

ANÁLISIS Y SIMULACIÓN DE UN SISTEMA DE BOMBEO SOLAR DE AGUA DE BAJO COSTO: RESULTADOS PRELIMINARES

E.N. Diaz¹, V. Aramburu¹, A. Iriarte^{2,4} y L. Saravia^{3,4}
Facultad de Cs. Exactas y Naturales Universidad Nacional de Catamarca,
Avda. Belgrano 300 C.P. 4700, endi@c.exactas.unca.edu.ar

RESUMEN En este trabajo se analiza la teoría de funcionamiento de un sistema de bombeo solar de agua basado en el uso de un concentrador. Se distinguen tres etapas en el funcionamiento de la bomba y se analizan las ecuaciones que describen el mismo en cada una. Se propone asimismo un modelo computacional del fenómeno basado en el uso del programa Simusol y las ecuaciones discutidas. Finalmente se comparan los resultados del modelo con valores experimentales del tiempo necesario para llevar a cabo el bombeo.

PALABRAS CLAVE: energía solar, bombeo de agua, simulación.

INTRODUCCION

En un trabajo anterior (Diaz y otros, 2006) se describe un sistema sencillo de bombeo térmico de agua usando un concentrador solar. El sistema tiene una capacidad limitada debido al tamaño relativamente pequeño de la bomba en sí. Esto hace que la cantidad de agua bombeada por cada carga de la caldera sea bastante limitada. Es deseable un tamaño que permita el bombeo de la mayor cantidad posible de agua por cada ciclo de carga. Es necesario redimensionar el tamaño de la bomba a fin de optimizar el tiempo de operación, en función de la energía disponible en la caldera.

El análisis teórico y la simulación permiten reproducir los resultados experimentales en los diferentes ensayos realizados, y a partir de ello realizar los ajustes necesarios en las dimensiones de la bomba.

En este trabajo se realiza un análisis teórico del funcionamiento de un equipo de bombeo solar y una simulación numérica termomecánica mediante el programa Simusol, basada en un análisis previo. Luego se presentan resultados experimentales del funcionamiento y se comparan con las simulaciones llevadas a cabo.

MATERIALES Y METODOS

FUNDAMENTOS TEÓRICOS DEL FUNCIONAMIENTO DE LA BOMBA

En un ciclo de la bomba, la misma pasa por tres etapas bien diferenciadas, a saber:

- 1.- El calentamiento del agua colocada en la caldera del concentrador desde la temperatura ambiente hasta la temperatura en que comienza la ebullición del agua.
- 2.- El aumento de la presión en la caldera y en la cámara de la bomba producido por el vapor generado en la bomba. Este incremento empuja al agua contenida en la cámara de la bomba, la que comienza a ascender por la tubería vertical que llega a la altura de bombeo. A medida que el agua sube, la presión en la cámara se va incrementando.
- 3.- El agua que asciende por la cañería llega al punto superior y comienza a salir de la misma cayendo en el tanque de reserva que se va a llenar. A partir de este momento la altura del agua se mantiene constante, pero igualmente se necesita un incremento de presión para que el líquido siga saliendo a cierta velocidad.

A continuación se analiza cada una de estas etapas por separado.

EL CALENTAMIENTO DEL AGUA

El concentrador con su caldera ha sido objeto de estudio en relación con su uso como cocina comunal, en cuyo caso el vapor es generado a presión ambiente por lo que su temperatura es de 100 °C. Se ha medido la eficiencia con que la radiación incidente es aprovechada efectivamente en el calentamiento del agua, obteniendo valores en el orden del 45 % si el agua no sobrepasa los 100 °C. Con este dato es posible calcular el tiempo necesario para llevar la temperatura del agua desde los

¹ Becarios UNCa

² INENCO, FCA- UNCa

³ INENCO, UNSa

⁴ Investigador del CONICET

20 °C iniciales hasta la ebullición a 100 °C. Se plantea una ecuación en la que la radiación solar absorbida por la caldera se iguale con el calor necesario para calentar el agua. En la misma no se incluye una pérdida hacia el ambiente ya que la misma ha sido tenida en cuenta en el cálculo de la eficiencia. Por tanto:

$$I \cdot A \cdot E_f \cdot t = C_p \cdot M \cdot (T_f - T_i) \quad [1]$$

donde I es la radiación solar incidente por metro cuadrado, A el área del colector, E_f la eficiencia del mismo, t el tiempo de calentamiento del agua, C_p el calor específico del agua, M su masa, T_f la temperatura final y T_i la inicial. Los valores de estas variables para el caso de la bomba son:

$I = 1000 \text{ W/m}^2$; $A = 2 \text{ m}^2$; $E_f = 45 \%$; $C_p = 4186 \text{ J/kg } ^\circ\text{C}$; $M = 2 \text{ kg}$; $T_f = 100 \text{ } ^\circ\text{C}$; $T_i = 20 \text{ } ^\circ\text{C}$

Reemplazando en la ecuación [1] se obtiene $t = 12,4 \text{ minutos}$.

ASCENSO DEL AGUA POR LA TUBERÍA VERTICAL

En la figura 1 se presenta un esquema de la bomba, mostrando la caldera, la conexión con la cámara de la bomba, en adelante “la cámara”, el agua contenida en la cámara para su bombeo y la cañería vertical por la cual se eleva el agua, en adelante “la cañería”. También se indican las posiciones de las temperaturas de relevancia en relación con el funcionamiento de la bomba. Los fenómenos físicos que ocurren en la etapa de ascenso del agua son:

- 1.- La radiación incidente en la superficie de la caldera calienta a la misma y a través de esta al agua comenzando la ebullición de la misma.
- 2.- El vapor pasa a la cámara comenzando a presionar sobre el pistón y el agua de la cámara.
- 3.- Bajo esta presión, el agua de la cámara comienza a elevarse por la tubería vertical a una cierta velocidad.

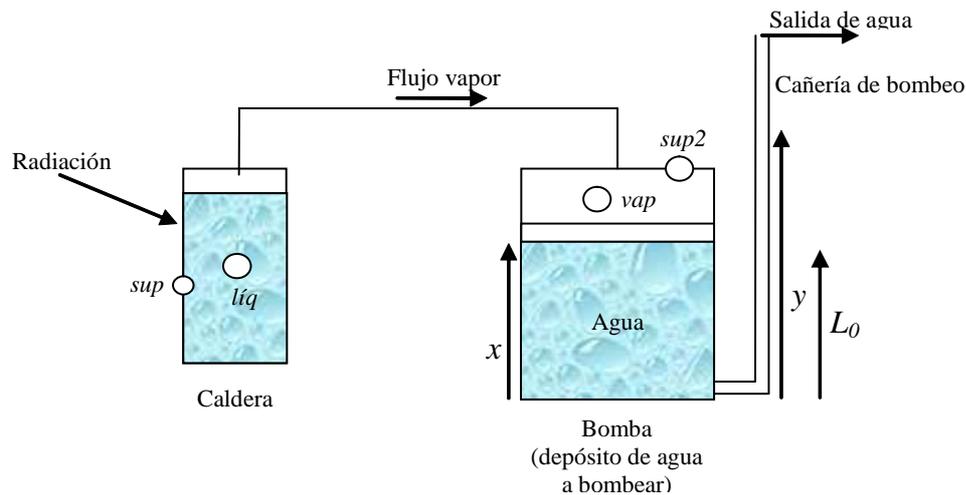


Figura 1. Esquema general de la caldera y la bomba a pistón

Se supuso que al comienzo del bombeo, el aire de la parte superior de la cámara era venteadado mediante la inyección de vapor y reemplazado por vapor de agua. Esto es posible ya que la presión del vapor que llega es superior a la presión atmosférica.

Este fenómeno se modela considerando que ocurren de manera acoplada dos procesos, uno térmico en el que interviene la radiación incidente, y otro mecánico de movimiento de agua, determinado por la presión del vapor que empuja al agua líquida en la cámara. A continuación se explica como será modelizado cada uno de ellos. Cabe indicar que los dos deberán ser simulados en forma conjunta ya que interactúan entre ellos.

Se supuso que el vapor en la cámara se encontraba saturado, y la relación entre su presión y temperatura se determinó a través de la conocida ecuación de Antoine:

$$P(T) = 161,75 \cdot e^{18,478 - 2046,976 / (T + 234,74)} + 3,74 \quad [2]$$

Esta ecuación tiene una precisión suficiente para los cálculos a realizar en este trabajo. La temperatura T está expresada en grados centígrados. La hipótesis de vapor saturado implica que la presión se calculará directamente a partir de la temperatura con esta fórmula.

En este esquema, las cuatro incógnitas bases a determinar son las temperaturas en: i) la superficie del cuerpo de la caldera ii) el líquido contenido por la caldera iii) el vapor contenido en la cámara de la bomba por encima del pistón y iv) la superficie del cuerpo de la cámara. Ellas están indicadas en la figura 1 como “sup”, “liq”, “vap” y “sup2”, respectivamente y en el

trabajo serán reconocidas con las mismas abreviaturas. Las experiencias realizadas mostraron que la temperatura del agua bombeada prácticamente no tiene cambios por lo que se supuso conocida y constante dicha temperatura. También se supuso conocida y constante la temperatura ambiente, T_a . Para cada uno de los elementos con las temperaturas incógnitas, que tienen masas determinadas, se planteó un balance de conservación de energía:

$$C_p \cdot M \cdot \frac{dT}{dt} = \text{flujos entrantes} - \text{flujos salientes} \quad [3]$$

donde C_p y M son el calor específico y masa del material involucrado y T corresponde a cada una de las temperaturas incógnitas. En las dos paredes el material es hierro, en el líquido y en el vapor es agua.

Existen flujos del tipo convectivo y se explican en detalle al describir la simulación a realizar, por ejemplo la pérdida de calor de la superficie de la caldera al ambiente, Q_{sa} .

Un caso especial es el correspondiente al proceso de ebullición del líquido de la caldera que conlleva un transporte de energía entre el líquido y el vapor al que se llama Q_{lv} . Este proceso es más complejo ya que las burbujas de vapor son producidas en el seno del líquido sobre la superficie metálica que recibe la radiación. Para cuantificar este flujo se utilizó la siguiente expresión (Incropera y De Witt, 2004):

$$Q_{lv} = \frac{P_{lv} \cdot A_1}{(T_{sup} - T_{vap})^3} \quad [4]$$

Donde P_{lv} es una constante, A_1 es el área de intercambio líquido-vapor, T_{sup} es la temperatura de la superficie y T_{liq} la del líquido. El proceso de ebullición es un transporte energético fuerte (eso se refleja en los coeficientes de transferencia de calor). El flujo de masa de vapor producido, se obtiene del cociente entre el calor Q_{lv} y el calor de cambio de fase líquido-vapor (Q_f) para el cual se tomó un valor promedio dado por

$$Q_f = 2,2MJ / kg \quad [5]$$

La condensación del vapor que se produce en la superficie de la cámara calentando a la misma, se representó como un flujo térmico convectivo convencional Q_{sa} con una constante convectiva H_{vs} (Incropera y DeWitt, 2004).

La temperatura del vapor se determinará a través del balance entre el flujo de la ebullición, Q_{lv} , y el flujo de condensación, Q_{sa} , en el proceso de la simulación. Los valores a adoptar para las constantes P_{lv} y H_{sa} serán críticos en el proceso y deberán ajustarse para representar adecuadamente el fenómeno físico.

De forma simultánea a la transferencia térmica, ocurre el movimiento del agua de la cámara. Se indicará con una “ x ” la posición del nivel de agua de la cámara respecto al fondo de la misma. El descenso del nivel de agua provoca un ascenso del agua en la tubería, la posición de la columna se indica con una distancia “ y ” medida respecto a la posición inicial.. Si A_c es la sección de la cámara y A_t la del tubo de ascenso, deberá cumplirse:

$$A_c \cdot (L_0 - x) = A_t \cdot (y - L_0) \quad [6]$$

Derivando la expresión [6] y llamando V_x a la velocidad del agua en la cámara y V_y , a la velocidad en la tubería, se obtiene:

$$- A_c \cdot V_x = A_t \cdot V_y \quad [7]$$

Dado que el área A_t es mucho menor que A_c , la velocidad de ascenso V_y será bastante mayor que la de descenso V_x . Cabe apreciar que los ejes x e y apuntan hacia arriba por lo que “ x ” disminuye cuando “ y ” aumenta. Este movimiento es un proceso de dinámica de fluidos, descrito en muchos libros de la especialidad, que corresponde a la salida de agua por un orificio de un tanque lleno de agua (Mott, 1996). Aplicando el teorema de Bernoulli entre el agua en la superficie de la cámara y el agua en la superficie de la cañería vertical. La expresión que se obtuvo es:

$$\frac{P}{\rho \cdot g} + \frac{V_x^2}{2 \cdot g} + x = \frac{P_0}{\rho \cdot g} + \frac{V_y^2}{2 \cdot g} + y + C \cdot \frac{V_y^2}{2 \cdot g} \quad [8]$$

Se supuso que el agua en la superficie de la cámara está sometida a la presión P del vapor y el agua en la superficie de la cañería está sometida a la presión atmosférica P_0 . Las alturas se miden respecto a la base de la cámara de la bomba, razón por la cual la altura de la superficie del agua será x . El término multiplicado por C es la pérdida viscosa por el roce del agua ascendente con el tubo. La altura de la superficie del agua en la cañería será " $L_0 - y$ ". La variable V_x se puede sustituir por V_y usando la expresión [7] y luego se despeja la velocidad V_y que constituye el propósito final de determinar como sube el agua por la cañería. Esto es:

$$V_y = \sqrt{\frac{2g \left\{ \frac{P - P_0}{\rho \cdot g} + (x - y) \right\}}{1 + C - \left(\frac{A_t}{A_c} \right)^2}} \quad [9]$$

Integrando V_x y V_y se obtienen " x " e " y " como función del tiempo.

Las ecuaciones térmicas y mecánicas interactúan ya que la presión P que actúa en el sistema mecánico se obtiene a partir de la temperatura del vapor. Por otro lado, al cambiar " x " cambia el volumen que ocupa el vapor generado.

BOMBEO DEL AGUA

Cuando el agua ha llegado al tope de la cañería se inicia el bombeo efectivo. Las ecuaciones son las mismas de la etapa anterior con la salvedad de que la distancia " y " pasará a ser constante.

MODELO COMPUTACIONAL PROGRAMADO CON EL SIMUSOL

Las simulaciones que se realizaron, tuvieron como finalidad obtener el tiempo para el cual se alcanzaba el valor de " y " máximo y a partir de ese momento evaluaba el flujo de agua que pasa con la velocidad V_y .

El programa Simusol se ha preparado para simular sistemas térmicos mediante una red en la que los nodos representan las temperaturas de interés y las ramas del circuito, las distintas transferencias térmicas. El esquema físico mostrado en la figura 1 se representa gráficamente, tal cual se ve en la figura 2, mediante el programa Día que se ha agregado al Simusol. Los nodos amarillos representan a las temperaturas. Cuatro de ellas, " sup ", " liq ", " vap " y " $sup2$ " representan las temperaturas a calcular. Las otras dos temperaturas, " amb " y " ag ", representan la temperatura ambiente y la del agua de la cámara, respectivamente, que se suponen constantes.

A continuación se describe el circuito térmico. En la figura 2, el nodo " sup " está en la superficie de la caldera donde se recibe la radiación y se pierde calor al ambiente a través de la resistencia convectiva " sa ". Un nodo " liq " está en el agua de la caldera. El calor producido por la radiación se transmite al agua de la caldera a través de una resistencia " sl ". La caldera tiene una masa de hierro y el líquido una masa de 2 kg de agua a evaporar.

El agua se evapora y un flujo, de nombre " lv ", pasa por una manguera al cuerpo de la bomba donde está el agua representada por un nodo " ag ". El vapor que está en la caldera, la manguera y el depósito se representa con un nodo " vap ". En la manguera se condensa algo de vapor, que se representa por un flujo " vd " que se pierde a tierra. Una masa " vap " representa la masa de vapor, cuyo valor es pequeño.

El vapor condensa sobre la superficie " $sup2$ " que pierde hacia el ambiente, resistencia " $sa2$ ", y hacia el agua fría del depósito " ag " a través de la resistencia " ag ". La superficie " $sup2$ " tiene una masa de hierro " $sup2$ ".

El concentrador cilindro parabólico de 2 m² recibe 2 kW y por las pérdidas ópticas llega a la superficie 1000 W representados por el flujo " rad ". Parte de esta energía se pierde al ambiente a través de la resistencia " sa ". El líquido se evapora con la energía entrante creando el flujo " lv ". La ecuación de esa evaporación es la [4] ya explicada en la sección anterior.

El flujo evaporado condensa en la superficie " $sup2$ " a través de la resistencia " vs ". Esta condensación está regida por una resistencia lineal con un valor del coeficiente convectivo igual a 500 W/m²°C.

La posición del pistón en el depósito esta dada por “x” medido desde el fondo de la cámara. Valdrá 0 cuando la cámara se vacíe. La posición del agua en el caño está dada por “y”, que no debe ser superior a la altura de la cañería.

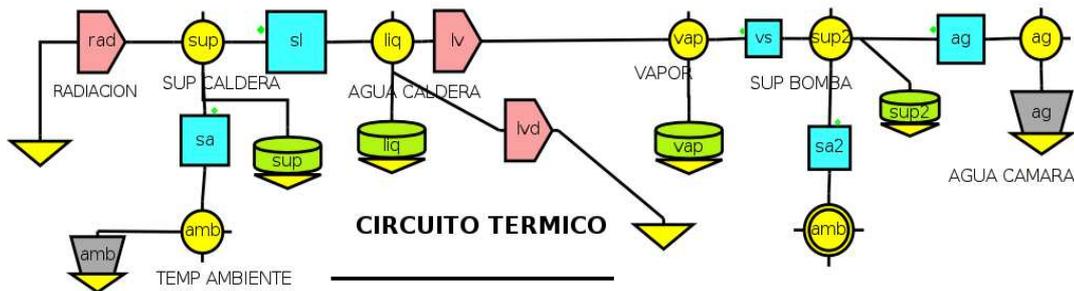
La presión “pvap” del vapor empuja el agua para que suba por el caño. El fenómeno se estudia con la ecuación de Bernoulli entre un punto en la superficie superior del agua contenida en la cámara y un punto de la superficie del agua contenida en la cañería. Esto se hizo en una sección anterior obteniéndose la ecuación [8]. En ella se despeja la velocidad “Vy” de subida del agua. Integrándola en el tiempo se logra la evolución de la altura “y”. Cuando el valor de “y” llega a la altura de la cañería comienza el proceso real de bombeo. El programa pasa a fijar el valor de “y”. La velocidad “Vy” se utiliza para determinar la cantidad de agua que se está bombeando. El cálculo termina cuando “x” llega a cero agotándose el agua de la cámara.

ANALISIS Y DISCUSION DE LOS RESULTADOS

En la Tabla 1 se muestran los valores obtenidos mediante la experimentación y la simulación con distintas alturas de bombeo. Se observa una buena aproximación en el tiempo de iniciación y un tiempo más corto en el período de bombeo aunque se coincide en el hecho de que los valores son similares para todas las alturas. Se espera que la coincidencia mejore una vez que se realicen medidas más detalladas que permitan un mejor ajuste.

<i>Experimentales</i>			<i>Simulación</i>	
Altura [m]	Tiempo empleado para comenzar bombeo [minutos]	Tiempo de bombeo [minutos]	Tiempo empleado para comenzar bombeo [minutos]	Tiempo de bombeo [minutos]
3	18	22	22	10
5	25	20	26	10
7	30	19	31	10
10	33	18	35	10

Tabla 1. Valores de los tiempos de bombeo, medidos y simulados, para distintas alturas de la cañería.



datos	tiempo	funciones	
JRAD=1000 JLV= 0.9*ppp Jlvd=0.1*ppp RSL=V1,Parea,70 RSA=V1,Parea,17 CSUP=C1,450,3 Csup2=C1,450,6 Cliq,C1,4186,Pmc EAMB = 19.5 Cvap=C1,4186,0.2 Rvs=V1,Par2,2000 Rsa2=V1,Par2,12 rag=v1,0.06,20 eag=19.5	3000 seg	Qpsat(TT)=(161.767*exp(18.4779-(4026.9759/(TT+234.7384)))+3.7383)	
RESULTADOS		iniciales	parametros
TEMP SUP, TEMP LIQ TEMP VAP temp sup2 Pmc(pmc,masa,kg) Px(x,altura,100 cm) Py1(y/10,altura,100 cm) Pvap (pvap,presion,pascal)		VCSUP =170 VCsup2=99 VClmq=99 Pmc=2.0 Pmco=0 VCVAP =99 Px=0.39 Py=0.41	PLV=0.008 Parea = 0.0934 Pp0= Qpsat(98.8) Pvap= Qpsat(temp liq) Ps=5.0-Py Ps1=Design(1,Ps) DPx=-PB/PA*Pv2 DPy=Pv2*(1+Ps1)/2 Py1=Py/10. DPmc=-JLV/2200000 Par2=0.26 DPmco=flujo Rvs/2200000 PPP =PLV* (temp sup -temp vap)**3*Parea
controles	parametros		
integration routine=implicit minimum step size = 1E-25 terminate if (Px.lt.0)	PA=3.1416*0.18**2 PB=3.1416*0.0125**2 Pro=1000 Pg=9.81 Pc=60 Pv2=sqrt(2*Pg/(1+2*pg*Pc)* (Px-Py+(Pvap-Pp0)/Pro/Pg))		

Figura 2. Circuito térmico usado por el programa SIMUSOL incluyendo los cuadros con los datos de cada elemento.

A continuación las figuras 3, 4, 5 y 6 muestran los resultados más importantes de una corrida de simulación de una bomba solar con capacidad para elevar el agua en 5 metros. La gráfica de la figura 3 muestra el movimiento del agua en la cámara de la bomba durante un ciclo de trabajo. La curva verde da la variación de la distancia “y”, que indica la posición del nivel de agua dentro de la cañería vertical, como función del tiempo. Se observa que partiendo desde la altura de la bomba el agua sube hasta los 5 metros en un tiempo de 12,5 minutos. Al llegar al borde superior de la cañería, a 5 metros sobre el nivel de la bomba, la curva se vuelve horizontal, indicando que el agua no sube más. A partir de ese punto comienza el bombeo efectivo.

En la misma figura, la curva roja muestra como baja el nivel de agua en la cámara. Mientras el agua sube en la cañería el descenso del agua en la cámara es muy lento, pero una vez que el agua llega arriba, el nivel en la cámara baja con mayor rapidez y luego de 10,8 minutos (contados desde que el agua llega arriba), se vacía el contenido de la bomba en el tanque elevado. Teniendo en cuenta el tiempo inicial de calentamiento del agua en la caldera, la bomba ha cumplido un ciclo en 35,8 minutos. Los resultados para distintas alturas muestran que el tiempo de bombeo en la simulación es bastante más corto que el medido. Esto indica que probablemente esté llegando demasiado vapor a la cámara haciéndose necesario ajustar la fórmula utilizada para el proceso de evaporación.

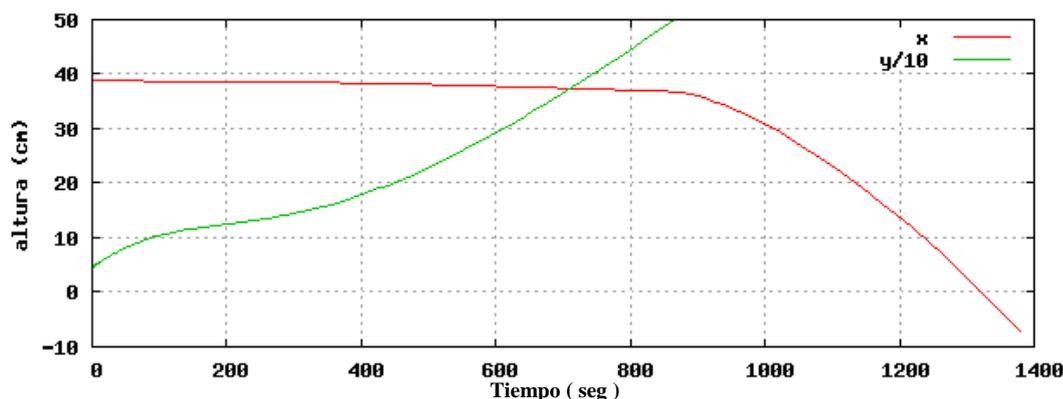


Fig. 3.- Valores de la posición “x” del pistón (en rojo), y de la posición “y” que da la altura de agua en la cañería (en verde)

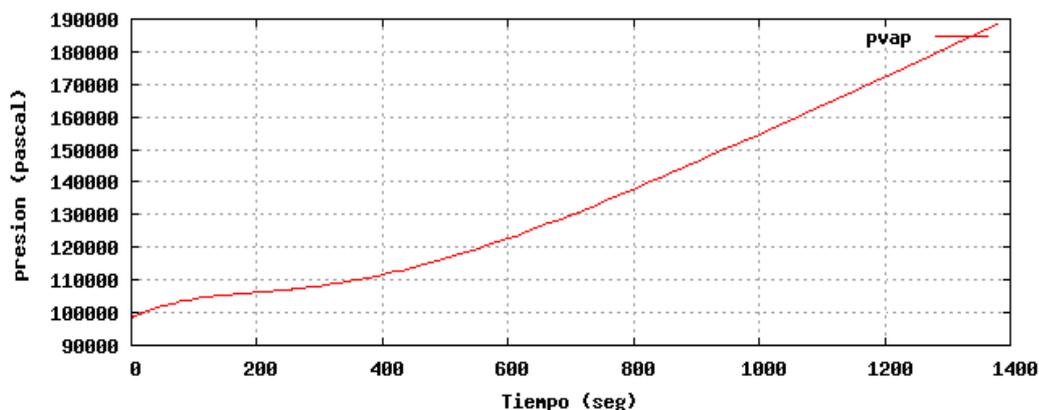


Fig. 4.- Valores de la presión de vapor en la cámara (abajo, en rojo) como función del tiempo.

El gráfico de la figura 4 muestra la variación de la presión en la cámara. Ella varía desde el valor inicial de presión atmosférica hasta un máximo del orden de 1.6 kg/cm². Esto indica que la producción de vapor en la caldera es aún superior al condensado en las paredes por lo que el vapor se sigue acumulando, aumentando así la presión. Las medidas de presión realizadas en algunas de las experiencias dan valores en el orden de 1.5 kg/cm², por lo que los valores de la simulación son compatibles con los valores medidos.

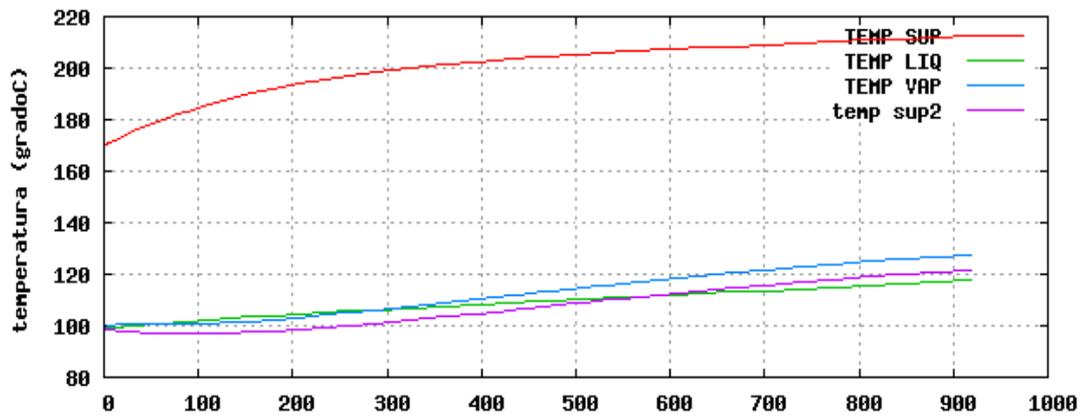


Fig.5.- Valores de distintas temperaturas como función del tiempo.

El gráfico de la figura 5 muestra diversas temperaturas en el equipo. La temperatura T_{sup} en la superficie de la caldera cambia de 170 °C a 220 °C a lo largo del proceso. Esto es algo mayor que los valores medidos que se encuentran alrededor de los 170 °C. La temperatura del vapor es casi la misma que la temperatura de la superficie de la cámara, mientras que la temperatura del líquido es algo menor. Las tres se encuentran en valores cercanos entre sí, como es de esperar.

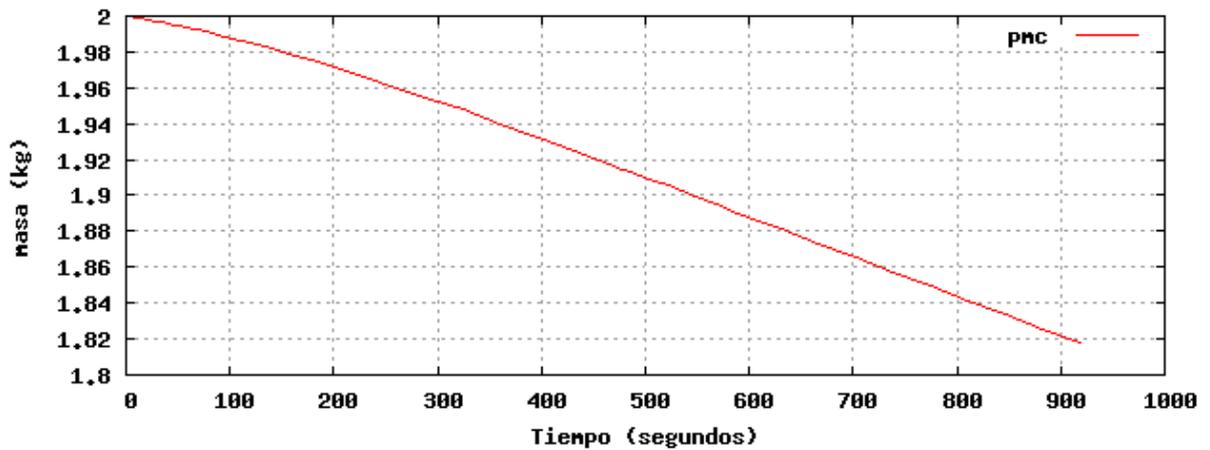


Fig.6.- Valores de la masa de agua en la caldera como función del tiempo

El gráfico de la figura 6 muestra la disminución de la masa del agua de la caldera a medida que la misma se va evaporando consumiéndose unos 0,35 kg sin contar la etapa inicial de calentamiento del agua.

CONCLUSIONES

A partir de los resultados obtenidos, se concluye que el modelo termomecánico de simulación basado en el programa Simusol es un buen punto de partida para usarlo como un apoyo en el proceso de optimización de la bomba de agua solar. Será necesario profundizar en el ajuste del modelo tratando que las ecuaciones relacionadas con la vaporización del agua en la caldera permitan obtener un mejor ajuste de los tiempos de bombeo. Este ejemplo de un sistema en el que interactúan elementos térmicos y mecánicos es una indicación de que con el Simusol se puede encarar el estudio de sistemas de cierta complejidad.

Se espera que con esta herramienta se facilite el proceso de optimización logrando dimensionar a la bomba para que maneje el mayor volumen de agua posible para una energía dada por el concentrador que se utiliza. La bomba en su estado actual no es de funcionamiento continuo debiéndose recargar de agua en cada ciclo. Se analizará la posibilidad de automatizar su uso para lograr un funcionamiento continuo.

Los resultados obtenidos muestran que la bomba es capaz de bombear agua en el orden de los 100 litros por hora y su productividad depende poco de la altura por lo menos hasta 10 metros.

Este uso del concentrador refuerza el concepto de que un concentrador de bajo costo como el usado aquí puede ser visto como un equipo multiuso para resolver varios problemas energéticos que se presentan en una vivienda o centro comunitario.

REFERENCIAS

- Diaz, N., Aramburu, V., Iriarte, A. y Saravia, L. (2006) "Sistema de Bombeo Térmico de Agua Utilizando un Concentrador Solar" ,Revista AVERMA Vol. 10 - ISSN 0329-5184.
- Mott, R.,(1996), "Mecánica de fluidos aplicada", Ed. Prentice Hall, 4ta. Edición, México
- Wark-Kenneth, Jr (1991) "Termodinámica". Ed. McGraw-Hill, 5^{ta} Edició., México.
- Zemansky, M. W.(1961), "Calor y Termodinámica", Ed. Aguilar, 1era edición, España

ANALYSIS AND SIMULATION OF A LOW COST SOLAR WATER PUMP: PRELIMINARY RESULTS

ABSTRACT

In this work an analysis of the solar water pump using a low cost concentrator, presented last year in the ASADES meeting, is performed. The pumping works in three stages: boiler heating, water elevation up to the water reservoir and water pumping. The basic physical aspects are presented and discussed. A simulation solar system is prepared using the program Simusol. The obtained results are compared with experimental values showing a reasonable coincidence. The model will be improved in the near future using more detailed experimental results.

KEY WORDS: solar energy, water pumping, simulation.