

PREDIMENSIONADO DE UN EVAPORADOR POR FLASH A ESCALA DE LABORATORIO.

Adriana Ovejero, Graciela Lesino¹.

Universidad Nacional de Salta, Facultad de Ciencias Exactas.

Departamento de Física. INENCO. Tel.: (0387) 4255424 Fax: (0387) 4255489

E-mail: ovejerom@unsa.edu.ar - lesino@unsa.edu.ar

RESUMEN: Se propone una modificación de los parámetros de funcionamiento de un evaporador para mejorar su eficiencia. Entre ellos se tiene en cuenta: el caudal, la temperatura de entrada, el número de tubos internos, su altura activa y el diámetro de los mismos. Se trabajó con un programa de simulación realizado en Excel, con el cual se puede estudiar el comportamiento de la eficiencia para los diferentes parámetros de funcionamiento. Los resultados obtenidos a partir de la simulación realizada para el evaporador a escala de laboratorio coinciden notablemente con el comportamiento encontrado para evaporadores que trabajan bajo condiciones OTEC. Este análisis puede aplicarse a sistemas de mayor tamaño con miras a la producción de vapor requerida para la generación de potencia.

Palabras claves: evaporación por flash, solar, generación de potencia

INTRODUCCIÓN:

El generador de vapor con el que se trabaja en la experiencia es un evaporador con un tubo surtidor vertical a la salida del cual se produce la evaporación por flash cuando una cierta cantidad de líquido a una determinada presión y temperatura entra al recinto que se encuentra a una menor presión. De ésta manera se produce la generación de vapor como resultado de una reducción en la presión del sistema y no por la adición de calor como ocurre en el caso de la ebullición convectiva. Se caracteriza por producir una muy baja caída de temperatura entre el fluido caliente y el vapor producido, siendo de uso interesante cuando se dispone de pequeños saltos de temperatura.

Este tipo de evaporadores son recomendados para plantas de ciclos abiertos. Se encuentran varios estudios realizados de los mismos para plantas OTEC. Éstos producen energía mecánica a partir de la diferencia de temperatura existente entre el agua de mar en la superficie y la que se encuentra a una determinada profundidad en áreas tropicales y subtropicales. El salto térmico disponible debe distribuirse entre el evaporador, la turbina y los condensadores de un ciclo Rankine. En nuestro país no se ha desarrollado aún la tecnología OTEC. Sin embargo, existen regiones que se caracterizan por tener elevados niveles de radiación solar y grandes salinas las cuales se pueden aprovechar para la producción de electricidad empleando el gradiente de temperatura existente en una poza solar.

En la Figura 1 puede observarse un esquema del evaporador utilizado en el laboratorio. El agua caliente ingresa al evaporador por su parte inferior. Cuando llega a la salida del tubo vertical se encuentra con una zona de menor presión, produciéndose la evaporación por flash. El vapor producido en el interior del recinto se condensa en el cono superior. El condensado se recoge en una canaleta situada entre la parte cónica y cilíndrica del evaporador. Este condensado constituye una medida aproximada de la cantidad de vapor producida por el equipo. (Ovejero et al., 2000).

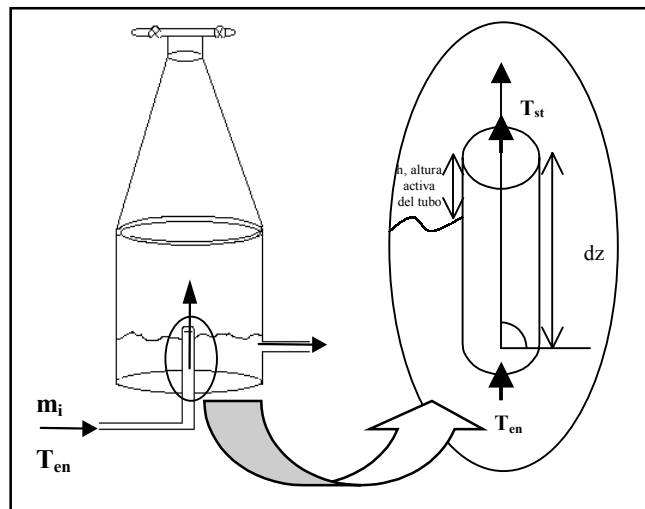


Figura 1. Esquema del evaporador

¹ Investigadora del CONICET

Proyecto parcialmente financiado por el CONICET

Para estudiar el comportamiento del evaporador se realizaron algunas pruebas a escala de laboratorio. Los resultados obtenidos en las experiencias fueron comparados con los obtenidos en la simulación. Se utilizó el modelo homogéneo que considera las dos fases (agua y vapor) como una fase única que posee las propiedades medias del fluido. Se encontró un buen ajuste entre las medidas y la simulación (Ovejero et al., 2000).

Tanto la eficiencia como la producción de vapor del evaporador se calculan de la siguiente manera:

$$m_{\text{vapor}} = \frac{[m_{\text{in}} \cdot C_{\text{pl}} \cdot (T_{\text{en}} - T_{\text{s}})]}{h_{\text{fg}}} \quad \varepsilon = (T_{\text{en}} - T_{\text{s}}) / (T_{\text{en}} - T_{\text{sat}})$$

donde m_{in} es el caudal de entrada, C_{pl} el calor específico correspondiente a la temperatura de entrada del agua T_{en} a la cual entra el agua caliente al evaporador, h_{fg} el calor latente de vaporización, T_{s} la temperatura de salida que es la que se mide en el nivel de desagote y T_{sat} la temperatura de saturación que es la que se mide en el interior del recinto.

En la simulación se calcula en primer lugar la caída de presión a lo largo del tubo interno del evaporador y a partir de la presión calculada a la salida del mismo se obtiene la temperatura de saturación correspondiente, con este valor utilizando la fórmula derivada a partir de la teoría cinética de los gases, se calcula la cantidad de vapor producido. Luego se obtiene la temperatura de salida a partir del balance de energía y con la misma se calcula el valor de la eficiencia. (Ovejero et al., 2000).

Se simuló el comportamiento del evaporador bajo condiciones OTEC, que corresponde al caso de un sistema a mayor escala y temperatura de entrada del orden de los 26°C, teniendo en cuenta que estos sistemas trabajan con agua caliente extraída de la superficie del mar, con cuyos datos se cuenta. Los resultados obtenidos con la simulación realizada, para el caso OTEC, coinciden significativamente con los valores de eficiencia y producción de vapor proporcionados por una planta de mayores dimensiones.

Una vez obtenidos los resultados de la simulación para el caso mencionado, se estudió el comportamiento del evaporador a escala de laboratorio con una temperatura de entrada del orden de los 70°C, temperatura del fondo de una poza solar. En ambos casos se estimó una diferencia entre temperatura de entrada y de saturación del orden de los 5 °C. Se ha modelizado la dependencia de la eficiencia y la producción de vapor con la geometría del evaporador y los valores de temperaturas de trabajo y caudales de entrada.

En el cálculo de producción de vapor del sistema OTEC, se tomó el área transversal del evaporador. El sistema mencionado cuenta con una malla que se coloca en la parte superior, que disminuye el tamaño de las gotas generadas por el flash producido en el interior del recinto, por lo que puede tomarse toda su área transversal. Por otra parte para el evaporador de laboratorio se tuvo en cuenta el área transversal del tubo interno del evaporador, dado que es de menor tamaño y no cuenta con la malla mencionada.

A continuación se presenta la comparación de los resultados obtenidos en la optimización, al considerar como variables el caudal de entrada, la temperatura de entrada, el diámetro del tubo interno, la altura activa del tubo y el parámetro alfa que representa la proporción de burbujas de vapor a la salida del tubo interno. En el análisis realizado se tiene en cuenta la variación de una de las cantidades físicas mencionadas y se mantienen las restantes variables fijas. Por último se propone un nuevo dimensionamiento para mejorar su eficiencia.

ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DEL EVAPORADOR CON EL CAUDAL DE ENTRADA:

En la Tabla 1 se pueden observar los valores estimados de temperatura de entrada y de saturación, presión de saturación y los considerados para la geometría del evaporador. En las Figuras 2 y 3 en los que se muestra la dependencia de la eficiencia y la producción de vapor con la variación del caudal de entrada, puede observarse en las mismas que tanto en condiciones OTEC como en las de laboratorio, el evaporador presenta un comportamiento similar.

Tabla 1

	T_{n} [°K]	T_{sat} [°K]	P_{sat} [Pa]	Radio del evaporador [m]	Altura activa [m]	Radio del tubo interno [m]	alfa
Otec	299.15	294.15	2496	2.38	0.5	0.075	0.96
Labo- ratorio	345	340	27406	0.15	0.02	0.0075	0.5

Se observa que a medida que el caudal de entrada va aumentando hay una caída de abrupta de la eficiencia por lo cual también disminuye la producción de vapor.

Bajo condiciones OTEC la mayor eficiencia se observa para caudales comprendidos entre 500 Kg/s y 700 Kg/s, mientras que bajo las condiciones de laboratorio se encuentra entre 0.12 Kg/s y 0.18 Kg/s.

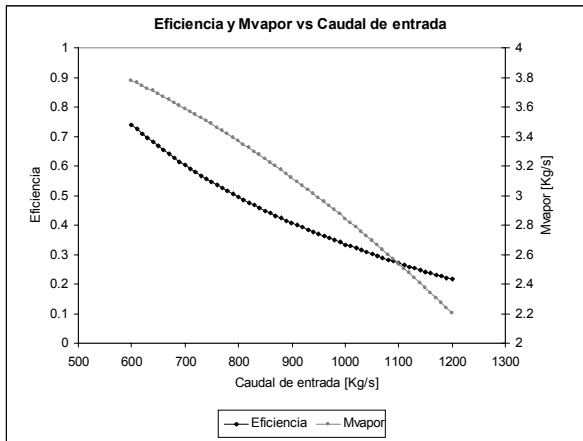


Figura 2 - Condiciones OTEC bajas temperaturas.

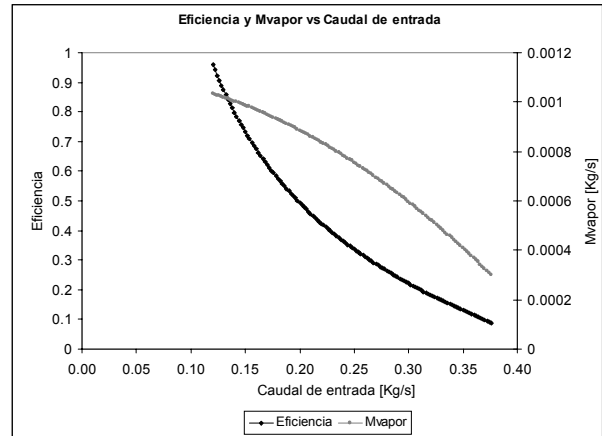


Figura 3 - Condiciones de Laboratorio altas temperaturas.

ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DEL EVAPORADOR CON LA TEMPERATURA DE ENTRADA:

En la Tabla 2 se pueden observar los valores estimados de caudal de entrada, de temperatura y presión de saturación y los considerados para la geometría del evaporador.

Tabla 2

	m_{in} [Kg/s]	T_{sat} [°K]	P_{sat} [Pa]	Radio del evaporador [m]	Altura activa [m]	Radio del tubo interno [m]	alfa
Otec	620	294.15	2496	2.38	0.5	0.075	0.96
Labo-ratorio	0.12	340	27406	0.15	0.02	0.0075	0.5

En las Figuras 4 y 5 se muestra la dependencia de la eficiencia con la temperatura del agua caliente a la entrada. En ambos casos a medida que la temperatura de entrada va aumentando, la eficiencia y la cantidad de vapor producido crecen considerablemente. Para una eficiencia de 0.9, en el caso OTEC corresponde una temperatura de entrada del orden de los 27.5°C, mientras que para el caso de laboratorio corresponde una temperatura del orden de los 72°C.

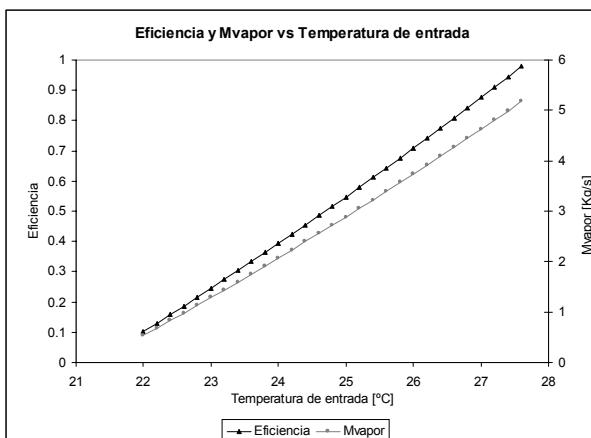


Figura 4 - Condiciones OTEC bajas temperaturas.

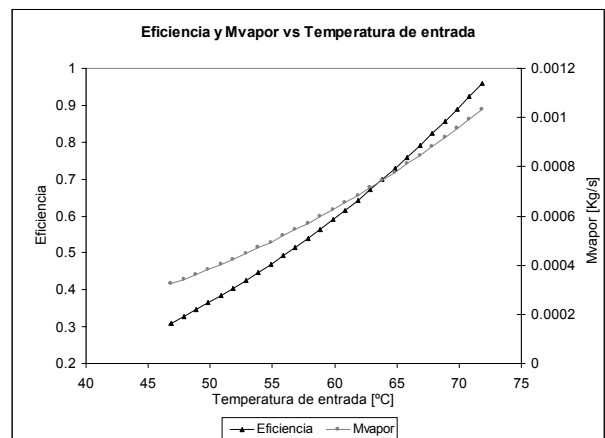


Figura 5 - Condiciones de Laboratorio altas temperaturas.

ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DEL EVAPORADOR CON EL DIÁMETRO DEL TUBO INTERNO:

En la Tabla 3 se pueden observar los valores estimados de presión y temperatura de saturación, de caudal y temperatura de entrada y los considerados para la geometría del evaporador.

Tabla 3

	T_n [°K]	T_{sat} [°K]	P_{sat} [Pa]	Radio del evaporador [m]	Altura activa [m]	m_{in} [Kg/s]	alfa
Otec	299.15	294.15	2496	2.38	0.5	620	0.96
Lab	345	340	27406	0.15	0.02	0.12	0.5

En la Figura 6, se observa que en el caso OTEC el aumento del diámetro del tubo interno del evaporador no afecta la caída de presión a lo largo del tubo interno, por lo que tampoco influencia su eficiencia y producción de vapor. En el caso de Laboratorio como se observa en la Figura 7 la eficiencia aumenta y la caída de presión disminuye al incrementarse el diámetro del tubo interno, como era de esperarse, dado que en el cálculo interviene el área transversal del tubo y no la del evaporador como en el caso OTEC.

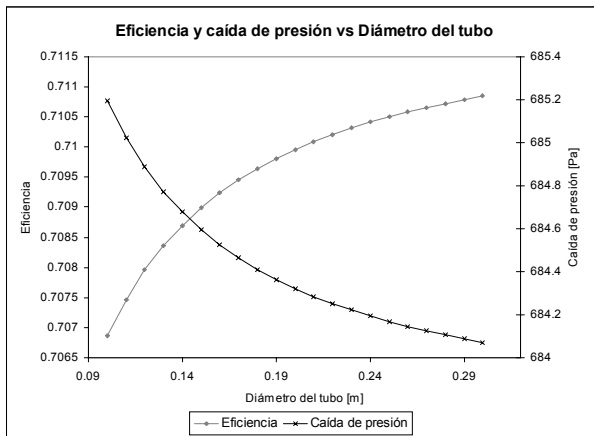


Figura 6 - Condiciones OTEC bajas temperaturas.

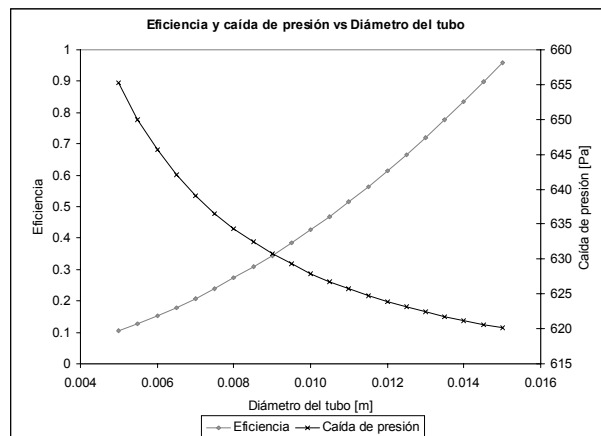


Figura 7 - Condiciones de Laboratorio altas temperaturas.

ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DEL EVAPORADOR CON LA ALTURA ACTIVA DEL TUBO INTERNO:

En la Tabla 4 se pueden observar los valores estimados de presión de saturación, de caudal y temperatura de entrada y los considerados para la geometría del evaporador.

Tabla 4

	T_n [°K]	T_{sat} [°K]	P_{sat} [Pa]	Radio del evaporador [m]	m_{in} [Kg/s]	Radio del tubo interno [m]	alfa
Otec	299.15	294.15	2496	2.38	620	0.075	0.96
Laboratorio	345	340	27406	0.15	0.12	0.0075	0.5

En la Figura 8 se observa que la eficiencia y la caída de presión disminuyen a medida que la altura activa del tubo interno aumenta. Bajo condiciones OTEC se recomienda una altura activa de 0.5m, para este valor de altura se tiene una eficiencia aproximada de 0.7. En cuanto al caso de Laboratorio en la Figura 9, se observa que los valores de eficiencia mayores se encuentran para una altura activa del tubo comprendida entre 0.02 m y 0.01 m.

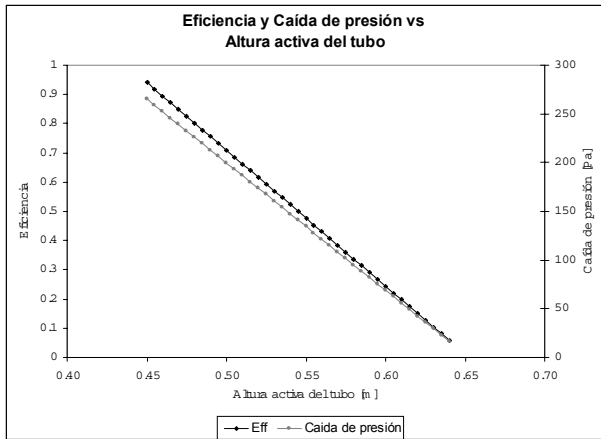


Figura 8 - Condiciones OTEC bajas temperaturas.

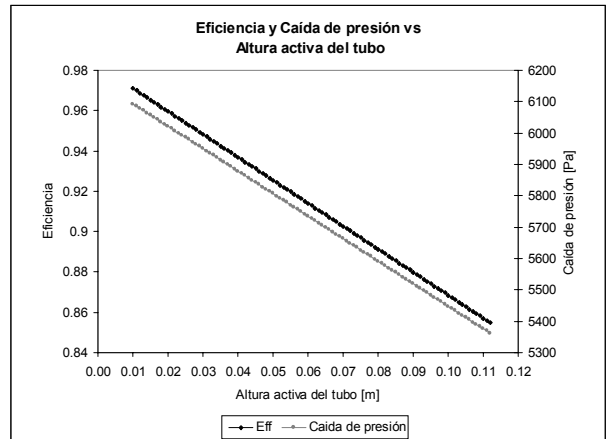


Figura 9 - Condiciones de Laboratorio altas temperaturas.

ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DEL EVAPORADOR CON EL PARÁMETRO ALFA:

Uno de los parámetros más interesantes en todo el análisis es el parámetro alfa, que representa la proporción de burbujas de vapor a la salida del tubo.

En la Tabla 5 se pueden observar los valores estimados de presión de saturación, de caudal y temperatura de entrada y los considerados para la geometría del evaporador.

Tabla 5

	T_n [°K]	T_{sat} [°K]	P_{sat} [Pa]	Radio del evaporador [m]	Altura activa [m]	Radio del tubo interno [m]
Otec	299.15	294.15	2496	2.38	0.5	0.075
Labo- ratorio	345	340	27406	0.15	0.02	0.0075

En el caso OTEC se observa en la Figura 10 que pequeñas variaciones del parámetro alfa, a partir de 0.95, para diferentes caudales corresponden a grandes cambios en la eficiencia del evaporador.

En lo que respecta al caso de Laboratorio, para caudales comprendidos entre 0.13 Kg/s y 0.2 Kg/s, se observa en la Figura 11 prácticamente la misma eficiencia para distintos valores del parámetro alfa, correspondiendo una mayor eficiencia a medida que el caudal de entrada disminuye, a un valor de 0.13 Kg/s.

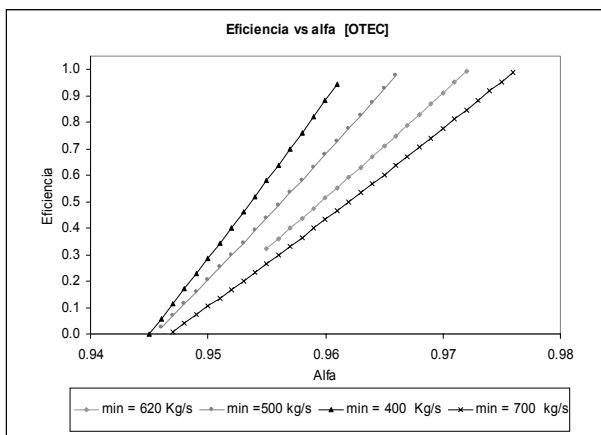


Figura 10 - Condiciones OTEC bajas temperaturas.

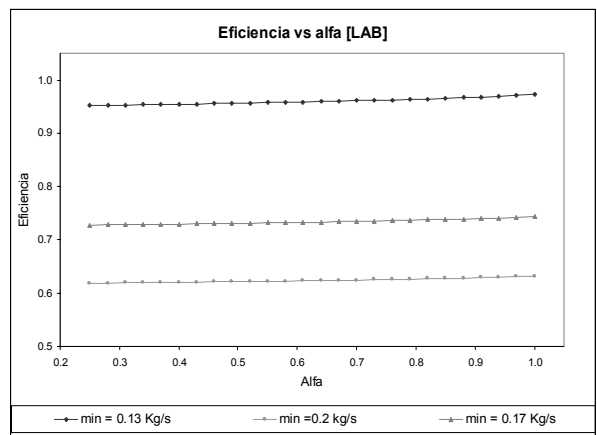


Figura 11 - Condiciones de Laboratorio altas temperaturas.

MODIFICACIÓN PROPUESTA PARA MEJORAR EL FUNCIONAMIENTO DEL EVAPORADOR A ESCALA DE LABORATORIO.

Con la geometría del evaporador montado en el laboratorio, diámetro de la base del evaporador de 0.30 m, diámetro del tubo interno de 0.014 m y habiendo estimado una presión de saturación de 27406 Pa, una diferencia de temperatura entre entrada y saturación de 5°C y un valor de alfa de 0.5, se analizó el comportamiento del evaporador con la variación de la altura activa del tubo. A partir de este análisis se observa que para una altura activa del tubo de 0.05 m le corresponde una eficiencia de 0.93. Tomando fijos los valores mencionados, se analiza la dependencia de la eficiencia con la variación del caudal y la temperatura de entrada, se encuentra para una eficiencia de 0.93 le corresponde un caudal de 0.13 Kg/s y una temperatura de entrada de 72°C.

Por lo que para mejorar el comportamiento del evaporador a escala de laboratorio, se podría fijar una altura activa del tubo de 0.05 m lo que corresponde a una eficiencia de 0.93, al trabajar con un caudal de entrada de 0.13 Kg/s, una temperatura de entrada de 345°K (72°C), un radio del tubo interno de 0.0075 m, habiendo estimado una presión de saturación de 27406 Pa en el interior del recinto y un valor de $\alpha = 0.5$.

CONCLUSIONES:

A partir del análisis realizado se observa que la geometría elegida para el evaporador, el área transversal del mismo, la altura activa, el diámetro y número de tubos internos, influyen significativamente la producción de vapor. Por otra parte tanto en el caso OTEC como en el de laboratorio el aumento del caudal de entrada no lleva a un aumento de la eficiencia. El incremento de la temperatura a la que entra el agua caliente si implica un incremento de su eficiencia. En lo que respecta al valor de alfa que representa la proporción de burbujas de vapor a la salida del tubo se observa, en el caso OTEC, que para diferentes caudales la eficiencia aumenta al incrementarse el valor de alfa. En el caso de laboratorio la eficiencia es prácticamente la misma con el incremento de alfa, pero depende fuertemente del caudal de entrada. Es notable influencia del parámetro alfa y de la presión de saturación sobre la producción de vapor.

Para el diseño del evaporador a mayor escala se puede aplicar el análisis realizado, teniendo en cuenta que el agua caliente que se suministra al mismo dependerá de la cantidad de calor acumulado en el fondo de la poza solar. Por otra parte se debe tener en cuenta que la cantidad de vapor producido debe satisfacer lo requerido por la turbina para la generación de una dada cantidad de potencia.

ABSTRACT: In this paper the authors propose a modification of the functioning parameters to attain a higher efficiency of a flash evaporator. These parameters are the inlet temperature of water, the active height, and the inner diameter of the evaporator pipe.

The effect on the efficiency for various values of the parameters was calculated with a simulation program. The results obtained for a small scale evaporator are in good agreement with the results for evaporators of OTEC technology. The results for this small scale evaporator can be applied to systems sized for power generation.

BIBLIOGRAFÍA:

- J. G. Collier and J.R.Thome. (1996). Convective Boiling and Condensation. Third Edition. Oxford Science Publications.
- S. M. Ghiaasiaan and A.T.Wassel, G. Nihous and L. Vega. A semi-Empirical Model for an OC-OTEC Spout Flash Evaporator. Ocean Energy Recovery. pp. 275-285.
- G. C. Nihous. (1989). A Semi-Empirical Analysis of Spout Evaporators for Open Cycle Ocean Thermal Energy Conversion.. OTEC Project. Presented at ASME National Heat Transfer Conference, Philadelphia, Pennsylvania.
- D. Bharathan, T.Penney. (1984). Flash Evaporation from Turbulent Water Jets. Journal of Heat Transfer. Vol.106/407-416.
- D. Bharathan, H.Green, H. Link, B.Parsons, J.Parsons and F. Zangrando (1990). Conceptual design of Open-Cycle Ocean Thermal Energy Conversion Net Power Producing Experiment (OC-OTEC NPPE). SERI/TP-253-3616.
- A. Ovejero, N. Salvo y G. Lesino (2000). Resultados Preliminares del Comportamiento de un Evaporador por Flash a Escala de Laboratorio para Generación de Electricidad a Baja Temperatura. Actas de la XXIII Reunión de Trabajo de ASADES. Vol 4, N 1, pp 3.43-3.48 Resistencia, Argentina.
- G. Lesino y M. Gea (2000). Prediseño de un Sistema Solar de Cogeneración a Baja Temperatura. Actas de la XXIII Reunión de Trabajo de ASADES. Vol 4, N 2, pp 7.23-7.28. Resistencia, Argentina.