

## **CALENTAMIENTO SOLAR DE AGUA: IMPACTO ENERGÉTICO Y AMBIENTAL**

E. Albizzati<sup>1</sup>, A. Arese<sup>2</sup>

Facultad de Ingeniería Química-Universidad Nacional del Litoral  
Santiago del Estero 2654- 3000-Santa Fe-Argentina  
Tel.: 32 4571160-albizati@fiq.unl.edu.ar

**RESUMEN:** Mediante el análisis de ciclo de vida (ACV) se determinan los impactos energético y ambiental del empleo de la energía solar para calentamiento de agua. Se calculan las fracciones de la demanda térmica cubiertas por la radiación solar, y por gas licuado o electricidad como fuentes auxiliares, en una instalación típica. El ACV de la instalación solar considera el suministro de materias primas, proceso de fabricación, transporte, operación y mantenimiento, donde se contabilizan la energía consumida y las emisiones de gases de efecto invernadero. La metodología usada cuantifica los beneficios energéticos y ambientales resultantes de la aplicación de la energía solar para calentamiento de agua. Cuando la instalación funciona con aporte solar, los porcentajes del ahorro neto de energía y de no emisión neta son cercanos al 72%, al compararlos con los casos en que el gas licuado o la electricidad son la única fuente energética para calentamiento de agua.

**Palabras clave:** calentamiento solar, análisis de ciclo de vida, impactos energético y ambiental.

### **INTRODUCCIÓN**

La energía es un recurso que debe seguir contribuyendo al desarrollo humano, brindando opciones y oportunidades a los hombres y mujeres de nuestro planeta. Lograr que los recursos energéticos lleguen al mayor número de habitantes posible es un desafío planteado para el siglo XXI, pero debe considerarse también que la generación y el uso de la energía puede estar acompañada de efectos ambientales a nivel local, regional y mundial, que amenazan a su vez el bienestar humano y los recursos naturales.

Desarrollo Sustentable es aquel que satisface las necesidades de las generaciones presentes sin comprometer las posibilidades de las generaciones futuras para atender sus propias necesidades (Informe mundial de energía, la energía y el reto de la sostenibilidad, 2000).

En este marco se entiende como Energía Sustentable la producción y el uso de recursos energéticos de modo que respalden el desarrollo humano a largo plazo, desde el punto de vista social, económico y ambiental. Puede afirmarse que en la actualidad un gran número de las prácticas en materia de energía no están de acuerdo con el concepto de Energía Sustentable. Particularmente es notorio que el empleo intensivo de los combustibles fósiles en los países industrializados y la consiguiente emisión de gases de efecto invernadero, está provocando el denominado Cambio Climático Global con su secuela de daños medioambientales y socioeconómicos.

Por consiguiente resulta imprescindible acrecentar en el corto plazo la introducción y aplicación de nuevas tecnologías y planificaciones energéticas que respondan a las pautas establecidas para un Desarrollo Sustentable. La incertidumbre acerca de la futura disponibilidad de las energías no renovables y la contaminación ambiental provocada por esas mismas fuentes de energía, favorecen los proyectos destinados a la incorporación de las diversas fuentes renovables y no convencionales de energía.

En un informe de la Agencia Internacional de Energía (World Energy Outlook, 2010) se indica que las energías renovables deberán desempeñar un rol central para conducir al mundo hacia un entorno energético más seguro, confiable y sostenible. La rapidez con que aumenten su contribución para satisfacer las necesidades mundiales de energía depende sin duda de la solidez del apoyo gubernamental para hacer que sean competitivas en costos, y para impulsar los avances tecnológicos.

Puede decirse que entre las energías renovables y no contaminantes, la energía solar y las tecnologías aplicables para su transformación y aplicación, son algunos de los recursos más importantes con que se cuenta para modificar el hoy ya insostenible sistema energético establecido a nivel mundial. El uso de la energía solar es hoy una realidad en el sector doméstico y en el productivo, existiendo un amplio y confiable conjunto de tecnologías para convertirla y utilizarla especialmente como energía térmica a bajas y moderadas temperaturas. (Goswami, Kreith y Kreider, 2000).

Debe considerarse que los impactos de la generación y el uso de los recursos energéticos son comunes a la mayoría de los sistemas energéticos pero difieren en magnitud y significancia de acuerdo a condiciones espaciales y temporales, locales y globales. Para evaluar el impacto de las actividades relacionadas con la energía se debe considerar el ciclo completo del sistema energético, siendo aplicable el Análisis de Ciclo de Vida (ACV).

El ACV se basa en la recopilación y análisis de las entradas y salidas del sistema para luego, aplicando el procedimiento

---

<sup>1</sup> Profesor Investigador-Área Operaciones Unitarias – Facultad de Ing. Qca. - UNL

<sup>2</sup> Profesor Investigador-Área Operaciones Unitaria: 07.65 de Ing. Qca. - UNL

adecuado, obtener resultados que muestren sus impactos potenciales (Sociedad Pública del Gobierno Vasco, 2009). Dentro del marco de un ACV se seleccionan las categorías de impacto a tener en cuenta. Dos categorías de impacto que resultan muy significativas son el consumo energético (la energía consumida en la obtención de las materias primas, fabricación, distribución, uso y fin de vida del producto) y el calentamiento global (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 calentamiento global se considera el impacto de todos los gases de efecto invernadero, en equivalentes de dióxido de carbono (Consoli F. et al., eds. 1993).

En este trabajo, aplicando el ACV se analizan los impactos energético y ambiental del empleo de la energía solar en el calentamiento de agua. En una primera etapa se calcula la performance térmica de una instalación típica localizada en Santa Fe-Argentina, para determinar los valores de las fracciones de la demanda térmica mensual y anual que son cubiertas por la radiación solar y una fuente auxiliar. El ACV de la instalación solar tiene en cuenta el suministro de las materias primas necesarias, el proceso de fabricación de los componentes e intermediarios, el transporte, la operación y el mantenimiento, donde se contabilizan la energía y las emisiones de dióxido de carbono y otros gases. El procedimiento posibilita determinar los beneficios energéticos y ambientales derivados de la aplicación de la energía solar para calentamiento de agua, cuando se usan gas licuado y electricidad como fuentes complementarias de energía.

## INSTALACIÓN SOLAR TÉRMICA

La instalación típica para el calentamiento solar de agua se compone de colectores planos, un tanque de almacenamiento y cañerías de distribución del fluido, disponiéndose además de una fuente de energía térmica complementaria (Figura 1).

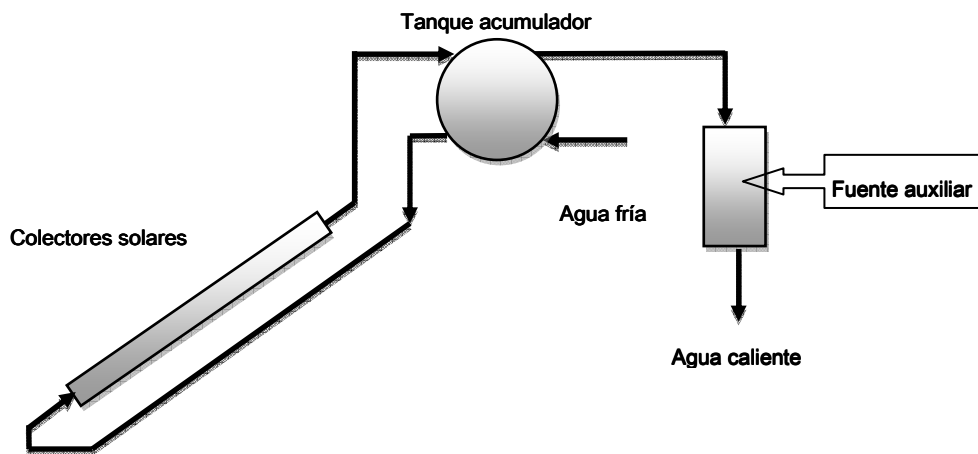


Figura 1. Esquema del calentamiento solar de agua por circulación natural.

La instalación solar a estudiar tiene dos colectores solares planos de  $2 \text{ m}^2$  de área bruta cada uno, y un tanque de almacenamiento de 215 L. Los colectores solares se posicionan con  $30^\circ$  de inclinación, mirando al norte (Figura 2). El consumo de agua caliente de la instalación se fija en 240 L diarios, a  $45^\circ\text{C}$  de temperatura, y se considera la temperatura del agua fría igual a  $18^\circ\text{C}$ .

La instalación para calentamiento de agua es pasiva ya que la circulación del fluido es por convección natural. El agua que se calienta en los colectores solares planos disminuye su densidad y asciende hacia el tanque de almacenamiento por las cañerías. Además la instalación es de circuito abierto, pues el agua que se consume circula por los colectores solares planos. La fuente auxiliar de energía está colocada en la cañería que sale del tanque acumulador y conduce el agua caliente para consumo.

La contribución de la energía solar para cubrir la demanda térmica se calcula con el método F-chart. En un año típico, se determina la fracción de la energía solar aportada en cada mes en función de dos parámetros adimensionales. Uno de ellos relaciona la cantidad de radiación solar incidente sobre los colectores con la demanda térmica, y el otro es el cociente entre las pérdidas de energía del sistema y la citada demanda. En la aplicación del método se tienen en cuenta el efecto de la temperatura del agua caliente, el volumen de agua acumulado en el tanque de almacenamiento y los parámetros característicos del colector solar (Duffie y Beckman, 2006).

La computación de la radiación solar diaria promedio recibida en cada mes por los colectores se realiza utilizando los valores de la componente directa y la componente difusa de la radiación solar en el plano horizontal. Para calcular estas componentes se parte de datos de la radiación solar global medidos en el plano horizontal en la ciudad Santa Fe. La radiación solar total que alcanza la superficie inclinada de los colectores es la suma de la radiación directa, la radiación difusa recibida desde el cielo, y la radiación difusa reflejada por el suelo (Albizzati, 1997; Duffie y Beckman, 2006).

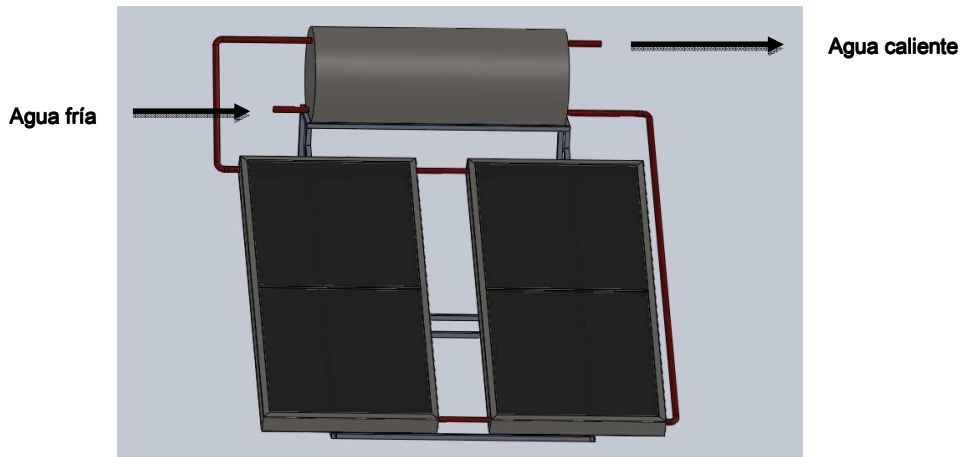


Figura 2. Instalación solar para calentamiento de agua.

### ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA

El ACV de un producto debería incluir todas las entradas/salidas de los procesos que participan a lo largo de su ciclo de vida: la extracción de materias primas y el procesado de los materiales necesarios para la manufactura de componentes, el uso del producto eventualmente su reciclaje y/o la gestión final. El transporte, almacenaje, distribución y otras actividades intermedias se incluyen cuando tienen la relevancia suficiente (Figura 3).

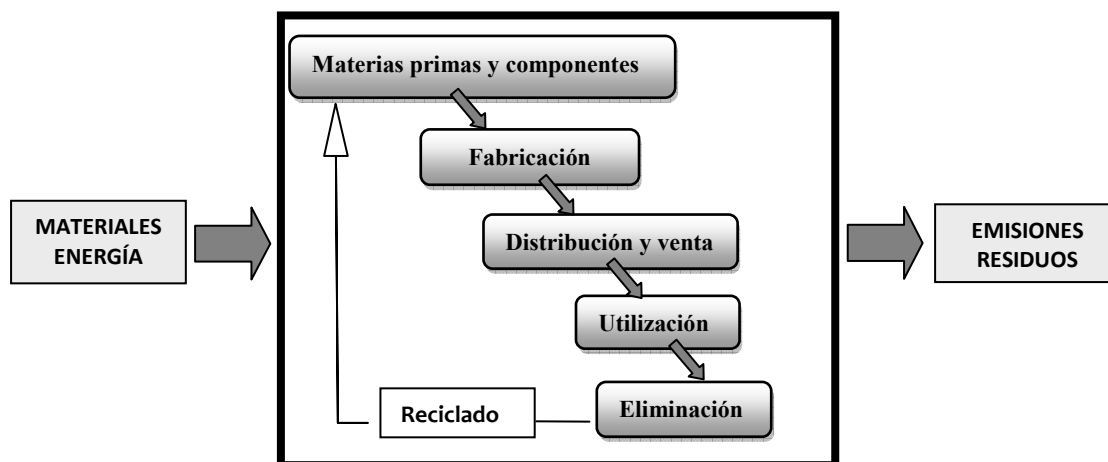


Figura 3. Ciclo de vida de un producto.

La manera y forma en la que se recopilan las entradas/salidas se conoce como inventario de ciclo de vida, y es la fase del análisis del ciclo de vida que sienta las bases para un posterior análisis y evaluación de los efectos relacionados con el producto. La evaluación de impactos del ciclo de vida, es la fase del ACV dirigida a conocer y evaluar la magnitud y la significancia de los impactos potenciales de un sistema.

Para efectuar el inventario de ciclo de vida de la instalación solar estudiada, se han utilizado herramientas relativamente simples. Los datos relevados están relacionados con la energía consumida y las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas a los diversos materiales usados en la instalación (Alcorn, 2003; Hammond y Jones, 2011). Lamentablemente no se disponen de datos a nivel nacional, por lo que se recurre a bases internacionales.

Por otra parte se hace necesario emplear información de las emisiones de dióxido de carbono equivalentes producidas por el uso de las fuentes auxiliares de energía en el sistema solar (gas licuado y electricidad). Para esto se recopilaron y procesaron datos de la emisiones debidas al empleo de diversos combustibles y al tipo de generación eléctrica en el país (Alcorn, 2003; Consejo Mundial de Energía, 2004; Hammond y Jones, 2011).

### RESULTADOS OBTENIDOS

#### *Radiación incidente y aporte de energía solar*

En la Tabla 1 se muestran los valores de la radiación solar global promedio mensual, medidos en el plano horizontal (H) y resultantes del cálculo sobre los colectores solares planos ( $H_T$ ). Se observa que el posicionamiento de los colectores logra acrecentar la radiación solar recibida en otoño e invierno. Asimismo la radiación incidente en todo el año, es mayor sobre el plano inclinado de los colectores que sobre uno horizontal (Albizzati, 1997; Albizzati, Rossetti y Alfano, 1997).

Mes	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
H (MJ/m <sup>2</sup> )	22,88	19,61	16,49	12,77	9,53	7,30	8,08	10,44	14,10	17,73	21,09	22,10
H <sub>T</sub> (MJ/m <sup>2</sup> )	20,57	18,88	17,41	15,32	12,54	9,82	10,71	12,71	15,43	17,53	19,34	19,58

Tabla 1. Radiación solar global horizontal y total sobre los colectores.

Para calcular la performance térmica de la instalación solar con el método F-chart se necesitan los parámetros característicos del colector plano empleado que incluyen: E que es la eficiencia óptica,  $F_R$  el factor de remoción del calor y  $U_C$  el coeficiente total de pérdidas de calor (IRAM, 1983). Los parámetros del colector solar plano en estudio son:  $F_R E = 0,70$  y  $F_R U_C = 6,0$  W / m<sup>2</sup> °C. El colector solar posee una cubierta de vidrio y está aislado en los laterales y fondo. Los conductos paralelos por los que circula el agua se conforman entre dos placas de acero inoxidable. La placa absorbente de la radiación está recubierta por una pintura no selectiva.

Los resultados obtenidos en el cálculo indican que la fracción anual de la demanda de energía térmica cubierta con energía solar es 75%. Entonces el resto (25%) se aporta mediante el uso de la fuente auxiliar de energía, que según la situación a analizar es gas licuado o electricidad.

La fracción de la demanda térmica cubierta con energía solar varía mes a mes (Figura 4). Como es esperable, los aportes máximos son en el verano y mínimos en invierno, llegando al 97 % y 43 % respectivamente.

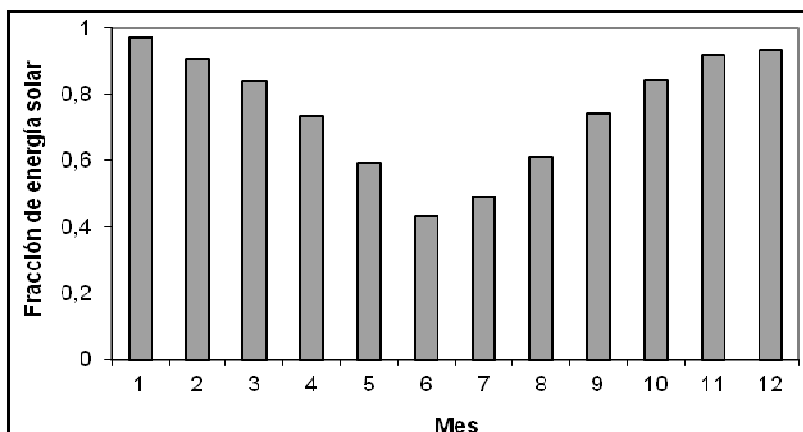


Figura 4. Aporte de la energía solar a la demanda térmica.

### Consumos de energía y emisiones

El resultado de la valoración del consumo energético y la emisión de gases equivalentes a dióxido de carbono para la instalación solar, se resume en la Tabla 2. Como es sabido, para la construcción de los colectores solares se utilizan diversos materiales y variados diseños. En este caso, en relación con los componentes más importantes, el conjunto placa absorbente-conductos de fluido es de acero inoxidable, la cubierta semitransparente es de vidrio común y el aislante es lana mineral.

En los cálculos realizados se considera que los efectos de las pinturas, selladores y uniones son el 10 % de la suma de los debidos a los colectores solares y al tanque de almacenamiento. Además ciertas actividades complementarias (transporte, fabricación, montaje y mantenimiento) representan aproximadamente un 10% del total de los efectos de todos los materiales de la instalación (Kalogirou, 2009).

El ahorro bruto de consumo energético y la no emisión bruta, que son los gases que dejan de emitirse, se deben sólo al aporte solar durante la operación del sistema. En la Tabla 3 se listan los resultados de cálculos relativos al funcionamiento de las instalaciones combinadas de calentamiento de agua, con el aporte del 75 % debido a la energía solar. Aún no se han contemplado todos los efectos de los consumos y emisiones de la instalación solar que se señalan en la Tabla 2.

Para hallar el impacto del consumo de gas licuado se contempla una eficiencia en la conversión a energía térmica del 85 %, y para la electricidad el valor de esa eficiencia es 95 %. Las emisiones de gases de efecto invernadero debidas a los consumos de gas licuado y de energía eléctrica son 0,083 kg CO<sub>2</sub> eq / MJ y 0,125 kg CO<sub>2</sub> eq / MJ respectivamente.

MATERIALES COLECTORES SOLARES	MASA (kg)	MJ/kg	MJ	kg CO <sub>2</sub> eq/ kg	kg CO <sub>2</sub> eq
Chapas acero inoxidable 0,5 mm espesor	32,0	56,7	1814,4	6,7	214,4
Chapas acero galvanizado N° 24	30,7	35,4	1087,5	2,9	89,1
Vidrios 4 mm	40,3	15,0	604,8	0,9	36,3
Aislaciones lana mineral 5 cm	2,4	16,6	41,0	1,3	3,2
<b>MATERIALES TANQUE ALMACENAMIENTO</b>					
Chapa acero inoxidable 0,5 mm	8,5	56,7	479,7	6,7	56,7
Chapa acero galvanizado N° 24	14,3	35,4	506,4	2,9	41,5
Aislación lana mineral 5 cm	1,2	16,6	19,7	1,3	1,5
<b>OTROS MATERIALES VARIOS</b>					
Caños de hierro para soporte 25x25 mm	31,3	35,0	1095,5	2,9	90,8
Cañerías de hierro para agua 2,5 cm	5,0	35,0	174,3	2,9	14,4
Aislaciones polietileno expandido 1 cm	2,8	103,0	288,4	3,1	8,7
Pinturas, selladores y uniones	-	-	455,4	-	44,3
<b>ACTIVIDADES COMPLEMENTARIAS</b>	-	-	656,7	-	60,1
<b>TOTAL</b>	-	-	7223,8	-	661,0

Tabla 2. Consumo energético y emisión de gases propios de la instalación solar.

INSTALACIÓN	MJ / año		kg CO <sub>2</sub> eq / año	
	CONSUMO	AHORRO BRUTO	EMISIÓN	NO EMISIÓN BRUTA
<b>SOLAR-GAS LICUADO</b>	2901,4	8750,7	240,8	726,3
<b>SOLAR-ELECTRICIDAD</b>	2596,0	7829,7	324,5	978,7

Tabla 3. Consumos energéticos y emisiones de gases de la instalación térmica durante la operación.

Según lo volcado en la Tabla 3, y considerando el área neta del colector solar, el ahorro energético bruto es 2431 MJ / año m<sup>2</sup> y la emisión bruta evitada es igual a 202 kg CO<sub>2</sub> eq / año m<sup>2</sup>, para la instalación solar-gas licuado. En la instalación solar-electricidad, el ahorro bruto es 2175 MJ / año m<sup>2</sup> y la no emisión bruta es 272 kg CO<sub>2</sub> eq / año m<sup>2</sup>.

### Impactos energético y ambiental

En la evaluación de los impactos energético y ambiental, la vida útil de la instalación solar se estima en veinte años (Tabla 4).

INSTALACIÓN	MJ		kg CO <sub>2</sub> eq	
	CONSUMO	AHORRO NETO	EMISIÓN	NO EMISIÓN NETA
<b>SOLAR-GAS LICUADO</b>	65250,9	167789,7	5477,2	13865,2
<b>SOLAR-ELECTRICIDAD</b>	59142,7	149366,9	7150,9	18912,8
<b>GAS LICUADO</b>	233040,6	-	19342,4	-
<b>ELECTRICIDAD</b>	208509,6	-	26063,7	-

Tabla 4. Consumos energéticos y emisiones de gases de la instalación térmica durante el ciclo de vida.

Al determinar el ahorro neto en la instalación térmica se consideran los efectos asociados a los consumos energéticos y a las emisiones de gases en todo el ciclo de vida, abarcándose los correspondientes a la instalación solar propiamente dicha (Tabla 2) y a su funcionamiento (Tabla 3).

En la Tabla 4 se verifica la notable reducción del consumo de energía y la emisión de gases cuando se registra el aporte solar en la instalación de calentamiento de agua. La comparación se efectúa contra el calentamiento que se llevaría a cabo usando solamente gas licuado o electricidad.

En la vida útil de ambas instalaciones combinadas, los porcentajes del ahorro neto de energía y de no emisión neta son muy próximos al 72%, tanto para la instalación solar-gas licuado como para la instalación solar-electricidad.

## CONCLUSIONES

En el trabajo se calculó la performance de una instalación solar, determinándose que puede cubrir el 75 % de la demanda térmica anual para el calentamiento de agua doméstico.

El análisis de ciclo de vida aplicado permitió conocer los consumos energéticos y las emisiones de gases de efecto invernadero, asociados a la construcción y el uso de la instalación solar.

Cuando la instalación funciona con aporte solar, los porcentajes del ahorro neto de energía y de no emisión neta son cercanos al 72%, al compararlos con los casos en que el gas licuado o la electricidad son única fuente energética.

El análisis de ciclo de vida es una herramienta que permite evaluar los impactos energético y ambiental derivados de la aplicación de la energía solar y de otras fuentes alternativas, habitualmente consideradas energías “limpias”.

## REFERENCIAS

- Albizzati E. (1997). Evaluación de la radiación solar incidente sobre la región centro-litoral de la República Argentina, Centro de Publicaciones de la Universidad Nacional del Litoral, Argentina.
- Albizzati E., Rossetti G., Alfano O. (1997), Measurements and predictions of solar radiation incident on horizontal surfaces at Santa Fe, Argentina (31°39'S, 60°43'W). *Renewable Energy*, 11, 4, 469-478.
- Alcorn A. (2003). Embodied energy and CO<sub>2</sub> coefficients for NZ buildings materials. Centre for Building Performance Research. Victoria University of Wellington, NZ.
- 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”. Report of Society of Environmental Toxicology and Chemistry.
- Duffie J. A., Beckman W. A. (2006). *Solar engineering of thermal processes*. 3rd Ed. J. Wiley.
- Goswami D. Y., Kreith F., Kreider J.F. (2000). *Principles of solar engineering*, 2nd Ed. Taylor & Francis.
- Hammond G., Jones C. (2011). The inventory of carbon & energy (ICE). Report BSRIA BG 10.
- Informe mundial de energía, la energía y el reto de la sostenibilidad (2000). Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo-Consejo Mundial de Energía. Departamento de las Naciones Unidas para Asuntos Económicos y Sociales.
- IRAM (1983). Colectores solares. Métodos de ensayo para determinar el rendimiento térmico - Norma 210002. Instituto Argentino de Normalización y Certificación.
- Kalogirou S. (2009). Thermal performance, economic and environmental life cycle analysis of thermosiphon solar water heaters. *Solar Energy*, 83, 1, 39-48.
- 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.
- World Energy Outlook (2010). International Energy Agency.

## ABSTRACT

Through the life cycle analysis (LCA) it could be established the energetic and environmental impacts of the use of solar energy in heating water. Fractions of the heat demand covered by solar radiation, and liquefied gas or electricity as auxiliary sources for a typical installation are calculated. The LCA of the solar system considers the raw materials supply, manufacturing process, transportation, operation and maintenance, and the energy consumed and emissions of greenhouse gases are taking account. The methodology used quantifies the energetic and environmental benefits resulting from the application of solar energy for heating water. When the installation operates with solar contribution, the percentage of net saving of energy and no emissions are close to 72% when compared to situations where the liquefied gas or electricity are the only energy source for heating water.

**Keywords:** solar heating, life cycle analysis, energetic and environmental impacts.