

DESTILACION SOLAR DE AGUA CON FIBRAS HUECAS¹

Graciela Lesino²

Instituto de Investigaciones en Energía No Convencional

Universidad Nacional de Salta - CONICET

Calle Buenos Aires 177, 4400 - Salta, Argentina

E-mail: lesino@ciunsa.edu.ar

RESUMEN

En el presente trabajo y en el marco de una propuesta anterior [1] se presenta la simulación numérica de los fenómenos de intercambio de calor y masa de un sistema usualmente usado para filtración constituido por una unidad de fibras huecas de polímeros hidrófobos. Se calculan producciones posibles del sistema y costos aproximados del metro cúbico de agua, en función de la temperatura de entrada, de condensación, de las concentraciones de sales y de los flujos así como del costo del julio (caloría) térmico. Los resultados son aplicables a fuentes térmicas como pozas solares, aguas termales, colectores solares, agua caliente de procesos industriales.

Se comparan los resultados con los obtenidos por simulación y experimentalmente por otros autores [2,4].

INTRODUCCION

El suministro de agua potable está íntimamente relacionado con la calidad de vida a través de su influencia sobre la salud humana y la productividad de la agricultura y ganadería, especialmente en el caso de regiones rurales, aisladas. Para estas poblaciones son importantes las instalaciones de desalinización de agua a pequeña escala, entendiendo por pequeña escala instalaciones con producciones menores que algunas decenas de metros cúbicos por día. Diseñar este tipo de unidades, a costo razonable, lograr que sean confiables y de bajo consumo energético es un problema sin soluciones claras en la actualidad. Como se verá más adelante, el costo del metro cúbico de agua en esos rangos de producción oscila entre los US\$ 4 y US\$ 12 [5]. Resulta razonable analizar sistemas basados en el uso de energías renovables, solar, geotérmica y para otras situaciones aprovechando la energía residual de procesos industriales mediante destilación con membranas especiales.

En un trabajo anterior [1], se propuso la destilación de agua en unidades de intercambio de calor y masa constituidas por membranas especiales de polímeros hidrófobos, del tipo de las usadas en microfiltración. Investigadores en el área de membranas han propuesto esta aplicación desde los años 80 [3] pero sin analizar sistemas integrados, con sus fuentes de energía ni los problemas de recuperación del calor del propio proceso.

La destilación con membranas es un proceso de evaporación a partir de una solución caliente (agua salobre o con otro tipo de contaminación) y posterior condensación sobre agua pura fría u otra forma de refrigeración. El vapor producido del lado caliente de la membrana la atraviesa esencialmente por difusión, condensando del lado frío. Como se trata de membranas hidrófobas, el agua y la solución no penetran en los poros. La membrana constituye el soporte mecánico de las interfases vapor-líquido. No se trata de un proceso de filtración por lo que las diferencias de presiones son muy bajas y hay cierta libertad en la elección del tamaño de poro. La difusión a través de la membrana se debe a la diferencia entre las presiones de vapor de ambos lados, debida a la diferencia de temperaturas. El uso de membranas permite obtener áreas grandes de evaporación en forma compacta.

En este caso se analiza el comportamiento de membranas llamadas fibras huecas (Fig. 1). Se trata de cilindros huecos cuyos diámetros pueden variar entre décimas de milímetro y milímetros que están atravesados en dirección aproximadamente radial por poros de diámetros de 0,1 a 1 micrón. Las fibras se empaquetan en

¹ Proyecto n° 374 del Consejo de Investigaciones de la Universidad Nacional de Salta.

² Investigadora del CONICET

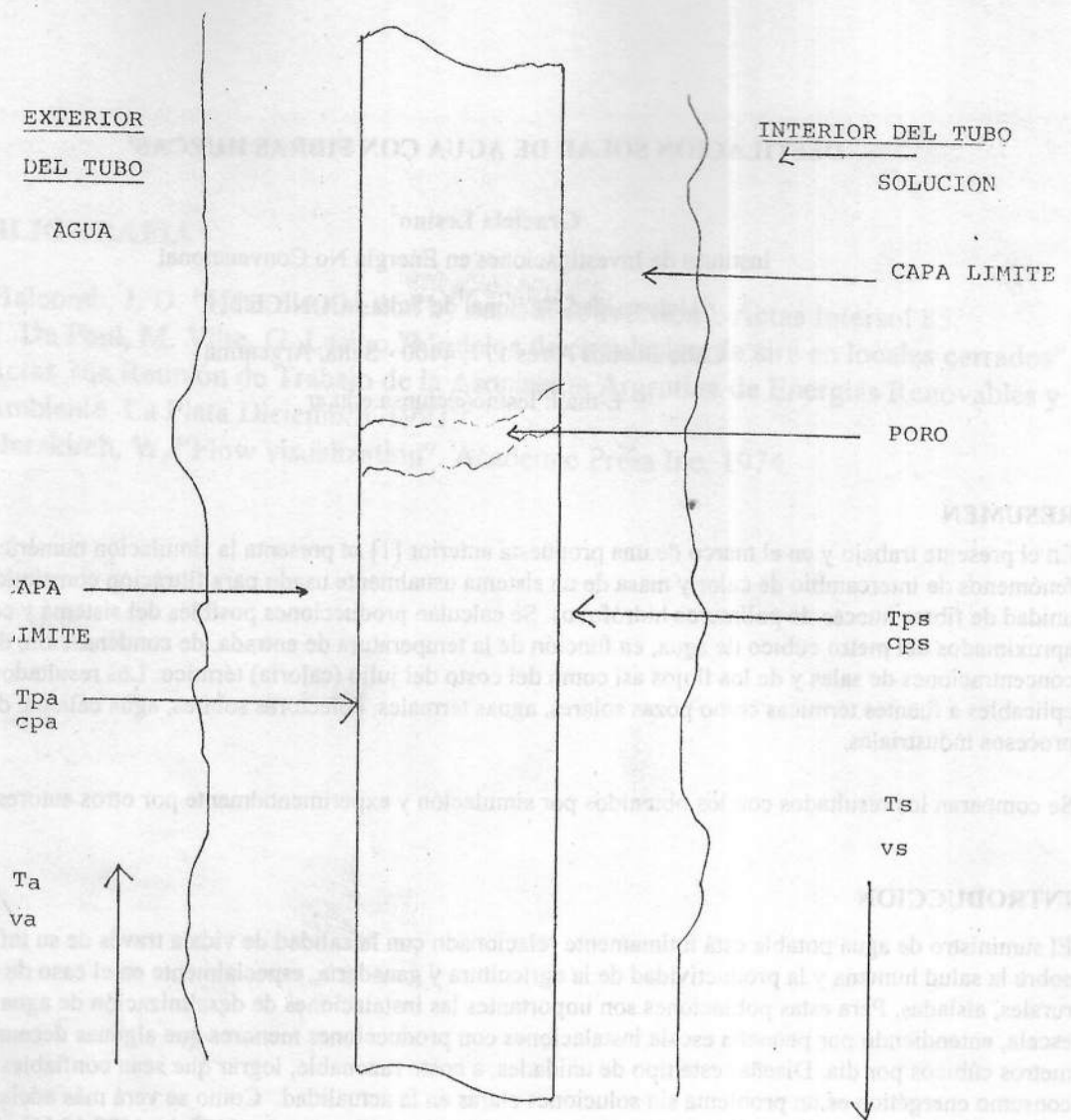


Fig. 2. Esquema del corte de la pared de un tubo

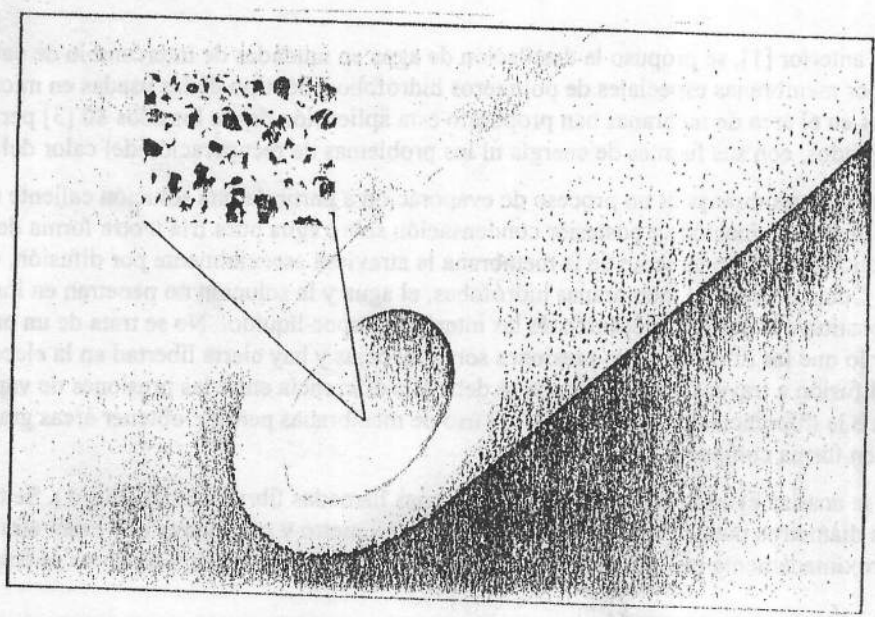


Fig. 1. Imagen de microscopio electrónico de la fibra.

cilindros con cabezales que separan el fluido que circula por el interior de las fibras del que circula por el exterior de las mismas, constituyendo una unidad de tipo carcasa y tubos (shell-and-tube). Para disminuir las pérdidas térmicas se hace circular la solución por el interior de las fibras. El sentido de los flujos es a contracorriente. La figura 1 muestra una imagen de microscopio electrónico de una de ellas.

DESCRIPCION DEL MODELO

Las temperaturas en las interfases son diferentes de las de las masas de fluidos debido a los siguientes fenómenos. El calor latente de vaporización del agua y el que se transfiere por conducción a través de la pared de la fibra son suministrados por la capa de fluido caliente próxima a la pared, siendo por ello su temperatura t_{pf} menor que t_f , la de la masa circulante en la zona. Dicha energía debe poder ser transferida, lo cual depende de las condiciones de funcionamiento y en el comportamiento del sistema. La producción de permeado (agua) puede estar controlada por la transferencia de calor o la de masa. A su vez, del lado de la condensación, se produce el aporte de calor latente y sensible a través de la pared, aumentando la temperatura de la pared t_{pa} con respecto a t_a del agua refrigerante. La evaporación produce también un aumento de la concentración de soluto c_p con respecto a la global c en la capa límite (Fig.2).

Los balances energéticos y de masa se modelizan suponiendo el sistema en estado estacionario.

La transmisión de calor por conducción en la fibra se calcula definiendo una conductividad térmica media de la membrana que resulta de la ponderación con la porosidad e de las conductividades térmicas del polímero k_p y de una mezcla tipo de vapor de agua y aire k_m . La porosidad e se expresa en por ciento y es la fracción del total del área de la membrana constituida por poros.

$$k = e/100 \cdot k_m + (1 - e/100) \cdot k_p \quad (1)$$

La potencia transferida por unidad de área por conducción Q_c es

$$Q_c = k/d \cdot (t_{pf} - t_{pa}) \quad (2)$$

donde d es el espesor de la membrana. Se desprecia el calor transferido por convección a través de los poros en las condiciones habituales de trabajo.

La transferencia de calor por cambio de fase (calor latente) Q_l es, con m el flujo másico por unidad de área y ΔH la entalpía de cambio de fase a la temperatura t_{ps} ,

$$Q_l = m \cdot \Delta H \quad (3)$$

La transferencia de calor desde la capa límite a la masa de la solución Q_s y el agua Q_a es, con h_s y h_a los respectivos coeficientes de transferencia

$$Q_s = h_s \cdot (t_{ps} - t_s) \quad (4.a)$$

$$Q_a = h_a \cdot (t_{pa} - t_a) \quad (4.b)$$

t_{ps} y t_{pa} se obtienen de las ecuaciones (3) y (4). h_s y h_a se obtienen de la correlación de Dittus-Boelter[8] entre los números de Nusselt Nu , Prandtl Pr y Reynolds Re ,

$$Nu = 0,023 \cdot Re^{0.8} \cdot Pr^n \quad (5)$$

válida para el Pr entre 0.6 y 160, en régimen turbulento plenamente desarrollado y Reynolds > 10000 . El valor de n (0,3-0,4) depende del sentido del flujo térmico. Los valores de las propiedades físicas de la

solución y el agua se han obtenido de correlaciones publicadas [6] o deducido de tablas de datos [7, 8]. El efecto del soluto sobre la presión de vapor pvs se obtiene con la corrección lineal de Raoult,

$$p_{vs} = (1-x) \cdot p_{va} \quad (6)$$

donde pva es la presión de vapor del agua pura a la misma temperatura y x la fracción molar de soluto.

Para la transferencia de masa y debido a la compleja estructura de la membrana, se usa la correlación experimental

$$m = C \cdot \Delta p \quad (7)$$

donde m es el flujo másico, C una constante determinada experimentalmente para cada tipo de unidad y Δp la diferencia de presiones a ambos lados de la membrana. No se ha hecho corrección por aumento de concentración en la capa límite c_p con respecto a la concentración c en la masa para estas condiciones de trabajo, pero es muy fácil incorporarla.

Para el cálculo se ha dividido el intercambiador de calor y masa en secciones iguales a lo largo de su eje y las variables físicas, números adimensionados y coeficientes de transferencia se calculan en cada una de ellas para el caso de fuertes variaciones de temperatura y/o flujo a lo largo de la unidad. Es necesario realizar iteraciones ya que se debe suponer la temperatura de salida del agua. En la Fig. 3 aparece el diagrama de flujo del programa.

RESULTADOS

La unidad simulada [2] es producida por ENKA, del Grupo AKZO, tipo ENKA-MICRODYN MD 020TP2N, constituida por tres fibras huecas de polipropileno, con poros de 0,2 micrones que trabajan en flujo transversal, un área de 0,0482 m², diámetros exterior e interior de las fibras 6 y 3 mm y diámetro interior de la carcasa 2.4 cm. La porosidad es 75% y la conductividad del polipropileno 0,14 v/m C. C vale 3,1 10 kg/Pa.s [2]. Las fibras están rodeadas de una malla (webbing) de polipropileno para aumentar la turbulencia en el exterior de las fibras. Estas unidades se producen hasta 8 metros cuadrados, diámetros de hasta 15 cm y longitudes máximas de 3 metros. Los resultados se muestran en las figuras 4 y 5.

COSTOS

La tabla I muestra datos de diferentes membranas y la II la parte del costo anualizado del metro cúbico de agua correspondiente a la unidad de destilación en función del costo de la membrana y del megajulio térmico, de la producción de la membrana y del porcentaje de recuperación de calor.

Para el cálculo económico se ha empleado una vida de 5 años para las membranas y una tasa de interés del 7%. Los costos son para la venta en pequeñas cantidades. El valor para la unidad de Microdyn es estimado. Se supone $t_{máx}$ 60 C y producción durante 23 horas por día, 360 días al año.

Tabla I - Datos y precios de membranas [9,10,11]

Proveedor	Material y Tipo	Precio por Unidad de Area de Membrana , US\$/m ²
Osmonics	RO / UF , arrollada en espiral	65
Koch	fibras huecas, polieter sulfona	250
Memtec, Australia	fibras huecas	140 (año 1990)
Microdyn	fibras huecas, polipropileno	700
Dupont	fluorocarbono, carbono	>500 (año 1992)

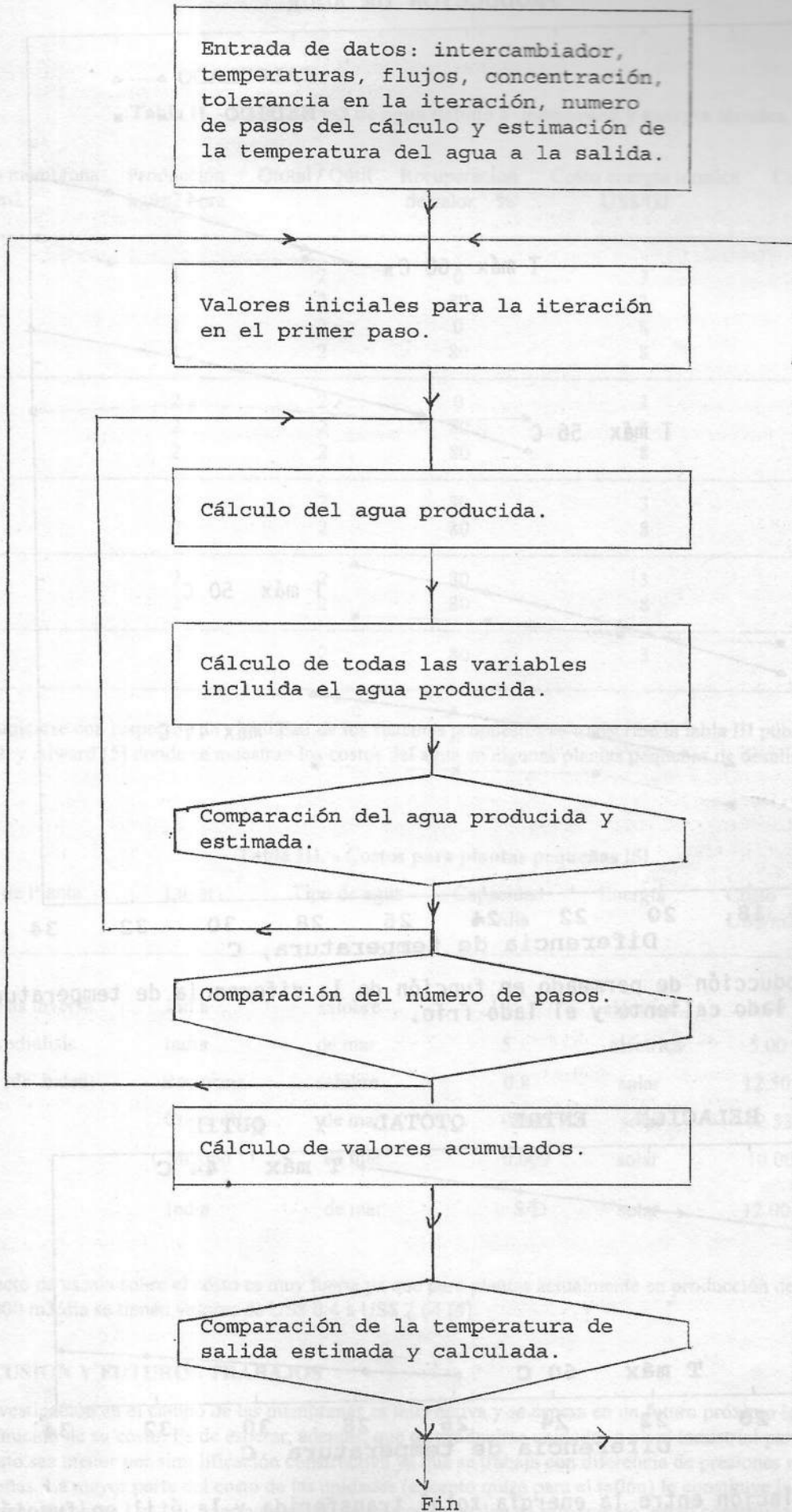


Fig. 3.- Diagrama de flujo del programa

PRODUCCION DE AGUA

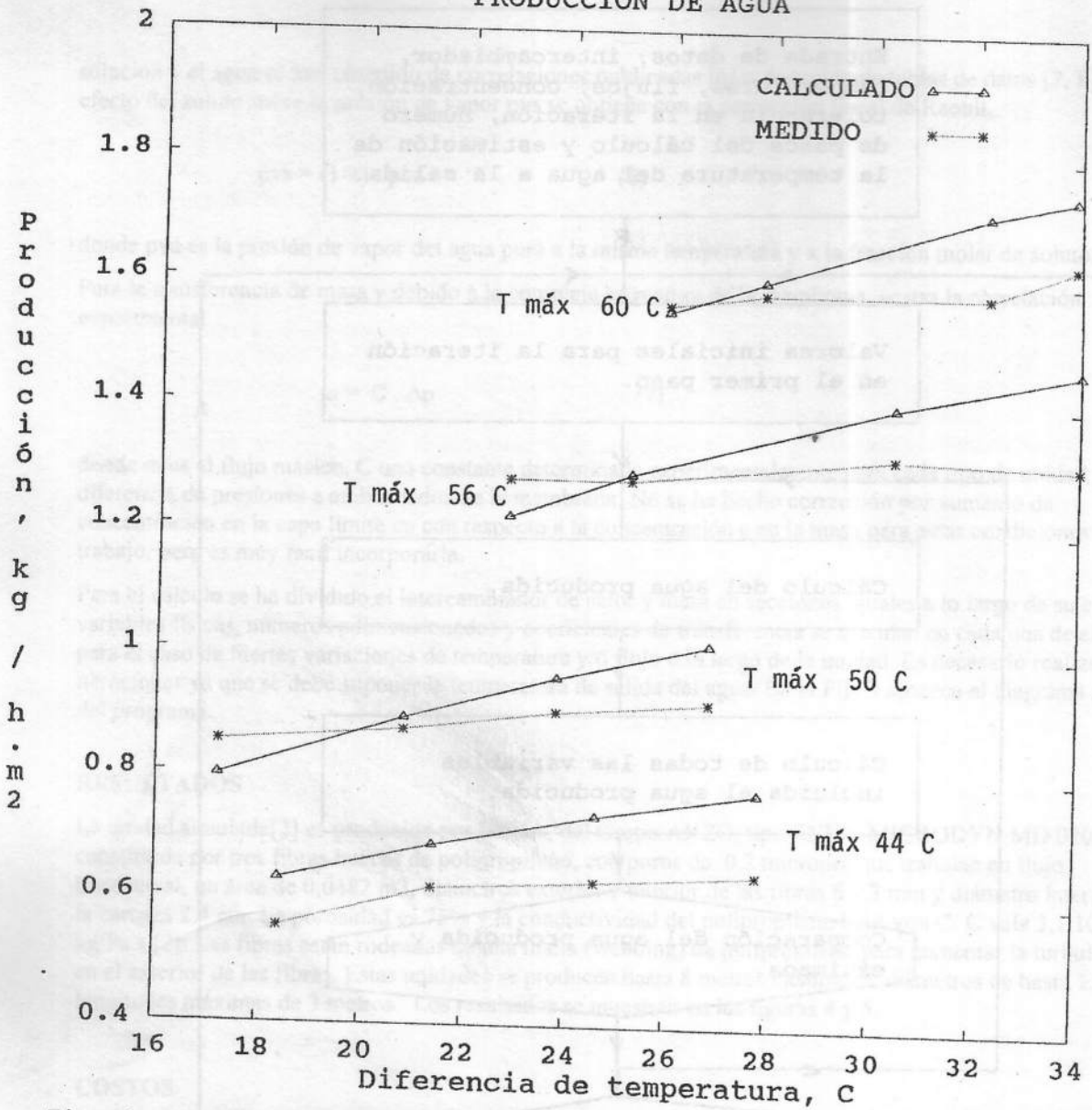


Fig. 4. Producción de permeado en función de la diferencia de temperatura entre el lado caliente y el lado frío.

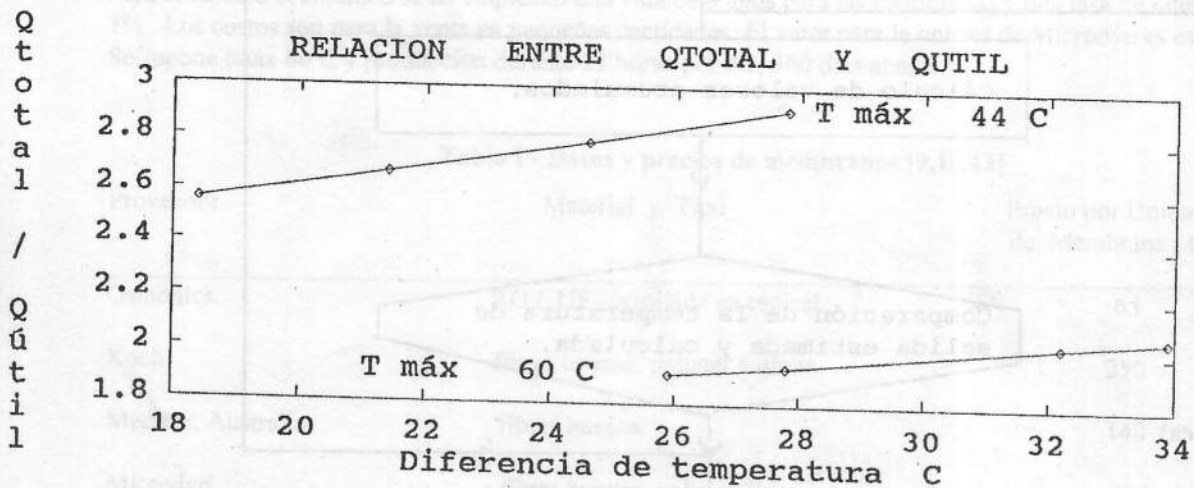


Fig. 5. Relación entre la energía total transferida y la útil en función de la diferencia de temperatura entre el lado caliente y el lado frío.

Tabla II. - Costo del m3 de agua debido a membrana y energía térmica.

Costo membrana US\$/m2	Producción kg/m2 hora	Qtotal / Qútil	Recuperación de calor %	Costo energía térmica US\$/GJ	Costo del agua US\$/m3
50	1	2	0	3	15,96
50	1	2	80	3	5,37
50	1	2	0	8	40,61
50	1	2	80	8	9,31
50	2	2	0	3	15,41
50	2	2	80	3	3,68
50	2	2	80	8	8,57
150	2	2	80	3	5,17
150	2	2	80	8	10,06
250	2	2	80	3	6,66
250	2	2	80	8	11,55
500	2	2	80	3	10,26

Para ubicarse con respecto a la viabilidad de los sistemas propuestos se transcribe la tabla III publicada por Ayoub y Alward [5] donde se muestran los costos del agua en algunas plantas pequeñas de desalinización de agua.

Tabla III. - Costos para plantas pequeñas [5]

Tipo de Planta	Lugar	Tipo de agua	Capacidad m3/día	Energía	Costo US\$/m3	Año
Osmosis inversa	India	salobre	10	eléctrica	4.00	1989
Electrodialisis	India	de mar	5	eléctrica	5.00	1989
Solar (de batea)	Bostwana	salobre	0.8	solar	12.50	1987
	Costa Rica	de mar	0.006	solar	12.53	1989
	México	de mar	0.009	solar	10.00	1992
	India	de mar	S/D	solar	12.00	1989

El efecto de escala sobre el costo es muy fuerte ya que para plantas actualmente en producción de 2.000 a 228.000 m3/día se tienen valores de US\$ 0.4 a US\$ 2.64 [5].

DISCUSION Y FUTUROS TRABAJOS

La investigación en el campo de las membranas es muy activa y se espera en un futuro próximo la disminución de su costo. Es de esperar, además, que de producirse unidades a nivel industrial para este uso, su costo sea menor por simplificación constructiva ya que se trabaja con diferencia de presiones muy pequeñas. La mayor parte del costo de las unidades (excepto quizá para el teflón) lo constituye la laminación y la mano de obra. Las unidades ensayadas, cuyos costos se dan en este trabajo, están construidas para trabajar a presión.

El programa computacional desarrollado simula adecuadamente, en primera aproximación, los resultados experimentales obtenidos por otros autores [2] por lo que será una herramienta útil para futuros estudios de casos, acoplando las unidades de destilación a las fuentes renovables mencionadas. Es necesario perfeccionar los aspectos de transferencia térmica para estas geometrías y para otros rangos de velocidades de los fluidos y analizar la aparente estabilización de la producción con la temperatura del lado caliente. Próximamente se contará con una unidad similar, lo que permitirá verificar esta situación.

En la simulación se ha introducido una constante experimental que relaciona la producción de agua con la diferencia de presiones de vapor entre ambos lados de la membrana. Es conveniente trabajar en la determinación de dicha constante en función de variables básicas.

En el aspecto experimental, se deben construir prototipos para determinar el comportamiento de las membranas en condiciones de trabajo de campo tales como pretratamiento necesario del agua, taponamiento, etc, verificar su comportamiento térmico y optimizar la recuperación de calor.

También debe analizarse la posibilidad de barrer el vapor con aire y condensar en una superficie no perteneciente a la fibra para disminuir la transferencia térmica por conducción.

AGRADECIMIENTOS

A la Dra. Simandl de la Universidad de McGill por la hospitalidad e información recibida durante la visita de su Laboratorio y a la Dra. Zangrando por las averiguaciones en empresas vendedoras de las membranas en EEUU.

REFERENCIAS

- 1.- Destilación de agua con sistemas poza solar-membranas especiales: propuesta, Graciela Lesino, Actas de la XVI Reunión de Trabajo de ASADES, La Plata, 1993.
- 2.- Water purification by membrane distillation, Stéphanie Lacoursière, Tesis de Master en Ingeniería, Universidad de Mc Gill, Montréal, Canadá, 1994.
- 3.- Low energy cost desalination processes using hydrophobic membranes, G.C.Sarti, C.Gostoli, S.Matulli, Desalination, 56, 277-286, 1985.
- 4.- Solar heated membrane distillation, G.L.Morrison, Sudjito, A.G.Fane and P.Hogan, Proceedings of the Solar World Congress, 2329-2334, Denver, Colorado, USA, 1991.
- 5.- Water requirements and remote arid areas: the need for small scale desalination, J.Ayoub and R.Alward, Brace Research Institute, Universidad de McGill, Montréal, Canadá, 1995.
- 6.- Salinity-gradient solar ponds, J.R.Hull, C.E.Nielsen and P.Golding, CRC Press Inc, Boca Ratón , Florida, 1989.
- 7.- Handbook of heat transfer fundamentals, W.M.Rohsenow, J.P.Hartnett, E.N.Ganic, MacGraw Hill Book Company, New York, 1985.
- 8.- Fundamentals of heat and mass transfer, F.P.Incropera and D.P.DeWitt, John Wiley and Sons Inc, Singapur, 1990.
- 9.- Comunicación personal, Dra. Federica Zangrando, agosto 1994.
- 10.-Comunicación personal, Dra. Jana Simandl, julio 1995.