

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE SISTEMAS SOLARES PARA CALENTAR AGUA USANDO UN PROGRAMA DINÁMICO

E. D. Albizzati

Facultad de Ingeniería Química - Universidad Nacional del Litoral
Santiago del Estero 2654 - CP 3000 - Santa Fe-Argentina
Tel.: 342 4571160 - email: albizzati@fiq.unl.edu.ar

Recibido 18/08/18, aceptado 26/09/18

RESUMEN: En este trabajo se simulan sistemas solares de mediana escala para calentamiento de agua con el software System Advisor Model. Las variables más importantes que se cargan en el programa son radiación solar, datos meteorológicos locales, perfil de demanda, temperatura del agua caliente e información técnica sobre los colectores solares y el tanque de almacenamiento. Los resultados indican que para una instalación de colectores planos selectivos con todas las baterías en paralelo, se calientan 9330 L de agua por m² de colector a 60 °C, lo que representa el 81,8 % de la demanda térmica anual. Además, se comprueba que la inclinación óptima de los colectores es mayor que la latitud de Santa Fe y un aumento en el volumen acumulado en el tanque disminuye la contribución de la energía solar. Finalmente, si se mantiene el caudal total de circulación, se verifica que al colocar cuatro baterías en serie, la contribución solar es 82,6 %, la energía solar térmica entregada crece y la energía auxiliar para calentamiento disminuye. En estas configuraciones la potencia para bombeo es mayor debido al aumento del caudal en cada colector y al arreglo de las baterías en serie.

Palabras clave: solar, calentamiento, agua, colectores, energía.

INTRODUCCIÓN

La energía solar térmica es uno de los mayores recursos energéticos con que se cuenta, existiendo asimismo un amplio conjunto de tecnologías para su aprovechamiento en todos los niveles térmicos, siendo muy confiables las aplicables a bajas temperaturas (Albizzati, 2012; Duffie y Beckman, 2013; Kalogirou, 2014). Los procesos térmicos solares a menos de 100 °C que se han son: calentamiento de agua para lavado y limpieza, precalentamiento de agua para calderas, calentamiento de fluidos para operaciones en tanques y recipientes de procesos, calentamiento para secado y acondicionamiento de ambientes.

Debe tenerse en cuenta que el empleo de la energía solar térmica implica reducir la dependencia de los combustibles tradicionales, aumentar la competitividad al generar energía en forma independiente, tener previsibilidad en los costos ya que el sistema solar requiere mayoritariamente una inversión inicial, contribuir a paliar la secuela de daños originados en la emisión de gases de efecto invernadero y posibilitar eventualmente que la energía sustituida sea destinada a otras áreas prioritarias.

En particular en el año 2017 se contabilizó una capacidad de calentamiento solar de agua a baja temperatura en todo el mundo de 472 GW, especialmente para fines residenciales (REN21, 2018). Respecto al calentamiento solar a mayor escala, el campo es amplio abarcando sistemas públicos y privados, e instalaciones de servicios y de producción, habiéndose aplicado en las industrias alimenticia, de bebidas, metalúrgica, textil, entre otras, y en sistemas sanitarios de hospitales, complejos habitacionales, etc.

En el referido contexto muchas publicaciones han presentado estudios relacionados con el calentamiento solar de agua en diversas aplicaciones, realizando variados enfoques y empleando diferentes herramientas de análisis y cálculo (Albizzati, 2016; Frein et al., 2014; Mamouri y Bénard, 2018; Yan et al., 2015, Zainine et al., 2017).

Este trabajo simula el comportamiento de sistemas solares de mediana escala para calentar agua aplicando el programa dinámico System Advisor Model (SAM) versión 2017.9.5, elaborado por el National Renewable Energy Laboratory de Estados Unidos (DiOrio et al., 2014). Con el software se determinan la radiación solar horaria incidente sobre los colectores, la temperatura del agua suministrada, la energía solar aportada a la demanda térmica y el consumo energético para bombeo. Luego para un sistema con baterías de colectores solares en paralelo, se analiza el efecto de algunas variables relacionadas con dichos equipos y el tanque acumulador sobre cobertura solar de la demanda térmica. Finalmente se compara los comportamiento térmico de la instalación antes estudiada con otras similares en las cuales donde las baterías están configuradas en serie-paralelo.

DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA SOLAR

En la instalación considerada en este trabajo el agua circula por convección forzada entre los colectores solares y el tanque acumulador (Figura 1). El circuito posee un intercambiador de calor y un controlador gobierna la captación de la radiación solar. El sistema solar se localiza en Santa Fe, Argentina y el consumo de agua caliente es de 2000 L diarios a 60 °C de temperatura, uniforme durante el día y a lo largo del año. Un suministro de energía auxiliar completa los requerimientos térmicos de la demanda prevista.

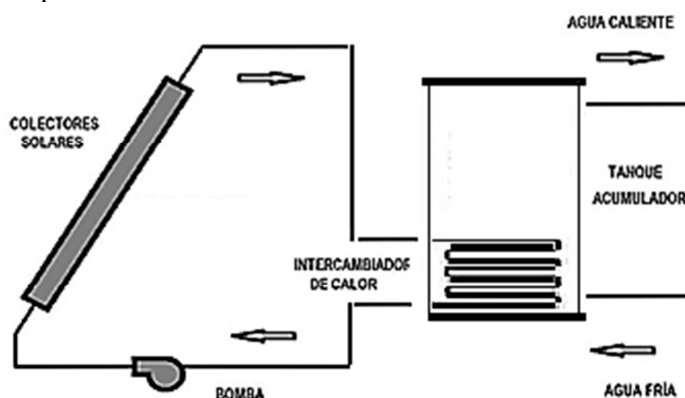


Figura 1. Esquema de la instalación solar para calentamiento de agua.

Como se detalla en la Tabla 1, el sistema solar se caracteriza, por el número de colectores (N_C), el área de colección (A_C), la inclinación de los colectores que miran al norte respecto al plano horizontal (B), el volumen de agua acumulado (T) y el coeficiente de pérdidas de calor del tanque (U_T). Además en la tabla se muestran los parámetros que caracterizan a los colectores ($F_R E_O$ y $F_R U_C$), que están asociados a E_O , la eficiencia óptica, F_R el factor de remoción del calor y U_C el coeficiente de pérdidas de calor, los que dependen de m_C , que es el caudal másico de agua por unidad de área de colección (ANSI/ASHRAE 93, 2010).

Colectores solares	N_C	A_C (m ²)	B (°)	$F_R E_O$	$F_R U_C$ (W/m ² °C)	m_C (kg/s m ²)	T (L)	U_T (W/m ² °C)
Tipo placa plana	32	64	35	0,679	4,653	0,02	3200	3,5

Tabla 1. Datos del sistema solar para calentamiento de agua.

En los colectores solares de placa plana adoptados para este estudio, la radiación se transmite por una cubierta de vidrio y llega a una placa de aluminio recubierta con pintura absorbente selectiva. La

energía térmica se transfiere al agua que circula por tubos de cobre, entre la placa y la cubierta hay aire, se utiliza un aislante y una caja contiene todos los componentes de colector (Figura 2).

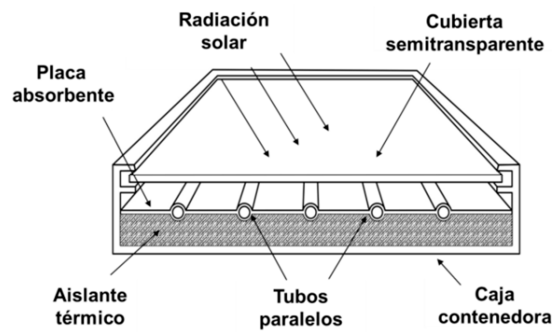


Figura 2. Colector solar de placa plana.

En relación con la configuración del conjunto de colectores se han considerado baterías constituidas por cuatro colectores solares en paralelo, pero a su vez las baterías pueden estar entre sí en paralelo, o en serie (Figura 3).

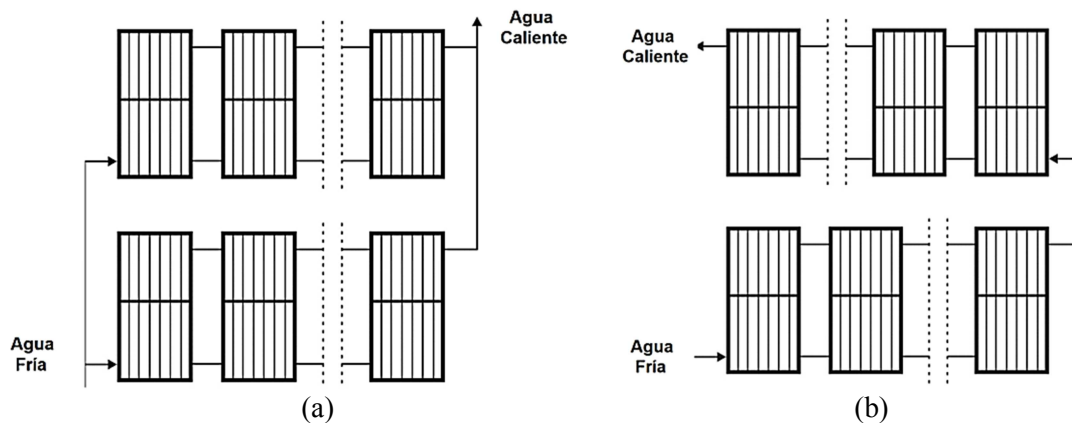


Figura 3. Baterías de colectores solares: en paralelo (a) , en serie (b).

Los parámetros característicos del colector se emplean para cálculos sin modificaciones solo cuando la instalación posee una configuración en la cual el caudal m_c es el mismo que el antes tabulado ($0,02 \text{ kg/s m}^2$), pero si este caudal es diferente los valores de $F_R E_O$ y $F_R U_C$ deben ser corregidos (Duffie y Beckman, 2013).

El caso base simulado considera que ocho baterías de cuatro colectores están todas configuradas en paralelo, y el caudal de agua circulante es relativamente bajo e igual a $0,01 \text{ kg/s m}^2$, por lo que el caudal total en la instalación es $0,64 \text{ kg/s}$. Mediante un diseño preliminar del circuito hidráulico se estiman las dimensiones de las cañerías, de las aislaciones correspondientes, y un consumo de 180 W para la bomba impulsora.

Cuando el sistema a simular contiene N equipos en serie y el caudal que circula es N veces el valor m_c contemplado en los parámetros $F_R E_O$ y $F_R U_C$ éstos no se modifican. Si en la configuración de la instalación se disponen N equipos en serie y el caudal circulante por cada colector cambia, los parámetros deben ser modificados según:

$$(F_R E_O)_N = F_R E_O [1-(1-K)^N / NK] \quad (1)$$

$$(F_R U_C)_N = F_R U_C [1-(1-K)^N / NK] \quad (2)$$

En las ecuaciones anteriores K se calcula con uno de los parámetros del colector, el caudal de agua por unidad de área y el calor específico del agua (C):

$$K = F_R U_C / C m_C \quad (3)$$

Al colocar las baterías de colectores en serie con un dado caudal circulante en cada colector, se incrementan las pérdidas térmicas debido al incremento de la temperatura, también la caída de presión y la potencia de la bomba de circulación. Asimismo con las baterías en serie, manteniendo el caudal total circulante, se pueden reducir las dimensiones del circuito hidráulico y las pérdidas de calor aumentando así el aporte solar a la demanda térmica.

CARACTERÍSTICAS DEL SOFTWARE SAM

El software usado genera 8760 valores horarios, relacionados con datos de la radiación incidente sobre los colectores y fundamentalmente resultados del aporte de energía térmica de origen solar y la temperatura del agua suministrada. Se puede obtener también otra información horaria, mensual y para todo el año, pudiéndose modificar una serie de variables operativas y de la instalación en estudio. Este programa ha sido verificado mediante la aplicación de otros modelos más complejos como el conocido como TRNSYS (DiOrio et al., 2014).

Una vez localizado geográficamente el sistema solar se cargan en el programa de cálculo los valores de la radiación solar directa y difusa horizontal junto con otros registros climáticos, que están disponibles para América del Sur-WMO Región 3 -Argentina Typical Meteorological Year (EnergyPlus, 2017).

El software tiene varias opciones para hallar la radiación recibida por los colectores (I_T), con la radiación solar global horizontal (I), que es suma de la radiación directa del sol (I_D) y la radiación difusa del cielo (I_d). La radiación solar sobre los colectores se obtiene en este caso con el modelo anisotrópico HDRK (Duffie y Beckman, 2013). El modelo contempla el índice de anisotropía (A_i), el cociente entre la radiación directa en los planos inclinado y horizontal (R_D) y la reflectividad de los alrededores (r):

$$I_T = (I_D + I_d A_i) R_D + I_d (1-A_i) (1+\cos B)/2 [1 + (I_D/I)^{1/2} \sin^3 (B/2)] + I_r (1-\cos B)/2 \quad (4)$$

Por otra parte la demanda periódica de energía térmica (Q_d) se calcula con la masa, el calor específico, y las temperaturas del agua caliente y fría. Para cubrir esa demanda, los colectores solares convierten parte de la radiación recibida y como existen pérdidas de calor desde las cañerías y el tanque acumulador hacia el ambiente, se dispone realmente de una cantidad inferior de energía de origen solar (Q_e).

El aporte de la energía solar a la demanda térmica (F_s) resulta:

$$F_s = Q_e / Q_d \quad (5)$$

A su vez se usa energía auxiliar (Q_a) con el fin de completar la demanda térmica, por lo que:

$$Q_d = Q_e + Q_a \quad (6)$$

Se debe tener en cuenta para la evaluación completa de la instalación que se consume energía eléctrica para el funcionamiento de la bomba.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A partir de los datos de la radiación solar directa y difusa horaria horizontal y considerando que r es 0,20, el software determina la radiación total incidente sobre los equipos solares, cuyos valores están por encima de 1000 W/m^2 en pocos días del año (Figura 4).

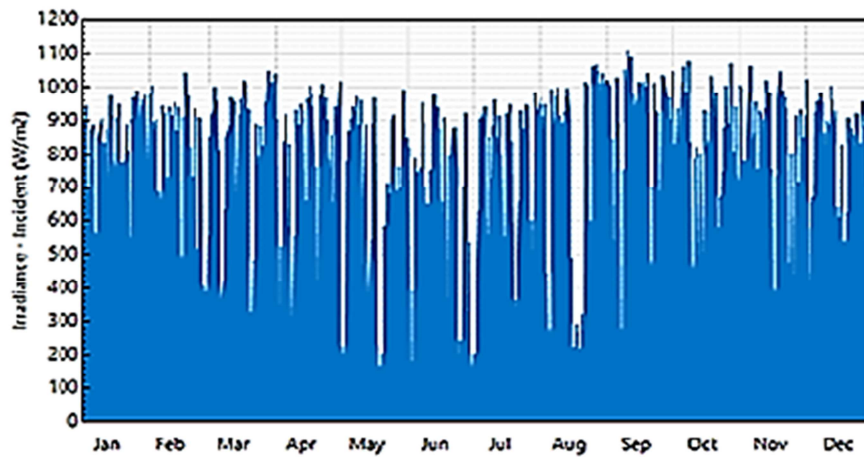


Figura 4. Radiación solar incidente sobre los colectores.

Como se observa en la Figura 5 para el sistema con las ocho baterías de colectores en paralelo, en muchos meses la temperatura del agua proveniente de la instalación supera los $85 \text{ }^\circ\text{C}$.

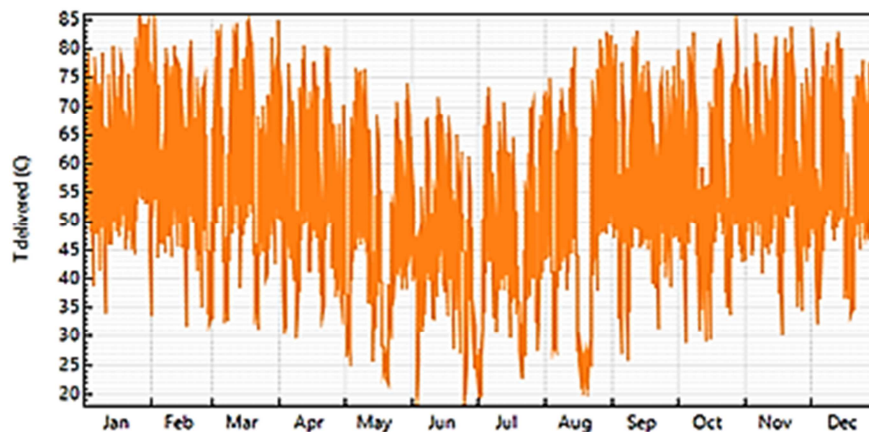


Figura 5. Temperatura del agua proveniente del tanque acumulador.

Según los cálculos efectuados para el caso base, la demanda térmica anual para calentamiento es $Q_d=31749,6 \text{ kWh}$, y la cantidad de energía térmica solar suministrada por la instalación solar varía desde 2761 kWh en enero hasta 1881 kWh en junio, siendo relativamente elevada en varios meses y horas del día (Figura 6). La fracción de la demanda térmica cubierta con energía del sol es $F_s=0,818$, por lo que la instalación posibilita en un año calentar hasta $60 \text{ }^\circ\text{C}$ unos 597140 L de agua o sea 9330 L de agua por m^2 de colector, y la energía consumida por la bomba es muy baja ($P_b= 347,7 \text{ kWh}$).

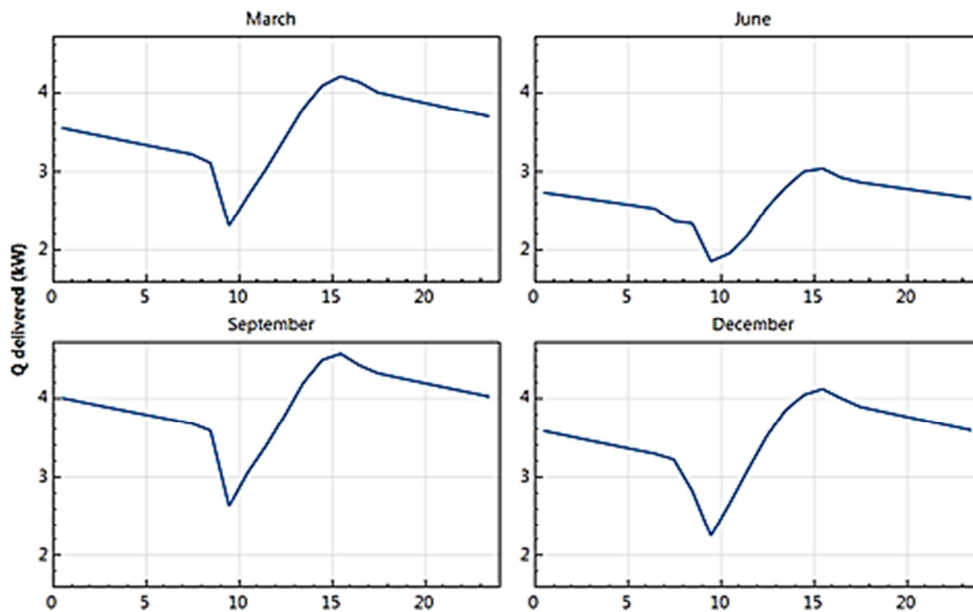


Figura 6. Energía suministrada por el sistema solar en meses típicos.

En función de las posibilidades que ofrece el software SAM, se considera a continuación la modificación de algunas de las variables del cálculo anteriormente realizado, y se determina su influencia en el comportamiento anual de la instalación solar previamente analizada.

Para construir la Tabla 2 se han modificado cuatro variables relacionadas con los colectores solares y el tanque acumulador de agua.

Variable modificada		Q_a (kWh)	Q_e (kWh)	P_b (kWh)	F_s
Inclinación de los colectores (°)	30	5867,0	25882,6	348,2	0,815
	35	5779,6	25970,0	347,7	0,818
	40	5889,9	25859,7	342,3	0,814
Parámetro de pérdidas del colector ($W/m^2 \text{ } ^\circ C$)	4,0	5232,5	26517,1	355,6	0,835
	4,653	5779,6	25970,0	347,7	0,818
	5,0	6078,4	25671,2	344,6	0,809
Volumen de agua del tanque (L)	3000	5743,2	26006,4	349,6	0,819
	3200	5779,6	25970,0	347,7	0,818
	3500	5861,0	25888,6	346,5	0,815
Coeficiente de pérdidas del tanque ($W/m^2 \text{ } ^\circ C$)	3	5393,1	26356,5	344,9	0,830
	3,5	5779,6	25970,0	347,7	0,818
	4	6181,4	25568,2	351,5	0,805

Tabla 2. Estudio sobre variables relacionadas con los colectores y el tanque acumulador.

En la tabla Q_a es la cantidad de energía auxiliar que sumada a Q_e completa la demanda térmica prevista. Se concluye que el valor óptimo de la inclinación de los colectores (35°) es de unos tres grados por encima la latitud de Santa Fe y que un aumento en el volumen de agua acumulado disminuye levemente el valor del aporte solar anual F_s , ya que crece el área de pérdida de calor al ambiente. Como es esperable, un efecto similar producen los aumentos de los coeficientes de pérdidas en los colectores y en el tanque de acumulación.

La Tabla 3 se elabora modificando dos variables operativas, y la configuración de las baterías de colectores solares.

Variable modificada		Q _a (kWh)	Q _e (kWh)	P _b (kWh)	F _s
Potencia de la bomba (W)	150	5779,6	25970,0	289,7	0,818
	180	5779,6	25970,0	347,7	0,818
	210	5779,6	25970,0	405,6	0,818
Caudal total circulante (kg/s)	0,64	5779,6	25970,0	347,7	0,818
	0,96	5807,0	25942,6	347,0	0,817
	1,28	5821,6	25928,0	346,6	0,817
Configuración de las baterías	8P - 180 W	5779,6	25970,0	347,7	0,818
	4P/2S - 220 W	5592,2	26157,4	428,6	0,824
	2P/4S - 320 W	5521,2	26228,4	624,0	0,826

Tabla 3. Estudio sobre variables operativas y de configuración del sistema solar.

En principio se ve en la tabla que una mayor potencia consumida por la bomba (P_b) no reduce el valor de la fracción F_s ya que esta potencia no participa en el balance térmico del sistema. Además un significativo aumento del caudal total circulante por la instalación provoca solo una leve disminución de dicha fracción y no trae beneficios en el comportamiento térmico.

Con respecto a la configuración de las baterías de cuatro colectores, 8P refiere al caso original con ocho baterías en paralelo, 4P/2S a cuatro en paralelo y dos en serie, y 2P/4S a dos en paralelo y cuatro en serie. En los dos últimos casos manteniendo el caudal total en 0,64 kg/s, se rediseñan las cañerías y aislaciones y como el caudal en cada colector crece a 0,02 kg/s m² y 0,04 kg/s m² se fijan nuevas potencias de la bomba.

Luego, al efectuar los cálculos se comprueba que con configuraciones que tienen más colectores en serie se aumenta el aporte solar a la demanda térmica, llegándose a 82,4 % y 82,6 %, cuando se colocan dos y cuatro baterías en serie respectivamente. Con el mayor número de baterías en serie la energía térmica solar entregada Q_e crece un 1,0 %, mientras que el consumo de la energía auxiliar Q_a disminuye aproximadamente en un 4,5 %.

Debe notarse que en los casos referidos antes, se necesitan mayores valores de la potencia necesaria para el bombeo porque crecen el caudal circulante por colector y el número de éstos en serie. Paralelamente el rediseño del circuito hidráulico con la reducción de sus dimensiones y consiguientemente de las pérdidas de calor al ambiente, dar lugar a un aumento de la contribución solar a los requerimientos de energía térmica.

CONCLUSIONES

El software System Advisor Model (SAM) posibilita analizar detalladamente el comportamiento de instalaciones solares para calentar agua. Los datos horarios de la radiación solar, variables climáticas locales, cantidad y temperatura del agua requerida, y características de los colectores para captación y del tanque acumulador, se encuentran entre los más importantes para posibilitar el uso del programa.

Los resultados de la aplicación del SAM indican que para una instalación que requiere energía en forma constante a lo largo del año y tiene colectores planos selectivos en baterías de cuatro colectores colocadas todas en paralelo, el sistema solar aporta el 81,8 % de la demanda. Se calcula también que es posible calentar 9330 L de agua por m² de colector a 60°C de temperatura, la inclinación óptima de los colectores solares (35°) es algo mayor que la latitud de la localización, y el crecimiento del volumen acumulado produce una disminución del aporte solar a la demanda. Asimismo se observa que el crecimiento de la potencia de bombeo y del caudal total que circula por la instalación no influyen sobre el comportamiento térmico de la misma.

Finalmente al comparar diversos arreglos de la instalación manteniendo el caudal total de circulación, se verifica que los equipos en serie provocan un crecimiento de la fracción de energía solar que cubre la demanda térmica hasta 0,826 al colocar de ese modo cuatro baterías. En estas condiciones se aumenta la energía solar térmica entregada, y se disminuye la energía auxiliar necesaria para el calentamiento del agua. Sin embargo debe recalarse que en estas configuraciones es mayor la potencia necesaria de bombeo debido al mayor caudal circulante por cada colector y al posicionamiento de las baterías en serie.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Nacional del Litoral por el apoyo recibido para realizar este trabajo.

REFERENCIAS

- Albizzati E. (2012). Energía solar térmica: principios básicos y aplicaciones tecnológicas. Centro de Publicaciones de la Universidad Nacional del Litoral, Santa Fe, Argentina, 150 p.
- Albizzati E. (2016). Evaluación de la sustentabilidad de instalaciones solares con colectores de placa plana y de tubos evacuados. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 32, 315-322.
- ANSI/ASHRAE 93 (2010) Methods of testing to determine the thermal performance of solar collectors, American National Standards Institute /American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers.
- DiOrio N., Christensen C., Burch J., Dobos A. (2014). Technical Manual for the SAM Solar Water Heating Model. <https://sam.nrel.gov/resources>.
- Duffie J. A., Beckman W. A. (2013). Solar engineering of thermal processes. 4th ed., J. Wiley & Sons, Hoboken, NJ, USA, 910 p.
- EnergyPlus (2017). EnergyPlus Weather Data. <https://energyplus.net/weather>.
- Frein A., Calderoni M., Mott M. (2014). Solar thermal plant integration into an industrial process. *Energy Procedia*, 8, 152-1163.
- Kalogirou S. (2014). Solar energy engineering: processes and systems, 2nd ed., Elsevier/Academic Press, Burlington, MA, USA, 840 p.
- Mamouri S., Bénard A. (2018). New design approach and implementation of solar water heaters: a case study in Michigan. *Solar Energy*, 162, 165-177.
- REN21, Renewables 2018 Global status report (2018). REN21, <http://www.ren21.net/status-of-renewables/global-status-report>.
- Yan C., Wang S., Ma Z., Shi W. (2015). A simplified method for optimal design of solar water heating systems based on life-cycle energy analysis. *Renewable Energy*, 74, 271-278.
- Zainine M., Mezni T., Dakhlaoui M., Guizani A. (2017). Energetic performance and economic analysis of a solar water heating system for different flow rates values: a case study. *Solar Energy*, 147, 164-180.

ABSTRACT

In this work, medium scale solar systems for water heating with System Advisor Model software are simulated. The most important variables that are charged in the program are solar radiation, local meteorological data, demand profile, hot water temperature, and technical information about the solar collectors and the storage tank. The results indicate that for an installation of selective flat collectors with all batteries in parallel, 9330 L of water per m² of collector are heated to 60 °C, which represents 81.8 % of the annual thermal demand. In addition, the optimum inclination of the collectors is greater than the latitude of Santa Fe and an increase in the accumulated volume decreases the contribution of solar energy. Finally, if the total circulation flow is maintained, it is verified that by placing four batteries in series the solar contribution is 82.6%, the solar thermal energy delivered increases and the auxiliary energy for heating decreases. In these configurations the power for pumping is greater due to the increase of flow rate in each collector and the arrangement of batteries in series.

Keywords: solar, heating, water, collectors, energy.