

ENSAYO Y SIMULACIÓN DE UN SISTEMA DE AGUA CALIENTE SOLAR TERMOSIFÓNICO EXPERIMENTAL

Watkins Marcelo, Bistoni Silvia¹, Salazar German²
Facultad de Ciencias Exactas y Naturales – UNCa
Av. Belgrano 300 – 4700, Catamarca, Argentina. E-mail: watkinsmarcelo@gmail.com

RESUMEN: El trabajo muestra el modelo matemático de un sistema experimental de colección solar termosifónico y la simulación de su funcionamiento empleando el software Simusol. Los ajustes del modelo se realizan empleando datos obtenidos durante el ensayo de un prototipo experimental. Las mediciones se realizan empleando instrumental de adquisición de datos automatizados. Se miden, la temperatura ambiente, la temperatura del agua en el tanque térmico y la radiación solar durante los ensayos. El proceso de ajuste del modelo resulta satisfactorio. Se obtiene un modelo físico matemático que responde satisfactoriamente y que permite simular el sistema de agua caliente solar con circulación termosifónica. Los datos obtenidos permiten calcular con buena aproximación la energía aprovechable del sistema.

Palabras clave: colector solar, simulación, termosifón, Simusol.

INTRODUCCIÓN

La región Noroeste de nuestro país se encuentra dentro de una de las zonas con mayor tasa de incidencia de energía solar del planeta. Junto con África, Australia y Norteamérica, la región sudamericana que comprende la puna de Perú, Bolivia, Norte de Chile y de Argentina, presenta un estimado de irradiación solar global de 210kWh/m² por año (GmbH, 2005). En Argentina, las provincias de Jujuy, Salta y Catamarca están en esta zona. Así, el recurso solar resulta ser particularmente importante, dada su abundancia y su potencialidad como fuente de energía.

El aprovechamiento de la energía solar puede realizarse actualmente con sistemas fotovoltaicos o térmicos. De ambas opciones la primera es muy costosa por el tipo de tecnología, de escaso desarrollo en nuestro país. Los sistemas térmicos solares, en cambio, presentan posibilidades concretas de desarrollo.

Empleando modelado y simulación computacional pueden realizarse ajustes del diseño de los sistemas térmicos. La principal ventaja que se observa al emplear simulaciones es la economía de recursos físicos y de tiempo. Se pueden obtener características básicas de comportamiento del sistema en condiciones simuladas sin necesidad de realizar repetidamente ensayos experimentales. En trabajos anteriores se muestran algunas aplicaciones de técnicas que incluyen la simulación computacional como complemento en el diseño de sistemas térmicos (Watkins *et al*, 2007; García *et al*, 2007).

En los sistemas de calentamiento solar de agua que utilizan el principio de funcionamiento termosifónico, se pueden identificar dos flujos de agua: el ocasionado por la demanda del usuario de agua caliente y el que se produce por el efecto termosifónico propiamente dicho (Duffie y Beckman 1980; Ibáñez P. *et al* 1990; Lucchini *et al* 2007). El software SIMUSOL (Saravia y Saravia, 2000) empleado para el modelado y simulación del presente trabajo, se adapta fácilmente a la simulación de los sistemas térmicos en general. Resulta necesario, no obstante, desarrollar un modelo para la simulación de la circulación termosifónica. De los procedimientos analizados para el cálculo del flujo de agua de estos sistemas, se selecciona para el presente trabajo el propuesto por Ibáñez Plana *et al*, (1990). Con dicho procedimiento de cálculo, se determina el caudal que se desplaza por convección natural del líquido debido a la variación de densidad del agua con la temperatura.

MATERIALES Y MÉTODO

Los procesos de simulación de sistemas térmicos requieren de una apropiada colección de datos para ajustar correctamente los modelos y validar posteriormente los resultados obtenidos. Con este fin se realiza una serie de ensayos experimentales destinados a la obtención de datos.

1- Facultad de Ciencias Agrarias - UNCa

2- Facultad de Ciencias Exactas - UNSa

Los ensayos se llevan a cabo empleando un colector solar de acero inoxidable marca INNOVAR de 1 m², instalado en una caja de plástico con cubierta de vidrio común de 4 mm y con aislación de lana de vidrio de 5 cm. El agua caliente se almacena en un tanque térmico de 80 litros de capacidad. La aislación del tanque consiste en una capa anular de 5 cm de perlita de polietileno expandido. Las otras dimensiones del tanque térmico para agua caliente se detallan en Tabla 1.

TANQUES DE AGUA - DATOS

Material	Diámetro (m)	Largo (m)	Espesor pared (m)	Superficie (m ²)
Fibra vidrio	0.5	1.1	0.005	2.120
Chapa acero	0.44	1	0.001	1.7

Tabla 1 – Dimensiones de los tanques de agua caliente

El dispositivo completo se monta sobre una estructura de hierro (caño estructural) de modo que el colector solar queda expuesto a la radiación formando un ángulo de 45° respecto de la horizontal (Figura 1) y orientado al Norte. El ángulo de 45° se selecciona empleando el software MER 3 (GIA, 2006) para optimizar la captación de energía en invierno manteniendo un promedio anual alto.

Las mediciones se realizan usando instrumentos de adquisición de datos marca Hobo que incluyen memoria suficiente para el registro de los datos durante más de cinco días corridos. Se instala un sensor de temperatura marca Hobo en el interior del tanque de agua. Un segundo sensor se coloca expuesto a la temperatura ambiente. Para la medición secuencial de la radiación solar se emplea un fotodiodo adaptado y calibrado contra un piranómetro térmico. Los instrumentos de adquisición de datos se programan para realizar mediciones y almacenar datos cada 15 minutos.



Figura 1: Prototipo empleado para los ensayos

Ensayos experimentales

Se realizan cuatro ensayos experimentales de tres a cuatro días de duración cada uno, en diferentes épocas del año. De dichos ensayos se obtienen las curvas de temperatura ambiente, radiación solar, y temperatura del agua en el interior del tanque de almacenamiento. La gráfica correspondiente al ensayo realizado en el mes de noviembre de 2009 puede verse en la Figura 2.

Se observa un primer día de sol pleno con una temperatura ambiente levemente superior a los 33 °C, un segundo día de ensayo nublado y temperaturas cercanas a los 25°C, un tercer día con sol pleno por la mañana y por la tarde pero con un momento de baja radiación al mediodía y un cuarto día parcialmente nublado. La temperatura ambiente promedio durante los cuatro días de ensayo es de 26,7 °C. Durante el mismo periodo de tiempo, la temperatura promedio del agua en el termotanque es de 44.4 °C. El pico máximo de radiación global (1156 w.m⁻²) se registra a las 13 horas del cuarto día. El máximo de temperatura ambiente registrado el mismo día es de 37 °C aproximadamente.

El agua en el tanque de almacenamiento tiene una temperatura inicial de 27 °C. Después del primer día de colección solar, llega a los 55°C y durante las 48 horas siguientes solo se registran pérdidas ya que el segundo día, la radiación no llega a provocar incrementos de temperatura en el agua. Al inicio del tercer día, el agua tiene una temperatura de 37 °C. Luego del tercer día de ensayo se mide la máxima temperatura de agua con un registro de 57,2 °C.

Los otros tres ensayos se realizan en setiembre de 2009, octubre del 2009 y marzo de 2010.

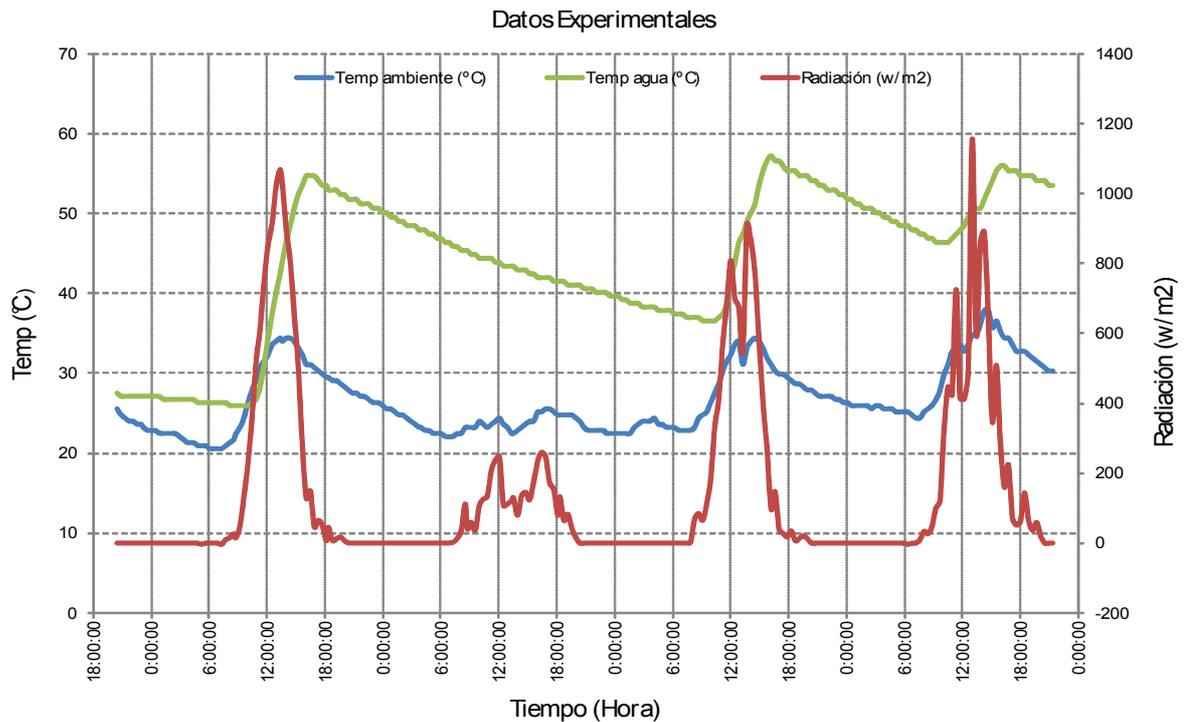


Figura 2: Curvas de temperatura y radiación obtenidas en un ensayo experimental de cuatro días

Termosifón: Modelo matemático

La circulación termosifónica se realiza por convección natural del agua, debido a la diferencia de densidades entre agua caliente y agua fría. El agua caliente tiene una densidad menor que el agua fría y por lo tanto tiene tendencia a desplazarse hacia las capas superiores del recipiente contenedor, mientras que el agua fría tiende a bajar a la parte inferior del mismo. Esa diferencia de densidades se puede calcular para establecer el empuje o presión ascendente del fluido en el circuito.

La curva en la Figura 3, muestra cómo varía la densidad del agua para temperaturas superiores a los 4°C. Dicha ley de variación puede ser representada empleando un polinomio interpolante.

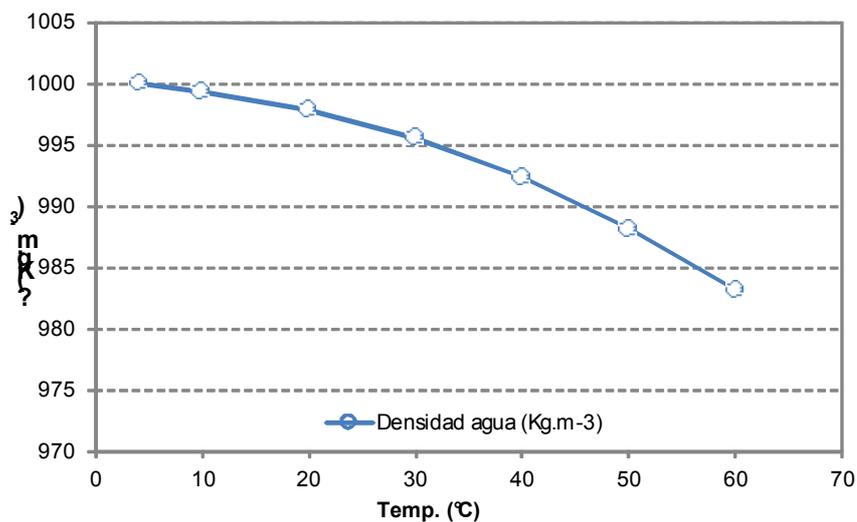


Figura 3: Densidad del agua en función de la temperatura

Una buena aproximación ($R^2 = 0.9993$) de la densidad en función de la temperatura se obtiene con el polinomio

$$\rho(t) = -0.0044 \cdot t^2 - 0.0170 \cdot t + 1000.0422 \tag{1}$$

donde la densidad $\rho(t)$ está expresada en (Kg.m^{-3}) y la temperatura t en ($^{\circ}\text{C}$)

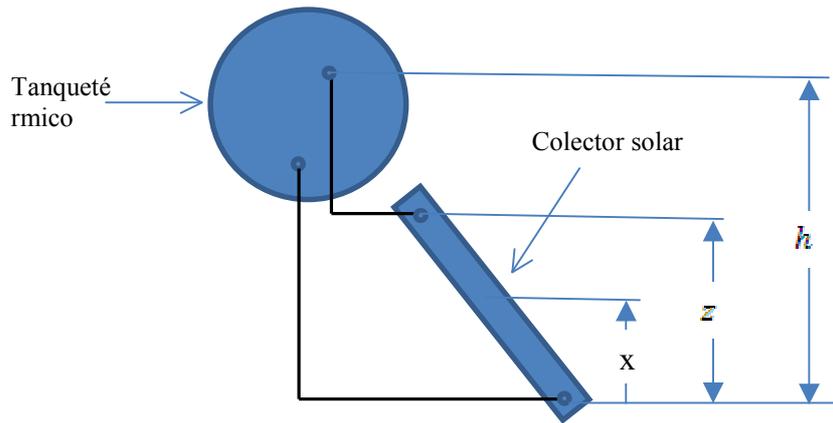


Figura 4: Esquema de alturas de tanque y colector solar

La Figura 4 muestra un esquema del tanque y colector solar. La ecuación [2] permite realizar el cálculo de la presión ascendente. Para que la circulación de agua se establezca, la diferencia de presión (Δp_h) provocada por las pérdidas hidráulicas debe ser igual a la diferencia de presión (Δp_D) provocada por la diferencia de densidades en un ciclo completo del fluido [3].

$$\Delta p_D = \rho_{prom} \cdot g \cdot h - \left[\int_0^z \rho(x) \cdot g \cdot dx + \rho_{sal} \cdot g \cdot (h - z) \right] \quad [2]$$

$$\Delta p_h = \Delta p_D \quad [3]$$

Por otro lado $\rho(x)$ es la densidad instantánea del agua en el colector y ρ_{sal} es la densidad del agua a la salida del colector. Si bien es cierto que la densidad del agua en el tanque acumulador no es igual para todas las alturas (estratificación), podemos emplear para el cálculo una densidad promedio ρ_{prom} en el depósito. La densidad con que ingresa el agua al colector es igual a la densidad promedio del tanque ($\rho_{ent} = \rho_{prom}$). Entonces:

$$\rho(x) = \rho_{prom} + \frac{(\rho_{sal} - \rho_{prom})}{z} \cdot x \quad [4]$$

De esta manera la variación de densidades en el colector se puede calcular con la ecuación [4], resultando proporcional a la altura (x) del punto considerado. El resultado de la integral de la ecuación [2] será:

$$\int_0^z \rho(x) \cdot g \cdot dx + \rho_{sal} \cdot g \cdot (h - z) = \rho_{sal} \cdot h \cdot g + \frac{1}{2} (\rho_{prom} - \rho_{sal}) \cdot z \cdot g \quad [5]$$

Sustituyendo en la [3]

$$\Delta p_D = (\rho_{prom} - \rho_{sal}) \cdot \left(h - \frac{1}{2} z \right) \cdot g \quad [6]$$

Quedando explícita la dependencia de la presión ascendente con las alturas z y h y con la diferencia de densidades.

La pérdida de presión del circuito para diferencias de temperatura relativamente pequeñas se puede calcular con:

$$\Delta p_h = \bar{\rho} \cdot \Delta v \cdot v^2 \quad [7]$$

$$\bar{\rho} = \frac{(\rho_{prom} + \rho_{sal})}{2} \quad [8]$$

Siendo $\bar{\rho}$ la presión media entre la presión en el tanque y la presión en la salida del colector, Δv es el factor de pérdida (adimensional) y v la velocidad del fluido en el circuito. El factor de pérdida Δv no se puede determinar por medición directa pero se sabe que varía entre 15 y 20, para este tipo de circuitos (Ibáñez Plana *et al*, 1990) por lo que se usa como parámetro de ajuste de la simulación.

Remplazando [8] en [7]

$$\Delta p_h = \frac{(\rho_{prom} + \rho_{sal})}{2} \cdot \Delta v \cdot v^2 \quad [9]$$

Igualando las presiones calculadas en [6] y [9] se puede despejar la velocidad de circulación del fluido

$$\frac{(\rho_{prom} + \rho_{sal})}{2} \cdot \Delta v \cdot v^2 = (\rho_{prom} - \rho_{sal}) \cdot \left(h - \frac{1}{2} z \right) \cdot g \quad [10]$$

$$v = \sqrt{\frac{(\rho_{prom} - \rho_{sal}) \cdot \left(h - \frac{1}{2} z \right) \cdot g}{\frac{(\rho_{prom} + \rho_{sal})}{2} \cdot \Delta v}} \quad [11]$$

$$Q = 1000 \cdot v \cdot A \quad [12]$$

Simulación con Simusol

Para simular el funcionamiento del termosifón es preciso ingresar, mediante una Tabla de datos, el comportamiento del fluido en el circuito termosifónico del calefón solar.

Empleando la ecuación [11] y las constantes “z”, “h”, y “Δv” medidas sobre el prototipo, se calcula la relación entre la diferencia de presiones y la velocidad del fluido en el circuito. Multiplicando esa velocidad por el área de la sección del caño en el que circula el líquido (3/4”) y por la constante numérica para pasar de m³.s⁻¹ a Kg.s⁻¹ se obtiene la relación entre caudal y diferencia de presión dada por la ecuación [12]. Las gráficas de ambas curvas están representadas en la Figura 5. De la segunda curva se obtienen los datos que se ingresan en forma de “Tabla” en la simulación (Ver TABLA 7 de Simusol en Figura 6).

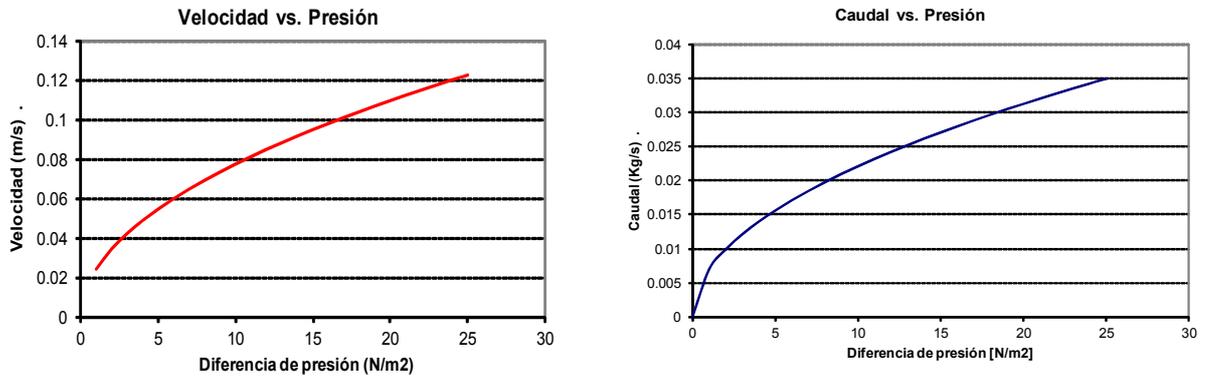


Figura 5: Curvas de velocidad y caudal de agua en función de la diferencia de presión

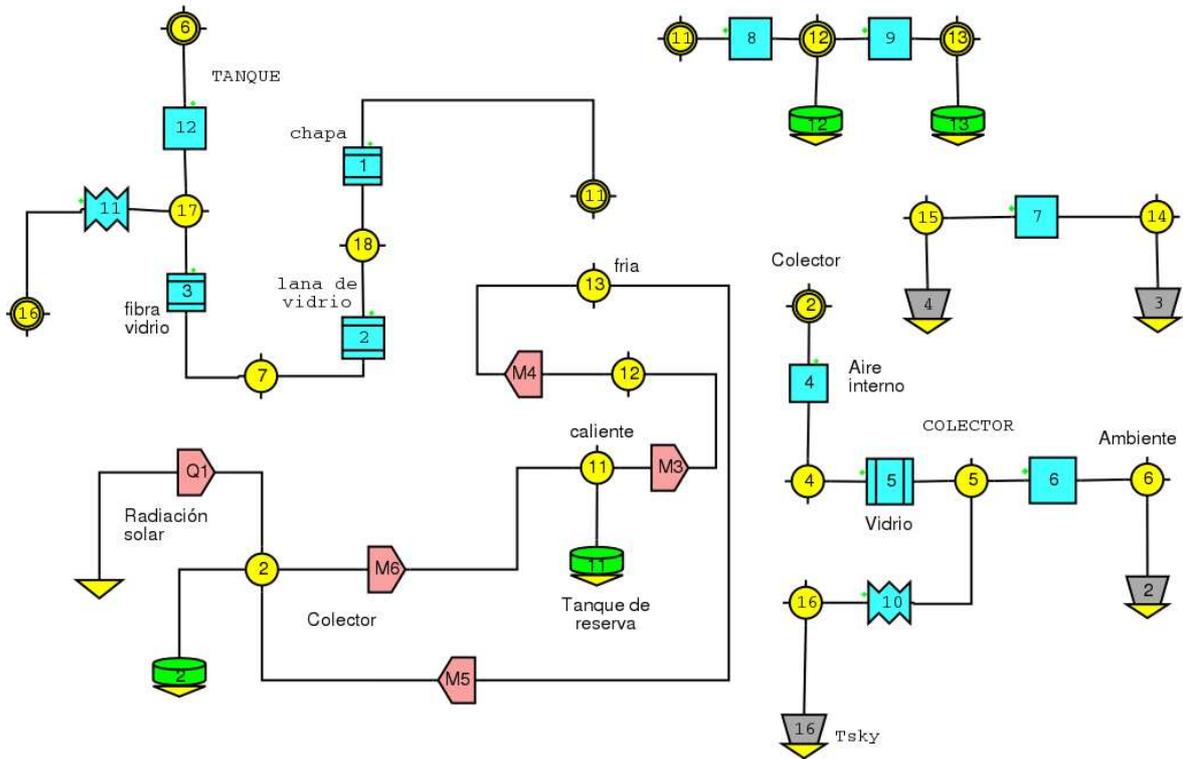
El circuito térmico para la simulación está constituido por una sección donde básicamente se representa la zona de circulación del agua, esto es los nodos 2, 11, 12 y 13. El nodo 2 y su condensador acumulador asociado (C2), representa al colector solar propiamente dicho, o sea la chapa negra que recibe la radiación solar. Dicha radiación es simulada en el circuito mediante el flujo de calor Q1. Los flujos de calor y masa M3, M4, M5 y M6 corresponden al circuito termosifónico. El agua del tanque de acumulación está dividida en tres volúmenes de 26.5 litros cada uno y representada en la simulación por tres condensadores acumuladores (C11, C12 y C13), vinculados mediante resistencias convectivas (R8 y R9) que representan el movimiento convectivo natural del agua en el tanque.

Una segunda sección constituida esencialmente por los nodos 7, 17 y 18 representa las pérdidas térmicas del tanque de acumulación de agua caliente. Las mismas son predominantemente conductivas en el interior del mismo (R1, R2 y R3) y convectivas - radiativas en la superficie exterior (R11 y R12).

La tercera sección del circuito conformada por los nodos 4, 5 y 6 modela los mecanismos de pérdida de energía térmica del colector solar.

Finalmente la sección central de la simulación es la constituida por los nodos 14 y 15. Esta sección permite el cálculo del caudal de agua en el circuito termosifónico. Las fuentes de voltaje 3 y 4 tomarán valores asignados por las funciones definidas como QAT y QBT en el cuadro “Funciones”. Ambos valores son las densidades del agua en el colector (QAT) y en el tanque de reserva, ambas dependientes de la temperatura del agua en ese instante.

Al aplicar los valores de QAT y QBT en el circuito constituido por las fuentes 3 y 4 y por la resistencia R7 cuyo valor es la inversa de la constante “g”, la corriente en R7 devuelve un valor igual a la diferencia de densidades multiplicada por “g” o, lo que es lo mismo, la diferencia de presiones expresada en N.m⁻².



GRAFICOS		DATOS	
ejes GRAFICO = tiempo(horas), temp(gradosC) lineas GRAFICO = SIMULADO, 1: 2, 3, 4, 5 archivo exp= Tagua39h.dat puntos GRAFICO=exp, 1:2 guardar GRAFICO = temp ejes GRAFLUJO = tiempo(horas), flujotermisif (w) lineas GRAFLUJO = SIMULADO, 1:6, 7 ejes GRAR = tiempo(horas), difpres (N/m2) lineas GRAR = SIMULADO, 1:8 guardar DIFPRE = termsifon		#Tanque R1=D1, 1.7, 0.001, 50 R2=D1, 2.12, 0.05, 0.04 R3=D1, 2.12, 0.003, 0.8 R8=PRE R9=PRE R11=R1, 2.12, Pemis, 0.8 R12=v1, 2.12, Pvto C11=c1, 4180, 25 C12=C1, 4180, 25 C13=C1, 4180, 25 #Colector R4=v1, 1, Pin R5=D1, 1.1, 0.004, 0.95 R6=v1, 1.1, Pvto C2=C1, 4180, 2 R7=1/9.81 R10=R1, 1, Pemis, 1 E3=QAT(Temp 2) E4=QBT(Temp 13) E16=Tabla 2(tiempo)	
TABLAS_ARCHIVOS		Tabla 7	
archivo A1=Rad39.dat columnas Tabla 1 = A1, 1:2 factores Tabla 1 = 1, 1 archivo A2 =Tsky39.dat columnas Tabla 2 = A2, 1:2 factores Tabla 2 = 1, 1 archivo A3 = Tamb39.dat columnas Tabla 3 = A3, 1:2 factores Tabla 3 = 1, 1		factor=1, factor=0.05 -100,0 1,0 1,0.007 6,0.01715 13,0.02524 19,0.03051 100,0.035	
RESULTADOS		CONTOLES	
TIEMPO TEMP 2, TEMP11, TEMP16, TEMP 13 JM3, JQ1, IR7, E3, E4		START TIME= 0 INTEGRATION ROUTINE= IMPLICIT	
FUNCIONES		PARAMETROS	
#densidad alta temp QAT(xx)=(1000.14-(0.0044*(xx**2))-(0.017*xx)) #densidad baja temp QBT(yy)=(1000.14-(0.0044*(yy**2))-(0.017*yy))		Pin=6 Pvto=9 Pefi=0.9 PRE=0.01 Pemis=0.9	
		TIEMPO	
		86 horas	
		DATOS	
		JM3=JM, 4180, Tabla 7(IR7) JM4=JM, 4180, Tabla 7(IR7) JM5=JM, 4180, Tabla 7(IR7) JM6=JM, 4180, Tabla 7(IR7) JQ1=JQ, Pefi, Tabla 1(tiempo) E1=18 E2= Tabla 3(tiempo)	
		INICIALES	
		VC11=27 VC12=27 VC13=27 VC2=25	

Figura 6: Diagrama generado por DIA para la simulación del sistema.

Con esa diferencia de presiones se ingresa en la Tabla 7 y se obtiene el caudal de agua expresado en $\text{Kg}\cdot\text{s}^{-1}$. Finalmente ese caudal es asignado a los flujos de calor y masa M3, M4, M5 y M6, completándose de este modo la secuencia de cálculo.

Los nodos 6 y 16 están asociados con las fuentes de voltaje (temperatura) 2 y 16 y a su vez con las Tablas 2 y 3 (del cuadro TABLAS_ARCHIVOS) cuyos datos son la temperatura ambiente y la temperatura de cielo (T_{sky}). La radiación solar directa y normal al plano del colector se ingresa en la simulación mediante la Tabla 1 (del cuadro TABLAS_ARCHIVOS) para determinar el flujo de calor de Q1.

RESULTADOS

El ajuste entre los valores simulados y los valores medidos de temperatura de agua resulta ser muy satisfactorio. El error porcentual promedio para las 86 horas de datos medidos es del 2,3 %, mientras que el error cuadrático medio es $\text{RMSE}= 1,07$ $^{\circ}\text{C}$.

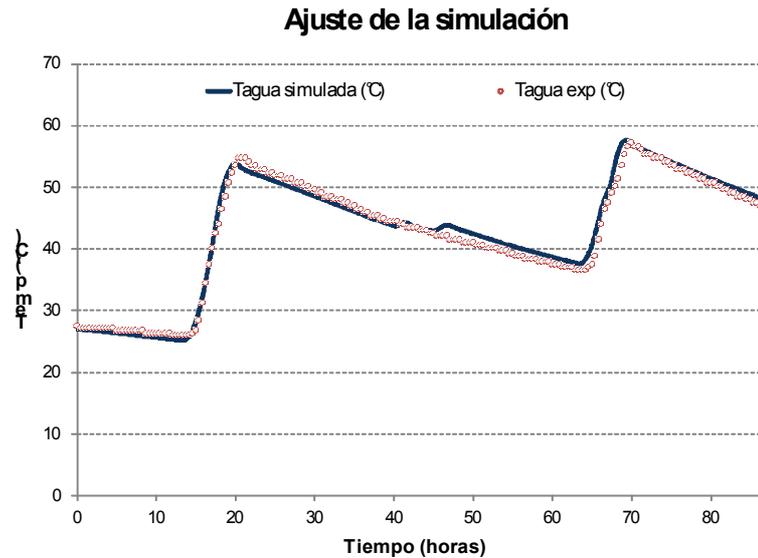


Figura 7: Curvas de temperatura experimental y simulada

La gráfica del ajuste de los valores de temperatura medida y simulada se muestra en la Figura 7. La línea continua muestra el resultado de la simulación mientras que los puntos corresponden a datos experimentales.

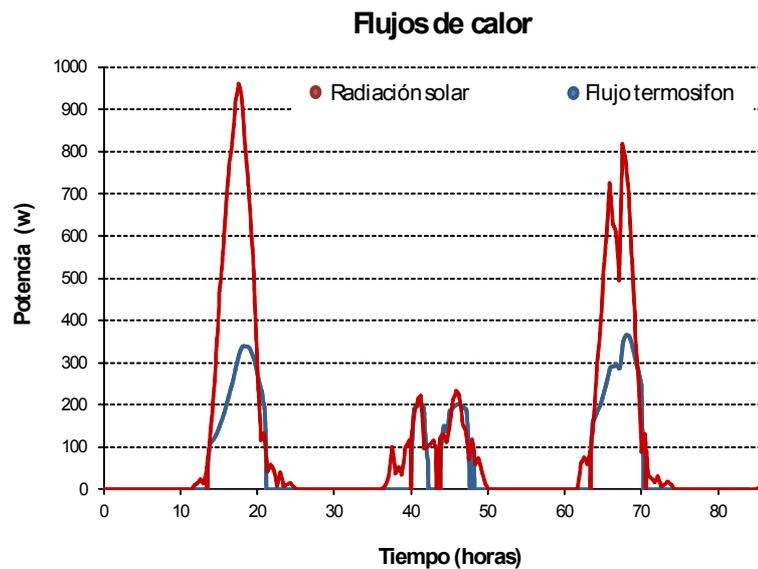


Figura 8: Curvas de flujos de calor en el calefón solar simulado.

En el cuadro "RESULTADOS" de la simulación se configura Simusol para que genere y grafique los flujos JQ1 y JM3. El

primero es el flujo de calor que toma el colector solar de la radiación directa, mientras que el segundo es el flujo de calor que transporta la masa de agua circulante en el interior del calefón. Empleando los datos obtenidos se trazan los gráficos que se muestran en la Figura 8. Integrando respecto del tiempo la curva de potencia (JM3) se puede calcular la energía total acumulada en el depósito. La energía transportada en forma de flujo de calor y masa durante el primer día es de 1730 J, el segundo día es de 520 J y el tercer día 1843 J. La curva de la potencia termosifónica es estimativa ya que no se cuenta con instrumental para medir el flujo real de agua en el circuito (Lucchiniet *al*, 2007).

La eficiencia del sistema se obtiene mediante el cociente entre la energía transportada por el agua hacia el tanque de reserva y la energía solar que llega al colector. De este modo, se obtiene una eficiencia promedio del 51% durante los cuatro ensayos y simulaciones realizadas.

CONCLUSIONES

El modelo empleado para la simulación es aplicable a cualquier artefacto térmico que cuente con un circuito de agua -u otro fluido- cuyo principio de circulación sea la variación de densidad por diferencia de temperaturas o termosifón. Los errores calculados son inferiores al 3%.

El procedimiento de simulación mostrado permite obtener valores del caudal termosifónico que por razones técnicas o tecnológicas no se pueden medir en forma directa.

Nuevamente se comprueba la utilidad de la simulación computacional en la optimización y dimensionamiento de sistemas térmicos de mediana complejidad.

REFERENCIAS

- Duffie J.A. y Beckman, W.A. (1980) *Solar Ingeneering of Termal Processes* – Edit. John Wiley & Sons
- García V., M. Gea, M. Watkins, y A. Iriarte, (2007). “Integración de modelos para la simulación de una cámara de producción de plantas con aporte solar y auxiliares”. *Revista Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, Vol. 11, pp. 8.131 – 8.138.
- GmbH EnergieAtlas, (2005) “Global Meteorological Database on CD-ROM for all solar and energy experts” - Switzerland
- GIA (Grupo Ingeniería Ambiental), (2006) “Software para dimensionamiento de sistemas solares MER 3” –Universidad de Flores.
- Ibáñez Plana M., Rosell Polo J., Rosell Urrutia J., (1990) *Colección: Energías Renovables – Editorial Mundi – Prensa*, pp. 202 - 205
- LucchiniJ., Barral J.,Galimberti P. (2007) “Estudio de un caudalímetro calorimétrico para mediciones en sistemassolares termosifónicos de calentamiento de agua”. *Revista Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, Vol. 11, pp. 8.175 – 8.182
- Saravia L. y Saravia D. (2000) “Simulación de sistemas solares térmicos con un programa de cálculo de circuitos eléctricos de libre disponibilidad”. *Revista Avances en Energías Renovables y M.A.*, Vol. 4, pp. 8.17 – 8.23.
- Watkins M., V. García, A. Iriarte, (2007). “Aplicación de Simusol para el diseño de sistemas de calefacción sol-gas con control automático”. *Revista Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, Vol. 11, pp. 2.31 – 2.36.

NOMENCLATURA

t	temperatura(°C)
Δp_D	diferencia de presión provocada por las pérdidas hidráulicas ($N.m^{-2}$)
Δp_n	diferencia de presión provocada por variación de densidad ($N.m^{-2}$)
ρ_{sal}	densidad del agua a la salida del colector ($Kg.m^{-3}$)
ρ_{prom}	densidad promedio del agua en el depósito o tanque ($Kg.m^{-3}$)
$\bar{\rho}$	densidad media entre la presión en el tanque y la presión en la salida del colector ($Kg.m^{-3}$)
Δv	factor de pérdida (adimensional)
v	velocidad del fluido en el circuitotermosifónico ($m.s^{-1}$)
Q	caudal de agua ($Kg.s^{-1}$)
A	área de la sección de paso de la cañería de agua (m^2)

ABSTRACT

The paper shows the mathematical model of an experimental thermosiphonic solar collection system and his simulation with the software Simusol. The adjust process of the model is perform using experimental data obtained during tests of an experimental prototype. The measurements were performed using instrumental with automatic data acquisition. Samples are taken from the ambient temperature, water temperature in the hot tank and solar radiation during the tests. The process of model adjust is satisfactory. It obtains a mathematic and physical model that respond satisfactorily to simulate a solar hot water system with thermosiphonic circulation. The data obtained allow us to determine the energy of the system.

Key words: solar collector, simulation, thermosiphon, Simusol.