

## **SUSTENTABILIDAD DEL APROVECHAMIENTO DE ENERGÍA SOLAR CON COLECTORES DE PLACA PLANA Y DE TUBOS EVACUADOS**

Enrique Albizzati<sup>1</sup>

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 16/09/15, Aceptado 13/10/15*

**RESUMEN:** La generación y uso de los recursos energéticos producen efectos ambientales, de modo que al evaluar la aplicación de la energía solar es necesario considerar el ciclo completo de los aprovechamientos mediante el Análisis del Ciclo de Vida. En este trabajo se calculan indicadores de sustentabilidad para el calentamiento solar de agua, con electricidad como energía auxiliar. La energía térmica generada y las emisiones evitadas se determinan descontando sobre los valores brutos, los requerimientos específicos del sistema de captación de la radiación. Los valores totales máximos de la energía térmica generada y de la mitigación de emisiones se consiguen con los colectores planos, pero la generación y mitigación por año y por metro cuadrado de captación, son mayores cuando se usa el colector de tubos evacuados. La instalación con colectores planos tiene más elevados periodos de amortización energética y ambiental, pero todos los valores obtenidos son siempre muy bajos.

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

### **INTRODUCCIÓN**

Las predicciones realizadas sobre la futura disponibilidad de las energías no renovables y la contaminación ambiental provocada por los combustibles tradicionales (carbón, petróleo y gas natural) favorecen los proyectos que proponen la incorporación de fuentes energéticas renovables y no convencionales. El empleo intensivo de dichos combustibles fósiles en los países industrializados y la consiguiente emisión de gases de efecto invernadero, producen el denominado Cambio Climático Global con su secuela de daños medioambientales y socioeconómicos (IPCC, 2013; OMM, 2012).

La energía solar es uno de los recursos energéticos renovables más importantes con que se cuenta, existiendo asimismo de un amplio y confiable conjunto de tecnologías para convertirla y utilizarla como energía térmica (Albizzati, 2012a; Duffie y Beckman, 2013; Kalogirou, 2009a). En el año 2014, considerando sólo los equipos solares para calentamiento de agua se contabilizaba una capacidad para producir 406 GW térmicos en todo el mundo (REN21, 2015).

Sin embargo, dados los impactos que provocan la generación y el uso de todas las fuentes energéticas, al evaluar la energía solar se debe analizar en forma completa el sistema de aprovechamiento aplicando el Análisis de Ciclo de Vida (ACV). El ACV es un procedimiento que posibilita evaluar los impactos medioambientales debidos a un producto o servicio; al aplicar este método se deben contabilizar todas las entradas y salidas en todos los procesos que forman parte de su vida útil: desde la extracción de materias primas necesarias para su fabricación hasta su reciclaje y/o su disposición final (Consoli F. et al., 1993; Ihobe, 2009).

Un equipamiento usado comúnmente para calentar agua en viviendas se compone de los colectores solares, el tanque de almacenamiento y cañerías del fluido, más una fuente de energía auxiliar. En artículos ya publicados, se aplicó el ACV con variados objetivos y diversas herramientas de cálculo, determinándose los consumos y beneficios, tanto energéticos como ambientales, del calentamiento solar de agua doméstico (Ardente et al., 2005; Kalogirou, 2009b; Greening y Azapagic, 2014; Hang et al., 2012; Koroneos y Nanaki, 2012; Lamnatou et al., 2014; Rey-Martínez et al., 2008).

1. Profesor e Investigador-Área de Operaciones Unitarias-FIQ-UNL

En este trabajo se calcula el aporte solar y la eficiencia térmica mensual y anual de sistemas solares combinados con energía eléctrica. Luego para cada sistema se determinan la energía solar térmica generada y la emisión de gases evitados al operar con energía solar; a los valores originados por el reemplazo de la electricidad, se descuentan la energía consumida y la emisión provocada por los requerimientos propios de la instalación del sistema de captación solar. Finalmente se han estimado los períodos de amortización energética y ambiental, necesarios para recuperar la energía consumida, y los gases emitidos propios de cada instalación.

## INSTALACIONES COMBINADAS

En las configuraciones consideradas en este estudio el fluido circula por convección natural entre los colectores y el tanque acumulador. Los colectores solares están posicionados en Santa Fe (Argentina), con 30° de inclinación al norte geográfico (Figura 1).

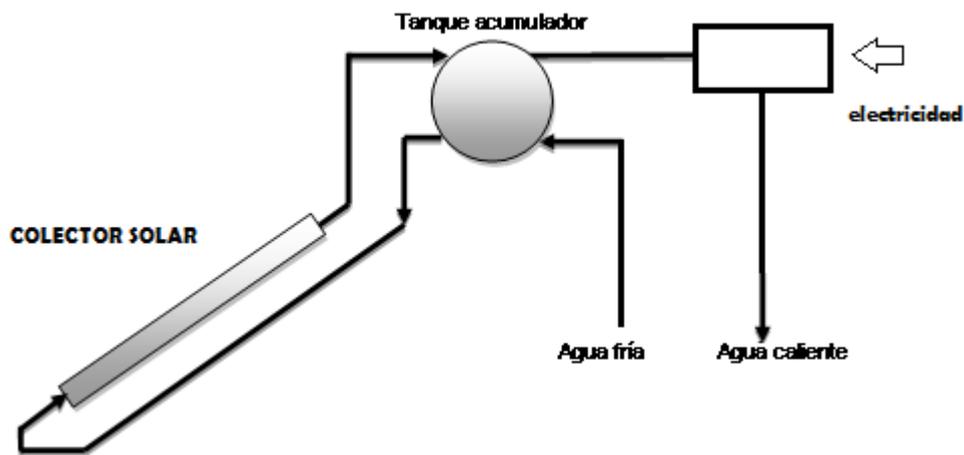


Figura 1. Esquema de la instalación combinada calentamiento de agua.

El consumo de agua doméstico se fija en 240 L diarios a 45 °C de temperatura, siendo la temperatura del agua fría 18 °C durante todo el año. Como se observa en la Tabla 1, son dos las instalaciones estudiadas, una con colectores de placa plana (SE-PP) y otra de tubos evacuados (SE-TE). Se estima que las instalaciones pueden satisfacer la demanda de una familia de 5 personas, y sus características técnicas responden a la oferta comercial existente.

INSTALACIÓN	T (L)	A (m <sup>2</sup> )	B (°)	F <sub>R</sub> E (-)	F <sub>R</sub> U <sub>C</sub> (W/m <sup>2</sup> °C)
SE-PP	240	3,6	30	0,7	6,0
SE-TE	200	2,8	30	0,7	2,0

Tabla 1. Instalaciones combinadas para calentamiento de agua.

Una de las instalaciones combinadas para el calentamiento posee dos colectores solares de placa plana de 1,8 m<sup>2</sup> cada uno, el tanque acumulador es de 240 L y su vida útil es de 20 años. En la otra, el colector solar es de tubos evacuados tiene 2,8 m<sup>2</sup>, posee un tanque de 200 L, y 15 años de utilidad.

Cada una de las instalaciones se caracteriza por el volumen de agua en el tanque (T), el área de colección (A), la inclinación de los colectores respecto al plano horizontal (B) y los parámetros propios de éstos. Dichos parámetros (F<sub>R</sub> E y F<sub>R</sub> U<sub>C</sub>) están asociados a E, la eficiencia óptica, F<sub>R</sub> el factor de remoción del calor y U<sub>C</sub> el coeficiente total de pérdidas de calor, y se determinan mediante las normas vigentes (ANSI/ASHRAE 93, 2010).

En los colectores solares planos adoptados la radiación se transmite por una cubierta de vidrio, es recibida y absorbida por una placa de acero inoxidable que la transforma en energía térmica. Esta energía se transfiere por conducción en la placa y se incorpora al fluido. El agua circula por canales

conformados entre la placa superior y otra inferior, aumentando su temperatura. Entre la placa y la cubierta hay una cámara de aire. Se utiliza un material aislante en el fondo y en los laterales, se coloca una caja de chapa galvanizada que contiene todos los elementos componentes del colector.

En el otro colector solar el agua circula por un conjunto de tubos evacuados dispuestos en paralelo. Se propone para cada tubo dos conductos concéntricos de vidrio borosilicato separados por una cámara al vacío. La radiación se transmite en el tubo exterior y se absorbe en el tubo interior, el que posee un recubrimiento superficial especialmente desarrollado al efecto. El fluido circula en U, entrando y saliendo del tanque acumulador por el extremo superior del tubo interno. Ambos tubos están cerrados por fusión en el extremo inferior y el colector tiene además una chapa reflectora debajo del conjunto de tubos de vidrio evacuados.

### APORTE SOLAR A LA DEMANDA

Para calcular la radiación solar diaria promedio recibida por los colectores se necesitan conocer los valores de las componentes directa y difusa de la radiación en el plano horizontal. La radiación se contabiliza como energía por unidad de tiempo y por unidad de área de colección. La radiación solar global promedio diario mensual ( $H$ ), es la suma de la radiación directa del sol ( $H_D$ ) y la radiación difusa del cielo ( $H_d$ ):

$$H = H_D + H_d \quad (1)$$

Las componentes directa y difusa de la radiación solar horizontal en cada mes del año se obtienen para la ciudad de Santa Fe de la base de datos NASA (NASA Atmospheric Science Data Center, 2014). La radiación solar total que reciben los colectores ( $H_T$ ) es la suma de la radiación directa, la radiación difusa recibida desde el cielo, y la radiación difusa reflejada por el suelo.

La radiación solar promedio diaria que incide sobre los colectores, se halla con el modelo propuesto por Liu-Jordan y extendido por Klein. Luego,  $H_T$  es el producto de la radiación global horizontal multiplicada por un factor  $R$ , que indica la variación de la radiación sobre los colectores con respecto a la que incide en el plano horizontal (Duffie y Beckman, 2013):

$$H_T = R H \quad (2)$$

En la Tabla 2 se presentan los valores de la radiación solar global promedio mensual en plano horizontal y los resultantes del cálculo sobre los colectores solares posicionados a  $30^\circ$  al norte geográfico.

MES	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$H$ (MJ/m <sup>2</sup> )	24,70	21,82	18,14	13,61	10,84	8,89	10,15	13,39	17,50	20,30	23,76	25,02
$H_T$ (MJ/m <sup>2</sup> )	22,11	21,05	19,49	16,66	15,26	13,23	14,92	17,70	19,99	20,25	21,68	21,97

Tabla 2. Radiación solar global horizontal y total mensual sobre los colectores solares,

La demanda de energía térmica mensual ( $Q$ ) en las instalaciones se calcula con el volumen de agua consumido ( $V$ ), la densidad del agua ( $p$ ), el calor específico del agua ( $c$ ), la temperatura del agua caliente ( $T_c$ ) y la temperatura del agua fría ( $T_f$ ):

$$Q = V p c (T_c - T_f) \quad (3)$$

El aporte de la energía solar a la demanda en las instalaciones combinadas, se determina con el método F-chart (Duffie y Beckman, 2013). En este método la fracción de la energía solar aportada en cada mes ( $f$ ), se determina con:

$$f = 1.029 Y - 0.065 X - 0.245 Y^2 + 0.0018 X^2 + 0.0215 Y^3 \quad (4)$$

En la expresión anterior X relaciona la cantidad de radiación solar incidente sobre los colectores con la demanda térmica, e Y es el cociente entre las pérdidas de energía del sistema y la citada demanda. Estos parámetros se corrigen considerando los valores de la temperatura del agua caliente, el volumen de agua en el tanque, la eficiencia óptica y el factor de remoción de calor del colector solar (Duffie y Beckman, 2013).

La fracción anual aportada por la energía solar a la demanda térmica (F) resulta de una sumatoria aplicada para los doce meses del año:

$$F = \sum (f Q)_i / \sum Q_i \quad (5)$$

A su vez, la eficiencia térmica anual de cada instalación solar ( $E_t$ ) se calcula como el cociente entre la energía solar aportada y la radiación total solar sobre los colectores en los n días de cada mes:

$$E_t = \sum (f Q)_i / A \sum (H_T n)_i \quad (6)$$

Los resultados obtenidos mediante la aplicación del método F-chart se muestran en la Tabla 3, mientras que en la Tabla 4 se visualizan los aportes solares y las eficiencias térmicas anuales que se han computado para las instalaciones. Las diferencias que se verifican en la tabla se deben a que los sistemas con colectores de placa plana tienen menores valores del aporte y de la eficiencia en los meses del año más fríos, debido al mayor valor del coeficiente de pérdidas de calor de estos colectores al compararlo con el de los tubos evacuados.

INSTALACIÓN	MES	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
SE-PP	X	4,78	4,84	5,08	5,66	6,15	6,54	6,69	6,28	5,94	5,44	5,13	4,65
	Y	2,05	1,96	1,81	1,55	1,42	1,23	1,34	1,64	1,86	1,88	2,01	2,04
	f	1,00	0,96	0,90	0,78	0,70	0,59	0,66	0,79	0,88	0,91	0,97	0,99
SE-TE	X	1,18	1,23	1,29	1,44	1,57	1,67	1,70	1,60	1,51	1,39	1,31	1,22
	Y	1,60	1,52	1,41	1,20	1,10	0,96	1,08	1,28	1,44	1,46	1,57	1,59
	f	1,00	1,00	0,94	0,83	0,77	0,68	0,75	0,86	0,95	0,96	1,00	1,00

Tabla 3. Aplicación mes a mes del método F-chart en las instalaciones.

INSTALACIÓN	RADIACIÓN ANUAL (MJ)	APORTE SOLAR (%)	EFICIENCIA TÉRMICA (%)
SE-PP	24549,7	84,3	34,0
SE-TE	19094,2	89,3	46,3

Tabla 4. Radiación incidente, aporte solar y eficiencia térmica anual de las instalaciones.

## ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA

En el ACV de las instalaciones solares se deben contemplar aquellas actividades que se llevan a cabo y que tienen la relevancia suficiente (Figura 2). El inventario del ciclo de vida o relevamiento de las entradas y salidas, sienta las bases para evaluar los impactos medioambientales, utilizándose dos categorías: el consumo energético (la energía consumida en la obtención de las materias primas, fabricación, distribución, uso y fin de vida del producto), y el cambio climático (medida de la temperatura que muestra en promedio un aumento en la temperatura de la atmósfera terrestre y de los océanos en las últimas décadas). En el cambio climático se considera el impacto de todos los gases de efecto invernadero, en equivalentes de dióxido de carbono.

En cada instalación combinada de calentamiento de agua, la generación de energía solar térmica y la mitigación de la emisión de gases se calculan comparando cada instalación con otra que usa

solamente electricidad. Los valores brutos de la generación térmica y de la mitigación que se deben al aporte solar durante el funcionamiento de la instalación combinada, se hallan con:

$$E_b = \sum Q_i N F c_a \quad (7)$$

En la ecuación anterior,  $\sum Q_i$  es la demanda térmica anual, N son los años de vida útil de la instalación y F tal como se ha expresado, es la fracción de la demanda térmica cubierta con energía solar. Con respecto a  $c_a$ , al calcular la energía térmica generada vale uno, y es diferente al determinar la mitigación de la emisión según la fuente de energía auxiliar utilizada.

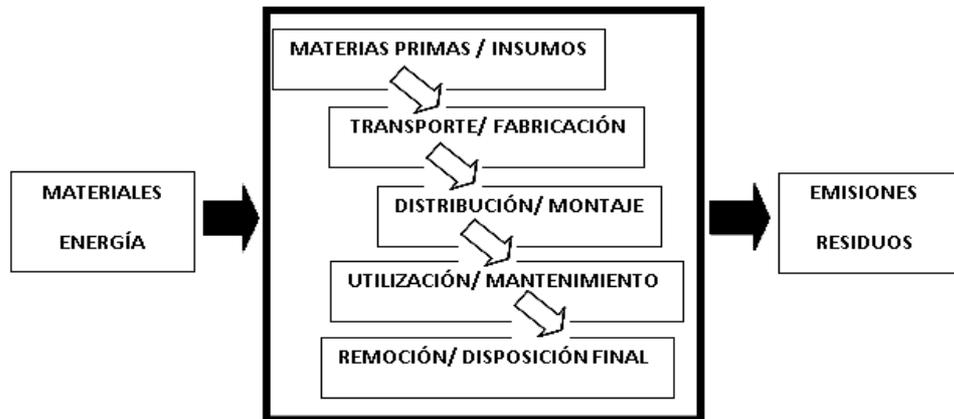


Figura 2. Esquema del ciclo de vida de la instalación solar.

Al hallar  $c_a$  se emplea información de la emisiones debidas a los combustibles fósiles y relacionada con el tipo de generación eléctrica en Argentina (Consejo Mundial de Energía, 2004). Las emisiones de gases en la conversión a energía térmica son 0,125 kg CO<sub>2</sub> eq /MJ (0,450 kg CO<sub>2</sub> eq /kW h) para la energía eléctrica, y este valor se corrige considerando una eficiencia en la conversión del 95 %.

Para determinar luego la generación de energía y la mitigación de emisiones netas en cada instalación combinada, se restan a los valores brutos los efectos debidos a los consumos energéticos y a las emisiones de gases en el ciclo de vida, correspondientes a la instalación solar y a su funcionamiento (Albizzati 2012b). Entonces dichos valores netos se calculan con:

$$E_n = E_b - e_i A \quad (8)$$

En cada situación,  $e_i$  representa la energía consumida o los gases emitidos por unidad de área de captación; en su cálculo se suman las contribuciones asociadas a los colectores solares ( $e_c$ ), al tanque de almacenamiento ( $e_t$ ), a otros materiales como cañerías, aislaciones, soportes, pinturas, selladores y uniones ( $e_m$ ) y a actividades complementarias como transporte, fabricación, montaje y mantenimiento del dispositivo solar ( $e_f$ ):

$$e_i = e_c + e_t + e_m + e_f \quad (9)$$

Para hallar el valor de  $e_i$  de la instalación solar, se usan datos de la energía consumida y de las emisiones de los materiales involucrados en cada una de ellas (Alcorn, 2003; Hammond y Jones, 2011).

Finalmente, como se sustituyen fuentes tradicionales por energía solar, es apropiado calcular los períodos de amortización energética y ambiental de las instalaciones. El período de amortización energética puede definirse como el tiempo de funcionamiento necesario para recuperar la energía consumida en el ciclo de vida de cada instalación, mientras que el período de amortización ambiental se considera en forma semejante, pero computando la cantidad de gases de efecto invernadero emitidos.

Los períodos de amortización energética y ambiental se determinan en meses con la expresión:

$$P_a = 12 e_i A / \sum Q_i c_a (2F-1) \quad (10)$$

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los valores brutos de la generación de energía y la mitigación de emisiones se deben al aporte solar durante la operación de cada sistema y al hallar los valores netos se descuentan a los valores brutos calculados, los propios de cada una de las instalaciones de captación solar adoptadas.

Al determinar los valores que se muestran en la Tabla 5, se sigue la metodología aplicada en un trabajo anterior (Albizzati, 2012b). En los colectores planos los efectos de las pinturas, recubrimientos selladores y uniones son el 10 % de la suma de los debidos a los colectores y el tanque; las actividades complementarias representan aproximadamente un 10% del total de los efectos de todos los elementos de la instalación. En lo relativo al colector de tubos evacuados ambos porcentajes aumentan al 15 %, en lo que respecta a los colectores solares, y los restantes se mantienen igual al caso anterior.

MATERIALES E INSUMOS	COLECTORES PLACA PLANA				COLECTOR TUBOS EVACUADOS			
	CONSUMO		EMISIÓN		CONSUMO		EMISIÓN	
	MJ	%	kg CO <sub>2</sub> eq	%	MJ	%	kg CO <sub>2</sub> eq	%
Colectores solares	3547,7	48,2	343,0	50,9	2525,7	41,0	179,9	38,0
Tanque de almacenamiento	1117,4	15,2	110,8	16,4	931,3	15,1	92,3	19,5
Materiales varios	2024,7	27,5	159,3	23,6	2030,3	32,9	150,1	31,7
Actividades complementarias	669,0	9,1	61,3	9,1	675,0	11,0	51,2	10,8
Total	7358,8	100	674,4	100	6162,2	100	473,5	100

Tabla 5. Consumo y emisiones propios de las instalaciones de captación solar.

Se observa en la referida tabla que en la instalación SE-PP los colectores representan el 48,2 %, del consumo de energía y el 50,9 % de la emisión de gases, mientras que 7358,8 MJ es el consumo y kg 674,4 CO<sub>2</sub> eq la emisión totales. En el equipo con tubos evacuados (SE-TE), el colector cubre el 41,0 % del consumo y el 38,0 % de la emisión; el consumo total es 6162,2 MJ y la emisión total es 473,5 kg CO<sub>2</sub> eq.

Los cálculos realizados para la generación y la mitigación netas se ven en la Tabla 6, resultando que la energía generada y la mitigación máximas se obtienen al operar con colectores planos, que son los de mayor vida útil. Por otra parte, como se observa en la tabla, la generación y la mitigación, por año y por metro cuadrado de captación solar, son mayores al usar el colector evacuado, que tiene más alta eficiencia térmica. El cociente entre la mitigación y la generación es igual a 0,127 y 0,128 kg CO<sub>2</sub> eq/MJ para los sistemas SE-PP y SE-TE respectivamente.

INSTALACIÓN	GENERACIÓN			MITIGACIÓN		
	MJ	MJ/año	MJ/m <sup>2</sup>	kg CO <sub>2</sub> eq	kg CO <sub>2</sub> eq/año	kg CO <sub>2</sub> eq/m <sup>2</sup>
SE-PP	168536,8	8426,8	46815,8	21375,2	1068,8	5937,6
SE-TE	133520,2	8901,3	47685,8	17036,5	1135,8	6084,5

Tabla 6. Energía térmica generada y mitigación de emisiones de las instalaciones.

En lo relativo a los períodos de amortización energética y ambiental, los valores mínimos son 9,0 y 5,5 meses respectivamente, para la instalación que emplea el colector de tubos evacuados, mientras que los correspondientes períodos son 12,3 y 9,0 meses al usar el colector de placa plana (Figura 3).

Los valores de los períodos de amortización son muy bajos para los dos tipos de colector empleados. Además, los cocientes obtenidos entre los períodos de amortización ambiental y energética, son 0,732 (SE-PP) y 0,611 (SE-TE).

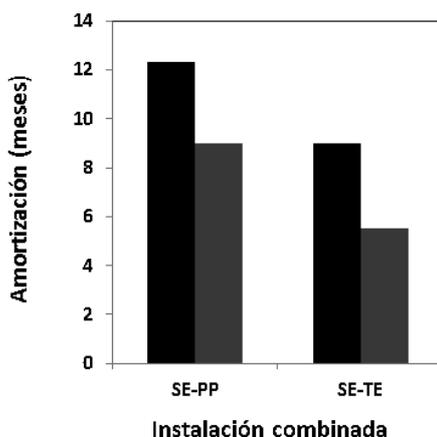


Figura 3. Períodos de amortización energética (■) y ambiental (▒) de las instalaciones

## CONCLUSIONES

Aplicando el ACV se han calculado indicadores para establecer el impacto energético y ambiental del empleo de energía solar en instalaciones familiares de calentamiento de agua, que utilizan electricidad como fuente auxiliar.

La energía térmica y la mitigación máximas totales se alcanzan con colectores planos, pero tanto la generación como la mitigación, por año y por metro cuadrado de captación solar, son más elevadas para el caso que se utiliza el colector de tubos evacuados.

La instalación con colectores de placa plana tienen períodos de amortización energética y ambiental mayores que la que posee el colector de tubos evacuados, pero siempre los valores de los citados períodos son muy bajos y menores a 12,3 meses.

## REFERENCIAS

- Albizzati E. (2012a). Energía solar térmica: principios básicos y aplicaciones tecnológicas. Centro de Publicaciones de la Universidad Nacional del Litoral, Santa Fe, Argentina, 150 p.
- Albizzati E. (2012b). Cálculos de la energía generada y la mitigación de emisiones de gases en instalaciones para calentamiento solar de agua. Energías Renovables y Medio Ambiente, 31, 9-16.
- Alcorn A. (2003). Embodied energy and CO2 coefficients for NZ buildings materials. Centre for Building Performance Research. Victoria University of Wellington, NZ [en línea]. [http://www.victoria.ac.nz/architecture/centres/cbpr/resources/pdfs/ee-co2\\_report\\_2003.pdf](http://www.victoria.ac.nz/architecture/centres/cbpr/resources/pdfs/ee-co2_report_2003.pdf).
- Ardente F., Beccali G., Cellura M., Lo Brano V. (2005). Life cycle assessment of a solar thermal collector. Renewable Energy, 30, 7, 1031-1054.
- ANSI/ASHRAE 93-2010 (2010). Methods of testing to determine the thermal performance of solar collectors. American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, Inc, Atlanta, GA, USA, 42 p.
- Consejo Mundial de la Energía (2004). Comparación de los sistemas energéticos utilizando ECV [en línea]. [http://www.worldenergy.org/wpcontent/uploads/2012/10/PUB\\_Comparison\\_of\\_Energy\\_Systems\\_using\\_lifecycle\\_2004\\_ESP\\_WEC.pdf](http://www.worldenergy.org/wpcontent/uploads/2012/10/PUB_Comparison_of_Energy_Systems_using_lifecycle_2004_ESP_WEC.pdf).
- Consoli F., Allen D., Boustead I., Fava J., Franklin W., Jensen A., de Oude N., Parrish R., Perriman R., Postlethwaite D., Quay B., Séguin J., Vigon B., eds. (1993). Guidelines for life-cycle assessment: a 'code of practice.' 1st ed. SETAC Press (Society of Environmental Toxicology and Chemistry). Pensacola, FL, USA, 73 p.

- Duffie J. A., Beckman W. A. (2013). Solar engineering of thermal processes. 4th ed. J. Wiley & Sons, Hoboken, NJ, USA, 910 p.
- Greening B., Azapagic A. (2014) Domestic solar thermal water heating: a sustainable option for the UK?. *Renewable Energy*, 63, 23-36.
- Hammond G., Jones C. (2011). Embodied carbon. The inventory of carbon & energy (ICE). Report BSRIA BG 10, Lowrie F. and Tse P. eds. A BSRIA Guide-BG 10/2011, BSRIA Ltd., Bracknell, UK, 136 p.
- Hang Y., Qu M., 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.
- Ihobe, Sociedad Pública de Gestión Ambiental, Gobierno Vasco (2009). Análisis de ciclo de vida y huella de carbono: dos maneras de medir el impacto ambiental de un producto [en línea]. <http://www.ihobe.net/Publicaciones>.
- IPCC Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (2013). Cambio Climático 2013: Bases físicas. Resumen para responsables de políticas. Contribución del grupo de trabajo I al quinto informe de evaluación del grupo intergubernamental de expertos sobre el cambio climático [en línea]. [http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg1/WG1AR5\\_SPM\\_brochure\\_es.pdf](http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg1/WG1AR5_SPM_brochure_es.pdf).
- Kalogirou S. (2009a). Solar energy engineering: processes and systems: Elsevier/Academic Press, Burlington, MA, USA, 760 p.
- Kalogirou S. (2009b). Thermal performance, economic and environmental life cycle analysis of thermosiphon solar water heaters. *Solar Energy*, 83, 1, 39-48.
- Koroneos C. J., Nanaki E. A. (2012) Life cycle environmental impact assessment of a solar water heater. *Journal of Cleaner Production*, 37, 154-161.
- Lamnatou C., Notton G., Chemisana D., Cristofari C. (2014). Life cycle analysis of a building-integrated solar thermal collector, based on embodied energy and embodied carbon methodologies. *Energy and Buildings*, 84, 378-387.
- NASA Atmospheric Science Data Center (2014). Surface Meteorology and Solar Energy. A renewable energy resource web site [en línea]. <http://eosweb.larc.nasa.gov/sse/>.
- OMM (2012). Declaración de la Organización Meteorológica Mundial sobre el estado del clima mundial en 2011 [en línea]. [http://www.wmo.int/pages/mediacentre/press\\_releases/gcs\\_2011\\_es.html](http://www.wmo.int/pages/mediacentre/press_releases/gcs_2011_es.html).
- REN 21 (2015). Renewables 2015 global status report. REN 21 Network. [en línea]. [http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2015/07/REN12-GSR2015\\_Onlinebook\\_low1.pdf](http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2015/07/REN12-GSR2015_Onlinebook_low1.pdf)
- Rey-Martínez F. J., Velasco-Gómez E., Martín-Gil J., Navas Gracia L. M., 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.

## ABSTRACT

The generation and use of energy resources produce environmental effects, so that in the evaluation of the application of solar energy is necessary to consider the complete cycle of the exploitation through the Life Cycle Analysis. In this work are calculated sustainability indicators for solar installations of water heating, with electricity as auxiliary energy. Thermal energy generated and avoided emissions are determined by discounting on gross values of energy consumption and emissions due to the specific requirements for the collection of solar radiation. The maximums total values of the thermal energy generated and the mitigation of emissions are achieved with flat plate collectors, but the generation and mitigation per year and per square meter of capture are higher when the collector of evacuated tubes is used. The installation with flat collectors has highest energetic and environmental amortization periods, but all values obtained are always very lows.

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