

## **CÁLCULOS DE LA ENERGÍA GENERADA Y LA MITIGACIÓN DE EMISIONES DE GASES EN INSTALACIONES PARA CALENTAMIENTO SOLAR DE AGUA**

**Enrique Albizzati**

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:15-2-13; Aceptado:27-4-13.*

**RESUMEN.-** El análisis del ciclo de vida se aplica para calcular la energía generada y la mitigación de las emisiones de gases en instalaciones solares de calentamiento de agua. Con el procedimiento presentado, se determinan los efectos del consumo de agua, el área y la inclinación de los colectores solares para una instalación típica con un combustible fósil como fuente complementaria. Cuando se comparan instalaciones similares, los beneficios energéticos son mayores sustituyendo el gas licuado y las ventajas ambientales son mayores para la electricidad. Aumentando el área de colección, son máximas la energía solar aprovechada en instalaciones de gas licuado y la mitigación de las emisiones de la electricidad, calculadas en forma total y por litro de agua. Los más altos valores de la generación y de la mitigación por unidad de área se obtienen con la instalación típica, usando gas licuado y electricidad respectivamente. Los períodos de amortización ambiental calculados para las instalaciones están entre 9,6 y 13,8 meses, mientras la amortización energética va desde 11,2 hasta 14,1 meses.

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

## **CALCULATIONS OF THE ENERGY GENERATED AND THE MITIGATION OF GAS EMISSIONS IN INSTALLATIONS FOR SOLAR WATER HEATING**

**ABSTRACT.-** The life cycle analysis is applied to calculate the energy generated and the mitigation of gas emissions in solar water heating installations. With the presented procedure, the effects of the changes in water consumption, area and tilt of solar collectors are determined for a typical installation with fossil fuel as complementary source. When comparing similar installations, the energetic benefits are greater substituting the liquefied gas and the environmental advantages are greater for the electricity. Increasing the area of collection are maximums the solar energy exploited in liquefied gas installations and the mitigation of emissions of the electricity, calculated as total and per liter of water. The highest values of the generation and mitigation per unit area are obtained with the installation typical, using liquefied gas and electricity respectively. The environmental amortization times calculated for the installations are between 9.6 and 13.8 months, while amortization energy ranging from 11.2 to 14.1 months.

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

### **1. INTRODUCCIÓN**

La energía es un recurso que debe contribuir 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 observarse 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 (PNUD-IDAE, 2004).

Si 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 no están de acuerdo con el concepto de sustentabilidad energética.

Particularmente es notorio que el empleo intensivo de los combustibles fósiles en los países industrializados y la emisión de gases de efecto invernadero, está provocando el denominado Cambio Climático Global con su secuela de daños medioambientales y socioeconómicos (IPCC, 2007; OMM, 2012).

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 fuentes de energía, favorecen los proyectos destinados a la incorporación de las fuentes renovables y no convencionales de energía.

La rapidez con que aumenten su contribución a las necesidades mundiales de energía depende sin duda del apoyo gubernamental para que sean competitivas en costos, y para lograr impulsar los avances tecnológicos.

En este marco puede decirse que entre las energías renovables y poco 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 sistema energético 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 (Albizzati, 2012; Duffie y Beckman, 2006; Kalogirou, 2009a).

Bajo el punto de vista tecnológico, la energía solar tiene como ventajas que es una energía abundante y renovable. Sin embargo, la radiación solar que se recibe en la superficie terrestre es poco concentrada y es una fuente variable en el tiempo, debido a los ciclos diarios y estacionales en cada lugar del planeta. La energía solar crece más rápidamente que cualquier otra tecnología renovable (International Energy Agency, 2012). Los colectores solares de agua caliente son utilizados por más de 200 millones de hogares, así como en muchos edificios públicos y comerciales en todo el mundo (REN21, 2012).

Considerando que los impactos de la generación y el uso de los recursos energéticos son comunes a la mayoría de los sistemas pero difieren en magnitud de acuerdo a las diversas condiciones, para evaluar la energía solar se debe considerar el ciclo completo del sistema energético, siendo aplicable el método conocido como Análisis de Ciclo de Vida (ACV). El ACV se basa en la recopilación de datos sobre las entradas y salidas del sistema para, con el procedimiento adecuado, obtener resultados que muestren sus impactos potenciales (Consoli F. et al., 1993; Sociedad Pública del Vasco, 2009). En diversos trabajos publicados se aplicó el ACV con diferentes objetivos y herramientas de cálculo para casos de calentamiento solar de agua en viviendas (Ardente et al.,

2005; Kalogirou, 2009b; Koroneos y Nanaki, 2012; Hang et al., 2012; Rey-Martínez et al., 2008). Debe tenerse en cuenta que la energía térmica generada a partir de la radiación solar para sustituir a los combustibles fósiles, puede ser considerada como energía convencional ahorrada. Este reemplazo de las fuentes a su vez evita la producción de gases de efecto invernadero, con la consiguiente mitigación de la emisión de contaminantes de la atmósfera.

En este trabajo, se presenta una metodología para calcular la energía solar térmica generada y la mitigación 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 aplica en el ciclo de vida de una instalación solar típica, con electricidad y gas licuado como fuentes energéticas complementarias. Luego se analiza el comportamiento de otras instalaciones combinadas para hallar el efecto producido por la variación del consumo de agua diario, el área de captación 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, la energía convencional sustituida, las emisiones de gases evitadas, y los períodos de amortización energético y ambiental.

## 2. MATERIALES Y MÉTODO

### 2.1 Instalaciones solares térmicas.

Una instalación usada comúnmente 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 complementaria (Figura 1).

El sistema para calentamiento de agua es pasivo ya que la circulación del fluido es por convección natural. El agua que se calienta en los colectores solares planos asciende hacia el tanque de almacenamiento por las cañerías. La instalación es de circuito abierto, pues el agua que se consume circula por los colectores solares planos. La fuente auxiliar de energía en las instalaciones está en la cañería que conduce el agua caliente para consumo.

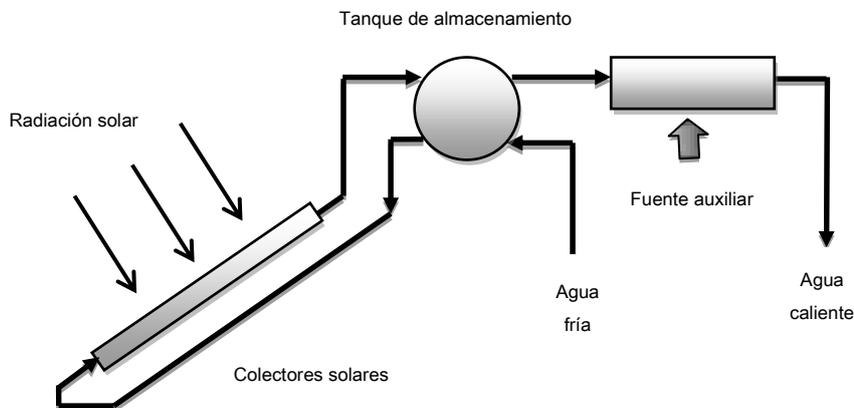


Fig. 1: Esquema de la instalación combinada de calentamiento de agua

La instalación típica considerada para el calentamiento con aporte solar tiene dos colectores planos. Los colectores solares tienen 1,8 m<sup>2</sup> cada uno, están posicionados con 30° de inclinación al norte geográfico, y el tanque de almacenamiento es de 240 L. El consumo de agua caliente se fija también en 240 L diarios a 45 °C de temperatura, y la temperatura del agua fría es 18 °C, durante todo el año.

Como se observa en la Tabla 1, la instalación típica puede usar electricidad (SE-I) o gas licuado (SGL-I).

Tabla 1. Instalaciones para calentamiento de agua.

Instalación		A (m <sup>2</sup> )	V (L)	B (°)
Solar- Electricidad	SE-I	3,6	240	30
	SE-II	3,6	204	30
	SE-III	5,4	240	30
	SE-IV	3,6	240	50
Solar- Gas licuado	SGL-I	3,6	240	30
	SGL-II	3,6	204	30
	SGL-III	5,4	240	30
	SGL-IV	3,6	240	50

En la tabla se listan otras instalaciones, con tres modificaciones respecto a la instalación típica. En una de ellas se reduce el consumo de agua diario (V), en otra se aumenta el área de los colectores (A), y en una tercera los colectores se posicionan con un mayor ángulo de inclinación (B). En todas las instalaciones, el fluido circula por convección natural y el circuito es abierto, y operan con electricidad o gas licuado como fuente complementaria.

## 2.2 Radiación y aporte solar a la demanda.

La computación de la radiación solar promedio recibida por los colectores se realiza utilizando los valores de la componente directa y la componente difusa de la radiación solar en el plano horizontal. La radiación solar global promedio para cada día del mes en el plano horizontal (H<sub>G</sub>), es la suma de la radiación directa del sol (H<sub>D</sub>) y la radiación difusa del cielo (H<sub>d</sub>).

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

Para hallar la radiación solar promedio diaria sobre los colectores, se usa el modelo propuesto por Liu-Jordan y extendido por Klein. La radiación total que alcanza la superficie absorbente (H<sub>T</sub>) es la suma de la radiación directa, la radiación difusa proveniente del cielo, y la radiación reflejada por el suelo que rodea a dicha superficie (Duffie y Beckman, 2006).

H<sub>T</sub> se expresa como el producto de la radiación global horizontal multiplicada por un factor R, indicativo de la variación de la radiación respecto a la que incide en el plano horizontal.

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

El factor R está compuesto por tres términos relacionados con la radiación directa, la difusa del cielo y la reflejada. R puede calcularse según:

$$R = (H_D / H_G) R_D + (H_d / H_G) [(1 + \cos B)/2] + \rho [(1 - \cos B)/2] \quad (3)$$

La superficie inclinada un ángulo B tiene un factor de visión del cielo igual a (1+cos B)/2 y su factor de visión del suelo es (1-cos B)/2. ρ es la fracción de la radiación solar que es reflejada por el suelo, y R<sub>D</sub> es el cociente entre la radiación directa en la superficie inclinada y en el plano horizontal.

R<sub>D</sub> se calcula teniendo en cuenta la declinación solar, la latitud del lugar de la instalación, el ángulo azimutal, la inclinación de la superficie colectora y los ángulos horarios de salida y puesta del sol en un día representativo de cada mes.

Por otra parte, la contribución de la energía solar a la demanda térmica en las instalaciones combinadas, se determina con el método f-chart. La fracción de la energía solar aportada en cada mes (f), se determina en función de dos parámetros adimensionales (Duffie y Beckman, 2006):

$$f = 1,029 Y - 0,065 X - 0,245 Y^2 + 0,0018 X^2 + 0,0215 Y^3 \quad (4)$$

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 estiman con:

$$X = F_R U_C (T_r - T_a) (A / Q) 24 n \quad (5)$$

$$Y = F_R E H_T (A_C / Q) n \quad (6)$$

En las expresiones anteriores, n es el número de días del mes, T<sub>a</sub> la temperatura ambiente, T<sub>r</sub> es 100 °C, F<sub>R</sub> el factor de remoción del calor, E la eficiencia óptica y U<sub>C</sub> el coeficiente de pérdidas de calor del colector solar empleado (IRAM, 1983; ANSI/ASHRAE 93).

La demanda térmica mensual de cada instalación (Q) se calcula con el volumen (V), la densidad (p), el calor específico (c), la temperatura caliente (T<sub>c</sub>) y la temperatura fría (T<sub>f</sub>) del agua:

$$Q = V p c (T_c - T_f) \quad (7)$$

Para la aplicación del método f-chart se tienen en cuenta correcciones para los parámetros X e Y originadas por la temperatura del agua caliente, el volumen de agua en el tanque de almacenamiento, la eficiencia óptica y el factor de remoción de calor del colector solar.

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

$$F = \sum (f Q)_i / \sum Q_i \quad (8)$$

Finalmente, la eficiencia térmica anual de la instalación solar (E<sub>t</sub>) se calcula con el cociente entre la energía solar térmica generada y la radiación total solar incidente en los colectores solares:

$$E_t = \sum (f Q)_i / \sum (H_T n A)_i \quad (9)$$

### 2.3 Análisis de ciclo de vida.

El ACV de un producto debe incluir todas las entradas y salidas en los procesos que participan a lo largo de su ciclo de vida: la extracción de materias primas y el procesamiento 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 se incluyen cuando tienen la relevancia suficiente (Figura 2).

La manera y forma en la que se recopilan las entradas y salidas en el ACV, se conoce como inventario de ciclo de vida, y es la fase del análisis que sienta las bases para una posterior 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 los impactos potenciales del sistema estudiado.

En el 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 efecto de todos los gases que producen el efecto invernadero, en equivalentes de dióxido de carbono.

Para efectuar el inventario de ciclo de vida de las instalaciones solares estudiadas, se pueden utilizar herramientas relativamente simples. Los datos relacionados con la energía consumida y las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas a los diversos materiales usados en la instalación solar se obtienen de bases internacionales (Alcorn, 2003; Hammond y Jones, 2011). En Argentina no se dispone de información completa a nivel nacional, por lo que debe recurrirse a las bases citadas.

También se hace necesario tener información de las emisiones de gases producidas por el uso de las fuentes auxiliares de energía en el sistema solar. Para esto se recopilan y procesan datos de las emisiones originadas por el empleo de empleo de electricidad y gas licuado (Alcorn, 2003; Consejo Mundial de Energía, 2004; Hammond y Jones, 2011). Se tiene presente que en Argentina opera el Sistema Argentino de Interconexión y la generación eléctrica es mixta, producida con energía térmica, hidráulica y nuclear.

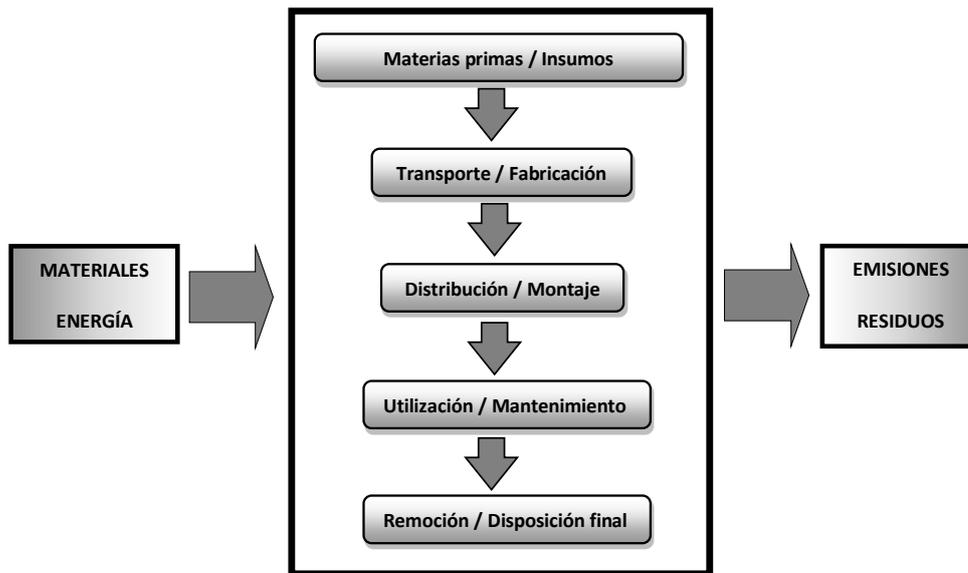


Fig. 2. Esquema del ciclo de vida de un producto.

### 2.4 Energía generada y mitigación de emisiones.

Para determinar la energía térmica generada y la mitigación de las emisiones en cada instalación combinada se contemplan la producción energética y la emisión de gases evitados al funcionar con energía solar. A estos valores brutos se deben descontar respectivamente, la energía consumida y las emisiones provocadas por los requerimientos propios de la instalación solar antes, durante y después de su funcionamiento.

Entonces los valores netos de la energía generada y de la mitigación de las emisiones ( $E_n$ ) se calculan en cada caso, mediante la diferencia entre la energía solar aportada o la

mitigación de emisiones ( $E_b$ ), y el consumo energético o la emisión de gases en el ciclo de vida ( $E_i$ ):

$$E_n = E_b - E_i \quad (10)$$

$$E_i = e_i A \quad (11)$$

En la ec. (11)  $e_i$  es energía consumida o los gases emitidos por unidad de área de colectores en el ciclo de vida, y  $A$  es el valor de dicha área.  $E_b$  se debe al aporte solar durante el funcionamiento de la instalación combinada, y puede computarse con:

$$E_b = \sum Q_i N F c_a \quad (12)$$

En la ecuación anterior,  $\Sigma Q_i$  es la demanda térmica anual,  $N$  son los años de vida útil de la instalación y  $F$  es la fracción de la demanda térmica anual cubierta con energía solar. Con respecto a  $c_a$ , su valor varía si la ec. (12) se aplica al cálculo energético o a la emisión de gases, pero depende también de la fuente de energía complementaria utilizada.

Para hallar  $e_i$  se suman las contribuciones asociadas a los colectores solares ( $e_c$ ), el tanque de almacenamiento ( $e_t$ ), otros materiales componentes del dispositivo solar ( $e_m$ ) y todas las actividades complementarias ( $e_f$ ).

$$e_i = e_c + e_t + e_m + e_f \quad (13)$$

$$e_t = e_v v_t \quad (14)$$

$$e_m = e_c x_v + (e_c + e_t) x_p \quad (15)$$

$$e_f = (e_c + e_t + e_m) x_f \quad (16)$$

En las ecuaciones escritas,  $e_v$  es el consumo energético o la emisión de gases por unidad de volumen del tanque y  $v_t$  es el cociente entre el referido volumen y el área de los colectores. Las otras variables tienen en cuenta la participación de 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, distribución, montaje, mantenimiento, remoción y disposición final).

Otro indicador para evaluar las instalaciones combinadas es el cociente entre las emisiones de gases evitadas y la energía solar aportada en la vida útil de la instalación. El numerador y el denominador de la expresión propuesta para este indicador se obtienen con la ec. (10), es decir con los valores netos de la mitigación de emisiones y la energía solar generada en cada instalación combinada.

Además, como en las instalaciones solar-electricidad y solar-gas licuado se sustituyen combustibles fósiles por energía solar, es posible determinar los períodos de amortización energética y ambiental.

El período de amortización energética puede definirse como el tiempo de funcionamiento necesario para recuperar la energía consumida por la instalación solar, mientras que período de amortización ambiental se computa en forma semejante, pero contemplando la cantidad de gases de emitidos. Aquí se incluyen en el numerador, los consumos o emisiones que durante el funcionamiento de la instalación combinada producen los combustibles fósiles.

Luego, se calcula el período de amortización energética o el período de amortización ambiental, expresado en meses, con:

$$P = 12 N [E_i + \Sigma Q_i (1-F) c_a] / E_b \quad (17)$$

Tabla 2. Demanda, aporte solar y eficiencia térmica mensuales en la instalación típica.

Mes	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Demanda (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
Aporte solar	1,000	0,964	0,904	0,775	0,696	0,586	0,659	0,788	0,881	0,911	0,968	0,993
Eficiencia térmica	0,341	0,345	0,349	0,351	0,344	0,334	0,333	0,335	0,332	0,339	0,337	0,341

### 3. RESULTADOS OBTENIDOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1 Radiación incidente y energía solar térmica.

En este trabajo la radiación solar horizontal promedio diaria en cada mes del año se obtiene de la base de datos del Atmospheric Science Data Center-NASA Langley Research Center para la ciudad de Santa Fe, Argentina (latitud 31,65° S, longitud 60,72° O).

La Figura 3 presenta los valores de la radiación solar total promedio mensual calculados con las ecs. (2) y (3) sobre colectores posicionados a 30° y 50° mirando al norte geográfico, con respecto al plano horizontal.

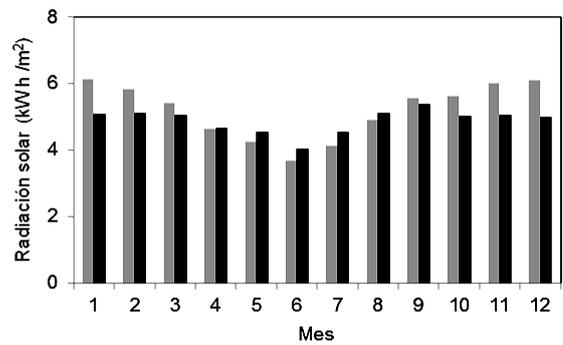


Fig. 3: Radiación solar total promedio diario

(30° ■, 50° ■).

La radiación solar total anual, es 1894,3 kW h/ m<sup>2</sup> (6819,4 MJ/ m<sup>2</sup>) a 30° y 1783,4 kW h/ m<sup>2</sup> (6420,3 MJ/ m<sup>2</sup>) a 50°. Se observa que el posicionamiento de los colectores a 50° acrecienta la radiación solar recibida entre abril y agosto, comparando con la inclinación a 30°. Asimismo, la radiación total incidente en el año sobre ambas superficies inclinadas es mayor que sobre el plano horizontal.

En la Tabla 2 se resumen la demanda térmica, el aporte solar y la eficiencia térmica mensuales computados para la instalación típica. Los parámetros característicos del colector solar plano adoptado para todo el estudio son:  $F_R E = 0,70$  y  $F_R U_C = 6,0 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$  (IRAM, 1983; ANSI/ASHRAE 93).

La fracción de la demanda térmica cubierta con energía solar varía mes a mes. Como es esperable, los aportes son mayores en el verano y menores en el invierno, llegando al 100 % y 58,6 % respectivamente. En relación con la eficiencia térmica del sistema solar, varía sólo entre el 33, 2 % y el 35,1%.

En las instalaciones combinadas solar-electricidad y solar-gas licuado, resultan variables la demanda, el aporte solar y la eficiencia térmica (Tabla 3). Los valores obtenidos indican que la fracción anual de la demanda de energía térmica cubierta con energía solar para las instalaciones típicas (SE-I y SGL-I) es 0,843. El máximo valor de F (0,918) se encuentra en el caso que el área de colección es 5,4 m<sup>2</sup> (SE-III y SGL-III), mientras que el valor es mínimo (F= 0,812) cuando los colectores se inclinan a 50° (SE-IV y SGL-IV).

La eficiencia térmica anual más alta proviene de las instalaciones con los colectores inclinados a 50° (E= 0,348), y la más baja para el área de colección 5,4 m<sup>2</sup> (E= 0,247).

### 3.2 Consumo energético y emisión de gases propios de la instalación solar típica.

Los resultados de la valoración del consumo energético y la emisión de gases equivalentes a dióxido de carbono para la instalación solar, se resumen en la Tabla 4.

Como es sabido, para la construcción de los colectores solares se utilizan diversos materiales y variados diseños. En este caso, en lo relacionado 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. Las actividades complementarias representan aproximadamente un 10% del total de los efectos de todos los materiales de la instalación (Kalogirou, 2009b).

Tabla 3. Demanda, aporte solar y eficiencia térmica anual de las instalaciones.

Instalación	Demanda (MJ)	Aporte solar	Eficiencia térmica
SE-I	9903,1	0,843	0,340
SE-II	8417,6	0,889	0,305
SE-III	9903,1	0,918	0,247
SE-IV	9903,1	0,812	0,348
SGL-I	9903,1	0,843	0,340
SGL-II	8417,6	0,889	0,305
SGL-III	9903,1	0,918	0,247
SGL-IV	9903,1	0,812	0,348

Tabla 4. Consumo y emisiones detalladas de la instalación solar típica.

Consumo y emisiones	Masa	Energía		Emisiones	
	kg	MJ/kg	MJ	kg CO <sub>2</sub> eq/ kg	kg CO <sub>2</sub> eq
Materiales de los colectores solares					
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
Materiales del tanque almacenamiento					
Chapa acero inoxidable 0,5 mm	9,4	56,7	533,0	6,7	63,0
Chapa acero galvanizado N° 24	15,9	35,4	562,6	2,9	46,1
Aislación lana mineral 5 cm	1,3	16,6	21,8	1,3	1,7
Otros materiales varios					
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	-	-	466,5	-	45,4
Actividades complementarias	-	-	669,0	-	61,3

Como se ve en la Tabla 5 los colectores solares representan cerca del 50%, tanto del consumo de energía como de las emisiones de gases de la instalación típica. Con valores decrecientes, participan materiales varios, el tanque de almacenamiento y las actividades complementarias del ciclo.

### 3.3 Energía generada y mitigación de las emisiones en las instalaciones combinadas.

Al aplicar la metodología propuesta para la evaluación de los impactos energético y ambiental, la vida útil de las instalaciones se estima en veinte años. La energía generada y la mitigación se computan con las ecs. (10)-(16).

Tabla 5. Consumo y emisiones totales de la instalación solar típica.

Materiales e insumos	Energía		Emisiones	
	MJ	%	kg CO <sub>2</sub> eq	%
Colectores solares	3547,7	48,2	343,0	50,9
Tanque de almacenamiento	1117,4	15,2	110,8	16,4
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

En las Tablas 6 y 7 se muestran los datos con que se alimentan los referidos cálculos para todas las instalaciones solar-electricidad y solar-gas licuado, agregándose que  $x_f$  y  $x_p$  valen 0,10.

Las emisiones de gases de efecto invernadero para la energía eléctrica y el gas licuado son respectivamente 0,125 kg CO<sub>2</sub> eq /MJ (0,450 kg CO<sub>2</sub> eq /kW h) y 0,083 kg CO<sub>2</sub> eq /MJ

(0,299 kg CO<sub>2</sub> eq /kW h) en la conversión de esas fuentes a energía térmica.

Los valores anteriores luego se corrigen considerando una eficiencia en la conversión térmica del 95 % cuando se consume electricidad y del 85 % para consumo de gas licuado.

Tabla 6. Cálculo de la generación de energía en las instalaciones combinadas.

Instalación	$c_a$	$e_c$ (MJ/m <sup>2</sup> )	$e_v$ (MJ/m <sup>3</sup> )	$x_v$ (MJ/m <sup>2</sup> )
SE	1,053	985,5	4,66	0,44
SGL	1,176			

Tabla 7. Cálculo de la emisión de gases en las instalaciones combinadas.

Instalación	$c_a$ (kg CO <sub>2</sub> eq/MJ)	$e_c$ (kg CO <sub>2</sub> eq/m <sup>2</sup> )	$e_v$ (kg CO <sub>2</sub> eq/m <sup>3</sup> )	$x_v$ (kg CO <sub>2</sub> eq/m <sup>2</sup> )
SE	0,132	95,3	0,46	0,33
SGL	0,098			

En la determinación de la energía generada y la mitigación de emisiones netas, se consideran los efectos de los consumos energéticos y las emisiones de gases, incluyéndose en los cálculos la información antes recopilada en las Tablas 4 y 5.

En la Tabla 8 se vuelcan los valores calculados de la generación de energía y de la mitigación de emisiones total, por unidad de área de colección y por litro de agua caliente para todas las instalaciones combinadas.

Tabla 8. Generación de energía y mitigación de emisiones de las instalaciones combinadas.

Instalación	Generación			Mitigación		
	MJ	MJ/m <sup>2</sup>	MJ/L	kg CO <sub>2</sub> eq	kg CO <sub>2</sub> eq/m <sup>2</sup>	kg CO <sub>2</sub> eq/L
SE-I	168536,8	46815,8	0,0962	21375,2	5937,6	0,0122
SE-II	150298,6	41749,6	0,1009	19088,9	5302,5	0,0128
SE-III	181113,7	33539,6	0,1034	23058,1	4270,0	0,0132
SE-IV	162048,3	45013,4	0,0925	20561,8	5711,6	0,0117
SGL-I	189161,6	52544,9	0,1080	15695,8	4359,9	0,0090
SGL-II	168784,9	46884,7	0,1133	13998,4	3888,4	0,0094
SGL-III	203565,4	37697,3	0,1162	16875,6	3125,1	0,0096
SGL-IV	181912,3	50531,2	0,1038	15091,9	4192,2	0,0086

Se observa que en dos instalaciones combinadas similares, son mayores los beneficios energéticos usando gas licuado, pero los beneficios ambientales son mayores con la utilización de la electricidad.

La mayor generación total y por litro de agua, se alcanza con gas licuado y mayor área de colectores (SGL-III). Sin embargo una mayor generación por unidad de área se logra con la instalación típica SGL-I. Los menores valores corresponden a las instalaciones: SE-II (generación total), SE-III (generación por unidad de área) y SE-IV (generación por litro de agua).

La mitigación de emisiones total y por litro de agua, es máxima al utilizar electricidad y un área de 5,4 m<sup>2</sup> (SE-III). La mayor mitigación por unidad de área corresponde a la instalación típica SE-I. En las instalaciones SGL-II, SGL-III y SGL-IV se obtienen los menores valores de generación total, generación por unidad de área y generación por litro de agua respectivamente.

Finalmente, el cociente entre la generación y la mitigación y los períodos de amortización energético ( $P_e$ ) y ambiental ( $P_a$ ) hallados con la ec. (17) se listan en el Tabla 9.

La relación entre mitigación y generación total es máxima para SE-III (cuando el área de colección es 5,4 m<sup>2</sup> y se emplea electricidad como fuente complementaria). El mínimo de la relación es para una instalación similar pero que usa gas licuado (SGL-III).

Los valores mínimos de  $P_e$  son para las instalaciones combinadas que emplean gas licuado y los de  $P_a$  para las que usan electricidad. Se nota que los valores de los citados períodos se encuentran entre 9,6 y 14,1 meses.

El período de amortización energética es mínimo para SGL-I y máximo para SE-III, mientras que el período de amortización ambiental es mínimo para SE-I y máximo para SGL-III. En lo que respecta a cociente  $P_a/P_e$ , para las instalaciones SGL-II y SGL-III se alcanza el valor máximo (1,087) y para SE-III el mínimo (0,745).

Tabla 9. Indicadores de la generación y emisiones de las instalaciones combinadas.

Instalación	Mitigación / Generación		P <sub>e</sub> (meses)	P <sub>a</sub> (meses)	P <sub>a</sub> /P <sub>e</sub>
	kg CO <sub>2</sub> eq/MJ	kg CO <sub>2</sub> eq/kW h			
SE-I	0,1268	0,4566	12,3	9,6	0,780
SE-II	0,1270	0,4572	12,7	9,7	0,764
SE-III	0,1273	0,4583	14,1	10,5	0,745
SE-IV	0,1269	0,4568	13,2	10,4	0,788
SGL-I	0,0830	0,2987	11,2	12,1	1,080
SGL-II	0,0829	0,2986	11,5	12,5	1,087
SGL-III	0,0829	0,2984	12,7	13,8	1,087
SGL-IV	0,0830	0,2987	12,1	13,0	1,074

### CONCLUSIONES

El análisis del ciclo de vida se aplica para valorar la energía generada y la mitigación de emisiones en sistemas solares de calentamiento de agua que utilizan un combustible fósil como fuente complementaria.

El procedimiento desarrollado permite establecer el efecto energético y ambiental de los cambios en el consumo de agua, el área, y la inclinación de los colectores en instalaciones solar-electricidad y solar-gas licuado.

Los colectores solares representan el 48,2 %, del consumo de energía y el 50,9 % de las emisiones de gases en las instalaciones solar típica (SE-I y SGL-I). Valores menores corresponden a materiales varios, al tanque de almacenamiento y a las actividades complementarias en la vida útil de la instalación.

Cuando se comparan dos instalaciones solares de similares características, se logra mayor generación de energía neta al usar gas licuado, es decir que son mayores los beneficios energéticos. Sin embargo, son mayores los beneficios ambientales cuando se emplea electricidad y no gas licuado, ya que se obtiene mayor mitigación neta de las emisiones de gases.

La energía generada total y por litro de agua es máxima al usar gas licuado y con la mayor área de colectores (SGL-III), pero la mayor generación por unidad de área se logra con la instalación SGL-I. La mitigación de emisiones total y por litro de agua, es máxima con electricidad y la mayor área (SE-III), aunque la mayor mitigación por unidad de área es para la instalación SE-I.

Los períodos de amortización energética calculados están entre 11,2 y 14,1 meses, mientras que los períodos de amortización ambiental entre 9,6 y 13,8 meses. El cociente entre los períodos de amortización ambiental y energética es menor que la unidad en instalaciones que usan electricidad y mayor que ese valor para las que emplean gas licuado.

### REFERENCIAS

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

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.

ANSI/ASHRAE 93 (2010). Methods of testing to determine the thermal performance of solar collectors. American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers.

Ardente F., Beccali G., Cellura M., Lo Brano V. (2005). Life cycle assessment of a solar thermal collector. *Renewable Energy*, **30**, 7, 1031-1054.

Atmospheric Science Data Center-NASA Langley Research Center. <http://eosweb.larc.nasa.gov/sse> (10 de julio de 2012)

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.

Hammond G., Jones C. (2011). The inventory of carbon & energy (ICE). Report BSRIA BG 10.

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.

International Energy Agency (2012). World Energy Outlook.

IPCC (2007). Cambio climático 2007: Informe de síntesis.

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.

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

OMM (2012). Declaración de la Organización Meteorológica Mundial sobre el estado del clima mundial en 2011.

PNUD-IDEA (2004). Informe mundial de energía: la energía y el reto de la sostenibilidad.

REN21 (2012). Renewables Global Status Report.

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.

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.