



## SIMULACIÓN DE UN SISTEMA SOLAR PARA GENERACION DE ENERGIA ELECTRICA A BAJA TEMPERATURA.

A. Ovejero, N. Salvo, G. Lesino  
INENCO

Universidad Nacional de Salta

Calle Buenos Aires 177 - (4400) Salta, Argentina

Tel: 54-387-4255424 Fax: 54-387-4255489

email: [ovejero@unsa.edu.ar](mailto:ovejero@unsa.edu.ar) - [nahuel@unsa.edu.ar](mailto:nahuel@unsa.edu.ar) - [lesino@unsa.edu.ar](mailto:lesino@unsa.edu.ar)

**RESUMEN:** Se describe el funcionamiento de un sistema solar de generación de energía eléctrica integrado por una poza solar, un evaporador por flash, una turbina de flujo radial saliente y un condensador de contacto directo. La instalación de este tipo de sistema fue pensado para la zona de la Puna la que se caracteriza por tener elevados niveles de radiación y requerir energía eléctrica y agua potable. El sistema en su conjunto opera a bajas presiones. Para simular el funcionamiento integral del mismo, en esta primera etapa, se trabajó con diferentes programas los que simulan el comportamiento de la poza solar, el evaporador por flash y la turbina. Para diferentes valores de temperaturas y caudales de extracción del fondo de la poza solar, flujo de vapor generado y velocidad con que es entregado a la turbina se obtienen resultados que permiten estimar el funcionamiento del sistema en su conjunto y la producción de electricidad generada.

**Palabras claves:** generación, simulación, turbina, OTEC.

### INTRODUCCIÓN:

La simulación realizada tiene en cuenta a un sistema integral de generación para la producción de energía eléctrica y agua potable por vía solar térmica a baja temperatura. El mismo está compuesto por una poza solar, un evaporador, una turbina de flujo radial saliente y un condensador de contacto directo. La instalación de este tipo de sistema fue pensada para la zona de la Puna. Opera por debajo de la presión atmosférica, por lo que se requiere que el mismo sea diseñado y construido de forma tal que no se produzcan pérdidas de vacío.

El rango de producción eléctrica bruta para este tipo de sistemas se encuentra comprendido entre los 20 y los 50 KW, pero para calcular la potencia neta que suministraría el mismo se debe tener en cuenta la eficiencia de los subsistemas que intervienen. Por ejemplo, con vapor a 60 °C, se generan unos 35 KW eléctricos, la producción de agua potable es de aproximadamente de 2000 Kg/h y además se podría disponer de agua a 40 °C para ser utilizada en calefacción de viviendas.

Cuando se analiza la potencia generada por el sistema, hay que hacer la diferencia entre la potencia bruta y potencia neta generada. Se entiende por potencia neta a la disponible después de los consumos auxiliares, es la potencia bruta que entrega el generador menos la potencia consumida por los sistemas de suministro y bombeo de agua, vacío y otros sistemas auxiliares.

En el presente trabajo se utilizaron tres diferentes programas para simular el sistema completo. El primer componente del sistema, la poza solar, utiliza variables de entrada referidas al clima y al diseño de la misma. Los valores obtenidos de la simulación de un componente son utilizados por el programa que simula el componente que sigue en el sistema y así sucesivamente.

### PROGRAMAS DE SIMULACIÓN

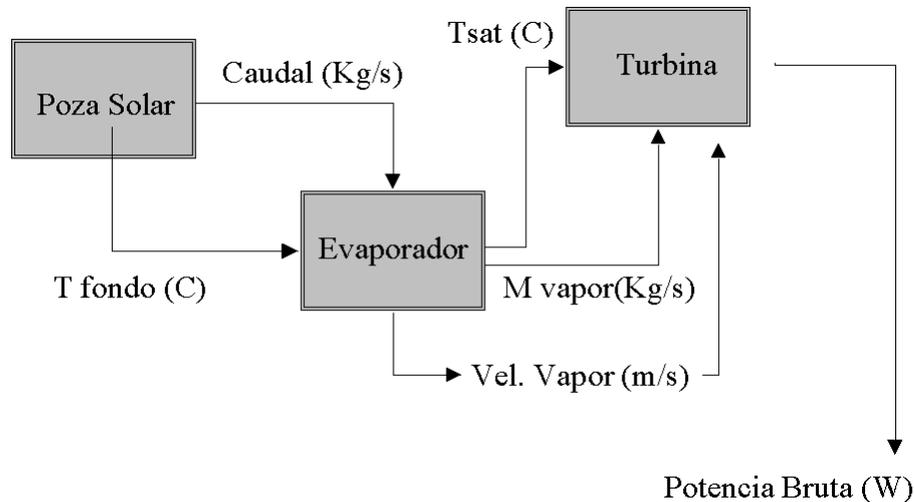
Se desarrollaron tres códigos de simulación, uno para cada componente del sistema que se analiza en esta instancia. En la figura 1 se muestra un esquema del proceso de cálculo. Se indican también las variables de entrada y salida de cada bloque.

El primer componente es una poza solar. Su utilidad se centra principalmente en la cantidad de energía que puede coleccionar y el bajo costo de mantenimiento de la misma. En el cálculo de la eficiencia térmica de este sistema hay que considerar no sólo la relación entre la cantidad de radiación solar incidente colectada y la energía acumulada sino también la cantidad de calor perdido a través de la zona de gradiente y hacia la tierra.

Para predecir el comportamiento térmico de la poza se empleó un modelo analítico unidimensional. El mismo predice las condiciones de funcionamiento mediante un desarrollo en serie de Fourier de la temperatura ambiente y de la radiación incidente.

Los datos introducidos para la simulación tienen en cuenta la geometría elegida de la poza, en lo que respecta a los espesores de las capa convectiva inferior, zona de gradiente y capa convectiva superior. Además el programa necesita la extracción de calor y las propiedades térmicas del agua y del suelo.

Se realizaron cálculos para diversos valores de extracción de calor y espesores de la zona de gradiente, dando por resultado la temperatura media de la capa convectiva inferior y la eficiencia térmica de la poza.



**Figura 1 - Esquema de cálculo**

El segundo componente es el evaporador por flash. Para el funcionamiento de éste componente solo se necesitan pequeñas diferencias de temperatura entre entrada y salida y bajas presiones. Las diferencias mencionadas dependen de la temperatura de entrada del agua caliente que se introduce en el evaporador y de la temperatura de saturación en el interior del recinto, determinada por la presión. La temperatura del fluido que ingresa al evaporador es la temperatura de la zona convectiva inferior de la poza o sea en definitiva, de la eficiencia térmica de la misma.

En lo que respecta al nivel de vacío necesario para el evaporador por flash, el mismo opera a presiones sub-atmosféricas, del orden de 24 a 30 kPa, para una temperatura de entrada del orden de los 70 °C.

El programa que simula el comportamiento del evaporador tiene en cuenta, para sus variables de entrada, la temperatura y el caudal del fluido que ingresa al mismo los que dependen del funcionamiento de la poza solar, y del nivel de vacío al cual opera el sistema en su conjunto. Como resultado de la ejecución del programa se obtiene el flujo másico, la temperatura del vapor producido y la velocidad a la cual ingresa a la turbina.

El último componente del sistema es la turbina. Para la simulación realizada se consideró una turbina de flujo radial saliente diseñada para trabajar bajo condiciones OTEC, de la que se dispone. Los resultados obtenidos muestran el comportamiento de la turbina para las nuevas condiciones de funcionamiento.

La simulación toma como variables de entrada la temperatura y la velocidad del vapor entregado por el evaporador a la turbina. Al ejecutarse el programa se realiza una serie de iteraciones teniendo en cuenta el balance másico de vapor en cada etapa de la misma. En la figura 2 se puede observar las etapas mencionadas. Al finalizar la ejecución del programa se obtiene como resultado la potencia bruta generada y la cantidad de vapor requerido para esa potencia entre otras variables.

## RESULTADOS OBTENIDOS

Los programas de simulación detallados anteriormente se corrieron independientemente, pero respetando los valores obtenidos en cada uno y utilizando éstos como variables de entrada en el módulo siguiente. En función de la potencia que se desea generar se analizaron cuáles eran las condiciones de velocidad, temperatura y flujo del vapor que ingresa a la turbina. Estas variables antes mencionadas deben ser entregadas por el evaporador, por lo que determinan el diseño del mismo.

En lo que respecta al evaporador propiamente dicho, la cantidad de vapor generada depende de la temperatura y el flujo másico del agua que ingresa y la presión de vacío dentro del recinto. La geometría juega también un rol importante en la producción de vapor, por ejemplo al aumentar la altura efectiva de los tubos, disminuye la cantidad de vapor producido y por lo tanto la eficiencia del evaporador.

Consideraciones análogas en lo que respecta a la geometría, pero ahora considerando la poza solar, debieron ser hechas para

entregar el caudal de agua al evaporador con las condiciones requeridas para su funcionamiento.

El programa que simula la poza solar se ejecutó para diferentes condiciones de extracción de calor de forma tal de conseguir la temperatura necesaria para el funcionamiento del evaporador. Esto determinó la eficiencia de la poza solar y el espesor de la zona de gradiente.

Los valores obtenidos de la ejecución del programa de la poza pueden verse en la tabla 1.

**Tabla 1: Resultados de la simulación de la poza solar**

<i>Temp. de extracción (°C)</i>	<i>Espesor de gradiente (m)</i>	<i>Extracción de calor (W/m<sup>2</sup>)</i>	<i>Caudal extraído (Kg/s)</i>	<i>Eficiencia (%)</i>
70	0.8	50	59.7	17
72	1	55	65	19
77	1	50	59.7	17

Con los valores de temperatura de extracción y caudal extraído, mostrados en la Tabla 1 se procedió a ejecutar el programa del evaporador por flash. La masa de vapor necesaria para hacer funcionar la turbina es el principal condicionante en la ejecución del programa para el evaporador. Recordemos que el funcionamiento del mismo depende de muchas variables, las cuales interaccionan entre sí de forma tal que una pequeña variación de por ejemplo la altura activa de los tubos hace que cambie drásticamente la eficiencia del equipo o la cantidad de vapor producido.

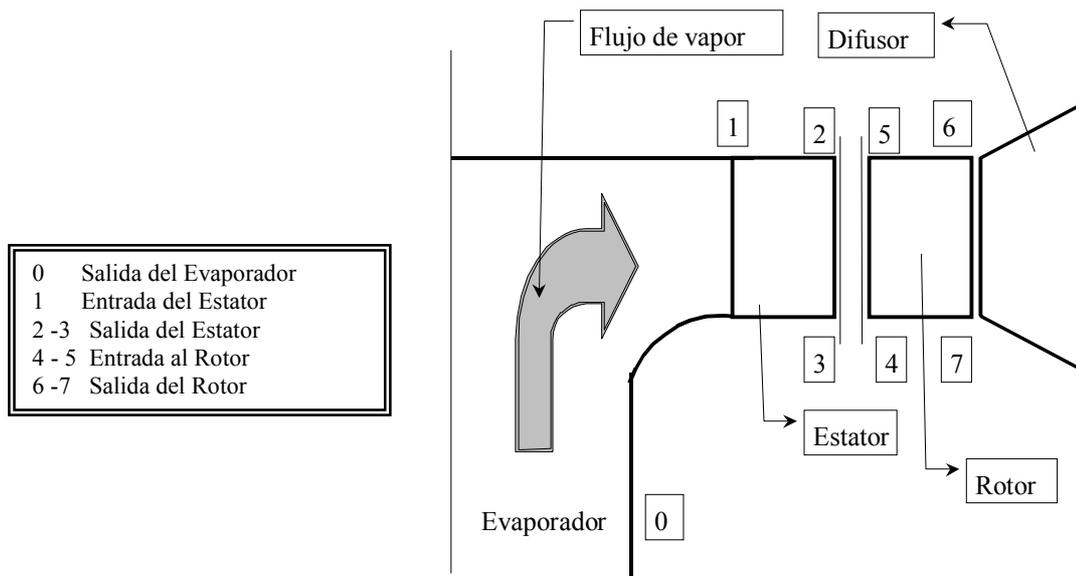
Se ajustaron las variables de forma tal que la eficiencia del evaporador fuera de alrededor del 90% y el flujo másico estuviera comprendido en los valores necesarios para el funcionamiento de la turbina. En la Tabla 2, se muestran algunos valores representativos del funcionamiento del evaporador.

**Tabla2: Valores obtenidos a partir de la simulación del evaporador por flash**

<i>T<sub>ent</sub> (°C)</i>	<i>T<sub>sat</sub> (°C)</i>	<i>m<sub>ent</sub> (Kg/s)</i>	<i>H (m)</i>	<i>Psat (Pa)</i>	<i>α</i>	<i>M<sub>vapor</sub> (Kg/s)</i>	<i>Eficiencia (%)</i>	<i>Velocidad (m/s)</i>
70.0	64.5	60	0.27	24500	0.5	0.6	98	30
70.0	65.0	60	0.27	25000	0.5	0.54	96	26.5
72.0	67.0	65	0.27	27000	0.5	0.63	99	29.0
72.0	66.0	65	0.30	27000	0.5	0.6	96	28.0
75.7	70	70	0.30	31218	0.43	0.7	97	28.2

Con los valores obtenidos a partir de la ejecución del programa para el evaporador, se procedió a correr el código que simula el funcionamiento de la turbina. Los datos de entrada para la turbina son la temperatura y velocidad del vapor producido. Durante la ejecución del programa, se realiza un balance de masa en cada tramo del esquema mostrado en la figura 2. Una vez que se cumple este balance de masa recién se inicia el cálculo en la sección siguiente. El programa tiene identificada cada sección con los mismos números mostrados en dicha figura. Uno de los archivos de salida de este programa muestra entre otros los valores de potencia bruta producida, masa de vapor requerida, caída de temperatura y entalpía a través de la turbina. En el otro archivo, se puede contar con toda la información necesaria en cada tramo dentro de la turbina e identificada con los números de las secciones antes mencionadas.

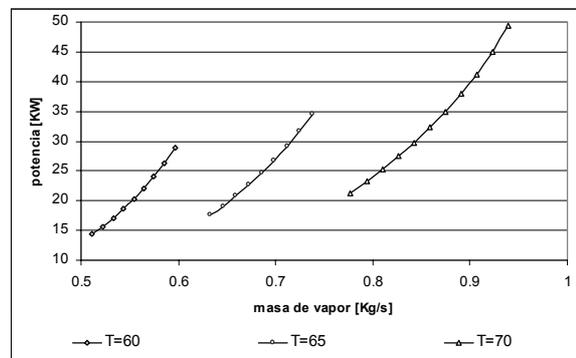
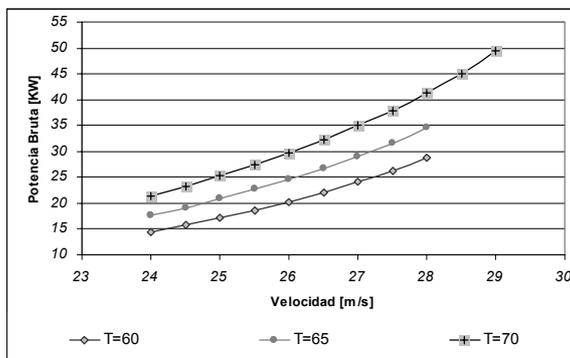
Los archivos de salida de la turbina fueron procesados con una planilla de cálculo con el objeto de poder graficarlos. En la figura 3 se muestran los valores de potencia bruta generada en función de la velocidad y parametrizada con respecto a la temperatura de entrada. En la figura 4 se puede apreciar como varía la potencia generada en función de la masa de vapor.



**Figura 2. - Etapas en la Turbina**

Es claro a partir de la figura 3, que la potencia producida depende muy estrechamente de la temperatura de saturación del vapor a la entrada de la turbina. Se observa en la misma figura que un aumento de la temperatura de entrada de 5 °C produce un aumento en la potencia del orden de 5 KW, para una misma velocidad de entrada del vapor. En la figura 4, el análisis a realizar debe tener en cuenta que para aumentar la masa de vapor debe tener no solo una mayor temperatura de entrada, sino también una mayor velocidad, por lo tanto al aumentar la masa de vapor aumenta la potencia generada.

Para estos valores de potencia generada, la eficiencia de funcionamiento de la turbina esta alrededor del 80 %. Con este valor de eficiencia el programa de la turbina predice que se genera una potencia comprendida entre 15 a 50 KW. Con este rango de potencia, se puede alimentar una pequeña población.



**Figura 3-Potencia generada en función de la velocidad    Figura 4-Potencia generada en función de la masa de vapor**

Los valores obtenidos a partir de la simulación realizada corresponden a la potencia bruta. Para obtener la potencia neta es necesario restar la potencia auxiliar consumida por el bombeo de la solución caliente del agua de refrigeración del condensador y el equipo de vacío.

**CONCLUSIONES**

A partir de lo realizado, podemos estimar el funcionamiento del sistema en su conjunto, permitiendo la optimización de cada componente. En lo que respecta al diseño de la poza solar, el mismo esta vinculado con los espesores de las zonas convectivas y de la zona de gradiente. A partir de los requerimientos de extracción de calor, desde la poza hacia el evaporador, se estimó la dimensión de la poza en el orden de 7000 m<sup>2</sup>.

En el caso del evaporador, el programa se ejecutó para las condiciones impuestas, con lo que se determinó los parámetros geométricos. En nuestro caso el evaporador resultante fue de 8 tubos internos de 0.03 m de diámetro. Los mismos están dispuestos en la base circular del evaporador.

En el esquema presentado en la figura 2, puede observarse que la turbina se encuentra por arriba del evaporador. Esta configuración determina que el sistema se construya alrededor del eje vertical de la misma. Por lo tanto como la turbina tiene un diámetro de 0.6 m , para el evaporador se fijó un diámetro de 0.4 m en su diseño el cual es un valor necesario para la cantidad de vapor requerido por el sistema.

Un aspecto a resaltar es que con estos programas de simulación se cuenta con una importante herramienta de diseño. El sistema completo debe incorporar un cuarto componente que son los condensadores, esto no fue hecho pues el principal objetivo del trabajo es el de cuantificar en alguna medida la potencia producida por la turbina. Recordemos que esta potencia dependerá no solo de la eficiencia de la turbina, sino también de la eficiencia de los otros componentes del sistema.

#### **ABSTRACT**

The present paper describes the development of an integral solar system for thermal electrical generation and water production at low temperature consisting of a solar pond, a flash evaporator, a turbine and a direct contact condenser.

Diferent simulation programs were used to obtain the power generated. The results obtained show that the efficiency of solar ponds, flash evaporator and turbine influence in a significative way the power generation of the global system.

#### **BIBLIOGRAFIA**

A. Bejan. (1995). Entropy Generation Minization. The Method of Thermodynamic Optimization of Finite Size Systems and Finite Time Processes. Hardcover.

J. G. Collier and J.R.Thome. (1996). Convective Boiling and Condensation. Third Edition. Oxford Science Publications.

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.

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'2000. Vol 4, N° 2, pp: 7.23-7.28. Resistencia, Argentina.

M.A. Ovejero, N. Salvo, 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'2000. Vol.4,N° 1, pp: 3.43-3.48. Resistencia, Argentina.