

EVALUACIÓN DE SISTEMAS TÉRMICOS Y FOTOVOLTAICOS SOLARES EN UNIDADES DE PRODUCCIÓN AGROPECUARIA, REGIÓN HUETAR NORTE, COSTA RICA¹

Tomás de Jesús Guzmán-Hernández², Freddy Araya-Rodríguez², Javier Mauricio Obando-Ulloa², Mikel Rivero-Marcos², Guillermo Castro-Badilla³.

Agricultura Mesoamericana, Volumen 28, número 3, el cual se publicará en el mes de agosto de 2017, según carta de aceptación del Comité editorial de la revista.

RESUMEN

Evaluación de sistemas térmicos y fotovoltaicos solares en unidades de producción agropecuaria, Región Huetar Norte, Costa Rica. La dependencia por los combustibles fósiles insta a buscar alternativas de producción más limpia que contribuyan a mitigar los efectos del cambio climático. El objetivo del presente trabajo fue determinar el potencial del uso de la energía solar para el calentamiento de agua y generación de energía eléctrica. El estudio se desarrolló en la lechería de la Sede Regional San Carlos del Instituto Tecnológico de Costa Rica de mayo de 2015 a abril de 2016. Se determinó la cantidad de electricidad producida y las temperaturas alcanzadas, respectivamente, por medio de los sistemas fotovoltaicos y térmicos instalados mediante un registro computarizado. Con la información de esa producción, también se calculó la cantidad de dióxido de carbono equivalente que se dejó de emitir a la atmósfera y el ahorro energético y económico de su consumo. El uso de los sistemas de energía solar permitió lograr un autoabastecimiento de energía eléctrica entre un 30 y 40% del consumo total de la unidad productiva. En la producción de energía para calentar el agua para la limpieza y sanitización de los equipos de ordeño, el sistema térmico fue capaz de lograr un incremento entre 20 y 37 °C, lo que representa

¹ Formó parte de un proyecto de investigación del Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR), Sede Regional San Carlos; financiado con fondos del Programa de Regionalización del Consejo Nacional de Rectores (CONARE), Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG) y Vicerrectoría de Investigación y Extensión del ITCR, Costa Rica.

² Instituto Tecnológico de Costa Rica, Programa de Doctorado en Ciencias Naturales para el Desarrollo (DOCINADE), Sede Regional San Carlos. Apartado Postal: 223-21001 Ciudad Quesada, Alajuela, Costa Rica. Teléfono: (506) 2401-3020. Fax: (506) 2475-5395. tjguzman@itcr.ac.cr; faraya@itcr.ac.cr; jaobando@itcr.ac.cr; mriveromarcos@gmail.com.

³ Instituto Tecnológico de Costa Rica, Escuela de Electrónica, Sede Regional San Carlos. gucastro@itcr.ac.cr

más del 70% de la energía necesaria para alcanzar la temperatura requerida (70°C) para estas operaciones y un ahorro económico de aproximadamente \$90 mensuales. Los resultados demuestran que estos sistemas contribuyen a disminuir la dependencia de los combustibles fósiles, lo que implica un mejoramiento en la eficiencia económica y productiva de las unidades de producción agropecuaria de la Región Huetar Norte de Costa Rica.

Palabras clave: energía eléctrica, energía solar, producción agropecuaria, sistema fotovoltaico, sistema térmico.

ABSTRACT

Evaluation of thermal and photovoltaic solar systems in agricultural production units, Northern Huetar Region, Costa Rica. The dependence on fossil fuels urges to seek clean energy alternatives to mitigate the effects of climate change. The objective of this study was to determine the potential of solar energy use for water heating and electricity generation. The study was conducted at the dairy of the Costa Rica Institute of Technology, San Carlos Campus, from May 2015 to April 2016. The data related to the amount of electricity produced and the temperature reached by water obtained from the photovoltaic and thermal systems installed, was recorded by a computerized register. With the information of this production, the amount of carbon dioxide equivalent not emitted to the atmosphere and the economic saving consumption were also calculated. The use of these systems allowed the self-supply of electrical energy around 30 to 40% of the total electrical consumption at the production unit. According to the energy production to heat water for the cleaning and sanitization of the milking equipment, the solar thermal system was capable to increase the water temperature between 20 to 37 °C, which represents more than 70% of the energy needed to reach the temperature required (70°C) for these operations and an economical saving around \$90 per month. The results showed these systems allow improve the economical and productive efficiency of the agricultural production units in the Northern Huetar Region of Costa Rica.

Key words: electrical energy, solar energy, agricultural production, photovoltaic system, thermal system.

INTRODUCCIÓN

En los últimos años, la producción y consumo de energías renovables a nivel internacional ha adquirido un mayor auge como resultado del encarecimiento de los combustibles fósiles y sus derivados, los altos índices de emisiones contaminantes, así como la necesidad de impulsar el compromiso con el desarrollo sostenible (Iglesias-Ferrer y Morales-Salas, 2013). Es fundamental que el progreso general de la humanidad sea armónico con un desarrollo positivo y sostenible, entendiéndose como aquel que satisface las necesidades del presente, sin crear problemas medioambientales y sin comprometer las demandas de las futuras generaciones (Lamela, 2005).

La ganadería es responsable del 18% de las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero (GEI), más que el transporte, de acuerdo con el informe presentado por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) sobre el impacto ambiental de esta actividad (Matthews, 2006). Por lo tanto, urge aplicar tecnologías que minimicen este impacto generado en los procesos productivos del sector.

En el cantón de San Carlos (provincia de Alajuela, Costa Rica) se encuentra el 55% de los asociados de la Cooperativa de Productores de Leche Dos Pinos R.L. (850 productores en total), quienes producen más del 50% de la producción nacional (0,6 millones de kilogramos de leche). Entre los procesos productivos del sector ganadero y lechero que inciden negativamente en la huella de carbono local, se encuentra el consumo eléctrico de las plantas agroindustriales.

Del 100% de radiación solar, sólo un 51% de ésta llega a la superficie terrestre. Del resto, un 19% es absorbido por las nubes y el otro 30% se pierde hacia el espacio (Taiz y Zeiger, 2002; Espero Marín, 2004). Actualmente, para captar la energía solar que incide sobre la superficie se usa distintos tipos de sistemas térmicos solares:

- Colectores solares para el calentamiento del agua: pueden ser de circuito abierto o cerrado, y normalmente son para uso doméstico. En estos sistemas, el agua de consumo se traslada a través de un circuito abierto que pasa directamente por los colectores solares y, en el cerrado, el agua caliente se almacena en un depósito para su posterior uso. Este sistema reduce costos y es más eficiente, pero presenta problemas en zonas con temperaturas bajas, así como con alta concentración de sales que acaban obstruyendo el sistema. Además, en las instalaciones de circuito cerrado se distinguen dos tipos de flujo: por termosifón (en el que el agua circula por diferencia de densidad) y forzado (en el que la circulación del agua se hace mediante una bomba) (Prosperi y

Croci, 2005; Khan et al., 2010; Quirós, 2011). Debido a que la radiación solar no es siempre suficiente para calentar agua durante todo el año, es recomendable conectar el sistema solar a un sistema convencional de calentamiento (Shyam, 1996).

- Equipos o módulos fotovoltaicos: están formados por un conjunto de celdas que producen electricidad a partir de la radiación solar que incide sobre ellos, bajo condiciones estandarizadas de radiación (1000 W/m^2) y temperatura de la célula (25°C). Los equipos fotovoltaicos se dividen en monocristalinos, compuestos de secciones de un único cristal de silicio; los policristalinos, cuando están formados por pequeñas partículas cristalizadas; y los amorfos, cuando el silicio no se ha cristalizado. Su efectividad es mayor cuanto mayor son los cristales, pero también su peso, grosor y coste. El rendimiento de las primeras puede alcanzar el 20% mientras que el de las últimas, aunque su peso y coste es muy inferior, no llega al 10% (Espejo-Marín, 2004; González, 2009).

Costa Rica presenta un potencial teórico solar de 10.000 MW (VI Plan Nacional de Energía 2012-2030 MINAET, 2011); sin embargo, su grado de utilización es mínimo. Por esta razón, el Ministerio de Ambiente, Energía y Telecomunicaciones (MINAET) en la línea de acción de la estrategia 2,2 para el sector energía, insta a promover programas de ahorro energético en los macro-consumidores, por lo que ha focalizado el estudio en las oportunidades y el potencial que tiene la Región Huetar Norte con fuentes de energía alternativas. En este punto, se ha optado por la tecnología solar como alternativa viable y efectiva, puesto que esta Región es una de las mejores zonas de radiación solar en Costa Rica, de acuerdo con el Instituto Costarricense de Electricidad (ICE, 2010).

Debido a que el Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR) tiene la misión de colaborar con el desarrollo del país, con diversos planes y programas de sensibilización y capacitación en sistemas de producción limpia, se diseñaron e implementaron dos sistemas solares para su evaluación técnica, económica y ambiental en la lechería de su Sede Regional San Carlos (ITCR-SSC).

El objetivo del presente trabajo fue determinar el potencial del uso de la energía solar a través de sistemas térmicos y fotovoltaicos para el calentamiento de agua y la generación de energía eléctrica, respectivamente.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se diseñó y construyó dos instalaciones con dispositivos solares fotovoltaicos e híbridos-termosifónicos, en la lechería de la Sede Regional San Carlos del Instituto Tecnológico de Costa Rica en Santa Clara de San Carlos, Alajuela (ITCR-SSC). Una vez que los sistemas estuvieron instalados y en funcionamiento, se evaluaron los resultados obtenidos desde mayo de 2015 a abril de 2016.

La temperatura ambiental media ($^{\circ}\text{C}$), precipitación mensual acumulada (mm) y radiación solar (kWh/m^2), registradas por la Estación Meteorológica del ITCR-SSC cada treinta minutos a lo largo de un año, fueron monitoreadas por el software climatológico WeatherLink 6.0.3 (Davis Instruments Corporation, Hayward, California, Estados Unidos).

Sistemas fotovoltaicos

Los sistemas fotovoltaicos instalados en la lechería del ITCR-SSC constó de ocho colectores solares (Yingli solar, HIT-N235SE10, Baoding, China) de 235 Wp y 1,26 m^2 cada uno, provistos con un micro inversor para generar corriente alterna e introducirla directamente en la red eléctrica.

La energía eléctrica (kWh) generada por los sistemas fotovoltaicos se registró cada 15 minutos a través de un equipo de transmisión de datos inalámbricos (Enphase Energy Inc., Petaluma, California, Estados Unidos).

La eficiencia de estos sistemas se calculó con base en la cantidad de energía eléctrica generada en función de la intensidad de radiación solar recibida (kWh/m^2).

Sistemas termosifónicos

Los sistemas termosifónicos instalados en la lechería del ITCR-SSC constaron de ocho colectores de placa plana con cubierta de poliuretano (Ecosun, HIT-N235SE10, Buenos Aires, Argentina) de 2,10 m^2 cada uno y con tubos de cobre en posición longitudinal para la circulación del agua. Cada cuatro colectores solares fueron conectados a un tanque acumulador primario con capacidad para 650 l de agua, desde cuya parte superior se canalizaba el agua caliente a un tanque acumulador secundario de 650 l de capacidad, el cual tenía acoplado un sistema auxiliar eléctrico y una válvula de escape en caso de vaporización del agua (Figura 1).

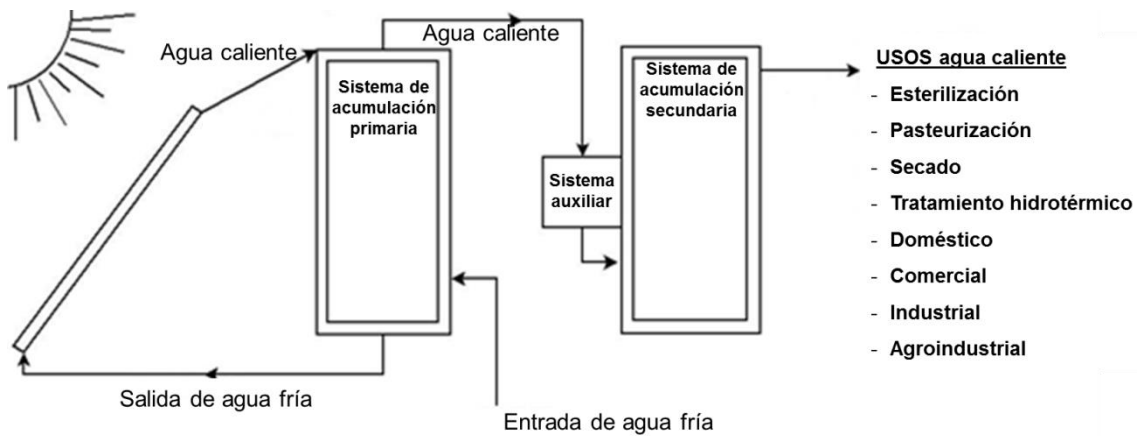


Figura 1. Esquema básico del sistema termosifónico híbrido instalado en la Lechería del Instituto Tecnológico de Costa Rica, Sede Regional San Carlos (ITCR-SSC), Costa Rica. 2015. El agua caliente asciende por diferencia de densidad hasta depositarse en el sistema de acumulación primaria. De su parte superior se canaliza a un segundo tanque que, junto con el sistema auxiliar, permite disponer de agua caliente a alta temperatura.

Figure 1. Basic diagram of the hybrid-thermosiphon system installed at the dairy of the Costa Rica Institute of Technology dairy, San Carlos Campus (ITCR-SSC), Costa Rica. 2015. Hot water ascends by density difference and it is deposited in the primary accumulation system. From its upper part, hot water is channeled to a second tank provided with an auxiliary system in order to provide hot water at high temperature.

Las temperaturas alcanzadas (°C) en el sistema termosifónico (temperatura de entrada del agua a los colectores, temperaturas del agua a la salida del tanque acumulador primario 1 y 2, y temperatura a la entrada del tanque acumulador secundario) se determinaron con un termómetro y un sistema automatizado de registro de datos. Con base en la temperatura alcanzada por el agua tras el paso por los colectores, se calculó el ahorro energético que corresponde al porcentaje de energía suministrado por el sistema termosifónico híbrido para alcanzar la temperatura requerida del agua (70°C) para las operaciones de limpieza de la lechería y sanitización de los equipos de ordeño (Ecuación 1).

$$\text{Ahorro energético (\%)} = \frac{\text{Temperatura agua salida del colector}}{\text{Temperatura requerida}} \times 100 \quad (\text{Ecuación 1})$$

La energía equivalente al incremento de la temperatura se calculó con la Ecuación 2 (Transferencia de calor) (Henley, 1973), estimando un consumo promedio de 200 l de agua al día.

$$Q \text{ (kWh)} = V \times \rho \times C_p \times \Delta T \times 2,7 \times 10^{-7} \text{ kWh/J} \quad \text{(Ecuación 2)}$$

donde,

V: volumen del agua consumido al día (0,2 m³/día)

ρ : densidad del agua (1000 Kg/m³)

C_p : calor específico del agua (4187 J/Kg.°C)

ΔT : incremento de la temperatura del agua, generado por los colectores (°C)

$2,7 \times 10^{-7}$: factor de conversión de kilowatt hora (kWh) a julio (J)

El rendimiento del sistema se calculó por medio de los valores de radiación incidente, temperatura ambiente y, de la temperatura del agua a la entrada y a la salida del colector solar, según la Ecuación 3 (ASRHA, 2013).

$$R = \eta_0 - [U_L (T_m - T_a) / I] \quad \text{(Ecuación 3)}$$

donde,

η_0 = Rendimiento óptico indica el porcentaje de los rayos solares que penetran la cubierta transparente del colector (%)

U_L = Coeficiente global de pérdidas (W/m².°C)

T_m = temperatura media del agua a su paso por el colector (°C)

T_a = temperatura media del agua previamente a su entrada al colector (°C)

I = radiación incidente total sobre el colector (W/m²).

En el Cuadro 1 se muestran los valores típicos de los parámetros característicos de eficiencia óptica (η_0), coeficiente global de pérdidas (U_L) y el rango normal de temperaturas de trabajo para distintos tipos de colectores para el cálculo del rendimiento. En este estudio, el rendimiento diario de los sistemas térmicos solares se calculó en intervalos de treinta minutos, desde las 5:30 hasta las 18 h. Los sistemas térmicos instalados en la lechería del ITCR-SSC eran de cubierta simple con un rango de temperatura de 10 a 60°C, por lo que los valores orientativos que se tomó como factor de conversión y de pérdidas térmicas fueron de 0,8 y 7, respectivamente.

Cuadro 1. Valores de los parámetros para calcular el rendimiento de los colectores térmicos. Lechería del Instituto Tecnológico de Costa Rica, Sede Regional San Carlos (ITCR-SSC), Costa Rica. 2016.

Table 1. Parameter values to calculate the performance of the thermal collectors. Dairy of the Costa Rica Institute of Technology, San Carlos Campus (ITCR-SSC), Costa Rica. 2016.

Tipo de colector	Factor de Conversión (η_0)	Factor de Pérdidas Térmicas U_L ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)	Rango de temperatura ($^\circ C$)
Sin cubierta	0,9	15-25	10 - 40
Cubierta Simple	0,8	7	10 - 60
Cubierta Doble	0,65	5	10 - 80
Superficie Selectiva	0,8	5	10 - 80
Tubos de Vacío	0,7	2	10 - 130

Fuente/Source: Díaz, 2015.

El impacto ambiental de estos sistemas se determinó por la relación de los kg de CO₂ equivalentes que no se emiten a la atmósfera como consecuencia de la energía generada (kWh) por los sistemas para uso eléctrico. De acuerdo con el Instituto Meteorológico Nacional (IMN, 2016), en Costa Rica un kWh equivale a 0,0381 Kg CO₂.

El ahorro económico de estos sistemas solares se calculó con base en la producción energética durante el tiempo que han funcionado en la unidad de estudio. De acuerdo con la tarifa vigente de la Cooperativa de Electrificación Rural de San Carlos R.L. (COOPELESCA R.L.), para un consumo mensual superior a los 3 000 kWh (como es el caso de las lecherías), el cargo por energía se sitúa en los US\$1,34. A este monto se le debe sumar US\$2 200,69 por kW de potencia instalada (los sistemas sistemas fotovoltaicos instalados en la lechería del ITCR-SSC tienen una potencia de 2kW), US\$0,60 por kWh de energía consumida en gastos de alumbrado público y un 5% del monto total por la energía eléctrica consumida, a partir de consumos mayores a los 250 kWh mensuales (ICE, 2015).

Finalmente, el tiempo de recuperación de la inversión inicial (\$10.000 USD en total) se estimó teniendo en cuenta el ahorro económico del año evaluado (Ecuación 4).

$$\text{Recuperación de la inversión (años)} = \frac{\text{Costo inicial}}{\text{Ahorro económico anual}} \quad (\text{Ecuación 4})$$

RESULTADOS

Sistemas fotovoltaicos

En Santa Clara de San Carlos se registró una temperatura promedio de 26 °C y una radiación mensual de 115 kWh/m² durante el período en estudio (mayo 2015 a abril de 2016) (Figura 2).

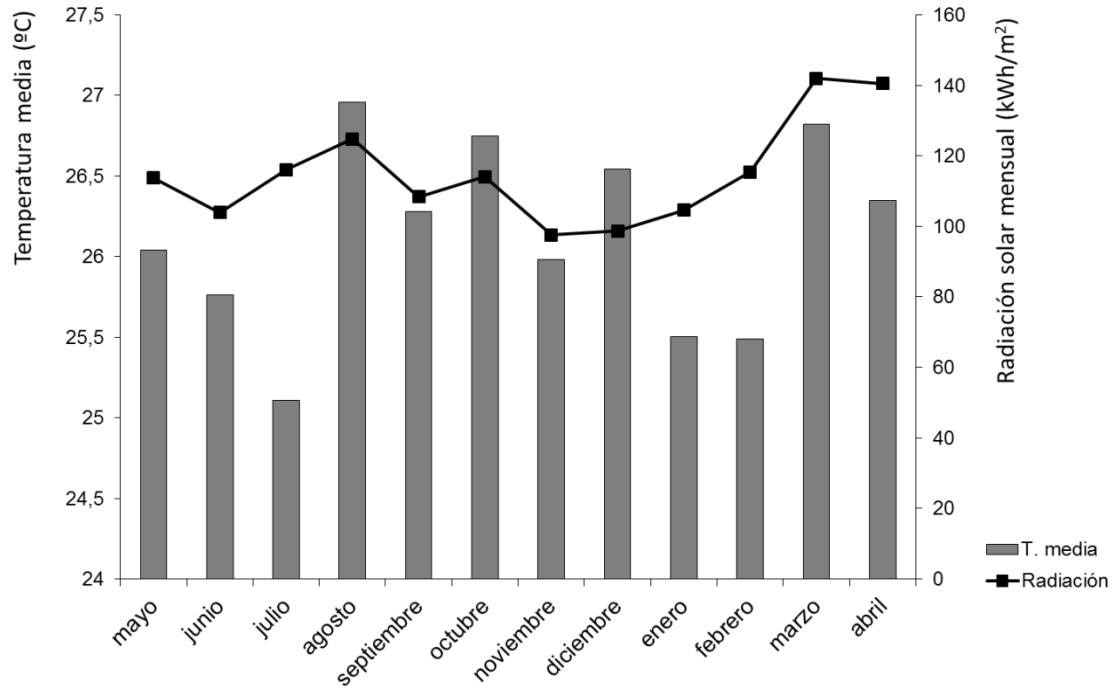


Figura 2. Temperatura media y radiación mensual registradas desde mayo 2015 a abril 2016. Santa Clara de San Carlos, Costa Rica.

Figure 2. Mean temperature and monthly radiation recorded from May 2015 to April 2016. Santa Clara de San Carlos, Costa Rica.

De acuerdo con estas condiciones, el sistema fotovoltaico generó más de 200 kW/h en los meses de agosto y diciembre de 2015, respectivamente. Este volumen de producción energética se mantuvo hasta abril de 2016, logrando una producción máxima (270 kWh) en marzo de 2016 (Figura 3), la cual a su vez presentó una correlación alta ($r^2= 0,63$) con la radiación solar que se aprecia notablemente a lo largo de un día, cuando la radiación solar y la producción eléctrica de los sistemas fotovoltaicos es máxima al mediodía (aprox. 800 Wh/m² y 100 Wh/m², respectivamente) (Figura 4).

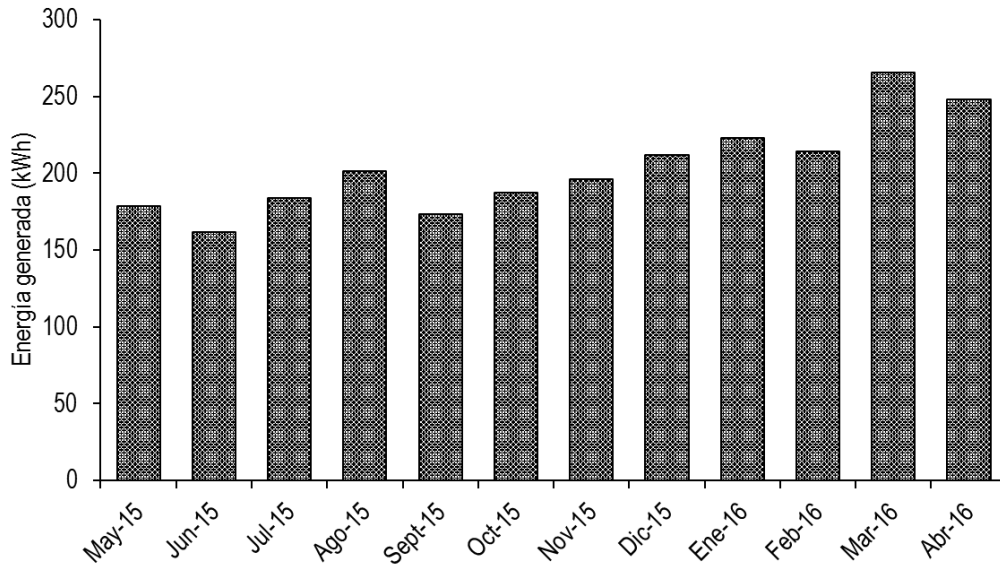


Figura 3. Energía generada por los sistemas fotovoltaicos de mayo 2015 a abril de 2016, en la Lechería del Instituto Tecnológico de Costa Rica, Sede Regional San Carlos (ITCR-SSC). Costa Rica.

Figure 3. Energy generated by the photovoltaic systems from May 2015 to April 2016, Dairy of the Costa Rica Institute of Technology, San Carlos Campus (ITCR-SSC). Costa Rica.

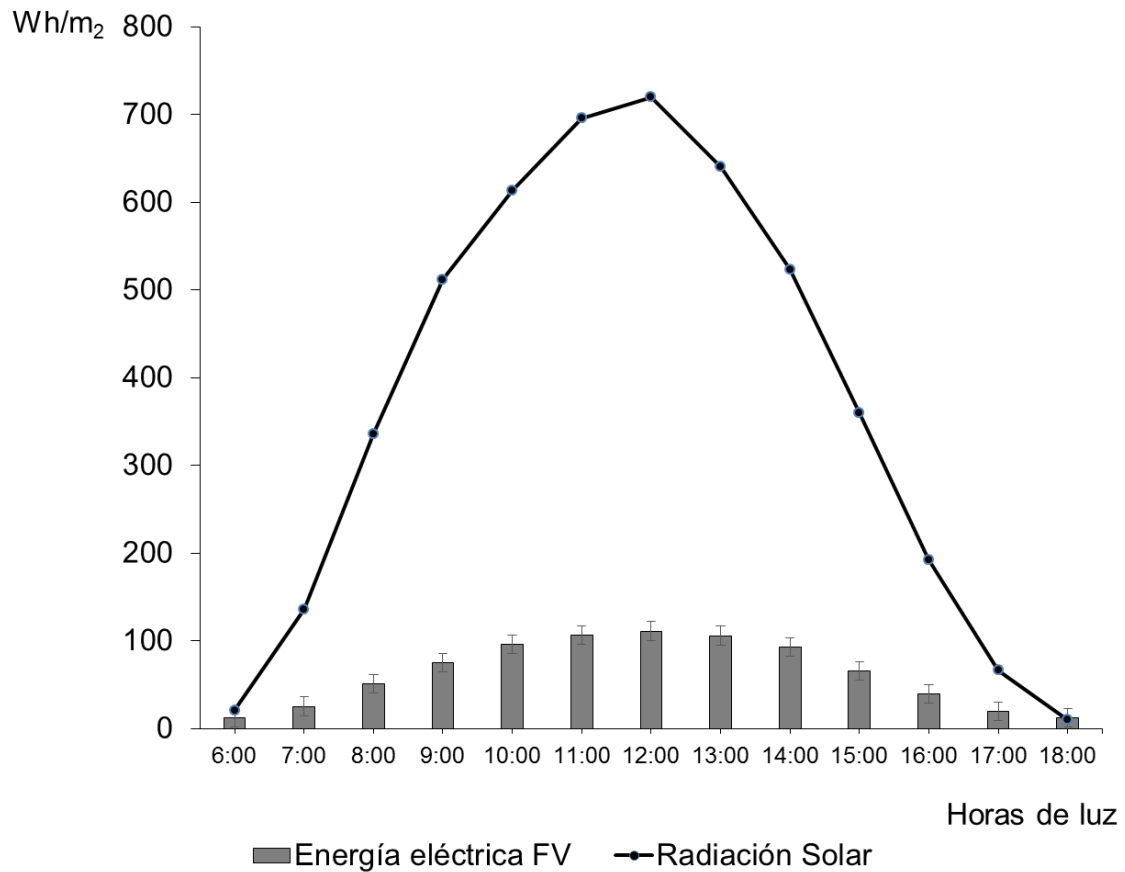


Figura 4. Promedio diario de la radiación solar y energía eléctrica fotovoltaica generada desde mayo 2015 a abril 2016. Lechería del Instituto Tecnológico de Costa Rica, Sede Regional San Carlos (ITCR-SSC), Costa Rica.

Figure 4. Daily mean of solar radiation and photovoltaic electrical energy generated from May 2015 to April 2016. Dairy of the Costa Rica Institute of Technology, San Carlos Campus (ITCR-SSC), Costa Rica.

El rendimiento de los sistemas fotovoltaicos en el período analizado presentó una tendencia entre 15% y 21%, cuyo máximo valor se presentó en diciembre 2015 y enero 2016 (Cuadro 2).

Cuadro 2. Rendimiento de los sistemas fotovoltaicos en función de la energía generada a partir de la radiación incidente, mayo 2015 a abril de 2016. Lechería del Instituto Tecnológico de Costa Rica, Sede Regional San Carlos (ITCR-SSC).

Table 2. Performance of photovoltaic systems based on energy generated from the incident radiation. May 2015 to April 2016. Dairy of the Costa Rica Institute of Technology, San Carlos Campus (ITCR-SSC).

Meses	Energía generada (kWh/m ² ·mes)	Energía solar incidente (kWh/m ² ·mes)	Rendimiento (%)
may-15	17,73	113,73	15,59
jun-15	16,01	103,94	15,40
jul-15	18,22	116,05	15,70
ago-15	19,94	124,76	15,99
sep-15	17,19	108,43	15,86
oct-15	18,59	114,05	16,30
nov-15	19,46	97,53	19,95
dic-15	21,00	98,67	21,28
ene-16	22,11	104,55	21,15
feb-16	21,23	115,38	18,40
mar-16	26,35	141,94	18,57
abr-16	24,58	140,50	17,49

Durante el período analizado, los sistemas fotovoltaicos generaron un total de 136,1 Kg equivalentes de CO₂ (Cuadro 3).

Cuadro 3. Kilogramos de CO₂ equivalente a la energía generada por los sistemas fotovoltaicos. Lechería del Instituto Tecnológico de Costa Rica, Sede Regional San Carlos (ITCR-SSC), mayo 2015 a abril de 2016, Costa Rica.

Table 3. Kilograms of CO₂ equivalent to the energy generated by the photovoltaic systems. Dairy of the Costa Rica Institute of Technology, San Carlos Headquarter (ITCR-SSC), May 2015 to April 2016, Costa Rica.

Mes	Energía generada por los sistemas fotovoltaicos (kWh)	Kg Equivalente de CO ₂
may-15	178,76	10,0
jun-15	161,34	9,0
jul-15	183,69	10,2
ago-15	201,0	11,2
sep-15	173,3	9,7
oct-15	187,4	10,4
nov-15	196,1	10,9
dic-15	211,6	11,8
ene-16	222,9	12,4

feb-16	214,0	11,9
mar-16	265,7	14,8
abr-16	248,0	13,8
TOTAL		
ANUAL	2443,79	136,1

Sistema termosifónico

El sistema solar termosifónico alcanzó una temperatura promedio de aproximadamente 48,5 °C y generó alrededor de 140,34 kWh mensualmente, lo que permitió ahorrar un 74% de la energía necesaria para alcanzar la temperatura requerida del agua para las operaciones de limpieza y desinfección de la lechería del ITCR-SSC (Cuadro 4).

Cuadro 4. Energía generada mensualmente por los sistemas solares termosifónicos instalados en la lechería del Instituto Tecnológico de Costa Rica, Sede Regional San Carlos (ITCR-SSC). Costa Rica. Mayo 2015 a abril 2016.

Table 4. Monthly energy generated by the thermosiphonic solar systems installed at the dairy of the Costa Rica Institute of Technology, San Carlos Campus (ITCR-SSC). Costa Rica. May 2015 to April 2016.

Mes	Temperatura del agua (°C)				Ahorro energético (%)	Energía aportada por el sistema (kWh/mes)
	Inicial (T _i)	Final (T _f)	Diferencial (ΔT= T _f - T _i)	Requerida (°C)		
may-15	27,5	52,5	+25,0	70,0	75,0	180,0
jun-15	27,3	50,8	+23,5	70,0	72,6	163,8
jul-15	26,0	43,1	+17,1	70,0	61,6	123,8
ago-15	26,2	35,3	+9,1	70,0	50,4	79,1
sep-15	27,5	51,7	+24,2	70,0	73,9	115,4
oct-15	26,4	42,9	+16,5	70,0	61,3	119,3
nov-15	26,0	41,0	+15,0	70,0	58,6	104,6
dic-15	30,4	54,2	+23,8	70,0	77,4	171,3
ene-16	31,6	60,4	+28,8	70,0	86,3	197,5
feb-16	32,6	43,7	+11,1	70,0	62,4	74,5
mar-16	28,5	52,9	+24,4	70,0	75,6	175,9

Abr-16	28,3	53,9	+25,6	70,0	77,0	178,9
MEDIA mensual	28,2	48,5	+20,3	70,0	69,3	140,3

El agua presentó una temperatura media de 28,2 °C a la entrada del sistema solar termosifónico. Durante los meses analizados en el período 2015-2016, se determinó que el agua presentó la temperatura más alta en el mes de abril de 2016 (33,63°C). En general, el sistema termosifónico logró un incremento promedio de 20,3 °C, lo que indica que permitió cubrir aproximadamente 69,3% de la energía necesaria para alcanzar la temperatura del agua requerida para las operaciones de limpieza de la lechería y sanitización de los equipos de ordeño (Figura 5).

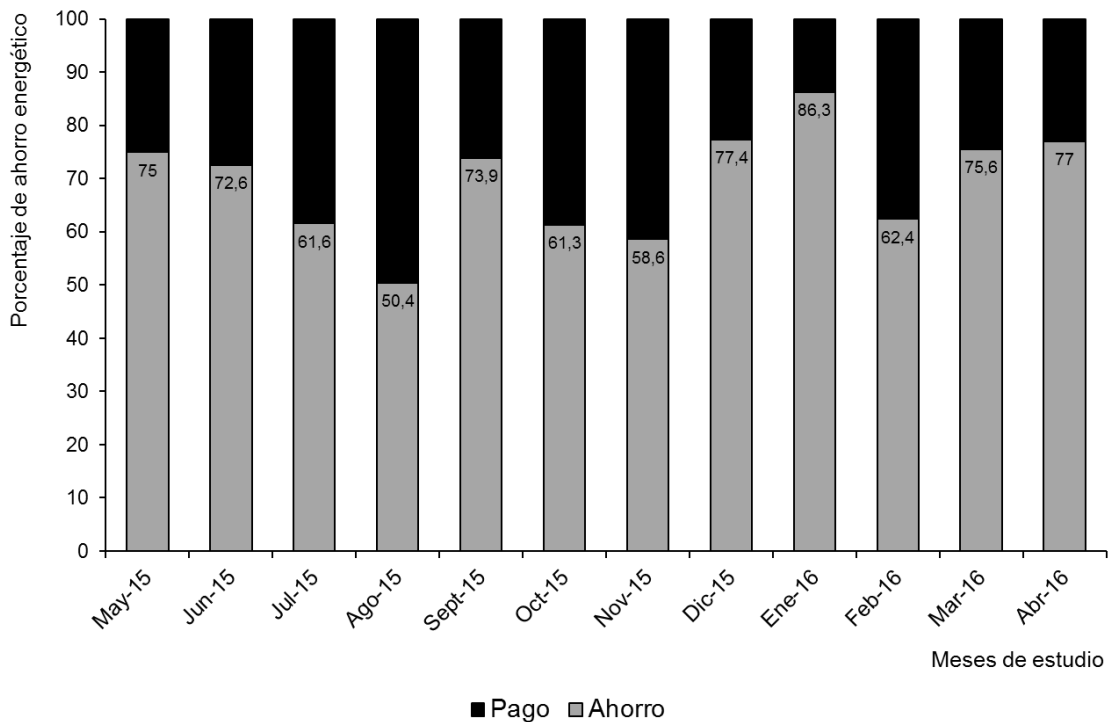


Figura 5. Ahorro energético porcentual logrado con el calentamiento del agua por medio del sistema termosifónico solar, de mayo de 2015 a abril 2016, lechería del Instituto Tecnológico de Costa Rica, Sede Regional San Carlos (ITCR-SSC). Costa Rica.

Figure 5. Percentage energetic saving reached by the thermosyphonic solar system for water heating from May 2015 to April 2016, Dairy of the Costa Rica Institute of Technology, San Carlos Campus (ITCR-SSC). Costa Rica.

El sistema termosifónico, al igual que el fotovoltaico siguió un comportamiento gaussiano de producción, en donde su máximo rendimiento se alcanzó entre las 11 y 12 h del día (Figura 6), lo que evidencia una eficiencia de aproximadamente 55,3%.

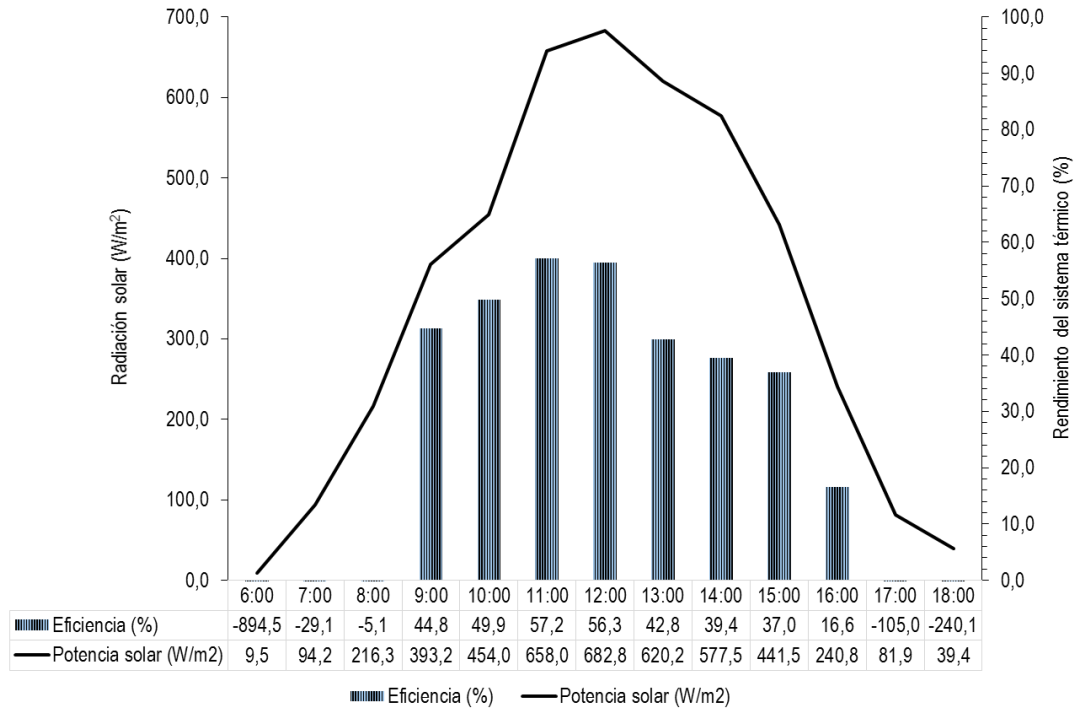


Figura 6. Rendimiento medio anual del sistema termosifónico a lo largo de un día, lechería del Instituto Tecnológico de Costa Rica, Sede Regional San Carlos (ITCR-SSC). Costa Rica.

Figure 6. Mean annual efficiency of the thermosiphonic system along a day. Dairy of the Costa Rica Institute of Technology, San Carlos Campus (ITCR-SSC).

El sistema solar termosifónico fue capaz de aportar 140,34 kWh mensuales promedio para alcanzar la temperatura requerida para las operaciones de la lechería del ITCR-SSC, lo que equivale a un promedio de 55,25 Kg de CO₂ anual (7,62 Kg por mes, Cuadro 5).

Cuadro 5. Kilogramos de CO₂ equivalente a la cantidad de energía generada por los colectores térmicos instalados en la lechería del Instituto Tecnológico de Costa Rica, Sede Regional San Carlos (ITCR-SSC) si procedieran de la electricidad. Calculado de mayo 2015 a abril 2016. Costa Rica.

Table 5. Kilograms of CO₂ equivalent to the energy generated by the thermal collectors installed at the dairy of the Costa Rica Institute of Technology, San Carlos Campus

(ITCR-SSC) if they would proceed from electricity. Calculate May 2015 to April 2016. Costa Rica.

Mes	Temperatura del agua (°C)		Energía diaria aportada (KJ/día)	Energía mensual aportada (kWh/mes)	Kg de CO ₂ equivalentes
	Inicial (T _i)	Final (T _f)			
	may-15	27,5	52,5	20.900,1	180,0
jun-15	27,3	50,8	19.650,4	163,8	9,1
jul-15	26,0	43,1	14.379,4	123,8	6,9
ago-15	26,2	35,3	7.600,7	79,1	4,4
sep-15	27,5	51,7	20.273,2	115,5	6,4
oct-15	26,4	42,9	13.857,6	119,3	6,6
nov-15	26,0	41,0	12.552,8	104,6	5,8
dic-15	30,4	54,2	19.891,9	171,3	9,5
ene-16	31,6	60,4	22.940,6	197,5	11,0
feb-16	32,6	43,7	9.248,5	74,5	4,2
mar-16	28,5	52,9	20.422,1	175,9	9,8
abr-16	28,3	53,9	21.473,2	178,9	10,0
MEDIA mensual	28,2	48,5	16.932,5	140,3	7,8

En la lechería del ITCR-SSC se logró un ahorro de aproximadamente US\$1 152 con el empleo de ambos sistemas térmicos solares durante el período analizado. Este ahorro representa el 35,57% del total (US\$3 257,09) de la factura total anual de electricidad (Cuadro 6 y 7).

Cuadro 6. Ahorro mensual y anual (en dólares estadounidenses) por la producción energética generada por los sistemas fotovoltaicos y termosifónicos y, porcentaje representativo respecto al gasto en la lechería del Instituto Tecnológico de Costa Rica, Sede Regional San Carlos (ITCR-SSC). Costa Rica. Mayo 2015 a abril 2016.

Table 6. Monthly and annual savings (in American dollars) for energy production by the photovoltaic and the hermosyphonic systems and, representative percentage of the expenses at the dairy of the Costa Rica Institute of Technology, San Carlos Campus (ITCR-SSC) dairy. Costa Rica. May 2015 to April 2016.

Mes	Energía total producida (KWh)	Costo por energía (\$)	Costo por alumbrado público (\$)	Impuesto de ventas (\$)	Ahorro total (\$)
may-15	359,0	91,7	2,5	4,6	98,7
jun-15	325,0	87,2	2,2	4,4	93,8
jul-15	308,0	84,9	2,1	4,2	91,2
ago-15	280,0	81,2	1,9	4,1	87,2
sep-15	289,0	82,4	2,0	4,1	88,5
oct-15	307,0	84,7	2,1	4,2	91,1
nov-15	301,0	84,0	2,1	4,2	90,2
dic-15	383,0	94,9	2,6	4,7	102,2
ene-16	420,0	99,8	2,9	5,0	107,7
feb-16	289,0	82,3	2,0	4,1	88,4
mar-16	442,0	102,6	3,0	5,1	110,8
abr-16	427,0	100,7	2,9	5,0	108,7
Total	4.128,0	1.076,3	28,5	53,8	1.158,5

Cuadro 7. Ahorro económico porcentual derivado de la producción energética generada por los sistemas fotovoltaicos y termosifónicos, instalados en la lechería del Instituto Tecnológico de Costa Rica, Sede Regional San Carlos (ITCR-SSC). Costa Rica. Mayo 2015 a abril 2016.

Table 7. Percentage economic saving derived from the energy production generated by the photovoltaic and thermosyphonic systems installed at the dairy of the Costa Rica Institute of Technology, San Carlos Campus (ITCR-SSC). Costa Rica. May 2015 to April 2016.

Concepto	Monto (US\$)
Factura eléctrica sin instalación de equipo solar	3.257,1
Factura eléctrica con instalación de equipo solar	2.098,5
Ahorro	1.158,5
Porcentaje de ahorro (%)	35,6

En el año cero se haría el pago de la inversión del proyecto (US\$10.000), y cada año que pasa esta inversión se pagaría con el ahorro que se generaría en la factura eléctrica (US\$1.158,5), por lo que en el año 8 la inversión se pagaría y a partir de ahí el productor recibiría los beneficios netos de la inversión, ya que los ahorros se seguirían recibiendo por el periodo de vida útil de los equipos (más de 25 años).

DISCUSIÓN

En el presente trabajo los sistemas solares instalados en la lechería del ITCR-SSC lograron generar un promedio mensual de aproximadamente 344 kWh y un total de 4.130 kWh, equivalentes a US\$1.160 capaz de cubrir el 35% del consumo eléctrico total anual (US\$3.260). De ese consumo eléctrico, una parte era destinada a calentar el agua para el lavado de equipos y desinfección, procesos que actualmente se cubren en un 74% por calentamiento térmico a través de los sistemas termosifónicos. Como además el agua tiene un alto poder calorífico (4.187 J/Kg·°C) (Poling, Prausnitz y Reid, 1987) y una vez caliente se deposita en un tanque sellado, con lo que se puede disponer siempre de ésta para las operaciones de limpieza y sanitización que se realizan en la lechería, lo cual asegura la inocuidad en esta unidad productiva.

Se puede afirmar que la cantidad de energía producida depende en alto grado de la intensidad de la radiación solar incidente, independientemente de la temperatura, la nubosidad y las precipitaciones de la zona, las cuales son constantes y abundantes a lo largo de todo el año en la Región Huetar Norte.

La relación entre la cantidad de radiación solar incidente y la energía generada a lo largo del día revela una alta correlación, razón por la cual siempre es preciso colocar los sistemas en la posición y ángulo que aproveche al máximo la luz incidente (Benítez-Salazar et al., 2013). Además, el rendimiento de los sistemas térmicos solares instalados en el ITCR-SSC es consecuencia del tipo de material con el que están contruidos los sistemas solares (González, 2009.). En este estudio se determinó que el rendimiento disminuye conforme aumenta la diferencia de temperaturas con respecto de la irradiación incidente (a la salida y puesta del sol y durante la noche). Al mediodía, tanto la irradiación como la temperatura ambiente tienen poca variación, pues es mayor la temperatura de entrada de agua al colector y más calor transfieren estos hacia el medio exterior (Joshi et al., 2005). Es decir, de la radiación que llega a los colectores, se aprovecha más al mediodía porque el propio colector pierde menos energía que cuando no hay radiación.

De acuerdo con el ICE (2010), el 76% de la energía generada en Costa Rica es de origen hidroeléctrico; 12% de origen geotérmico, 4% de origen eólico y 1% de biomasa. Solamente un 7% del total producido se genera con fuente térmica, por lo que el 93% de la energía generada en el país procede de fuentes no fósiles, lo que hace que la cantidad de CO₂ que se evita emitir a la atmósfera con los sistemas solares no sea tan significativo como puede serlo en otros países más dependientes de los combustibles fósiles.

Aunque las centrales hidroeléctricas no contaminen en términos de 0 emisión de gases de efecto invernadero (GEI), lo que no significa que no suponga un impacto ambiental sobre las regiones donde se construyen en comparación con los desvíos de los ríos e impacto directo sobre el microclima y fauna piscícola, deforestación y expropiación de tierras por inundación. Debido a esto, la energía solar destaca por ser una tecnología sostenible, viable y factible en diversos usos domésticos, industriales y en aplicaciones tecnológicas (Iglesias-Ferrer y Morales-Salas, 2013).

Es preciso señalar que, en el monto calculado, no se tiene en cuenta el costo ambiental que supone la implantación de los sistemas solares, el cual elevaría significativamente el ahorro de la factura eléctrica, ya que actualmente las empresas no contemplan los costos medioambientales que generan sus actividades. Las nuevas normativas medio ambientales y la presión de las organizaciones no gubernamentales y de los organismos de crédito internacionales están modificando esta actitud y han llevado a las empresas a prestar cada vez más atención a esos costos.

Con el tiempo, la sociedad adoptará las energías renovables, ya que las reservas de combustibles fósiles son limitadas y sólo son generadas con el transcurso de tiempos geológicos. Por lo tanto, la pregunta no es si la sociedad adoptará las energías renovables, sino cuándo lo hará. Los tiempos de vida de los combustibles fósiles podrían ampliarse gracias a las nuevas tecnologías de extracción, pero la necesidad de minimizar los efectos nocivos del cambio climático es un problema más inmediato que el agotamiento de los combustibles fósiles (Timmons et al., 2014).

CONCLUSIONES

Los sistemas de energía solar son una alternativa para disminuir la dependencia de los combustibles fósiles de las explotaciones productivas agropecuarias de la Región Huetar Norte de Costa Rica. En este trabajo se ha demostrado que la Región Huetar Norte es una zona donde estos sistemas han contribuido a mejorar no sólo la eficiencia de estas explotaciones, sino también las operaciones que en ellas se realiza. Además, el uso de estos sistemas para la generación de energías limpias contribuye a disminuir la emisión de gases de efecto invernadero y por ende, la huella de carbono de estas explotaciones lo que implicaría una diferencia que le permitiría diferenciar comercialmente la producción de las explotaciones que los usen, por medio de un sello ecológico o sello verde.

LITERATURA CITADA

ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers) 2003. Standard ANSI/ASHRAE 93-2003: Methods of Testing to Determine the Thermal Performance of Solar Collectors. ASHRAE, USA.

Benítez-Salazar, V.H., G.A. Torres Valverde, L.A. Gámez Valdéz, y J.H. Pacheco Ramírez, 2013. Sistema fotovoltaico de iluminación solar. *Epistemus* 15: 86-92.

Prosperi M. et A. Croci, 2005. Dossier solare térmico. Proyecto RES & RUE Dissemination. http://www.ape.fvg.it/wp-content/uploads/dlm_uploads/2016/03/ADICONS-Solare-termico.pdf (consultado 15 jul. 2016)

Díaz, J.F. 2015. Conceptos de energía solar térmica. <https://juanfrancisco207.wordpress.com/2015/01/31/conceptos-de-energia-solar-termica/> (consultado 15 jul. 2016).

Espejo-Marín, C. 2004. La energía solar fotovoltaica en España. *Nimbus* 13-14:5-31.

González, J. 2009. Energías renovables. Editorial Reverté SA, ESP.

Henley, E.J. 1973. Sistemas de unidades. En: E.J. Henley, y E.M. Rosen, editores, Cálculo de balances de materia y energía Editorial Reverté SA, ESP. p. 31-34.

ICE (Instituto Costarricense de Electricidad). 2010. Costa Rica: matriz eléctrica. https://www.kolbi.cr/wps/wcm/connect/8823524c-7cc7-4cef-abde-a1f06e14da0e/matriz_folleto_web2.pdf?MOD=AJPERES&CVID=I8SK4gG (consultado 8 jul. 2016).

Iglesias-Ferrer, J.M., y J. Morales-Salas. 2013. Dimensionado de un sistema térmico solar mediante simulación y su validación energética. *Ingeniería Energética* 34:55-65.

IEN (Instituto Ecuatoriano de Normalización). 2009. NTE INEN 2507: Rendimiento térmico de colectores solares en sistemas de calentamiento de agua para uso sanitario. IEN, Quito, ECU.

IMN (Instituto Meteorológico Nacional). 2016. Factores de emisión gases de efecto invernadero. Sexta edición. <http://cglobal.imn.ac.cr/documentos/factores-de-emision-gei-sexta-edicion> (consultado 30 ene. 2017).

Joshi, S.V., R.S. Bokil, and J.K. Nayak. 2005. Test standards for thermosyphon-type solar domestic hot water system: review and experimental evaluation. *Solar Energy* 78: 781-798.

Khan, M., A. Abdul Malek, M. Mithu, and D. Das. 2010. Design, fabrication and performance evaluation of natural circulation rectangular box-type solar domestic water system. *Int. J. Sustainable Energy* 2:164-177.

Lamela, A. 2005. La sostenibilidad, un reto global ineludible. *Informes de la Construcción* 57:499-500.

Matthew, C. 2006. La ganadería amenaza el medio ambiente. Organización de las naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. <http://www.fao.org/Newsroom/es/news/2006/1000448/index.html> (consultado el 29 de jun. 2016).

MINAET (Ministerio de Ambiente, Energía y Telecomunicaciones). 2011. VI Plan Nacional de energía 2012-2013. http://www.dse.go.cr/es/03Publicaciones/01PoliticaEnerg/VI_Plan_Nacional_de_Energia_2012-2030.pdf (consultado 25 may. 2016).

Poling, B.E., J.M. Prausnitz, and R.C. Reid. 1987. *The properties of gases and liquids* 4ª ed. McGraw-Hill interamericana, ESP.

Quirós, L. 2011. Construir América Central y el Caribe. <http://revistaconstruir.com/construccion-sostenible-un-reto-para-la-region/836/> (consultado 28 jun. 2016).

Shyam, S.N. 2005. La energía solar y su utilización. Proyecto de Investigación desarrollados en el departamento de Física de la Universidad Nacional. Heredia. Costa

Guzmán-Hernández et al.: Energía solar en sistemas agropecuarios de Costa Rica.

Rica. http://www.sistemamid.com/panel/uploads/biblioteca/2014-06-27_10-14-37105995.pdf (consultado 28 jun. 2016).

Taiz, L., and E. Zeiger. 2002. Chapter 7. Photosynthesis. The light reaction. In: L. Taiz, editor, -Plant physiology, -Sinauer Associates. USA. pp.112-115.

Timmons, D., J. M. Harris y B. Roach. 2014. La Economía de las Energías Renovables. http://www.ase.tufts.edu/gdae/education_materials/modules/EconomiaEnergiasRenovables.pdf (consultado 3 oct. 2016).