

REDUCCIÓN DEL CONSUMO ENERGÉTICO Y DE LA EMISIÓN DE GASES EN INSTALACIONES PARA EL CALENTAMIENTO SOLAR DE AGUA

E. Albizzati¹

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

Recibido: 29/07/12; Aceptado: 25/09/12

RESUMEN: El análisis del ciclo de vida se aplica para calcular las reducciones del consumo energético y la emisión de gases en instalaciones solares de calentamiento de agua. Para una instalación típica se determinan los efectos de los cambios en el consumo de agua, área, pérdida de calor e inclinación de los colectores solares. Al comparar instalaciones similares, los beneficios energéticos son mayores con gas licuado y las ventajas ambientales son mayores con electricidad. Si se aumenta la superficie de los colectores son máximos los beneficios energéticos y medioambientales evaluados en bruto, pero los beneficios netos más altos se obtienen mediante la reducción de la pérdida de calor. Los períodos de amortización energética y ambiental calculados para las instalaciones están entre siete y catorce meses aproximadamente.

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

INTRODUCCIÓN

El empleo intensivo de combustibles fósiles ha creado incertidumbre sobre la disponibilidad futura de estas fuentes de energía y ha conducido al calentamiento global, provocado por las emisiones de gases de efecto invernadero. En el marco actual, la radiación solar es uno de los recursos más importantes para modificar la matriz energética, que está dominada en muchos casos por el petróleo, el carbón y el gas natural. El uso de la energía solar es hoy una gran posibilidad en el sector doméstico y en el productivo, dado que existe un amplio y confiable conjunto de tecnologías especialmente para utilizarla como energía térmica a bajas y moderadas temperaturas (Albizzati, 2012; Kalogirou, 2009a).

Por otra parte, la generación y el uso de toda fuente de energía tiene diferentes impactos, tanto en el campo energético como en el ambiental, siendo necesario el Análisis de Ciclo de Vida (ACV). El ACV se basa en la recopilación de las entradas y salidas del sistema para luego, aplicando el procedimiento adecuado, obtener resultados que muestren sus impactos potenciales (Consoli F. et al., eds, 1993; Sociedad Pública del Gobierno Vasco, 2009). En trabajos publicados, se aplica el ACV con variados objetivos y herramientas de cálculo, determinándose los consumos y beneficios -energéticos y ambientales- del calentamiento solar de agua en viviendas (Albizzati y Arese, 2011; Kalogirou, 2009b; Hang et al., 2012; Rey-Martínez et al., 2008).

En este trabajo, se presenta una metodología para calcular la reducción del consumo energético y de la emisión de gases en instalaciones de calentamiento de agua, comparando instalaciones solar-combustible fósil con otras que usarían solamente estos combustibles. Inicialmente el procedimiento se emplea en el ciclo de vida de una instalación solar tipo, con electricidad o con gas licuado como fuente complementaria. Luego se analiza el comportamiento de otras instalaciones combinadas para hallar el efecto producido por la variación del consumo de agua diario, el área, las pérdidas de calor, y la inclinación de los colectores solares. En las instalaciones solar-electricidad y solar-gas licuado, se determinan y comparan la contribución de la energía solar a la demanda térmica, el ahorro energético, las emisiones de gases evitadas, y los períodos de amortización energético y ambiental.

CONSUMO ENERGÉTICO Y EMISIÓN DE GASES

Características de las instalaciones

La instalación tipo para el calentamiento con aporte solar se compone de dos colectores planos, un tanque de almacenamiento y cañerías de distribución del fluido, además de una fuente de energía complementaria. Los parámetros del colector solar plano adoptado para el estudio son: $F_R E = 0,70$ y $F_R U_C = 6,0 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$. E es la eficiencia óptica, F_R el factor de remoción del calor y U_C el coeficiente total de pérdidas de calor (IRAM, 1983).

Como se ve en la Tabla 1, la instalación tipo puede usar electricidad (SE-1) o gas licuado (SGL-1). En la instalación tipo los colectores solares tienen 2 m^2 de área bruta cada uno, están posicionados con 30° de inclinación al norte, y existe un tanque de almacenamiento de 240 L. El consumo de agua caliente se fija en 240 L diarios, a 45°C de temperatura, y la temperatura del agua fría es igual a 18°C .

¹ Profesor Investigador-Área Operaciones Unitarias – Facultad de Ing. Qca. - UNL

INSTALACIÓN COMBINADA		V (L)	A (m ²)	B (°)	F _R U _C (W/m ² °C)
SOLAR-ELECTRICIDAD	SE-1	240	3,6	30	6,0
	SE-2	204	3,6	30	6,0
	SE-3	240	3,6	30	4,0
	SE-4	240	5,4	30	6,0
	SE-5	240	3,6	50	6,0
SOLAR-GAS LICUADO	SGL-1	240	3,6	30	6,0
	SGL-2	204	3,6	30	6,0
	SGL-3	240	3,6	30	4,0
	SGL-4	240	5,4	30	6,0
	SGL-5	240	3,6	50	6,0

Tabla 1. Instalaciones combinadas para calentamiento de agua.

En la tabla anterior se consideran diversas modificaciones de la instalación tipo para favorecer el aporte solar a la demanda térmica, especialmente en la época en que existe menor disponibilidad del recurso, analizando su influencia en la reducción del consumo energético y las emisiones. Por ello se reduce el consumo de agua diario (V), se aumenta el área de los colectores (A), se logran disminuir las pérdidas de calor (F_R U_C), y los colectores se posicionan con un mayor ángulo de inclinación (B).

Todas las instalaciones, en la que el fluido circula por convección natural y el circuito es abierto, son similares a la presentada en el trabajo de Albizzati y Arese (2011).

Método de cálculo

La reducción del consumo energético y de la emisión de gases en una instalación de calentamiento de agua, se calcula comparando instalaciones combinadas solar-electricidad y solar-gas licuado, con otras en las que el calentamiento se llevaría a cabo usando solamente electricidad y gas licuado respectivamente.

Tanto el ahorro bruto de energía y como la no emisión bruta -que son los gases que dejan de emitirse- se deben al aporte solar durante el funcionamiento de la instalación combinada, y pueden hallarse con la expresión:

$$E_b = Q n F c_a \quad (1)$$

En la ecuación anterior, Q es la demanda térmica anual, n son los años de vida útil de la instalación y F es la fracción de la demanda térmica cubierta con energía solar. Con respecto a c_a, su valor varía si la ec. (1) se aplica el cálculo energético o a la emisión de gases, dependiendo también de la fuente de energía complementaria utilizada.

Luego, para determinar el ahorro neto de energía y la no emisión neta en cada instalación combinada, se contemplan los efectos debidos a los consumos energéticos y a las emisiones de gases en el ciclo de vida, incluyéndose los correspondientes a la instalación solar y a su funcionamiento. Entonces dichos valores netos se calculan con:

$$E_n = E_b - e_i A \quad (2)$$

e_i es energía consumida o gases emitidos por unidad de área de colectores, y A es la referida área.

Para hallar e_i en el ciclo de vida de la instalación solar se aplica la metodología del trabajo de Albizzati y Arese (2011). Se usan datos de la energía consumida y de las emisiones de los materiales involucrados en cada instalación solar (Alcorn, 2003; Hammond y Jones, 2011). Además, información de las emisiones debidas a los combustibles fósiles y del tipo de generación eléctrica en nuestro país (Alcorn, 2003; Consejo Mundial de Energía, 2004; Hammond y Jones, 2011).

El cálculo de e_i suma las contribuciones asociadas a los colectores solares (e_c), el tanque de almacenamiento (e_t), otros materiales varios (e_m) y las actividades complementarias (e_f).

$$e_i = e_c + e_t + e_m + e_f \quad (3)$$

$$e_t = e_v v_t \quad (4)$$

$$e_m = e_c x_v + (e_c + e_d) x_p \quad (5)$$

$$e_f = (e_c + e_t + e_m) x_f \quad (6)$$

En las ecuaciones escritas, e_v es el consumo energético o la emisión de gases por unidad de volumen del tanque que compone la instalación solar, y v_i es el cociente entre el referido volumen y el área de los colectores. Otras variables tienen en cuenta la participación de todos los elementos necesarios para la fabricación y funcionamiento de la instalación solar: x_v (cañerías, aislaciones y soportes), x_p (pinturas, selladores y uniones) y x_f (transporte, fabricación, montaje y mantenimiento).

Las expresiones formuladas posibilitan hallar el ahorro de energía y la emisión de gases evitada en las instalaciones combinadas. Dichos ahorros y no emisiones pueden expresarse en forma bruta o neta, y resulta de interés efectuar los cálculos por unidad de área de captación de la radiación solar.

Por otra parte, como se sustituyen combustibles tradicionales por energía solar, es muy ilustrativo calcular los períodos de amortización energética y ambiental de las distintas instalaciones solar-electricidad y solar-gas licuado.

El período de amortización energética puede definirse como el tiempo de funcionamiento necesario para recuperar la energía consumida en la instalación solar, mientras que período de amortización ambiental se computa en forma semejante, pero con la cantidad de gases de efecto invernadero emitidos. Dichos períodos se definen con:

$$P_{j1} \text{ (meses)} = 12 n e_i A / E_b \quad (7)$$

Otra forma utilizada para definir los períodos de amortización incluye en el numerador de las expresiones, los consumos o las emisiones que, durante el funcionamiento de la instalación combinada, producen los combustibles fósiles. Resulta entonces:

$$P_{j2} \text{ (meses)} = 12 n [e_i A + Q (1-F) c_a] / E_b \quad (8)$$

Con las ecs. (7) y (8) cuando $j = e$ se calcula el período de amortización energética, y cuando $j = g$, el período de amortización ambiental.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El cálculo de la radiación solar diaria promedio recibida en cada mes por los colectores utiliza los valores de las componentes directa y difusa de la radiación en el plano horizontal. La radiación solar total que reciben los colectores es la suma de la radiación directa, la radiación difusa recibida desde el cielo, y la radiación difusa reflejada por el suelo (Duffie y Beckman, 2006).

En este trabajo, las componentes directa y difusa de la radiación solar horizontal se obtienen para la ciudad de Santa Fe de la base de datos del Atmospheric Science Data Center-NASA Langley Research Center (<http://eosweb.larc.nasa.gov/sse/>).

La Tabla 2 presenta los valores de la radiación solar global promedio mensual en el plano horizontal y los resultantes del cálculo sobre los colectores solares planos posicionados a 30° al norte; se agregan además las demandas térmicas mensuales de la instalación tipo.

Mes	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Radiación global horizontal (MJ/m²)	24,70	21,82	18,14	13,61	10,84	8,89	10,15	13,39	17,50	20,30	23,76	25,02
Radiación total a 30° (MJ/m²)	22,11	21,05	19,49	16,66	15,26	13,23	14,92	17,70	19,99	20,25	21,68	21,97
Demanda térmica (MJ)	841,1	759,7	841,1	814,0	841,1	814,0	841,1	841,1	814,0	841,1	814,0	841,1

Tabla 2. Radiación solar y demanda térmica de la instalación tipo.

La contribución de la energía solar a la demanda térmica en las instalaciones combinadas, se determina con el método F-chart (Duffie y Beckman, 2006). En la Figura 1 se visualizan los aportes solares mensuales computados para la instalación tipo en Santa Fe, siendo F la fracción anual de la demanda térmica que se cubre con energía solar.

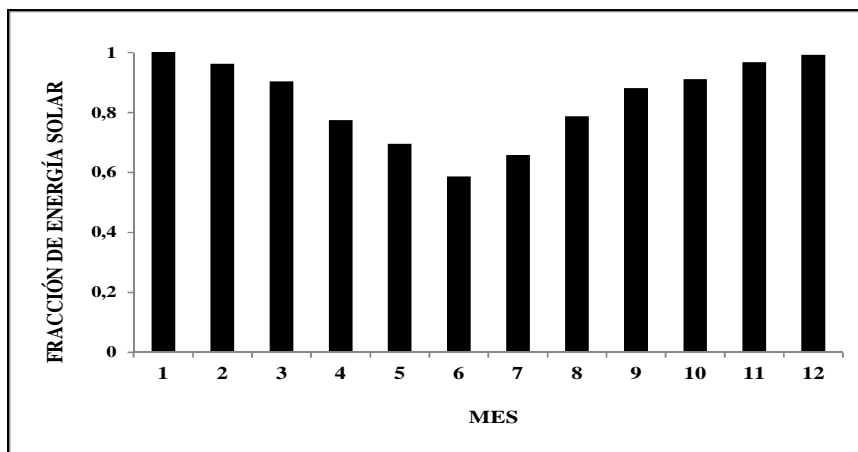


Figura 1. Aporte mensual de la energía solar a la demanda térmica.

El ahorro bruto en el consumo energético y la no emisión bruta se deben al aporte solar durante la operación de cada sistema. Al aplicar la metodología propuesta para la evaluación de los impactos energético y ambiental, la vida útil de las instalaciones solares es veinte años, y lo que se denomina no emisión, son los gases que dejan de emitirse al sustituirse los combustibles fósiles por la radiación del Sol.

Como se ve en la Tabla 3, el máximo valor de F (0,918) se encuentra en el caso que el área de colección es 5,4 m², mientras que el valor es mínimo (F= 0,812) cuando los colectores se inclinan a 50°. Al realizar el análisis de dos instalaciones similares en función de variables en bruto, son mayores los beneficios energéticos usando solar-gas licuado y mayores los beneficios ambientales con solar-electricidad.

El ahorro bruto y la no emisión bruta totales -en MJ y kg CO₂eq - son mayores si los colectores solares tienen mayor área (SE-4 y SGL-4), pero los máximos por unidad de área -en MJ/m² y kg CO₂eq/m²- corresponden a los casos donde se reduce el coeficiente de pérdidas de calor (SE-3 y SGL-3). Respecto a los valores mínimos de ahorro bruto y de no emisión bruta: en MJ y kg CO₂eq se obtienen si se reduce el consumo de agua (SE-2 y SGL-2), y en MJ/m² y kg CO₂eq/m² si área de colección es mayor (SE-4 y SGL-4).

INSTALACIÓN	F	AHORRO BRUTO		NO EMISIÓN BRUTA	
		MJ	MJ/m ²	kg CO ₂ eq	kg CO ₂ eq/m ²
SE-1	0,843	175895,6	48859,9	22049,6	6124,9
SE-2	0,889	157657,4	43793,7	19763,3	5489,8
SE-3	0,912	190186,1	52829,5	23841,0	6622,5
SE-4	0,918	191475,9	35458,5	24002,7	4444,9
SE-5	0,812	169407,1	47057,5	21236,2	5898,9
SGL-1	0,843	196520,4	54589,0	16370,1	4547,3
SGL-2	0,889	176143,7	48928,8	14672,8	4075,8
SGL-3	0,912	212486,6	59024,1	17700,1	4916,7
SGL-4	0,918	213927,6	39616,2	17820,2	3300,0
SGL-5	0,812	189271,1	52575,3	15766,3	4379,5

Tabla 3. Consumos energéticos y emisiones de gases de las instalaciones combinadas durante la operación.

La valoración del consumo energético y de la emisión de gases equivalentes a dióxido de carbono para la instalación solar tipo, se resume en la Tabla 4. Se usaron valores de e_c, e_v, c_a, x_p y x_v extraídos del trabajo de Albizzati y Arese (2011).

Luego, para determinar el ahorro neto en las instalaciones se consideran los efectos asociados a los consumos energéticos y a las emisiones de gases en todo el ciclo de vida (Tabla 5). Se abarca la información recopilada para la instalación solar propiamente dicha (Tabla 4) y la relacionada con su funcionamiento (Tabla 3), suponiendo que los valores de la última tabla se mantienen aún para la situación ideal, en la que el colector tiene las menores pérdidas de calor.

MATERIALES E INSUMOS	CONSUMO ENERGÉTICO		EMISION DE GASES	
	MJ	%	kg C02 eq	%
Colectores solares	3547,7	48,2	343,0	50,9
Tanque de almacenamiento	1117,4	15,2	110,8	16,4
Otros materiales varios	2024,7	27,5	159,3	23,6
Actividades complementarias	669,0	9,1	61,3	9,1
Total	7358,8	100	674,4	100

Tabla 4. Consumo energético y emisión de gases propios de la instalación solar tipo.

En la Tabla 5 se muestra que en dos instalaciones similares, son mayores los beneficios energéticos netos usando gas licuado, y los beneficios ambientales netos son mayores con electricidad. El mayor ahorro neto y las mayores emisiones evitadas netas - totales y por unidad de área- se alcanzan con menores pérdidas de calor (SE-3 y SGL-3). Los valores menores de esas variables corresponden a las instalaciones: SE-2 y SGL-2 (en MJ y kg C02eq) y, SE-4 y SGL-4 (en MJ/m² y kg C02eq/m²).

INSTALACIÓN	AHORRO NETO		NO EMISIÓN NETA	
	MJ	MJ/m ²	kg C02 eq	kg C02 eq/m ²
SE-1	168536,8	46815,8	21375,2	5937,6
SE-2	150298,6	41749,6	19088,9	5302,5
SE-3	182827,3	50785,4	23166,6	6435,2
SE-4	181113,7	33539,6	23058,1	4270,0
SE-5	162048,3	45013,4	20561,8	5711,6
SGL-1	189161,6	52544,9	15695,8	4359,9
SGL-2	168784,9	46884,7	13998,4	3888,4
SGL-3	205127,8	56979,9	17025,8	4729,4
SGL-4	203565,4	37697,3	16875,6	3125,1
SGL-5	181912,3	50531,2	15091,9	4192,2

Tabla 5. Consumos energéticos y emisiones de gases de las instalaciones combinadas durante el ciclo de vida.

Finalmente, los períodos de amortización energético y ambiental calculados para todas las instalaciones se listan en la Tabla 6. En la misma se nota que, aunque los valores varían según las fórmulas de cálculo usadas, se encuentran aproximadamente entre siete y catorce meses. Como es esperable, los valores de las amortizaciones son más grandes cuando se aplica la ec. (7), frente a los que se obtienen con la ec. (8).

INSTALACIÓN	P _{e1} (meses)	P _{e2} (meses)	P _{g1} (meses)	P _{g2} (meses)
SE-1	10,0	12,3	7,3	9,6
SE-2	11,2	12,7	8,2	9,7
SE-3	9,3	10,4	6,8	7,9
SE-4	13,0	14,1	9,4	10,5
SE-5	10,4	13,2	7,6	10,4
SGL-1	9,0	11,2	9,9	12,1
SGL-2	10,0	11,5	11,0	12,5
SGL-3	8,3	9,5	9,1	10,3
SGL-4	11,6	12,7	12,7	13,8
SGL-5	9,3	12,1	10,3	13,0

Tabla 6. Períodos de amortización energética y ambiental de las instalaciones combinadas.

Los mínimos de P_e y P_g son para las instalaciones combinadas que emplean gas licuado y electricidad respectivamente. Los períodos de amortización energética y ambiental son mínimos si se reducen las pérdidas de calor (SE-3 y SGL-3) y máximos cuando se aumenta el área de captación (SE-4 y SGL-4). En lo que respecta a los valores de P_e y P_g obtenidos para las instalaciones tipo (SE-1 y SGL-1), son los más cercanos a los mínimos calculados para el caso en la que las pérdidas de calor de los colectores solares son mínimas.

CONCLUSIONES

Se presenta una metodología para hallar la reducción del consumo energético y de la emisión de gases en instalaciones solares de calentamiento de agua que emplean un combustible fósil como fuente complementaria.

El procedimiento aplicado permite establecer el efecto de los cambios en el consumo de agua, el área, las pérdidas de calor, y la inclinación de los colectores solares de una instalación típica.

Cuando se comparan dos instalaciones similares, son mayores los beneficios energéticos obtenidos al usar solar-gas licuado y mayores los beneficios ambientales con solar-electricidad.

Para la situación en la que se reducirían las pérdidas de calor de los colectores, se observan los mayores beneficios energéticos y ambientales de las instalaciones combinadas.

Si se aumenta el área de colección, son máximos el ahorro de energía y las emisiones evitadas, ambos valorados en bruto, pero eso no ocurre para el caso en que se determinan los valores netos.

Los períodos de amortización energética y ambiental, aún cuando varían en función del criterio adoptado para su definición, están entre siete y catorce meses aproximadamente.

REFERENCIAS

- Albizzati E. (2012). Energía solar térmica: principios básicos y aplicaciones tecnológicas. Centro de Publicaciones de la Universidad Nacional del Litoral, Santa Fe, Argentina.
- Albizzati E. y Arese A. (2011). Calentamiento solar de agua: impacto energético y ambiental. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 15, 7.65-7.70.
- Alcorn A. (2003). Embodied energy and CO₂ coefficients for NZ buildings materials. Centre for Building Performance Research. Victoria University of Wellington, New Zealand.
- Consejo Mundial de la Energía (2004). Comparación de los sistemas energéticos utilizando ECV.
- Consoli F. et al., eds. (1993). Guidelines for life-cycle assessment: a "code of practice". Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC), Brussels, Belgium.
- Duffie J. A. y Beckman W. A. (2006). Solar engineering of thermal processes. 3rd ed. John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey, USA.
- Hammond G. y Jones C. (2011). The inventory of carbon & energy (ICE). Report BSRIA BG 10.
- Hang Y., Qu M. y Zhao F. (2012). Economic and environmental life cycle analysis of solar hot water systems in the United States. *Energy and Buildings*, 45, 2, 181-188.
- IRAM (1983). Colectores solares. Métodos de ensayo para determinar el rendimiento térmico - Norma 210002. Instituto Argentino de Normalización y Certificación.
- Kalogirou S. (2009a). Solar energy engineering: processes and systems. Academic Press, San Diego, California, USA.
- Kalogirou S. (2009b). Thermal performance, economic and environmental life cycle analysis of thermosiphon solar water heaters. *Solar Energy*, 83, 1, 39-48.
- Rey-Martínez F. J., Velasco-Gómez E., Martín-Gil J., Navas Gracia L. M. y Hernández Navarro S. (2008). Life Cycle analysis of a thermal solar installation at a rural house in Valladolid (Spain). *Environmental Engineering Science*, 25, 5, 713-724.
- Sociedad Pública del Gobierno Vasco (2009) Análisis de ciclo de vida y huella de carbono. Dos maneras de medir el impacto ambiental de un producto.

ABSTRACT

Life cycle analysis is applied to calculate the reductions of energy consumption and gas emission in solar water heating installations. The effects of the changes in water consumption, area, heat loss and tilt of solar collectors are determined for a typical installation. When comparing similar installations, the energetic benefits are greater with liquefied gas and the environmental advantages are greater with electricity. If the collectors area increases are maximums the energetic and environmental benefits evaluated in gross, but the higher net benefits are achieved by reducing heat loss. The energetic and environmental amortization times calculated for the installations are between seven and fourteen months approximately.

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