

## **DESTILACIÓN DE AGUA CON FIBRAS HUECAS: BARRIDO DEL VAPOR CON AIRE Y CONDENSACIÓN EN CONTACTO DIRECTO\***

Marcelo Gea y Graciela Lesino\*

INENCO

Universidad Nacional de Salta

Calle Buenos Aires 177 - CP4400 - Salta

Tel - Fax: 087-255489 E-mail: geam@ciunsa.unsa.edu.ar

### **RESUMEN**

La destilación de agua con membrana es un proceso en el cual una membrana con microporos hidrofóbica separa la solución salina caliente del agua destilada más fría. Esta diferencia de temperaturas genera una diferencia de presiones de vapor entre los lados que produce la migración de agua en forma de vapor. El objetivo de este trabajo es evaluar las probables ventajas de barrer con aire el vapor del lado frío y condensarlo sobre una superficie que no pertenezca a la membrana, disminuyendo la transferencia de calor por conducción. Se propone realizar la condensación en contacto directo del vapor de agua en condensadores tipo packing estructurado los cuales poseen un elevado coeficiente de transferencia de calor por unidad de volumen.

Se presentan los resultados de una simulación numérica de los fenómenos de intercambio de calor y masa de un sistema formado por una unidad de fibras huecas de polímero, un condensador y el aire circulando en circuito cerrado. Se estudia la producción de destilado en función del tamaño del condensador y de los flujos de aire y agua.

### **INTRODUCCIÓN**

La destilación por membranas es un proceso relativamente nuevo de desalinización. En ellas el proceso de destilación se lleva a cabo con diferencias de temperatura menores de 50°C. Si además se considera la utilización de energías solar para calentar la solución salina y una adecuada recuperación del calor transferido en el proceso, el método puede resultar económicamente atractivo [Lesino, 1996].

Para que se produzca la destilación es necesaria una diferencia de presiones de vapor entre los lados de una membrana hidrofóbica que permite la difusión del vapor de agua a través de ella. La membrana actúa como soporte físico de la interfase líquido - vapor. La diferencia de presiones es generada habitualmente por la diferencia de temperaturas entre la solución salina caliente de un lado de la membrana y el agua destilada fría del otro lado.

En un trabajo previo se planteó la posibilidad de barrer con aire el vapor que atraviesa la membrana, y que luego este condense en otra superficie, fuera del destilador [Gea et al, 1997]. Se concluyó que esta alternativa se justifica en que operando sobre la temperatura del aire se logra independizar la producción de destilado de las pérdidas térmicas por conducción a través de la membrana. Es decir que, a diferencia con el barrido con agua, se puede considerar la posibilidad de aumentar la temperatura del aire de entrada y así disminuir las pérdidas de calor sin disminuir la producción. Esto significa una ventaja porque la conveniencia económica del proceso es fuertemente dependiente de la recuperación del calor total (sensible y latente). Además, al poder controlar las pérdidas por conducción, se incorpora la posibilidad de utilizar membranas de menor espesor con las que se consigue mayor producción.

Como contrapartida se introduce una mayor complejidad en la etapa de condensación, debiendo agregarse un intercambiador para la condensación del vapor de agua. Debe considerarse que al utilizarse aire más caliente para disminuir las pérdidas es más complicado el proceso para la condensación.

\* Proyecto N°649 del Consejo de Investigación de la UNSA

\* Investigadora del CONICET

## CONDENSACIÓN EN CONTACTO DIRECTO

La condensación en contacto directo permite eficiencias térmicas elevadas en condensadores de pequeñas dimensiones, con bajas pérdidas de carga en el gas y con menores costos de operación que los condensadores de superficie usados comúnmente.

Entre los condensadores de contacto directo para aplicaciones industriales se utilizan los llamados packing, que permiten transferencias de calor y masa en pequeños volúmenes. Últimamente se han adoptado, especialmente en torres de enfriamiento los packing estructurados, los cuales se caracterizan por un elevado coeficiente de transferencia volumétrico, del orden de  $1 \text{ MW/m}^3\text{K}$ , frente al rango típico de  $150 \text{ a } 300 \text{ KW/m}^3\text{K}$ . En ellos el líquido se distribuye sobre una serie ordenada de placas inclinadas construidas en metal, plástico o malla metálica. El fluido atraviesa alternativamente secciones triangulares y romboidales produciéndose una redistribución continua del flujo líquido y un relativamente simple camino para el gas [Zangrando et al, 1993].

En el National Renewable Energy Laboratory (NREL) se desarrolló un intensivo programa de testeo de condensadores que tuvieran una alta eficiencia térmica para usarse en ciclos de conversión de energía térmica oceánica en los cuales la diferencia de temperaturas disponibles es muy limitada (aproximadamente  $20 \text{ C}$ ) [Bharathan et al, 1988]. Allí los intercambiadores deben condensar el vapor con una elevada eficiencia y una muy baja caída de presión. De estos estudios resultó que quienes mejor cumplían estas características eran los packing estructurados.

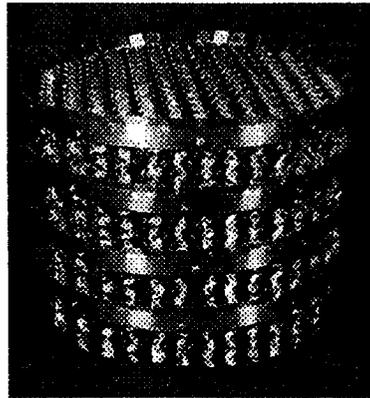


Fig. 1. Unidad de packing estructurado. (Gentileza Jaegger S.A.)

## MODELO COMPUTACIONAL

Se realizó un programa computacional que simula el funcionamiento del sistema integrando dos programas ya existentes: el de la unidad de membrana y el del condensador de contacto directo. El primero fue desarrollado en el INENCO y calcula el permeado en la membrana barriendo el vapor con aire bajo las distintos parámetros de funcionamiento. El segundo fue desarrollado durante el programa del NREL. El modelo calcula los procesos de transferencia unidimensional de calor, masa y momento y obtiene las propiedades del vapor, el aire y el líquido a lo largo del condensador bajo condiciones estacionarias.

Como la fracción de no condensables en la mezcla aire - vapor es predominante, no es posible el condensado de un elevado porcentaje del vapor presente en el aire. Por ello se plantea que el gas realice un circuito cerrado en el sistema. La dirección de este flujo  $G$  es en contracorriente, tanto en la membrana respecto a la solución salina como en el condensador respecto al agua pura. El flujo  $L$  de agua en el condensador deberá pasar por otro intercambiador para la recuperación del calor latente.

## CONDICIONES DE DISEÑO DEL CONDENSADOR

La performance de los condensadores de contacto directo es una compleja función de la carga de líquido y de vapor, de la concentración de gas no condensable, del gas liberado por el líquido, de la temperatura de saturación, de la presión y de la geometría. Dos parámetros principales describen su comportamiento térmico: la eficiencia térmica y el número de Jacob.

La eficiencia térmica relaciona el cambio de temperatura del agua al pasar por el condensador con la potencial de temperaturas máximo disponible:  $\epsilon = (T_{as} - T_{ae}) / (T_{ve}^* - T_{ae})$

El número de Jacob describe la mínima cantidad de agua necesaria para condensar el vapor a un dado potencial de temperaturas :  $Ja = L C_{pa} (T_{ve} - T_{le}) / G h_{fg}$

$T_{ve}$  = temperatura de vapor en equilibrio con el agua a la entrada

$T_{as}$  = temperatura del agua a la salida

$T_{ae}$  = temperatura del agua a la entrada

L = flujo de agua

$C_{pa}$  = calor específico del agua

G = flujo de vapor

$h_{fg}$  = calor de vaporización del agua

La fracción de vapor condensado es el producto  $\epsilon \times Ja$ . La eficiencia térmica no es alta debido a la presencia mayoritaria de gases no condensables, los cuales provocan un incremento en la pérdida de presión del vapor a lo largo del condensador.

Se plantea para el diseño un valor del número de Jacob entre 1.1 y 1.2 que son los valores comunes usados en la industria química, ya que valores mayores representan un uso ineficiente del agua. Se comprueba que para valores mayores de Ja el aumento de destilado es mínimo.

La caída de presión aumenta cuadráticamente con el flujo de gas. En el caso que se estudia, donde la fracción de vapor en la mezcla es pequeña, es posible un flujo mayor que el utilizado en la experiencia del NREL en la cual el vapor es predominante. Se utiliza un valor  $G = 1 \text{ kg / s m}^2$  en contracorriente.

La inundación es un limitación para los flujos en un condensador a contracorriente, porque cuando el líquido no drena apropiadamente y llena los canales del packing limita el flujo de aire y como consecuencia aumenta significativamente la caída de presión del gas.

El valor fijado de G es igual al flujo de aire en la membrana multiplicado por el número de unidades. Mientras mayor es el número de unidades de membrana propuesta por metro cuadrado de condensador, menor debe ser el flujo en cada membrana. Pero estando fijo Ja, al bajar el flujo de aire aumenta su contenido de humedad, y se debe controlar que no haya saturación pues se generaría condensación en las paredes de la membrana.

Bajo estas condiciones se realizó el cálculo de las distintas condiciones de funcionamiento del sistema para distintas longitudes de condensador propuestas, encontrándose la relación entre la longitud del condensador, el flujo de agua y el volumen necesario para condensar el producto de  $1 \text{ m}^2$  de membrana.

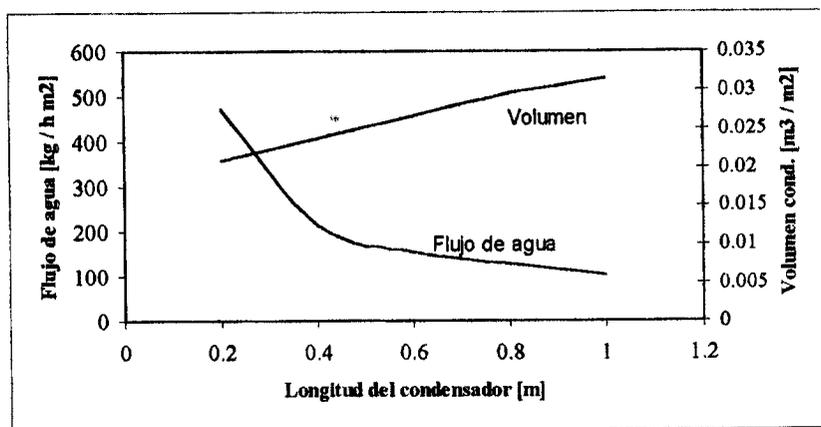


Fig. 2. Flujo de agua y volumen de condensador en función de la longitud.

La gráfica muestra el flujo de agua por metro cuadrado y el volumen de condensador necesarios por metro cuadrado de membrana en función de la longitud del intercambiador. Mientras menor es la longitud del intercambiador, mayor debe ser el flujo de agua y menor el volumen de condensador para condensar la misma cantidad de vapor de agua.

## CONCLUSIONES

Bajo las condiciones planteadas la simulación presenta como resultado una producción promedio de  $1,82 \text{ kg / s m}^2$  con una temperatura de entrada del aire en la membrana entre 27 C y 30 C y flujo de 1,5 kg / h de solución a 60 C. Este es un valor

que está dentro del rango del obtenido en ensayos de unidades similares con agua a ambos lados de la membrana [Lacoursiere, 1994].

Sin contar las pérdidas de calor al exterior, la relación entre los calores total y latente transferidos es de 1,14, lo que confirma que la condensación del vapor permeado en una superficie exterior a la membrana representa la posibilidad de una mejor recuperación del calor, lo cual juega un papel decisivo en el costo del sistema.

La condensación en contacto directo en intercambiadores del tipo de los packing estructurado permite un sistema compacto debido a su elevado coeficiente de transferencia volumétrico. Su diseño debe resolverse comparando los costos de bombeo de agua y aire con el precio del condensador, apareciendo en principio conveniente una longitud de packing no menor de 0,4 m.

## BIBLIOGRAFÍA

- "Destilación con Fibras Huecas: Barrido del Vapor con Aire" M. Gea, G. Lesino. Avances en Energías Renovables. 1997
- "Destilador solar de agua con fibras huecas", Graciela Lesino, Actas XIX Reunión ASADES, Mar del Plata, 1996.
- "Direct-Contact Condensation of Low-Density Steam on Seawater at High Inlet Noncondensable Concentrations", F. Zangrando, D. Bharathan, Transactions of the ASME, Vol. 115, August, 1993.
- "Direct-Contact Condensers for Open-Cycle OTEC Applications. Model Validation with Fresh Water Experiments for Structured Packings" D. Bharathan, B. K. Parsons, J. A. Althof. National Renewable Energy Laboratory. Octubre 1988.
- "Water purification by membrane distillation", Stéphanie Lacoursière, Tesis de Master en Ingeniería, Universidad de Mc Gill, Montreal, Canadá, 1994.