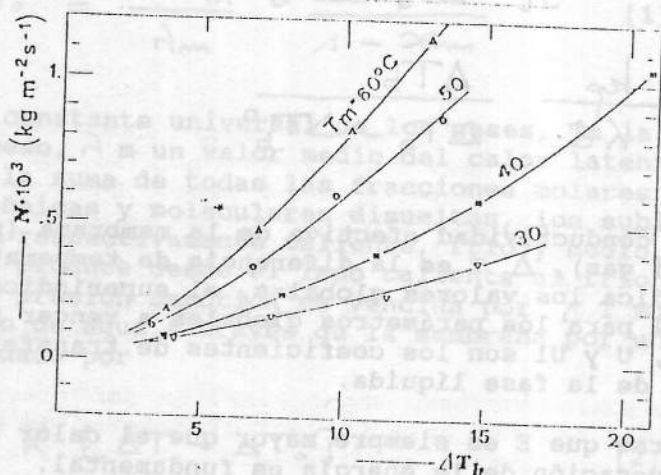


Fig. 1.- Flujo versus Diferencia de temperatura global, agua pura (3).

La figura 4 muestra los resultados obtenidos por Morrison et al (2) para fibras huecas de 0.3 mm de diámetro interior, 0.6 mm de diámetro exterior, poros de 0.22 micrones y porosidad de 0.7. Las fibras huecas pueden ser de polipropileno u otro. Tienen



mayor área de intercambio por unidad de volumen (pueden llegar hasta 1000 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>) que las membranas planas que se configuran en general en forma helicoidal.

b) Fase líquida - aire

Otras configuraciones son utilizables del lado de la condensación. Del lado frío puede haber una película de aire y una superficie fría donde se produzca la condensación. En esta configuración las resistencias a las transferencias térmica y de masa son más altas. También puede barrerse a contracorriente el lado frío con un flujo de aire y realizarse la condensación fuera de la unidad de destilación. En este último caso la velocidad de evaporación puede ser mayor que en el caso del aire quieto, conservándose el orden de magnitud de la energía perdida a través de la membrana (9).

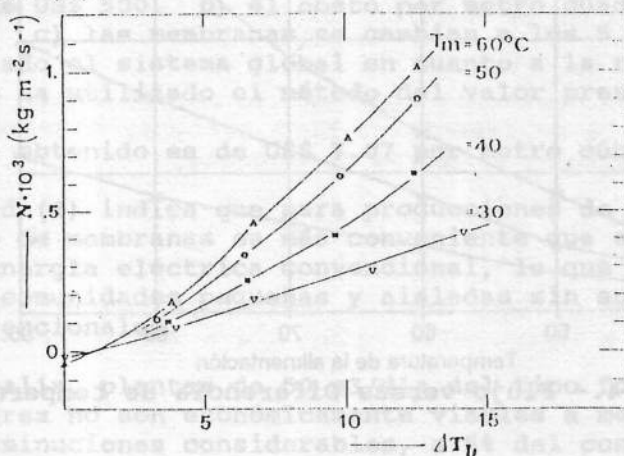


Fig. 2.- Flujo versus Diferencia de temperatura global, solución NaCl 0.1M (3).

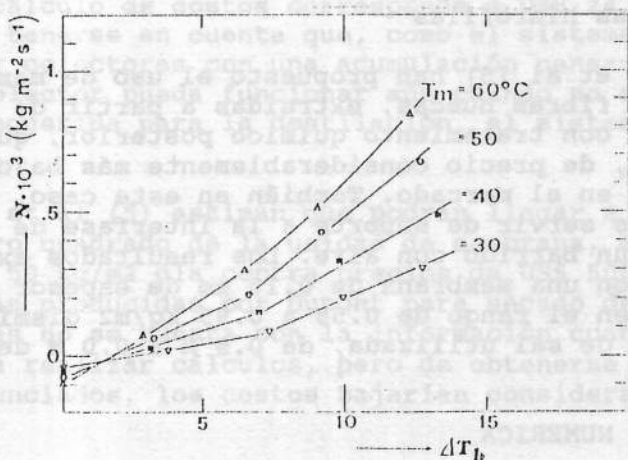


Fig. 3.- Flujo versus Diferencia de temperatura global, solución de NaCl 0.5M (3).

## Aspectos prácticos

En lo que se refiere al mantenimiento de las membranas, es fundamental no someterlas a pulsos de presión, evitar la contaminación con tensioactivos, realizar ciclos de limpieza y lavado con solución ácida. Experiencias con agua del Mar Egeo, durante seis meses no han mostrado problemas. El aumento del flujo disminuye el ensuciamiento pero incrementa el agregado de

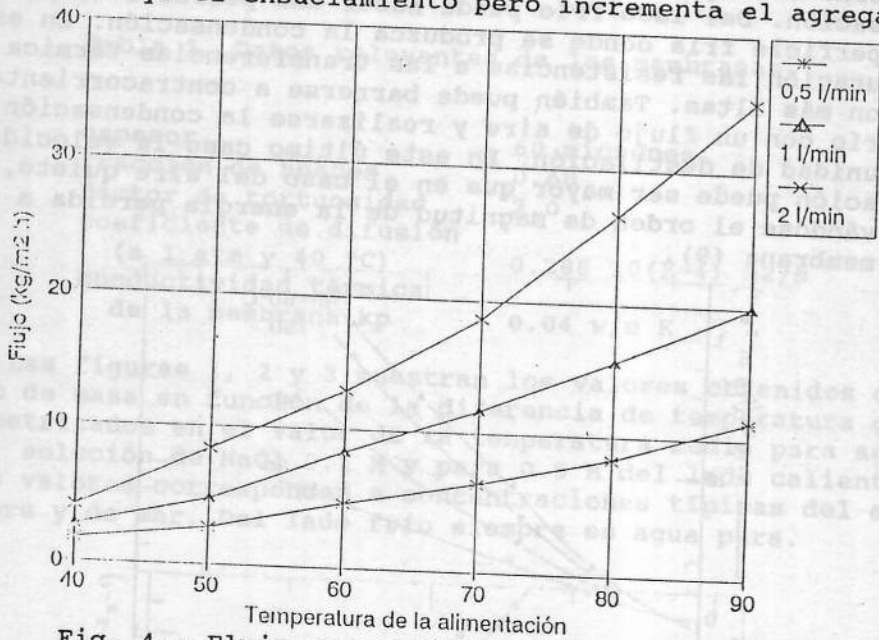


Fig. 4.- Flujo versus Diferencia de temperatura (2)

aditivos para impedir la precipitación de las sales de calcio (7).

### 2.1.2 Membranas hidrófilas

Korngold et al (5) han propuesto el uso de membranas hidrófilas de fibras huecas, extruidas a partir de gránulos de polietileno y con tratamiento químico posterior, que están desarrollando, de precio considerablemente más bajo que las que se encuentran en el mercado. También en este caso, la función de la membrana es servir de soporte a la interfase de evaporación, realizándose un barrido con aire. Los resultados experimentales indican que con una membrana de 0.15 mm de espesor a 50 °C, los flujos están en el rango de 0.55 a 0.95 kg/m<sup>2</sup> disminuyendo con la concentración de sal utilizada, de 0.5 M a 0.0 M de NaCl.

## 3. SIMULACION NUMERICA

Los cálculos para determinar las condiciones de funcionamiento del sistema y su producción se han realizado

empleando los resultados experimentales existentes en lo que se refiere a las membranas.

En lo que se refiere a las pozas, el espesor de la capa de gradiente es el óptimo para la temperatura media anual de diseño. El espesor de la capa convectiva inferior se ha elegido de manera de tener la mínima amplitud anual de temperatura sin encarecer el sistema excesivamente. El modelo numérico empleado (8) se basa en un análisis de Fourier del problema térmico.

#### 4. CALCULO DE COSTOS PRELIMINAR

Las hipótesis bajo las cuales se ha realizado el análisis de costos son las siguientes: a) el costo por metro cuadrado de membrana es de US\$ 500. b) el costo por metro cuadrado de poza es de US\$ 10. c) las membranas se cambian a los 5 años. d) no se ha optimizado el sistema global en cuanto a la recuperación de calor. e) se ha utilizado el método del valor presente.

El costo obtenido es de US\$ 7.07 por metro cúbico.

Schofield (6) indica que para producciones de 50 l/día, este método de uso de membranas es más conveniente que el de ósmosis inversa con energía eléctrica convencional, lo que constituye una ventaja para comunidades pequeñas y aisladas sin suministro de energías convencionales.

En Australia, plantas de 50 m<sup>3</sup>/día del tipo fotovoltaico-ósmosis inversa no son económicamente viables a menos que se produzcan disminuciones considerables, a 5% del costo en ese momento, de los paneles fotovoltaicos, según Morrison (2). Este mismo autor da un costo inicial de su equipo propuesto de US\$ 2660 para una producción de 50 l/día, lo que en nuestras hipótesis de cálculo de costos corresponde a US\$ 24.46/metro cúbico. Debe tenerse en cuenta que, como el sistema está alimentado por colectores con una acumulación pensada solamente para que el colector pueda funcionar aún cuando no se alcance la temperatura requerida para la destilación, el sistema trabaja 8 horas por día.

Korngold et al (5) estiman que podrán llegar a un costo de US\$15 por metro cuadrado de la unidad de membrana, de producción aproximada de 50 kg/m<sup>2</sup> día contra precios de US\$ 500 por metro cuadrado de las producidas por Dupont para secado de gases. De estas membranas no se cuenta con la información cuantitativa necesaria para realizar cálculos, pero de obtenerse los resultados anunciados, los costos bajarían considerablemente.

#### 5.- CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

Se ha mostrado el interés de experimentar con este tipo de

sistema y la necesaria atención que se debe prestar a los nuevos desarrollos en el área de las membranas, especialmente los que impliquen reducción de los costos de las mismas, dada la importancia de su costo en el precio global, al haberse utilizado localizaciones favorables a la construcción de pozas. El presente trabajo constituye un estudio preliminar. Las tareas a realizar en el futuro se refieren a la construcción de prototipos para adquirir experiencia en el manejo de las membranas y la construcción de sus unidades, la operación de las mismas y su mantenimiento. Es necesario optimizar el ciclo de recuperación de la energía transferida por calor latente y por conducción a través de la membrana. En lo que se refiere a las pozas, es necesario continuar con los aspectos de simulación de manera de analizar la incidencia de la acumulación en la poza o como destilado, mejoramiento de la recuperación de calor y optimización de la producción versus optimización del rendimiento térmico.

También es necesario analizar la conveniencia de introducir un calentamiento suplementario para trabajar a la mayor temperatura posible, en forma permanente.

#### AGRADECIMIENTOS

Deseo agradecer al Ing. Hugo A. Destefanis su valioso asesoramiento e información referente a las membranas.

#### BIBLIOGRAFIA

- 1.- Solar Energy Handbook, Cap.18, Agricultural and Other Low-Temperature Applications of Solar Energy, T.A.Lawand,
- 2.- Solar Heated Membrane Distillation, G.L.Morrison et al, Proceedings of the Solar World Congress, pp 2329-2334, Denver, Colorado, USA, 1991.
- 3.- Low Energy Cost Desalination Processes Using Hydrophobic Membranes, G.C.Sarti, C.Costoli and S. Matulli, Desalination, 56, pp 277-286, 1985.
- 4.- Water Distillation by Ion-exchange, Hollow Fibers, F.Korngold and D.Vofsi, Desalination, 84, pp 123-135, 1991.
- 5.- Water Distillation Method Based in Pervaporation through Hollow Fibers and Comparison with Conventional Solar Still, Proyecto de la Universidad Nacional Heredia, Costa Rica.
- 6.- Developments in Membrane Distillation, R.W.Schofield, P.A.Hogan, A.G.Fane and C.J.D.Fell, Proceedings ICOM '90, pp 728-730.



7.- G.C.Sarti, comunicación personal.

8.- Small and Medium Size Solar Pond Thermal Analysis, L.R.Saravia y G.Lesino, Proceedings de la 2a. Conferencia Internacional de Pozas Solares, Roma, Italia, 1990.

9.- A Desalination Process through Sweeping Gas Membrane Distillation, L.Basini, G.D'Angelo, M.Gobbi and G.C.Sarti, C. Gostoli, Desalination, 64, pp 245-257, 1987.

## INTRODUCCION

En la Provincia de Salta, Departamento de Anta, se ha detectado altas concentraciones de arsénico en el agua de pozos de toda la zona, esto provoca una enfermedad que se denomina hidrarsenicosis y deriva en cáncer de piel, los pobladores de esta zona viven en pequeños caseríos denominados "Puestos" donde habitan entre 15 a 20 personas y consumen agua de un o más pozos, muchos de ellos presentan los síntomas de la enfermedad. La población en general se encuentra dispersa en la zona, siendo la distancia entre los puestos de alrededor de 5 Km, es de muy escasos recursos económicos, la mayoría de los pobladores trabaja en la obtención de carbón de leña o en el transporte.

Una manera de combatir la enfermedad es proveer de agua potable (sin arsénico) a los pobladores de la zona. Debido a las características climáticas, subtropical con estación seca, y la buena radiación, se propuso el uso de destiladores solares pasivos del tipo invernadero para la producción de agua potable a partir de los pozos con alguna arsenización. Estos destiladores son usados en zonas donde no hay disponibilidad de energía eléctrica o de difícil acceso para el transporte de combustibles.

El destilador propuesto es pasivo y de tipo invernadero (Ref 1). Este tipo de destilador tiene un rendimiento de 4 litros/día, si se considera que la cantidad de agua potable necesaria para el consumo de una persona es del orden de 7 litros se necesitan alrededor de 172 m<sup>2</sup> de destilador por persona.

Los destiladores solares de este tipo tienen la ventaja de tener un costo bastante accesible, y al no requerir de ningún tipo de combustible este es el único costo que se tiene en cuenta. Son fáciles de instalar y requieren de un mantenimiento mínimo y sencillo, solo el lavado y limpieza periódica de la base.

## EXPERIENCIAS REALIZADAS

Las primeras experiencias realizadas con equipos de destilación tipo invernadero fueron utilizando distintos tipos de materiales, con la idea de reducir costos se realizó la construcción de la base con placas de cemento premolidas recubiertas con plástico negro si bien se consiguió un costo más reducido, de alrededor de 80 \$ el módulo de 2 m<sup>2</sup> de superficie de colectora los inconvenientes son que el equipo era muy pesado para