

DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UNA INSTALACIÓN SOLAR EN UN PROCESO PRODUCTIVO

Enrique Albizzati

Facultad de Ingeniería Química - Universidad Nacional del Litoral
Santiago del Estero 2654 - 3000-Santa Fe-Argentina
Tel.: 54 0342 4571160 - albizzati@fiq.unl.edu.ar

Recibido:17-03-20; Aceptado: 12-05-20; Publicado online:30-07-20.

RESUMEN.- Se diseña un sistema solar con convección forzada para calentamiento agua en un proceso productivo. La instalación tiene 40 m², 20 colectores planos selectivos y un tanque de almacenamiento de 3 m³. Cuando se simula con el software System Advisor Model los resultados anuales indican que se cubre el 83,5% de la demanda y la eficiencia térmica es 12,4 %. Luego para la misma demanda, pero aumentando las temperaturas de las corrientes de suministro y retorno, disminuyen la energía termosolar, el aporte solar y la eficiencia térmica. Si se duplica la demanda, modificando el tiempo de operación o el caudal de agua caliente, aunque el aporte solar es menor crecen la energía suministrada y la eficiencia. Se verifica además que si el proceso requiere mantenimiento térmico es máxima la energía termosolar suministrada anualmente, pero la cobertura solar es mínima (46,6%), y se alcanza el mayor valor en la eficiencia de la instalación (24,0 %).

Palabras claves: solar, energía, proceso, agua, calentamiento.

DESIGN AND SIMULATION OF A SOLAR INSTALLATION IN A PRODUCTIVE PROCESS

ABSTRACT.- A solar system with forced convection for heating water in a productive process is designed. The installation has 40 m², 20 selective flat collectors and a 3 m³ storage tank. When is simulated with the System Advisor Model software, the annual results indicate that 83.5% of the demand is covered and the thermal efficiency is 12.4%. Then, for the same demand but increasing the temperatures of the supply and return currents, the solar thermal energy, the solar contribution and the thermal efficiency decrease. If the demand is doubled, modifying the operating time or the flow of hot water, although the solar contribution is less, the energy supplied and the efficiency grow. It is also verified that if the process requires thermal maintenance, the termosolar energy supplied annually is maximum, but the solar coverage is minimal (46.6 %), and the highest value in the efficiency of the installation is reached (24.0 %).

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

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años se ha observado una marcada tendencia a incorporar las energías renovables y no convencionales en la matriz energética mundial, debido a las incertidumbres relacionadas con el futuro de las fuentes tradicionales y la contaminación ambiental que han provocado el cambio climático (IRENA, 2019; REN 21, 2019).

La energía solar es un abundante recurso, existiendo asimismo un amplio conjunto de tecnologías para su aprovechamiento en todos los niveles de temperatura (Albizzati, 2012; Duffie y Beckman, 2013; Kalogirou, 2014). La energía solar térmica puede aplicarse en instalaciones de servicios y de producción, plantas industriales, sistemas sanitarios de hospitales y complejos habitacionales, pertenecientes al sector público y privado.

El aprovechamiento de la energía termosolar implica no solo reducir la dependencia de los combustibles tradicionales,

sino también 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. Se observa que a la determinación de la performance térmica de toda instalación solar deberá seguir el análisis de su impacto ambiental y de su factibilidad económica contemplando su vida útil.

Hay que tener en cuenta que las tecnologías más confiables son las desarrolladas para bajas temperaturas, y utilizan colectores solares planos y de tubos evacuados, habiéndose ya reconocido que los primeros tienen mayor durabilidad y los últimos generan energía térmica más eficientemente (IEA-ETSAP e IRENA, 2015; Lauterbach et al., 2014). En lo que respecta al calentamiento solar de agua, en el año 2018 se contabilizó una capacidad en todo el mundo de 480 GW, especialmente para fines residenciales (REN21, 2019).

Por otra parte, en Europa, Estados Unidos y regiones de los países en desarrollo se ha comprobado que una importante fracción de la demanda del calor industrial se puede cubrir con energía solar (Kumar et al., 2019; Solar Payback, 2017). El sector industrial consume en el mundo alrededor del 35 % del consumo total de energía, siendo el 30 % energía térmica por debajo de los 150 °C, el 22% corresponde al rango entre 150-400 °C, y el 48 % supera los 400°C de temperatura. Los procesos y servicios en los que se usa la radiación solar para calentar agua son el precalentamiento de la alimentación para calderas, higiene de equipos e instalaciones y calor para operaciones en tinas, baños y recipientes (Farjana, 2018; Mekhilef et al., 2011; Sharma et al., 2017). Considerando este campo muchas publicaciones presentan estudios en diversas escalas y modalidades productivas, empleando diferentes herramientas y software para la evaluación de la performance de las instalaciones solares (Abdel-Dayem et al., 2001; Frein et al., 2014; Kalogirou, 2003; Quijera et al., 2011; Suresh y Rao, 2017). En este trabajo se diseña un sistema solar de mediana escala para calentamiento de agua en un proceso productivo cuya demanda térmica es variable durante el día y a lo largo del año. Se simula el mismo con el software System Advisor

Model (SAM), y se determinan la radiación solar aprovechada, la temperatura del agua suministrada, la energía termosolar aportada y los consumos energéticos complementarios. Luego se analiza en la instalación modular el efecto de variables relacionadas con la demanda térmica del proceso sobre la contribución de la energía solar, computando la fracción solar de la demanda térmica cubierta, los consumos de energía complementarios y la fracción aportada de la energía total.

2. MATERIALES Y MÉTODO

2.1 Integración de la energía solar.

En la Tabla 1 se muestran procesos y servicios donde potencialmente es aplicable la energía termosolar, observándose que los mismos abarcan los mismos varios sectores industriales. Las áreas que poseen mayor potencial son las industrias de alimentos y bebidas, fabricación de materiales o piezas metálicas, procesos químicos y plantas para lavado y limpieza (Farjana, 2018; Kumar et al., 2019; Sharma et al., 2017).

Tabla 1. Aplicaciones industriales de la energía solar térmica.

INDUSTRIA	Alimenticia Bebidas Metalúrgica	Alimenticia Bebidas Química Textil	Alimenticia Bebidas	Alimenticia Papelerera Química	Alimenticia Bebidas Maderera Papelerera	Alimenticia Maderera Papelerera Textil
PROCESO O SERVICIO	Lavado y limpieza	Calentamiento y calefacción	Pasteurización y esterilización	Concentración y evaporación	Cocción	Secado
TEMPERATURA DE OPERACIÓN	40 - 70 °C	30 - 90 °C	60 - 120 °C	40 - 120 °C	90 - 170 °C	70 - 220 °C

Una vez identificado el proceso o servicio industrial, se requiere integrar la energía solar aplicando una metodología para dimensionar y configurar las instalaciones considerando las necesidades propias de la producción y el uso de las otras fuentes de energía que lo abastecen. Para ello se están desarrollando diferentes procedimientos y herramientas, según la localización geográfica y el tipo de aplicación que se planifica.

En general se han priorizado las aplicaciones: producción de agua caliente para lavar y limpiar, calentamiento de agua para generación de vapor, calor para procesos en recipientes y secado por convección con aire caliente. Se pueden contemplar las industrias que presentan el mayor consumo de energía, así como los casos en que se dispone de fluidos

que retornan de un proceso o servicio a una temperatura relativamente alta. Por lo antes expresado el calentamiento solar de agua se puede aplicar para abastecer procesos térmicos donde se opera durante un tiempo predeterminado, se pueden aprovechar corrientes de retorno y el nivel de temperatura no es muy elevado.

2.2 Características de la instalación solar.

La instalación solar modular a diseñar se localizará para este estudio en Santa Fe, Argentina, y en la misma el agua circula por convección forzada entre los colectores solares y el tanque acumulador, en un circuito que posee principalmente bombas, un intercambiador de calor y un controlador que gobierna la captación de la radiación solar. (Fig. 1).

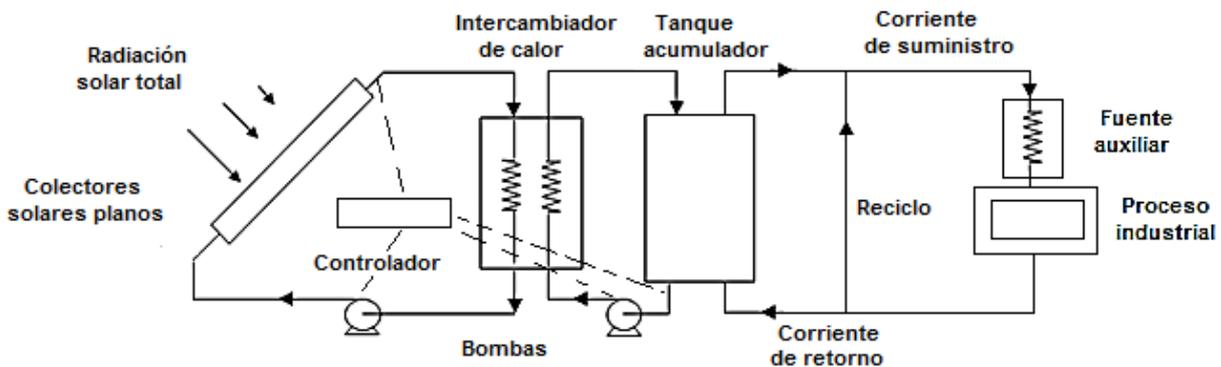


Fig. 1. Esquema para integración de la instalación solar.

Los colectores adoptados en este estudio son de placa plana. En éstos la radiación solar se transmite por una cubierta de vidrio semitransparente, una parte se absorbe en una placa de aluminio recubierta con un material selectivo, y convertida en energía térmica se transfiere al agua que circula por tubos de cobre. Entre la placa y la cubierta hay una cámara de aire, se utiliza un aislante térmico para evitar las pérdidas de calor, y una caja de chapa metálica contiene todos los componentes (Albizzati, 2012; Duffie y Beckman, 2013; Kalogirou, 2014).

El sistema que se ha propuesto posee dos fuentes de energía complementarias consistentes en el suministro de energía auxiliar con gas natural para completar los requerimientos térmicos demandados, y el empleo de electricidad para bombeo en el circuito hidráulico.

2.3 Descripción del software SAM.

Para calcular la radiación solar incidente sobre los colectores y evaluar el comportamiento del sistema se emplea el software SAM. Este simulador fue desarrollado por el National Renewable Energy Laboratory (USA) para la planificación y evaluación de proyectos de energías renovables, así como para la investigación académica y ha sido verificado mediante la aplicación de otros modelos más complejos como TRNSYS (DiOrio et al., 2014).

El modelo formulado para calentamiento de agua permite modificar la localización geográfica, los perfiles de la demanda, las características del colector, y muchas otras variables. Para su utilización se deben cargar valores horarios de la radiación solar en el plano horizontal, y datos climáticos correspondientes al lugar donde está el sistema.

SAM tiene varias opciones para hallar la radiación recibida por los colectores solares (I_T), partiendo de la radiación solar global (I), la radiación directa (I_D) y/o la radiación difusa (I_d), todas en el plano horizontal.

El programa es dinámico y genera 8760 valores horarios, relacionados fundamentalmente con el aporte de energía térmica de origen solar y la temperatura del agua. Se puede obtener también otra información horaria, mensual y anual, seleccionando en forma apropiada las entradas y salidas que se incluyen en el software.

En lo que respecta a la demanda periódica de energía térmica (Q_d), se estima con la masa de agua total (M), el calor específico del agua (C_p), la temperatura del agua caliente (T_c) y la temperatura del agua que retorna del proceso (T_r):

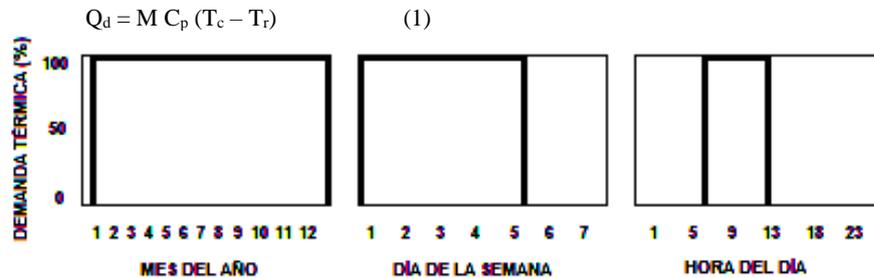


Fig. 2. Demanda térmica del proceso.

La temperatura del proceso es 45°C. En función de las necesidades establecidas para el abastecimiento, la

En la instalación los colectores solares convierten una parte de la radiación recibida; hay pérdidas de calor en las cañerías y el tanque acumulador, y el intercambiador tiene una eficiencia menor al 100 %.

Luego desde el tanque se suministra una cantidad Q_e de energía térmica de origen solar y cuando es necesario se usa energía auxiliar (Q_a) con el fin de completar la demanda térmica.

Entonces:

$$Q_d = Q_e + Q_a \quad (2)$$

Asimismo, la fracción aportada por la energía solar para cubrir la demanda térmica resulta:

$$F_s = Q_e / Q_d \quad (3)$$

Se debe tener en cuenta para la evaluación que también se consume energía eléctrica en las bombas (P_b), entonces la fracción solar realmente aportada es:

$$F_a = (Q_e - P_b) / Q_d \quad (4)$$

2.4 Consideraciones para el diseño.

Para diseñar la instalación solar es necesario utilizar la fracción anual F_s , y la eficiencia térmica (E_s), que es el cociente entre la energía solar aportada y la radiación total solar incidente. Esta radiación es el producto entre la radiación anual por unidad de superficie (ΣI_T), el área de cada colector solar (A_c) y el número (N_c) de colectores.

$$E_s = Q_e / (N_c A_c \Sigma I_T) \quad (5)$$

En el diseño del sistema se adoptan previamente valores de F_s y E_s , y después se estima el área de captación mediante:

$$N_c A_c = F_s Q_d / (E_s \Sigma I_T) \quad (6)$$

El área que se fija para la instalación se determina en función del tamaño de los colectores adoptados, y debe tener un valor próximo al estimado previamente.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Requerimientos del proceso productivo.

El proceso productivo requiere de seis horas al día y se realiza cinco días de la semana. Como no se trabaja en la primera quincena de enero se lleva a cabo durante 250 días en el año (Fig. 2).

temperatura fijada para el agua caliente es 75 °C, la temperatura de la corriente de retorno es 50 °C y el caudal

circulante es 0,072 kg/s. El agua caliente circula por un intercambiador de calor que alimenta térmicamente el recipiente donde transcurre el proceso, siendo la temperatura de la corriente de salida 5° C más alta que la necesaria en el mismo. Si el sistema solar suministra agua a menos de 75 °C, esta temperatura se alcanza mediante la fuente térmica auxiliar. Cuando la temperatura de la corriente que sale del tanque es mayor a 75 °C la corriente se mezcla con una parte de la corriente de retorno para lograr el nivel térmico fijado.

3.2 Dimensionamiento de la instalación.

Una vez localizado el sistema solar, se cargan en el programa SAM la radiación solar directa y difusa horizontal

$$I_T = (I_D + I_d A_i) R_D + I_d (1 - A_i) (1 + \cos B)/2 [1 + (I_D/I)^{1/2} \sin^3 (B/2)] + I_r (1 - \cos B)/2 \tag{7}$$

La Fig. 3 presenta los valores horarios de la radiación solar total que incide sobre los colectores, calculados con $r=0,20$. La radiación total incidente supera los 1000 W/m² en primavera y verano, pero en otras épocas del año se también alcanzan valores significativos, que son superiores a 800 W/m².

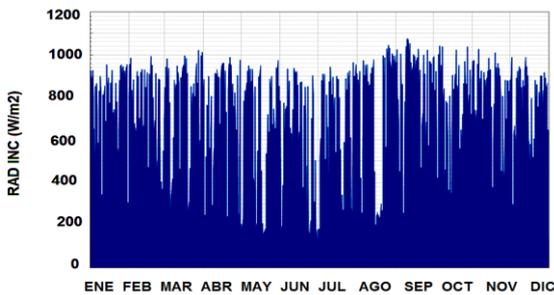


Fig. 3. Radiación solar horaria sobre los colectores.

En la Fig. 4 está representada la radiación solar promedio que incide sobre los colectores durante el día y en cuatro meses representativos del año. Se observa que la radiación incidente es alta y como es esperable los valores mínimos se encuentra para el mes de junio.

junto con otros registros climáticos, que están disponibles para América del Sur-WMO Región 3-Argentina Typical Meteorological Year (EnergyPlus, 2017).

Los colectores solares se posicionan inclinados un ángulo $B = 35^\circ$ mirando al norte, calculándose la radiación incidente con el modelo anisotrópico HDKR (Duffie y Beckman, 2013). Éste contempla el índice de anisotropía (A_i), el cociente entre la radiación directa entre los planos inclinado y horizontal (R_D), y la reflectividad de los alrededores (r):

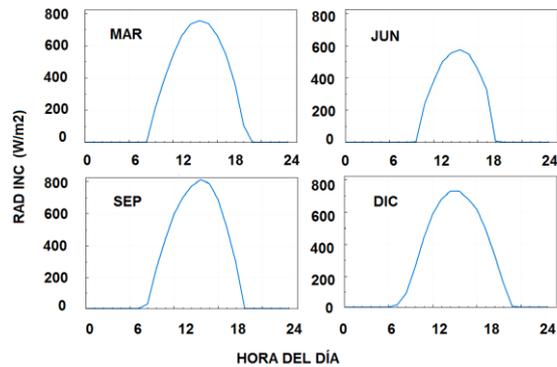


Fig. 4. Radiación solar promedio sobre los colectores.

Al estimar el número de colectores de la instalación, se adoptan valores relativamente bajos de la eficiencia E_s , ya que no va a operarse durante todos los días del año, y la Para hallar el área de captación, se suponen valores de la fracción solar y de la eficiencia, siendo la radiación incidente anual es 1899,9 kWh/m² (6839,6 MJ/m²) y la demanda anual es 11326,3 kWh (40774,7 MJ).

Considerando los resultados que se obtienen en la Tabla 2 el área total adoptada es 40 m², y como el área de cada colector es 2 m² el número de colectores es veinte.

misma está referida a la radiación solar total que potencialmente se podría convertir en energía térmica.

El sistema solar modular se caracteriza entonces mediante los datos técnicos que se muestran en las Tablas 3 y 4.

Tabla 2. Cálculo del área de colectores solares.

RADIACIÓN SOLAR TOTAL ANUAL		DEMANDA TÉRMICA ANUAL		APORTE SOLAR TÉRMICO ANUAL	EFICIENCIA TÉRMICA ANUAL	ÁREA TOTAL DE LOS COLECTORES
(kWh/m ²)	(MJ/m ²)	(kWh)	(MJ)	(%)	(%)	(m ²)
1899,9	6839,6	11326,3	40774,7	60,0	15,0	23,8
					12,0	29,8
				70,0	12,0	34,8
					10,0	41,7
				80,0	10,0	47,7
					8,0	59,6

Tabla 3. Datos técnicos de los colectores solares.

ÁREA TOTAL DE LOS COLECTORES	INCLINACIÓN DE LOS COLECTORES	PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS DE LOS COLECTORES		
		Fr Eo	Fr Uc	CAUDAL CIRCULANTE
(m ²)	(°)	(-)	(W/m ² °C)	(kg/s m ²)
40	35	0,70	4,50	0,020

Tabla 4. Datos técnicos de componentes de la instalación solar.

VOLUMEN DEL TANQUE	COEFICIENTE DE PÉRDIDAS DEL TANQUE	LONGITUD TOTAL DE LAS CAÑERÍAS	RESISTENCIA TÉRMICA DE LAS CAÑERÍAS AISLADAS	EFICIENCIA DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR
(m ³)	(W/m ² °C)	(m)	(m ² °C/W)	(%)
3	1	120	0,75	80

Los parámetros de los colectores $F_R E_o$ y $F_R U_c$ 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, siendo dependientes del caudal másico de agua por unidad de área de captación (ANSI/ASHRAE 93, 2010).

Las baterías que conforman la instalación solar tienen cinco colectores cada una, y están configuradas todas en paralelo (Fig.5).

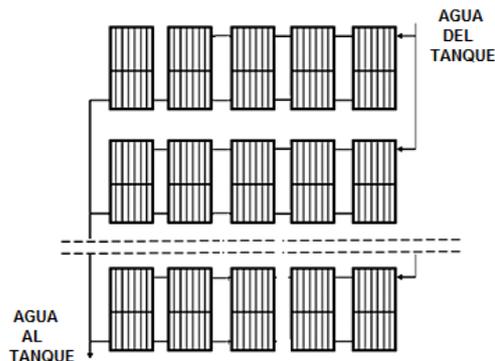


Fig. 5. Esquema de la configuración de los colectores.

El caudal de agua circulante por los colectores es relativamente bajo y el caudal total en la instalación es de 0,40 kg/s. Cuando el sistema opera con un caudal diferente al tabulado los parámetros se corrigen para la simulación; solo si hay N equipos en serie y el caudal que circula es N veces el valor contemplado, éstos no se modifican (Duffie y Beckman, 2013; Oonk et al., 1979).

El tanque acumulador se dimensiona fijando 75 L/m² de área de colección, y para el circuito hidráulico se determinaron además las dimensiones de las cañerías, de las aislaciones y un consumo máximo de 190 W para la bomba.

3.3 Aporte solar térmico de la instalación.

Como resultado de la aplicación del software SAM, la cobertura de la demanda térmica es del 83,5 % y la eficiencia térmica es 12,4 % en el año.

Se encuentra también que anualmente son necesarios 1870,5 kWh (6733,8 MJ) de energía adicional para completar el suministro de calor y 517,4 kWh (1862,6 MJ) son consumidos para bombear el fluido, por lo que la contribución solar efectiva es 78,9 %.

En la Fig. 6 se observan los valores de la energía térmica promedio que es entregada por los colectores solares en cuatro meses representativos del año. Al mediodía, los máximos corresponden a marzo y setiembre (10,0 kW), mientras que el mínimo (6,5 kW) a junio. La energía realmente disponible es menor en la práctica, ya que hay pérdidas de calor en las cañerías y tanque acumulador.

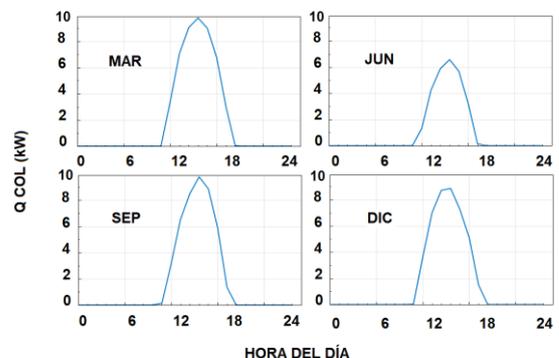


Fig. 6. Energía térmica promedio proveniente de los colectores.

La Fig. 7 muestra la temperatura del agua horaria promedio del tanque. En éste se supone que existe estratificación alcanzándose generalmente valores de la temperatura que superan los 85 °C, salvo durante los meses del invierno.

Por otra parte en la Fig. 8 se presenta el aporte mensual de energía termosolar proveniente de la instalación. Se nota que el proceso productivo no se lleva a cabo en la primera quincena de enero. Descartando dicho mes, los valores mínimo y máximo aportados son 640,6 kWh (2306,2 MJ) y 963,9 kWh (3470,0 MJ), en julio y noviembre respectivamente.

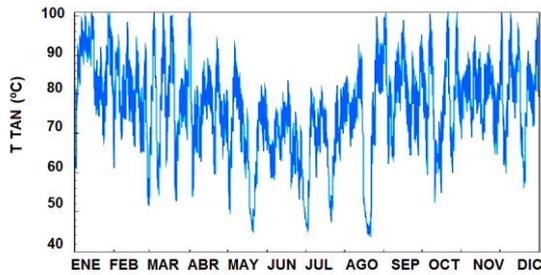


Fig. 7. Temperatura del agua horaria promedio en el tanque.

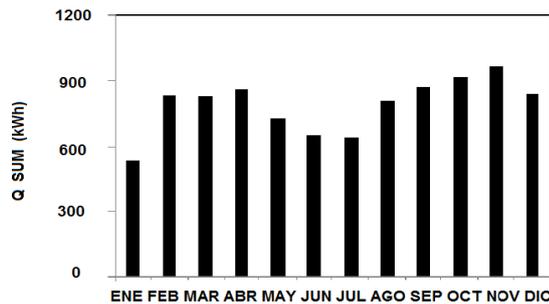


Fig. 8. Energía solar térmica mensual suministrada.

En vista de la importancia que tiene el consumo de las energías complementarias, en las Fig. 9 y 10 se verifica que en invierno es muy elevado el consumo de energía térmica auxiliar y disminuye la potencia necesaria para la circulación del fluido.

Además, aunque en setiembre el consumo de energía auxiliar es mínimo frente al de los otros meses, la electricidad para bombeo posee valores similares a los de marzo y diciembre.

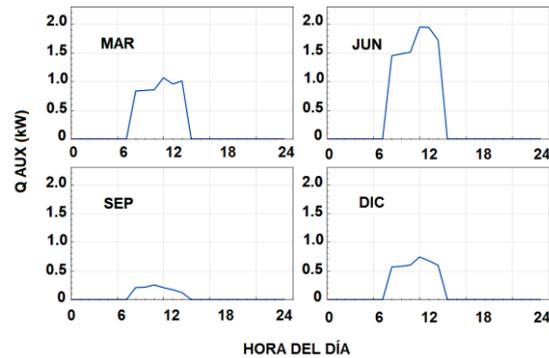


Fig. 9. Consumo de energía térmica auxiliar promedio.

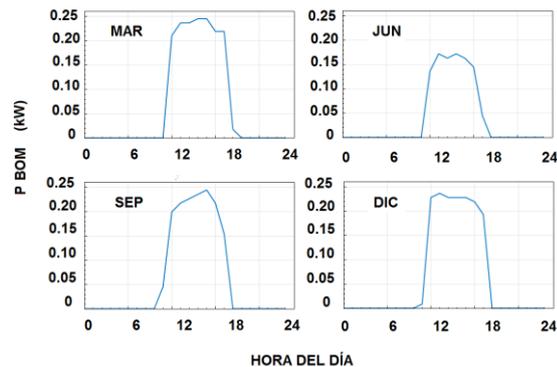


Fig. 10. Consumo de energía eléctrica promedio para bombeo.

3.4 Efectos de la demanda térmica.

A continuación se computan los efectos que produce la demanda en la instalación modular cuando se modifican las temperaturas, el caudal y/o el tiempo de suministro del agua caliente al proceso (Tabla 5).

Tabla 5. Demanda térmica de la instalación.

CASO	TIPO DE SUMINISTRO	TEMPERATURA DE SUMINISTRO	TEMPERATURA DE RETORNO	CAUDAL SUMINISTRADO
		(°C)		(kg/s)
I	A	50	75	0,072
II	A	70	95	0,072
III	A	50	75	0,144
IV	B	50	75	0,072
V	C	50	75	0,144-0,022

En los tipos de suministro A y C el tiempo del proceso es de seis horas, pero en el caso IV (B) es de doce horas. Solamente en el caso V (C) se contempla un suministro de energía térmica adicional mediante agua caliente, que es el 15% de la demanda original. Este suministro tiene como objetivo mantener una temperatura mínima, compensando las pérdidas calóricas cuando el proceso no se lleva a cabo. (Figura 11).

El caso I es el analizado anteriormente, y en los casos III-V, estudiados crece la demanda térmica con la consiguiente reducción del aporte anual de energía solar térmica (Tabla 6).



Fig. 11. Demanda térmica con mantenimiento.

Tabla 6. Efectos de la demanda sobre el aporte solar.

CASO	ENERGÍA TÉRMICA ANUAL DEMANDADA		ENERGÍA TÉRMICA SOLAR ANUAL SUMINISTRADA		APORTE SOLAR TÉRMICO ANUAL (%)	EFICIENCIA TÉRMICA ANUAL (%)
	(kWh/m ²)	(MJ/m ²)	(kWh/m ²)	(MJ/m ²)		
I	283,2	1019,5	236,4	851,0	83,5	12,4
II	283,2	1019,5	144,6	520,6	51,1	7,6
III	566,3	2038,7	416,7	1500,1	73,6	21,9
IV	566,3	2038,7	350,2	1260,7	61,8	18,4
V	977,5	3518,8	455,4	1639,5	46,6	24,0

En el caso II por requerimientos del proceso productivo se aumenta la temperatura de las corrientes de suministro y de retorno, y aunque prácticamente se mantiene el valor de la demanda son muy significativos los decrecimientos del aporte y de la eficiencia solar térmica. La energía térmica solar anual suministrada por unidad de superficie de captación es mínima e igual a 144,6 kWh/m² (520,6 MJ/m²), debido a la menor captación de los colectores y a que las pérdidas de calor de la instalación son mayores a medida que se incrementa la temperatura.

Si aumenta solo el caudal de agua (caso III) se produce un crecimiento de la energía solar térmica suministrada y de la eficiencia de la instalación. Se alcanzan valores anuales de 416,7 kWh/m² (1500,1 MJ/m²) y 21,9 % respectivamente al

duplicar el caudal de fluido, pero el aporte térmico solar baja al 73,6 %.

En el caso IV el suministro se realiza durante doce horas y aunque la demanda es igual al caso anterior, todos los indicadores relacionados con la contribución de la energía solar que están tabulados son menores.

Cuando se incorpora el mantenimiento térmico al caso III (caso V) el aporte solar a la demanda prevista es igual al 46,6 %, y se obtienen 455,4 kWh/m² (1639,5 MJ/m²), el valor más alto de la energía termosolar suministrada y 24,0 % el mayor de la eficiencia de la instalación.

Tabla 7. Efectos de la demanda sobre la energía total.

CASO	ENERGÍA TÉRMICA SOLAR ANUAL SUMINISTRADA		ENERGÍA TÉRMICA ANUAL AUXILIAR		ENERGÍA ELÉCTRICA ANUAL PARA BOMBEO		APORTE SOLAR EFECTIVO ANUAL (%)
	(kWh)	(MJ)	(kWh)	(MJ)	(kWh)	(MJ)	
I	9455,8	34040,9	1870,5	6733,8	517,4	1862,6	78,9
II	5784,4	20823,8	5541,9	19950,8	468,0	1684,8	46,9
III	16667,5	60003,0	5985	21546,0	546,9	1968,8	71,2
IV	14007,0	50425,2	8645,5	31123,0	576,5	2075,4	59,3
V	18216,5	65579,4	20881,5	75173,4	618,0	2224,8	45,0

Finalmente en la Tabla 7 se muestran valores de la energía solar térmica, y de las energías complementarias para cubrir la demanda e impulsar el fluido.

El consumo de energía anual para bombeo varía entre 468,0 kWh (1684,8 MJ) y 618,0 kWh (2224,8 MJ), y los aportes

solares efectivos tienen un valor mínimo de 45,0 % en el caso V, y máximo de 78,9 % en el caso I.

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 entre los más importantes para posibilitar el uso del programa.

En el trabajo se procede a diseñar un sistema solar para calentar agua que abastece un proceso productivo, con 20 colectores planos selectivos con 40 m² de superficie de captación y un tanque acumulador de 3 m³.

Al simular la instalación los resultados indican que se cubre el 83,5 % de la demanda térmica anual y la eficiencia térmica es 12,4 %. Se encuentra también que debido a la energía adicional para completar el suministro de calor y bombear el fluido, la contribución solar efectiva es del 78,9 %.

Luego se estudia el efecto de cambios en la demanda térmica prevista, modificando las temperaturas, el caudal y el tiempo de suministro del agua. Si las temperaturas de las corrientes de suministro y retorno aumentan en 20 °C, pero no se modifica el valor de la demanda, las disminuciones de la contribución y la eficiencia solar térmica son muy importantes, llegando anualmente a 51,1 % y 7,6 % respectivamente.

Si se duplica la demanda incrementando solo el caudal de agua, aunque la contribución anual disminuye aumentan la energía termosolar y la eficiencia de la instalación. Lo mismo sucede al duplicar el tiempo de operación y operar con la mitad del caudal, pero en este caso dichos indicadores son aún menores.

Cuando crece la demanda debido al mantenimiento térmico establecido para el proceso, aunque la contribución solar disminuye al 46,6 %, la eficiencia alcanza un valor máximo e igual al 24,0 %, dado el incremento de la energía solar térmica suministrada.

AGRADECIMIENTOS

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

REFERENCIAS

Abdel-Dayem A. M., Mohamad M. (2001). Potential of solar energy utilization in the textile industry-a case study. *Renewable Energy*, **23**, 3-4, 685-94.

Albizzati E. (2012). Energía solar térmica: principios básicos y aplicaciones tecnológicas. Centro de Publicaciones de la Universidad Nacional del Litoral, Santa Fe, Argentina.

0ANSI/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. Recuperado de <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.

EnergyPlus (2017). EnergyPlus Weather Data. <https://energyplus.net/weather>.

Farjana S. H., Huda N., Mahmud M. A. P., Saidur R. (2018). Solar process heat in industrial systems-A global review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **82**, 3, 2270-2286.

Frein A., Calderoni M., Mott M. (2014). Solar thermal plant integration into an industrial process. *Energy Procedia*, **8**, 152-1163.

IEA-ETSAP e IRENA (2015). Solar Heat for Industrial Processes. irena.org/publications/2015/Jan/Solar-Heat-for-Industrial-Processes.

IRENA (2019). Transforming the energy system-and holding the line on the rise of global temperatures. Recuperado de: <https://www.irena.org/publications/2019/Sep/Transforming-the-energy-system>.

Kalogirou S. (2003). The potential of solar industrial process heat applications. *Applied Energy*, **76**, 4, 337-361.

Kalogirou S. (2014). Solar energy engineering: processes and systems, 2nd ed., Elsevier/Academic Press, Burlington, MA, USA.

Kumar L., Hasanuzzaman M., Rahim N. A. (2019). Global advancement of solar thermal energy technologies for industrial process heat and its future prospects: A review. *Energy Conversion and Management*, **195**, 885-908

Mekhilef S., Saidurb R., A. Safari A. (2011) A review on solar energy use in industries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **15**, 4, 1777-1790.

Lauterbach C., Schmitt B., Vajen, K. (2014). System analysis of a low-temperature solar process heat system. *Solar Energy*, **101**, 117-130.

Oonk R, Jones D., Cole-Appel B. (1979). Calculation of performance of N collectors in series from test data on a single collector. *Solar Energy*, **23**, 535-536.

Quijera J.A., González Alriols M., Labidi J. (2011). Usage of solar energy in an industrial process. *Chemical Engineering Transactions*, **25**, 875-80.

REN21 (2019). Renewables 2019 Global status report REN21. Recuperado de: <http://www.ren21.net/status-of-renewables/global-status-report>.

Sharma A. K., Sharma C., Mullic S. C., Kandpal T. C. (2017). Solar industrial process heating: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **78**, October, 124-137.

Solar Payback (2017). Solar heat for industry. https://www.international-climate-initiative.com/fileadmin/Dokumente/2017/170530_Brochure_EN_Solar_Payback_digital.pdf.

Suresh N. S., Rao B. S. (2017). Solar energy for process heating: a case study of select indian industries. *Journal of Cleaner Production*, **151**, 439-451.