

# Transferencia de calor en un concentrador solar



**Pamela Villamil Sapién, Gerardo Ruiz Chavarría**

*Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México,  
Ciudad Universitaria 3000, circuito exterior, CP 04510, México D. F.*

**E-mail:** villamilsapien2@gmail.com

(Recibido el 16 de Enero de 2010; aceptado el 22 de Octubre de 2010)

## Resumen

La enseñanza de temas asociados a la energía solar ha adquirido relevancia en los últimos años a raíz del futuro agotamiento de combustibles fósiles y al problema del calentamiento global. En este trabajo se presenta un prototipo de concentrador solar construido con aluminio súper pulido y basado en la óptica de no enfoque. Entre las posibles aplicaciones se encuentran la construcción de estufas solares y de generadores en refrigeradores de absorción de amoníaco en agua. Se estudian, tanto teórica como experimentalmente, los procesos de transferencia de calor que ocurren. En ausencia de fuentes de energía, los procesos de transferencia de calor modelan con la ley de enfriamiento de Newton. Sin embargo, cuando el sol aporta energía, el sistema se describe con un modelo más complicado. Para poder conocer la evolución de este sistema se miden dos variables termodinámicas (presión y temperatura).

**Palabras clave:** Transferencia de calor, energía solar, termodinámica.

## Abstract

The solar energy as a subject in the teaching of physics has a increasing interest due to the depletion of fossil fuels and to the problem of global warming. In this work paper we show a prototype of a solar concentrator built with a super polished aluminium sheet and based in non focusing optics. Among the possible application are the construction of solar oven and a generator in an ammonia-water absorption refrigerators. A both theoretical and experimental study are performed for the heat transfer process in that system. If no source of energy is present evolution of the heat transfer follow the Newton's cooling law. However, when the solar power is taken into account the system is described by another model a little more complicated. In order to follow the evolution of the prototype two thermodynamics quantities are measured temperature and pressure.

**Keywords:** Heat Transfer, solar energy solar, thermodynamic.

**PACS:** 87.50.wp, 88.05.Gh, 68.03.Fg.

**ISSN 1870-9095**

## I. INTRODUCCIÓN

Se conoce como radiación, al proceso físico por el cual se transmite energía en forma de ondas electromagnéticas que viajan a la velocidad de la luz y no requieren ningún medio para propagarse.

La luz es una forma de energía radiante que nuestros sentidos pueden percibir directamente. Otras formas de energía son la infrarroja o la ultravioleta; sin embargo, hay diversas manifestaciones de la radiación dependiendo de la longitud de onda de ésta.

La principal fuente de energía para nuestro planeta es el Sol. En la vecindad de la Tierra, llega proveniente de nuestra estrella, una cantidad de energía por unidad de tiempo y unidad de superficie igual a  $1366 \text{ watts/m}^2$ . En su conjunto, la Tierra recibe continuamente una potencia de  $1.74 \times 10^{17} \text{ watts}$  [1].

De la energía que llega a las inmediaciones de nuestro planeta, el 30% de esta energía es reflejada y devuelta al espacio antes de que pueda ser utilizada. Las nubes son, en su mayoría, las responsables de este proceso pues son

blancas y cubren grandes espacios horizontales. La radiación solar que llega al suelo lo hace en dos formas: directamente del Sol o difusa, *i. e.* llega desde cualquier dirección después de haber sufrido múltiples desviaciones.

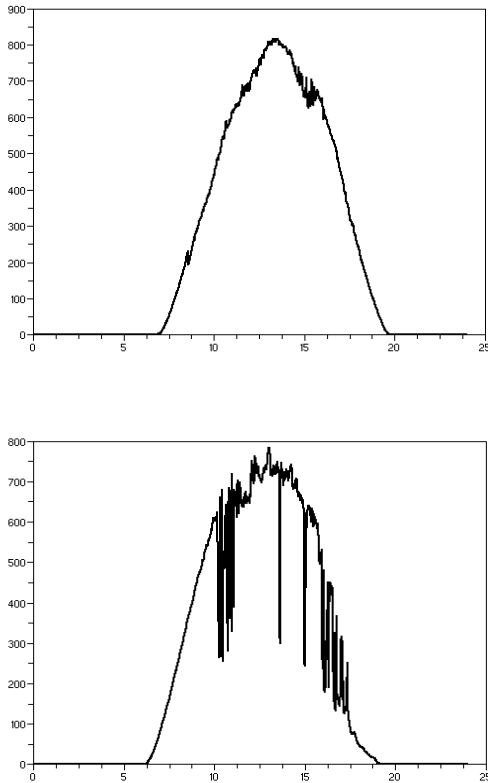
En latitudes altas o en días nublados, la radiación difusa supera a la directa mientras lo contrario ocurre en latitudes bajas o en días soleados.

En la ciudad de México, la potencia por unidad de área que llega a la superficie depende del día del año y de la hora, teniendo valores máximos de aproximadamente  $800 \text{ W/m}^2$  [2]. En la figura 1, se muestran las gráficas de la irradiancia en dos días, uno soleado y el otro nublado que corresponden al mes de abril del 2007.

Para expresar la potencia solar (y en general de cualquier radiación), se utiliza el término irradiancia, la cual es la rapidez de incidencia de energía radiante sobre una superficie.

El flujo de energía sobre una superficie determinada depende no solo de la irradiancia que exista, sino también, en la orientación y geometría que tenga la superficie en cuestión respecto a la dirección de propagación de un haz de

radiación. La irradiancia será máxima cuando el plano este en posición normal a la dirección de propagación de la radiación y mínima si es paralelo. Por lo tanto, la irradiancia sobre una superficie dependerá del ángulo de incidencia que tenga la superficie con respecto a la dirección de propagación de la radiación.



**FIGURA 1.** a) Curva de radiación solar ( $\text{watts/m}^2$ ) de un día soleado en la ciudad de México. b) Curva de radiación ( $\text{watts/m}^2$ ) para un día nublado en la ciudad de México. Los datos fueron tomados en el Taller de Meteorología de la Facultad de Ciencias. Se grafica irradiancia en función de la hora.

Los dispositivos que aumentan el valor de la irradiancia se llaman concentradores. Su principio de funcionamiento es desviar la luz de una superficie de manera que esta llegue a otra superficie con un área más pequeña [3].

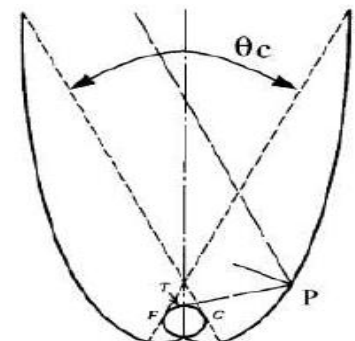
Por lo general, un colector solar se usa para transformar la energía radiante en calor. La transferencia de energía se hace desde una fuente radiante (Sol) hacia un fluido (agua o aire) que circula por los ductos del colector. El flujo de energía radiante que finalmente es interceptada por el colector, proviene básicamente del rango visible del espectro solar (longitudes de onda de 400 a 700nm) y es por naturaleza variable con el tiempo. Actualmente, existen diversos colectores solares diseñados para la captación de energía; las diferencias radican en los materiales utilizados para su construcción y en la geometría, pero todos ellos operan bajo el mismo principio.

Con la óptica convencional de enfoque, esto se logra mediante el uso de lentes o espejos parabólicos, sin embargo, en estas circunstancias se requiere de ajustes continuos para dar seguimiento al Sol. Esto se puede entender, si se tiene en cuenta, que un paraboloide es una

superficie en la que todos los rayos que llegan paralelos al eje de simetría se reflejan y pasan por el foco.

Para evitar el uso de seguidores solares, se han diseñado espejos en donde los rayos que inciden entre 0 y un valor máximo (ángulo de aceptación) se reflejan y llegan finalmente a una superficie. El caso que nosotros presentamos, es uno en donde tal superficie es un cilindro (tubo) que aumenta las posibilidades de que los rayos lleguen al receptor.

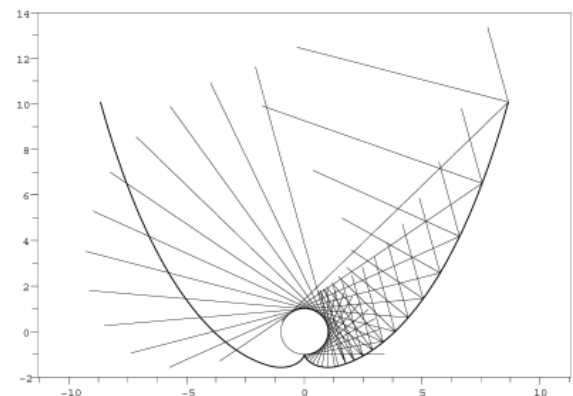
Se puede lograr un mejor desempeño utilizando la óptica de no enfoque, la cual procesa solo el flujo de radiación (figura 2), consiguiendo así, la concentración más alta posible sin conservar información acerca de su dirección original de los rayos incidentes y requiriendo un mínimo de seguimiento e incluso pueden permanecer fijos.



**FIGURA 2.** Rayos incidentes en un colector con óptica de no enfoque y receptor tubular.

## II. DESCRIPCIÓN DEL COLECTOR

Fabricado con lámina súper pulida (espejo) con un espesor de 0.016 pulgadas y una reflectancia mínima de 86%, los espejos están moldeados en parte como una involuta. Ésta última es una curva que tiene la característica de que todos los rayos que inciden sobre ella con un ángulo de incidencia igual al ángulo de aceptación, al reflejarse, pasan tangentes al círculo dibujado en la figura 3. Mientras que, si el ángulo de incidencia es menor al ángulo de aceptación, el rayo al reflejarse va a incidir sobre el círculo [4].



**FIGURA 3.** Trazado de rayos con un ángulo de incidencia.

El tubo tiene una longitud de 1.52cm y un diámetro de 25.4 mm, pintado en negro mate para que absorba la mayor cantidad posible de ésta energía que será utilizada en procesos posteriores. La principal función de éste, es absorber la radiación incidente y transferirla con mínimas pérdidas a un fluido de trabajo (en nuestro caso agua). Todo el dispositivo se encuentra montado en un esqueleto de madera y cubierto con una placa de vidrio transparente para permitir la entrada de la luz.

Parte de las pérdidas de energía ocurren cuando el aire que está en contacto con el tubo se calienta, y a raíz de ello, disminuye su densidad. Por lo tanto, el aire tiende a subir, lo que genera una pérdida de calor. Para evitarla es que colocamos un vidrio en la parte superior de la estructura y evitar que existan pérdidas de energía por convección.

En la figura 4, se muestra una foto del colector.



**FIGURA 4.** Colector solar prototipo. Con este dispositivo se han alcanzado temperaturas de hasta 140 grados centígrados. El ángulo de aceptación es de 15°.

El colector es orientado sobre un eje este-oeste con una inclinación de 30° hacia el sur con respecto a la vertical; esto para que los rayos solares lleguen con una incidencia menor a 15 grados con respecto al eje del espejo. Por razones de diseño, el ángulo de aceptación en el colector es de 15°, ofreciendo así, operaciones del concentrador por periodos de tiempos extensos (3 meses) sin necesidad de ajustar su orientación antes de esto.

### III. MODELACIÓN CON LA TRANSFERENCIA DE CALOR

Si un cuerpo tiene una temperatura mayor a la del medio ambiente y se deja evolucionar libremente, éste se enfría hasta alcanzar la temperatura del medio.

En nuestro dispositivo, la radiación solar que incide sobre la cubierta transparente (vidrio) llega hasta la superficie del espejo, el cual refleja la radiación hacia el generador-absorbedor. La energía que logra entrar al generador, calienta el agua elevando su temperatura y presión. Si ya no hay una fuente de energía –por ejemplo, durante la noche- se va perdiendo el calor en el absorbedor,

*Transferencias de calor en un concentrador solar*  
 el agua se enfría, y por lo tanto, disminuye también la presión.

En general, todo intercambio de calor es la suma de tres procesos: convectivo, radiactivo y conductivo. Si los dos últimos fueran despreciables, entonces, la transferencia de calor se produce casi exclusivamente por el movimiento de aire alrededor del cuerpo.



**FIGURA 5.** Rayos que inciden sobre el colector.

En cualquier caso, la velocidad de transferencia de calor es proporcional a la diferencia de temperatura entre la superficie y el fluido. Este hecho se modela mediante la ley de enfriamiento de Newton.

$$\frac{dQ}{dt} = -k(T - T_0), \quad (1)$$

donde  $T$  es la temperatura instantánea del cuerpo,  $k$  una constante que define el ritmo de enfriamiento y  $T_0$  es la temperatura ambiente.

Si ahora, por algún método se suministra energía al cuerpo, un balance energético determina que:

$$\frac{dQ}{dt} = -k(T - T_0) + potencia. \quad (2)$$

Si consideramos que  $\frac{\Delta Q}{\Delta T} = C_p m = W$ , podemos reescribir la Ec. (2) como:

$$W \frac{d(T - T_0)}{dt} = -k(T - T_0) + potencia, \quad (3)$$

la cual tiene una solución de la forma:

$$T = T_0 + \frac{Pot}{k} \left( 1 - e^{-\frac{kt}{W}} \right). \quad (4)$$

Si al tiempo  $t_1$ , cuando al valor de  $T=T_1$  se interrumpe el suministro de energía, la Ec. (3) se transforma en:

$$W \frac{d(T - T_0)}{dt} + k(T - T_0) = 0. \quad (5)$$

Cuya solución es:

$$T = T_0 + (T_1 - T_0)e^{-\frac{k(t-t_1)}{W}} \quad (6)$$

Por todo lo anterior, si exponemos a un cuerpo a ciclos de calentamiento-enfriamiento con potencia de inyección constante conocida, al ajustar los datos experimentales al modelo teórico, es posible determinar el valor de  $k$  y  $W$ .

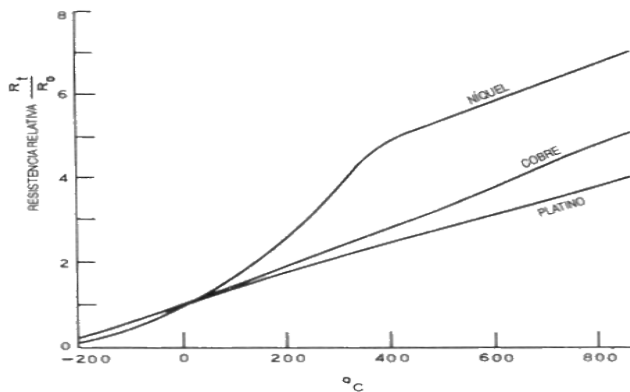
Conociendo estos parámetros, se puede cuantificar la potencia de la fuente de energía (solar en este caso) y la eficiencia del proceso de transferencia de calor con solo realizar ciclos de calentamiento y posteriores ajustes de los datos experimentales.

La aplicación de este método experimental simple a un sistema dinámico como el nuestro (colector solar), implica primero, poder asegurar el calentamiento y enfriamiento uniforme del mismo.

### III. DISPOSITIVO EXPERIMENTAL

Para mostrar experimentalmente los procesos de transferencia de calor, realizamos mediciones de dos variables termodinámicas (presión y temperatura) utilizando sensores (transductores piezoeléctricos y sondas de platino respectivamente).

Un transductor se puede definir como un instrumento que convierte una magnitud física (p. ej. temperatura, distancia y presión) en otra magnitud fácil de evaluar experimentalmente (en la mayoría de los casos, en una señal eléctrica).



**FIGURA 6.** Curvas de resistencia vs. temperatura para alambres de platino, cobre y níquel. La resistencia está normalizada al valor cuando  $T=0^{\circ}$ .

Los sensores de temperatura basados en una variación de una resistencia eléctrica son probablemente los más abundantes. Los metales empleados en estos sensores de temperatura (platino, níquel y cobre), no siempre tienen una respuesta lineal, excepto en el caso del platino. La principal ventaja de estos metales es que su sensibilidad es unas diez veces mayor que la de los termopares.

En la figura 6 se muestra como el platino presenta el mejor margen de linealidad pues tanto el cobre como el níquel no tienen esta cualidad entre los 100 y 300  $^{\circ}\text{C}$ .

Designada como PT-100, las sondas fabricadas con platino nos ofrecen linealidad en los rangos de temperatura que requerimos para nuestro colector.

En el PT-100, la relación entre la temperatura y la resistencia está dada por:

$$R_t = R_0(1 + \alpha T), \quad (7)$$

donde:

$R_0$  = resistencia en  $\Omega$  a  $0^{\circ}\text{C}$ ,

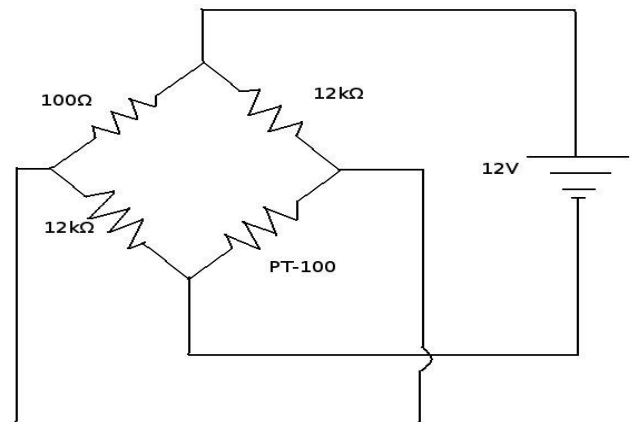
$R_t$  = resistencia en  $\Omega$  a  $t^{\circ}\text{C}$ ,

$T$  = temperatura actual

$\alpha = 0.003850\Omega^{-1}^{\circ}\text{C}^{-1}$ .

Las variaciones de resistencia en la sonda (PT-100) se convierten a variaciones de voltaje mediante un puente de Wheatstone (figura 7) para luego ser registradas con una tarjeta de adquisición de datos.

En los experimentos que hicimos, se utilizó una interfase de 14 bits con resolución de 1.22 mV.



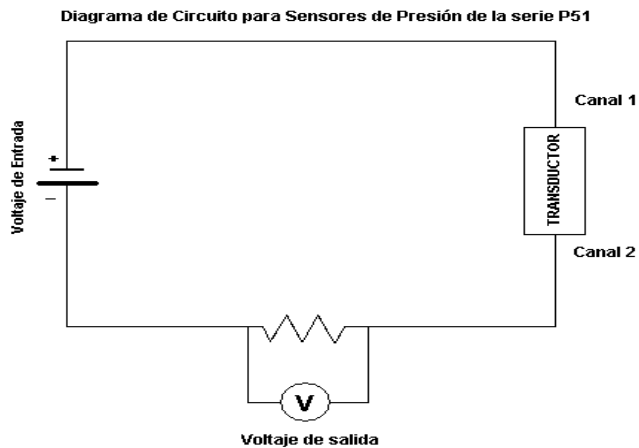
**FIGURA 7.** Puente de Wheatstone con una alimentación de 12 volts.

A cero grados, el puente está equilibrado, lo que significa que el voltaje de salida es de 0. Cuando cambia la temperatura, se produce el desbalance en el puente dando un voltaje que es proporcional a la temperatura.

El voltaje que se mide en el puente de Wheatstone es del orden de milivolts, por lo que es necesario amplificarlo (para tener valores del orden de volts); esto para registrar adecuadamente las variaciones de temperatura con la tarjeta de adquisición de datos.

Los captadores de presión están basados en el efecto piezoeléctrico. Éste consiste, en que, si a un material piezoeléctrico se le aplica una fuerza externa, se induce una diferencia de potencial entre sus caras [5]. Esta señal eléctrica depende de la fuerza aplicada.

El captador de presión que se utilizó fue MediaSensor P51 series MS de SSU Technologies, que contiene un material piezoeléctrico que da una salida de corriente entre 5 y 20 mA. Ésta última es necesaria convertirla a voltaje por lo que fue necesario incluir una resistencia de 100 $\Omega$ . El circuito utilizado es mostrado en la figura 8.



**FIGURA 8.** Diagrama de circuito para sensores de presión. Se ha usado una resistencia de  $100 \Omega$ , lo que da salidas de voltaje entre 0.5 y 2 V, que se envían directamente a la tarjeta de adquisición de datos.

Por cuestiones de comodidad de manejo, los transductores de presión y temperatura se alimentaron con un mismo voltaje (12 V) y sus circuitos asociados se colocaron en la misma caja, donde fueron evaluados independientemente.

Para registrar los datos, se utilizó una tarjeta de conversión analógico-digital (A/D) NI-6009 de Nacional Instruments con cuatro entradas analógicas. Una clara ventaja de este equipo, es que se conecta a la computadora por medio de un puerto USB, que permite registrar simultáneamente varias señales, además de un costo relativamente bajo. Éste dispositivo transforma una señal en una cadena de bits. Éstas se almacenan en un archivo de computadora o se procesa en tiempo real.

Se muestrearon simultáneamente las señales de presión y temperatura a una frecuencia de 1 Hz. Con el fin de eliminar los ruidos (por ejemplo la influencia del sector eléctrico con una frecuencia de 60 Hz) y evitar problemas de "aliasing" durante el procesamiento e interpretación de los datos, se procedió a filtrar la señal a una frecuencia menor a la mitad de la frecuencia de muestreo.

Para poder conocer la evolución de la transferencia de calor en el colector, fue necesario, a lo largo de varios días, realizar mediciones de dos variables termodinámicas (presión y temperatura).

Llenamos con 1380ml de agua el tubo colector; en uno de los extremos del tubo se colocó un transductor de presión mientras que en el otro extremo el de temperatura.

A cada uno de los transductores se le agregó teflón y sellador, evitando así, fugas en el dispositivo.

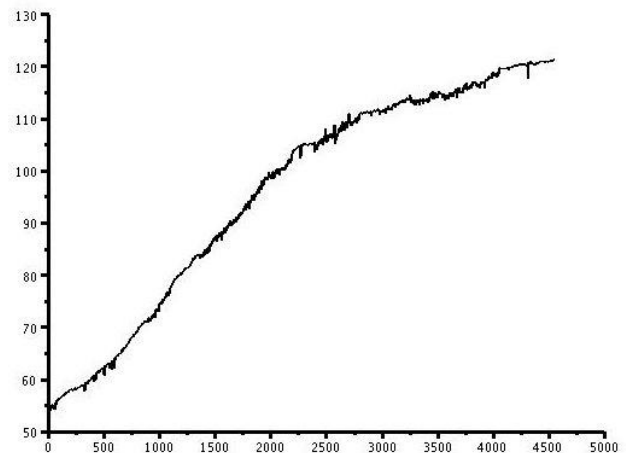
#### IV. RESULTADOS

Las pruebas del colector solar se realizaron durante días soleados. La temperatura que se alcanzó en el tubo llegó hasta 140 grados centígrados, lo que ya es una medida de la eficiencia del concentrador solar.

Cuando un fluido cambia de fase (en nuestro caso de líquido a vapor), la densidad cambia y la energía calorífica

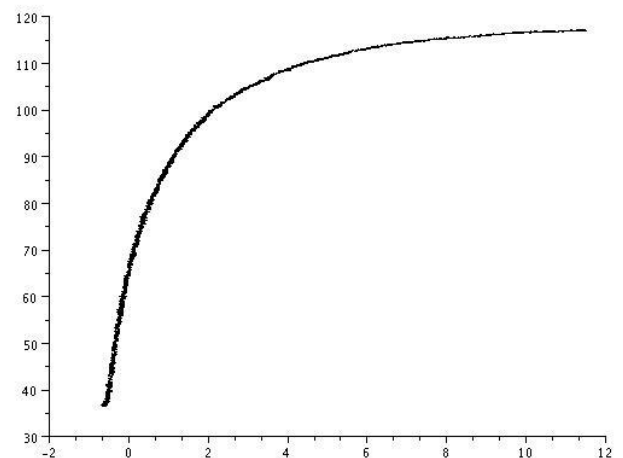
se libera (evaporación) o se absorbe (condensación) en magnitudes considerables. Baste recordar que el calor latente de vaporización en el agua a una presión de 1 atmósfera es de 540 cal/gr. Mientras que el calor necesario para aumentar la temperatura de un gramo de agua en un grado es de solo una caloría (definición de capacidad calorífica).

En la figura 9, se presenta una gráfica de la temperatura del tubo colector en función del tiempo. Se aprecia primero un incremento de la temperatura hasta que se alcanza un valor asintótico. Éste último corresponde a un balance entre la aportación de energía (radiación solar) con las pérdidas debido a que éste sistema tiene una temperatura más alta que el medio. La curva concuerda con la predicción hecha en la ecuación (4).



**FIGURA 9.** Temperatura del tubo colector en función del tiempo.

Con los datos obtenidos, es posible tener una gráfica de temperatura vs presión, esto es, la curva de saturación del agua con un pequeño error pues hay que tomar en cuenta al aire que había en el tubo al momento de llenarse y sellarse. Los datos corresponden a un rango de 2.15atm. y  $117.1^{\circ}\text{C}$ , como se puede observar en la figura 10.



**FIGURA 10.** Curva de saturación del agua en el colector que relaciona la temperatura con la presión.

Los resultados presentados en la figura 9 se pueden comparar con una ecuación empírica reportada en la literatura [6], cuya gráfica se presenta en la figura 11.

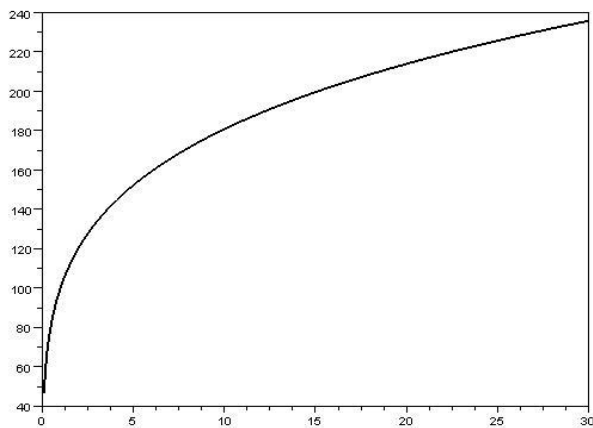


FIGURA 11. Curva de saturación del agua.

## V. CONCLUSIONES

El colector solar, que aquí se modela y proponemos, está destinado a tener una aplicación directa en el campo de la refrigeración solar por absorción, pues ha logrado alcanzar temperaturas de hasta 140°C, lo cual es muy favorable para esta aplicación.

Pero este tipo de trabajo puede utilizarse fácilmente en otros campos relacionados con la mejora y optimización de equipos de transferencia de calor para la obtención de un mejor aprovechamiento de la energía. Por ejemplo, se les usa en la cocción de alimentos (hornos solares)

Es por todo lo anterior, que se debe trabajar más acerca

en el uso apropiado de la energía, planeando el consumo de manera más racional, con los alumnos considerando las fuentes renovables de energía como son: la energía solar, eólica, geotérmica, mareomotriz, etc., para con esto poder evitar así una escasez en el futuro.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido apoyado por el proyecto “Diseño y construcción de un sistema de refrigeración solar por absorción”, que forma parte del Macroproyecto “La Ciudad Universitaria y la Energía” de la UNAM. Taller de Fluidos-Tlahuizcalpan, Facultad de Ciencias, UNAM. Taller de Meteorología, Facultad de Ciencias, UNAM.

## REFERENCIAS

- [1] McVeigh, J. C., *Sun Power, An Introduction the applications of Solar Energy* (Pergamon press, 1ª Edición, Internacional, Canada, 1977).
- [2] Duffie, J. A., and Beckman, W., *A Solar energy thermal processes*. (John Wiley and Sons Inc., Nueva York, 1974).
- [3] Rafael, A. S, Felipe, M., *Ingeniería de la energía solar*, (El colegio Nacional, 1ª Edición, México, 1994).
- [4] Ricón, E. A., Osorio, F. A., *A New Troughlike Nonimaging Solar Concentrator*, *Journal of energy Engineering* **124**, 51-54 (2002).
- [5] Gautschi, G., *Piezoelectric Sensorics* (Springer, Berlin Heidelberg, 2002).
- [6] Conde, M., *Engineering. Thermodynamical properties of {NH<sub>3</sub> + H<sub>2</sub>O} solutions for the industrial design of absorption refrigeration equipment*, (Properties of Working Fluids, USA, 2004).