

TEC | Tecnológico
de Costa Rica

USO DE TECNOLOGÍA SOLAR

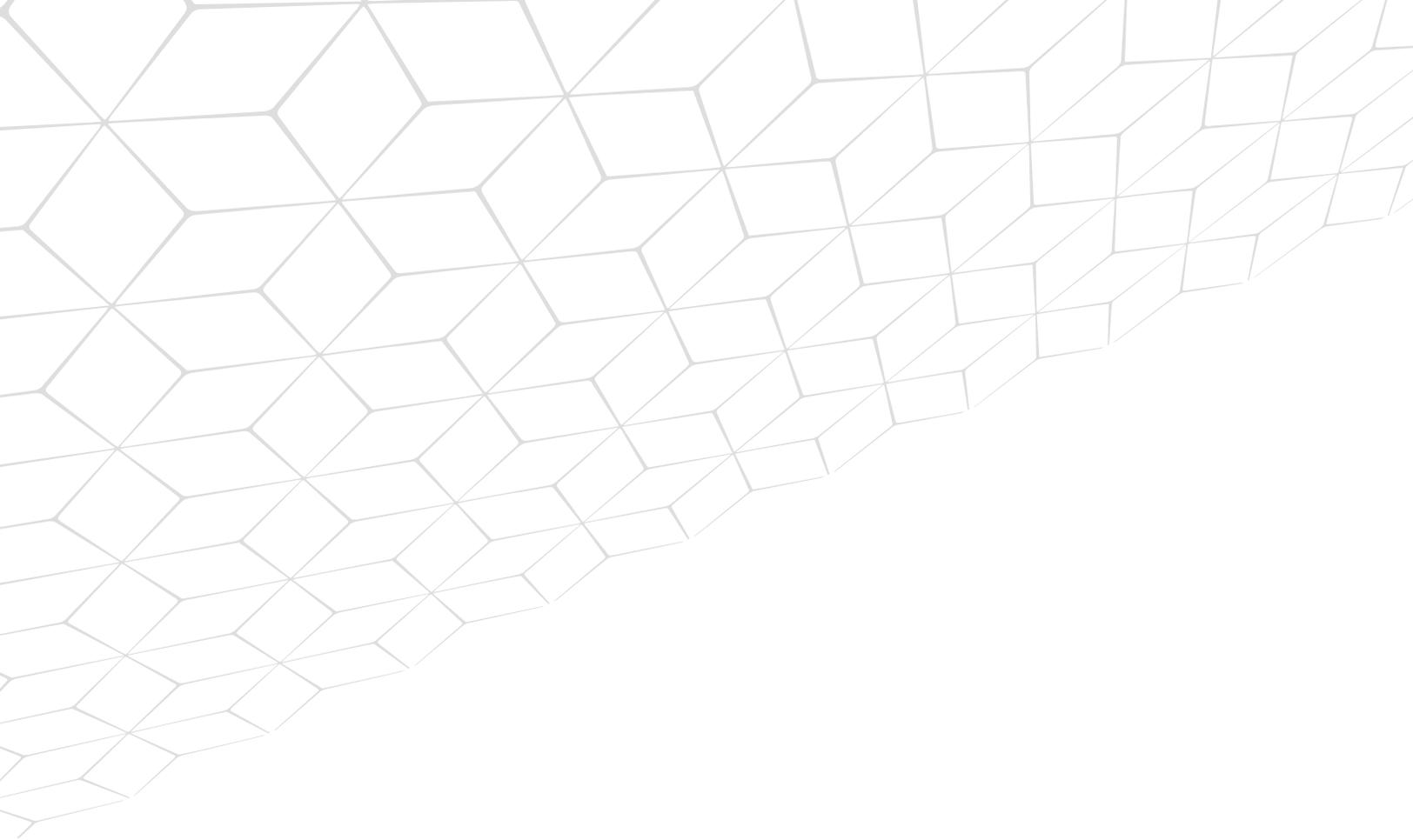
en actividades agropecuarias
de la Región Huetar Norte
de Costa Rica (II Parte)



Autores de la compilación:

Dr. Tomás de Jesús Guzmán Hernández

Dr. Javier Mauricio Obando Ulloa



Uso de tecnología solar en actividades agropecuarias de la Región Huétar Norte de Costa Rica

Autores de la compilación:

Dr. Tomás de Jesús Guzmán Hernández

Dr. Javier Mauricio Obando Ulloa

Contenidos

La energía solar: una alternativa para las explotaciones agropecuarias de la zona Huetar Norte de Costa Rica.....	11
Dr. Tomás de Jesús Guzmán Hernández; Dr. Freddy Araya Rodríguez; Lic. Guillermo Castro Badilla; Bach. Gonzalo Quiroz Vinda, Dr. Javier Mauricio Obando Ulloa	
La energía solar en sistemas agropecuarios. Resultados de un programa local piloto en la zona norte de Costa Rica	19
Tomás de Jesús Guzmán Hernández; Freddy Araya Rodríguez; Guillermo Castro Badilla. Instituto Tecnológico de Costa Rica, Sede Regional de San Carlos, Costa Rica.	
Aplicación de sistemas solares térmicos y fotovoltaicos en el sector agrícola y agroindustrial para disminuir los gases de efecto invernadero en la región Huetar Norte de Costa Rica.	32
Tomás J. Guzmán Hernández, Javier M. Obando Ulloa, Guillermo Castro Badilla	
Evaluación de sistemas térmicos y fotovoltaicos solares en unidades de producción agropecuaria, Región Huetar Norte, Costa Rica	48
Tomás de Jesús Guzmán-Hernández, Freddy Araya-Rodríguez, Javier Obando-Ulloa, Mikel Rivero-Marcos, Guillermo Castro-Badilla.	
Uso de la energía solar en sistemas de producción agropecuaria: producción más limpia y eficiencia energética	64
Tomás de Jesús Guzmán Hernández, Freddy Araya Rodríguez, Guillermo Castro Badilla y Javier M. Obando Ulloa	
Producción mas limpia y eficiencia energética: caso del uso de la energía solar	74
Tomás de Jesús Guzmán Hernández; Gonzalo Quiroz Vindas; Freddy Araya Rodríguez	
Aplicación de tecnologías solares térmicas híbridas, para la deshidratación y secado de productos agrícolas en la Región Huetar Norte de Costa Rica.....	91
Dr. Tomás de Jesús Guzmán Hernández, Dr. Javier Mauricio Obando-Ulloa, Lic. Guillermo Castro-Badilla, Deyver Antonio Rodríguez-Rojas, Lic. Natalia Arce Hernández, MAE. Ing. Juan Manuel Ortega Castillo, Dr. Freddy Araya-Rodríguez	
Estimación de la reducción de gases de efecto invernadero para la implementación de tecnología térmica solar en el proceso de escaldado de pimienta.....	98
Oviedo-Ortega, S.; Guzmán-Hernández, T.J.; Obando-Ulloa, J.M.	
Familias térmicas solares para procesamiento de productos agropecuarios y agroindustriales en la región Huetar Norte de Costa Rica: programa local piloto	104
Tomás de Jesús Guzmán-Hernández, Javier Mauricio Obando Ulloa; Freddy Araya Rodríguez; Guillermo Castro Badilla	

Estimación de la reducción de gases de efecto invernadero en el escaldado de pimienta (<i>Piper nigrum</i> L.) en la planta procesadora de la Asociación de Productores de Pimienta de Sarapiquí (APROPISA)	110
Javier Mauricio Obando-Ulloa, Stephanie Oviedo- Ortega, Tomás de Jesús Guzmán-Hernández.	
Aplicación de tecnologías térmicas solares pasivos y activas como alternativa a los sistemas tradicionales de secado en unidades de producción agropecuarias en la zona Huetar Norte de Costa Rica.....	120
Tomás de Jesús Guzmán Hernández; Freddy Araya Rodríguez; Javier M. Obando Ulloa; Guillermo García Castro; Cristian Moreira Segura	
Energía solar: tecnología aplicada al secado de productos agrícolas de la Región Huetar Norte de Costa Rica.....	141
Tomás de Jesús Guzmán Hernández, Javier Mauricio Obando Ulloa, Freddy Araya Rodríguez, Guillermo Castro Badilla, Valentina Arguelles Ulloa, Jacobo Ortiz Martínez	
Sistemas fotovoltaicos y su posible uso en sistemas pasivos y activos de secado	149
Modelo estratégico para la implementación de sistemas térmicos solares híbridos forzados al proceso de incorporación de valor agregado del cacao en la Región Huetar Norte	159
Marcela Fernández Rodríguez	
Planos del sistema térmico solar híbrido forzado diseñado e implementado en el Campus Tecnológico Local San Carlos (Instituto Tecnológico de Costa Rica).....	169
Planos del sistema térmico solar híbrido forzado diseñado e implementado para la asociación de productores agroambientalistas de cacao (Guatuso).....	174
Sistema Térmico Solar Pasivo implementado en el Campus Tecnológico Local San Carlos (Instituto Tecnológico de Costa Rica)	182
Sistema térmico solar con piso radiante implementado en la fábrica artesanal de chocolates fusión (El Tanque, Florencia, Alajuela)	185
Premios obtenidos	189

Prólogo

La primera parte del manual “Uso de tecnología solar en actividades agropecuarias de la Región Huetar Norte de Costa Rica. Manual Técnico” fue el resultado de los primeros proyectos de investigación y extensión desarrollados entre 2014 y 2017 por Grupo de Investigación en Sistemas Térmicos Solares para la Agricultura del Programa de Doctorado en Ciencias Naturales para el Desarrollo del Programa de Doctorado en Ciencias Naturales para el Desarrollo (Campus Tecnológico Local San Carlos, Instituto Tecnológico de Costa Rica), cuyos integrantes comenzaron a trabajar en la aplicación de la tecnología térmica solar en otras actividades agrícolas (secado, escaldado, entre otros) a partir de 2017.

Esta segunda parte está compuesta por un compendio de artículos publicados en diferentes medios científicos, técnicos, divulgativos y memorias de eventos científicos y, también incluye algunos otros resultados producto del registro, la evaluación de los datos del funcionamiento de estos equipos y los planos de cada uno de los sistemas (Cuadro 1).

El proyecto que dio inicio a la aplicación de sistemas solares en unidades de producción agrícola, especialmente en ganadería, se denominó “Implementación de tecnologías solares en actividades económicas agropecuarias en la zona Huetar Norte de Costa Rica. Programa local piloto”, el cual estuvo inscrito en el Programa de Regionalización Universitaria (PUR-CONARE) y que inició en 2014 en el Campus Tecnológico Local San Carlos (ITCR) y contó con un financiamiento de 10 millones de colones aportados por el ITCR.

Ese proyecto, así como la experiencia generada por los investigadores, abrió la puerta para la ejecución de otros proyectos relacionados (cuadro 2) que lograron atraer más de 200 millones de colones de fondos externos (MAG- FITTACORI, INDER, Fundación CRUSA) para la utilización de energía solar en las actividades de pequeños y medianos productores agropecuarios y agroindustriales, comunidades, así como a cooperativas y asociaciones de productores legalmente constituidos principalmente en la región Huetar Norte de Costa Rica (Cuadro 3).

Estos proyectos han permitido mejorar la calidad de los procesos de producción, tanto agrícola como agroindustrial, en los procesos de esterilización, pasteurización, secado y escaldado, el uso de sistemas limpios de producción y la mejora de las condiciones ambientales, por la reducción de la huella de carbono y de la emisión de gases de efecto de invernadero gracias a la transferencia de esta tecnología avanzadas a los procesos de producción rural del país, por lo que los productores de otras zonas del país (Dota, Zarcero, Pérez Zeledón y zona Sur, entre otras) reclamen la aplicación de estos sistemas.

Esta vinculación academia-sector productivo-gobierno (instituciones públicas) han permitido la participación tanto de estudiantes costarricenses como de diferentes países, entre ellos España y México y, por medio de una propuesta robusta, solucionar problemas concretos de la práctica productiva de las pequeñas y medianas empresas o asociaciones, lo que constituye clave del éxito de estos proyectos.

El grupo de investigación fue galardonado con el premio “National Energy Globe”, de la Fundación Energy Globe (Austria) en 2018 y 2019 por los proyectos “Sistemas solares térmicos para operaciones agrícolas” (Thermal solar systems for farming operations) y “Utilización de energía solar en el proceso de secado de productos agrícolas” (Use of solar energy in the drying process of agricultural products), respectivamente, con los cuales representaron al ITCR.

Esperamos que el mismo sea de utilidad para técnicos, ingenieros, productores, empresas, y el sector público.

Cuadro 1. Detalle de los medios en los que se ha publicado de los artículos incluidos en esta compilación

Artículo	Medio de publicación
La energía solar: una alternativa para las explotaciones agropecuarias de la zona Huetar Norte de Costa Rica	Ventana 10 (1): 12- 18. ISSN: 1659-3308.
La energía solar en sistemas agropecuarios. Resultados de un programa local piloto en la zona Norte de Costa Rica	Germinar 20: 18-19. ISSN: 1659-1089
Aplicación de sistemas solares térmicos y fotovoltaicos en el sector agrícola y agroindustrial para disminuir los gases de efecto invernadero en la región Huetar Norte de Costa Rica	Memorias del I Congreso Interuniversitario de Extensión y Acción Social. San José, Costa Rica, 16- 18 de septiembre, 2019 (en prensa)
Evaluación de sistemas térmicos y fotovoltaicos solares en unidades de producción agropecuaria, Región Huetar Norte, Costa Rica.	Agronomía Mesoamericana 28 (3): 535-548. ISSN 2215-3608, doi:10.15517/ma.v28i3.26442
Uso de la energía solar en sistemas de producción agropecuaria: producción más limpia y eficiencia energética.	Tecnología en Marcha Número Especial Encuentro de Investigación y Extensión 2016: 46-56. doi:http://dx.doi.org/10.18845/tm.v29i8.2984
Producción más limpia y eficiencia energética: Caso del uso de la energía solar	Congreso lechero 2015
Aplicación de tecnologías solares térmicas híbridas, para la deshidratación y secado de productos agrícolas en la Región Huetar Norte de Costa Rica	Ventana 11 (1): 21-25. ISSN: 1659-3308.
Estimación de la reducción de gases de efecto invernadero para la implementación de tecnología térmica solar en el proceso de escaldado de pimienta	Ventana 12 (1): 20-23. ISSN: 1659-3308.
Familias térmicas solares para procesamiento de productos agropecuarios y agroindustriales en la región Huetar Norte de Costa Rica: programa local piloto	Comunicación oral en el XIII Congreso Latinoamericano y del Caribe de Ingeniería Agrícola (CLIA 2018; San José, 4- 7 de junio). Sometido a evaluación para su publicación en la revista Tecnología en Marcha.
Estimación de la reducción de gases de efecto invernadero en el escaldado de pimienta (<i>Piper nigrum L.</i>) en la planta procesadora de la Asociación de Productores de Pimienta de Sarapiquí (APROPISA)	Comunicación oral en el 12th Annual International Symposium on Agricultural Research (Atenas, Grecia, 15- 18 de julio, 2019). Sometido a evaluación para su publicación en el ATINER'S Conference Paper Series
Aplicación de tecnologías térmicas solares pasivos y activas como alternativa a los sistemas tradicionales de secado en unidades de producción agropecuarias en la zona Huetar Norte de Costa Rica	Comunicación oral en el 11th Annual International Symposium on Agricultural Research. Atenas, Grecia, 16- 19 de julio, 2018. Publicado en el ATINER'S Conference Paper Series, No: AGR2018- 2591.
Energía solar: Tecnología aplicada al secado de productos agrícolas de la región Huetar Norte de Costa Rica	Ventana 13 (1). ISSN: 1659-3308. En prensa
Sistemas fotovoltaicos y su posible uso en sistemas pasivos y activos de secado	Informe final de Prácticas Internacionales 2015, MSc. Pablo Urzainsqui Ardanaz, Universidad Pública de Navarra (España) (Inédito)
Modelo estratégico para la implementación de sistemas térmicos solares híbridos forzados al proceso de incorporación de valor agregado del cacao en la región Huetar Norte	Capítulo de la tesis de maestría en Gestión Ambiental y Desarrollo Local del Instituto Centroamericano de Administración Pública (ICAP) de la Lic. Marcela Fernández Rodríguez. Defendida en diciembre de 2019

Cuadro 2. Detalle de los proyectos ejecutados por el Grupo de Investigación en Sistemas Térmicos Solares para la Agricultura del Programa de Doctorado en Ciencias Naturales para el Desarrollo del Programa de Doctorado en Ciencias Naturales para el Desarrollo (Campus Tecnológico Local San Carlos, Instituto Tecnológico de Costa Rica)

Nombre del proyecto	Fecha	Fondo	Monto interno ITCR (¢)	Monto externo (¢)	Observaciones
Implementación de tecnologías solares en actividades económicas agropecuarias en la zona Huetar Norte de Costa Rica. Programa local piloto.	2014-2018	Programa de Regionalización Universitaria (PUR-CONARE)	10 000 000,00		Es el proyecto que da inicio a la aplicación de sistemas solares en unidades de producción agrícolas especialmente en la ganadería. Vigente.
"Implementación de tecnologías solares en una planta de procesamiento de leche y lecherías, para pasteurizar, esterilizar y generar energía en la zona Huetar Norte de Costa Rica". Programa local piloto. Inicio, enero del 2016-dic 2017	2016-2017	Fundación para el Fomento y Promoción de la Investigación y Transferencia de Tecnología Agropecuaria de Costa Rica FITTACORI-MAG		7 000 000,00	Aprobado por MAG_FITTACORI, Resultados incluidos en las Memorias del 2017. Concluido
"Aplicación de energía solar en los sistemas productivos agropecuarios de la zona norte de Costa Rica". Inicio, enero del 2016 hasta dic 2018	2016-2019	Vicerrectoría de Investigación y Extensión (VIE)	10 000 000,00		Proyecto aprobado por la Dirección de Proyectos. Vigente
Aplicación de energía solar en los sistemas productivos agropecuarios de la Zona Norte de Costa Rica. Programa local piloto Caso pimienta/semillas	2017-2019	Instituto de Desarrollo Rural (INDER)		40 000 000,00	Proyecto aprobado y financiado por la Sub región de Sarapiquí, del INDER Vigente
"Capacitación en el uso de tecnologías para el aprovechamiento de la energía solar en actividades económicas pecuarias en la zona Huetar Norte y Chorotega de Costa Rica". Programa piloto especial para productores de "Dos Pinos"	2016-2018	Dos Pinos		4 500 000,00	Aprobado por el Comité de Educación y Bienestar Social En ejecución

Nombre del proyecto	Fecha	Fondo	Monto interno ITCR (t)	Monto externo (t)	Observaciones
"Aplicación de tecnologías solares térmicas para el secado del cacao (<i>Theobroma cacao L.</i>) en la Región Huetar Norte de Costa Rica"	2017-2018	Fundación para el Fomento y Promoción de la Investigación y Transferencia de Tecnología Agropecuaria de Costa Rica FITTACORI-MAG		7 000 000,00	Aprobado y en ejecución
"Aplicación de tecnologías térmicas solares para el secado del cacao (<i>Theobroma cacao L.</i>) en la Región Huetar Norte de Costa Rica"	2017-2018	Programa de Regionalización Universitaria (PUR-CONARE)	5 000 000,00		Aprobado y en ejecución
"Mejoramiento de la infraestructura y diagrama de flujo en la planta procesadora de la Asociación de Productores de Pimienta de Sarapiquí (APROPISA)"	2018-2020	INDER		175 000 000,00	Aprobado y en ejecución
Aplicación de tecnologías solares térmicas pasivas y activas para el secado del cacao (<i>Theobroma cacao L.</i>) en la Región Huetar Norte de Costa Rica	2019-2021	MAG-Transferencia de Tecnologías al Sector Agropecuario		117 198 200,00	En trámite
Apoyo del Programa de Energía solar del ITCR, de la Vicerrectoría de Administración	2017	VAD-ITCR	10 000 000,00		Ejecutado
Apoyo de la Vicerrectoría de Docencia en equipamiento docente	2017	ViDA	2 500 000,00		Ejecutado
Simposio Internacional en Agua y Energía	2017	VIE-CONICIT-MICIT	2 737 600,00	2 875 303,00	Ejecutado
Simposio Internacional en Agua y Energía de otras fuentes	2017	Dos Pinos		799 936,00	Ejecutado
Total	2014-2018		40 237 600,00	237 175 239,00	Fondos externos que han sido gestionados, una parte ejecutados y otra en ejecución.

Cuadro 3. Relación de los proyectos aprobados, los diseños construidos y en funcionamiento y su ubicación en la región Huetar Norte

Proyecto	Unidad desarrollada y funcionando	Unidades y su ubicación
<i>“Implementación de tecnologías solares en una planta de procesamiento de leche y lecherías, para pasteurizar, esterilizar y generar energía en la zona Huetar Norte de Costa Rica”. Programa local piloto.</i>	Sistema solar termosifónico híbrido con resistencias eléctricas	Un sistema en el Campus Tecnológico Local San Carlos (ITCR) que apoya: 1. Esterilización de equipos de ordeño 2. Esterilización de equipos de del laboratorio de microbiología 3. Esterilización de equipos en el laboratorio de calidad de carne.
	Sistema fotovoltaico de 2K	Un sistema en el Campus Tecnológico Local San Carlos (ITCR).
	Sistema solar termosifónico híbrido con resistencias eléctricas	Dos sistemas en la Escuela Técnica e Industrial de Santa Clara (ETAI): 1. Esterilización de equipos de ordeño 2. Esterilización de equipos en el laboratorio de calidad de biotecnología y de agroindustria.
	Sistema solar térmico forzado híbrido con sistema auxiliar de gas LP	Dos sistemas en las PYMES, procesadora de lácteos: 1. LLAFRAK 2. San Bosco, Ambos en Santa Rosa de Pocosol en la zona Norte.
<i>Secador solar “Implementación de tecnologías solares en actividades económicas agropecuarias en la zona Huetar Norte de Costa Rica”. Programa local piloto.</i>	Secador solar activo con aire y agua caliente, con sistema auxiliar de gas LP	Dos secadores activos para secado de cacao, frutas y semillas: 1. PYME SIBAELI, 2. Campus Tecnológico Local San Carlos (ITCR) 3. PYME Chocolate Fusión
<i>“Aplicación de energía solar en los sistemas productivos agropecuarios de la zona norte de Costa Rica”.</i>	Secador solar pasivo	Campus Tecnológico Local San Carlos (ITCR)
	Escaldador de pimienta	CEPROMA LAKY, Puerto Viejo, Sarapiquí.

La energía solar: una alternativa para las explotaciones agropecuarias de la zona Huetar Norte de Costa Rica

Dr. Tomás de Jesús Guzmán Hernández; Dr. Freddy Araya Rodríguez; Lic. Guillermo Castro Badilla; Bach. Gonzalo Quiroz Vinda, Dr. Javier Mauricio Obando Ulloa

Área académica del Programa de Doctorado en Ciencias Naturales para el Desarrollo. Escuela de Agronomía. Instituto Tecnológico de Costa Rica, Sede Regional de San Carlos

Introducción

La energía solar es una energía renovable, obtenida a partir del aprovechamiento de la radiación electromagnética procedente del Sol. La Tierra recibe 174 petavatios de radiación solar entrante (insolación) desde la capa más alta de la atmósfera. Aproximadamente el 30% de esta radiación regresa al espacio, mientras que las nubes, los océanos y las masas terrestres absorben alrededor de 3 850 000 exajulios por año.

Esta radiación absorbida ha sido aprovechada por el ser humano desde la Antigüedad, mediante diferentes tecnologías que han ido evolucionando. En la actualidad, el calor y la luz del Sol pueden aprovecharse por medio de diversos captadores como células fotovoltaicas, helióstatos o colectores térmicos, pudiendo transformarse en energía eléctrica o térmica. Es una de las llamadas energías renovables o energías limpias que podrían ayudar a resolver algunos de los problemas más urgentes que afronta la humanidad.

La Agencia Internacional de la Energía (IEA) indicó que el desarrollo de tecnologías solares limpias, baratas e inagotables supondrá un enorme beneficio a largo plazo, ya que aumentará la seguridad energética de los países mediante el uso de una fuente de energía local, inagotable e independientemente de importaciones. Con este tipo de energía, se beneficiará la sostenibilidad, ya que la contaminación se reduciría y en términos económicos se disminuiría los costos de la mitigación del cambio climático, evitando el excesivo incremento de los precios de los combustibles fósiles. De esta manera, los costos para su incentivo y desarrollo deben ser considerados inversiones, los cuales deben ser realizados de forma correcta y ampliamente difundidos (IEA, 2011).

Dentro de las tecnologías desarrolladas actualmente para el aprovechamiento de la energía solar, sobresalen las células fotovoltaicas que son dispositivos semiconductores que producen corriente eléctrica directamente de la radiación solar o bien mediante una deposición de metales sobre un sustrato denominada célula solar de película fina. Según informes de la organización ecologista Greenpeace, la energía solar fotovoltaica podría suministrar electricidad a dos tercios de la población mundial en el año 2030, lo que reduciría la dependencia energética de combustibles fósiles y contaminantes como el petróleo (Landa, 2005, Roman, 2007, Rizk y Nagrial, 2008, Torpey, 2009, Tinajeros, 2011, Swift, 2011).

Gracias a los avances tecnológicos, la sofisticación y la economía de escala, el coste de la energía solar fotovoltaica se ha reducido de forma constante desde que se fabricaron las primeras células solares comerciales y su eficiencia ha aumentado, lo cual ha ocasionado que el costo medio de generación eléctrica por medio de la energía fotovoltaica, sea competitivo con el de las energías no renovables. A su vez, esto ha hecho que este tipo de energía haya ganado popularidad, tanto a nivel doméstico como industrial (Ekström et al., 2016).

Según el VI Plan Nacional de Energía 2012-2030 del Ministerio de Ambiente, Energía y Telecomunicaciones (MINAET), Costa Rica es un país rico en recursos naturales renovables que podrían utilizarse con fines energéticos. Sin embargo, el país basa su desarrollo en el uso de los derivados del petróleo, por lo que el crecimiento del consumo de hidrocarburos en los últimos 20 años ha sido del 4,7% anual y el de la electricidad de 5,3% anual. Debido a esto, el MINAET, en su I Plan Nacional de Energía 2012-2030 se ha planteado promover programas de ahorro energético en los macro-consumidores, ya que el país cuenta con un potencial teórico de energía solar de 10000 MW, cuyo grado de utilización es mínimo (MINAET, 2011).

Guzmán (2014) plantea que los sistemas solares térmicos y fotovoltaicos pueden ser usados en sistemas agropecuarios y en unidades de producción del sector (lecherías, plantas de matanza, empacadoras y plantas procesadoras), en forma de autoconsumo para bajar los costos por facturas eléctricas y disminuir la huella de carbono del sector ganadero. A su vez, Guzmán e Iglesias (1986, 1987, 1989, 1991 y 1999) plantean la necesidad de aplicar estos sistemas a unidades de producción agropecuaria para controlar enfermedades y plagas en cultivos económicos.

Aunado a esto, Berriz (2012) afirma que los países que dispongan de radiación solar suficiente, utilicen estos sistemas. Por otra parte, Matthews (2006) plantea que la ganadería genera más gases de efecto invernadero (GEI) que el transporte, por lo que urge aplicar tecnologías que minimicen este impacto generado en los procesos productivos del sector.

Ante esta situación, urge aplicar tecnologías que minimicen este impacto generado en los procesos productivos del sector ganadero, ya que en la zona Huetar Norte de Costa Rica existe una gran cantidad de productores de leche, así como invernaderos de producción de hortalizas y de plantas ornamentales, productores de semillas y de otros tipos, que usan de manera sistemática agua o aire caliente en sus unidades, recursos que son calentados a través de resistencias eléctricas, con intercambiadores térmicos, de gas y otras funciones con combustible fósil.

Específicamente, en el cantón de San Carlos se encuentra el 55% de los asociados de la Cooperativa de Productores Dos Pinos R.L., quienes producen más del 50% de demanda nacional (0,6 millones de kilos de leche). Entre los procesos productivos del sector ganadero y lechero que genera huella de carbono se encuentra el consumo eléctrico de las plantas agroindustriales relacionadas, ya sean lecherías u otras, por lo que se han estudiado las alternativas y estrategias de eficiencia energética, oportunidades y potencial presentes en la zona y se puede optar por la tecnología solar como alternativa viable y efectiva. El último estudio del ICE indica que las dos mejores zonas de radiación solar en el país, son la zona Huetar Norte (San Carlos) y la zona Chorotega (Guanacaste) (Portilla 2014).

En este sentido, el Programa de Producción Agropecuaria de la Escuela de Agronomía de la Sede del Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR) en San Carlos, por su vocación agropecuaria, especialmente lechera y ganadera, ha apostado por la utilización e introducción de la energía solar, su adecuación y validación, por lo que instaló (con fines didácticos y demostrativos), un sistema fotovoltaico en su lechería y en otras plantas procesadoras de leche relacionadas directamente con esta Sede para evaluar la eficiencia de los sistemas solares de captación térmica para el calentamiento de agua y producción de energía en unidades de producción agropecuarias.

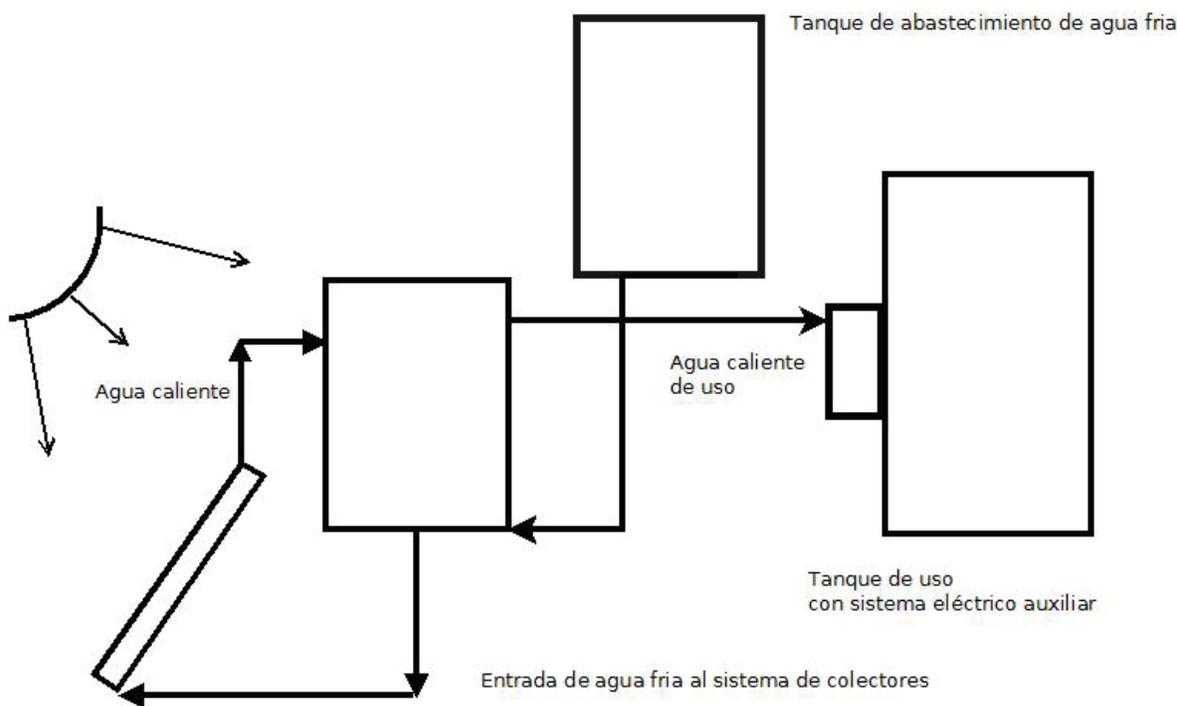
Metodología

En las unidades de producción seleccionadas se diseñaron y se instalaron tres sistemas solares termosifónicos y/o forzados, según el caso (Cuadro 1). Para efectos de este trabajo, se presentan los datos de la lechería de la Sede Regional del ITCR, durante los meses de mayo a diciembre de 2015, mientras que para los otros se presenta un avance de su operación, ya que aún se encuentran en etapa de acondicionamiento para la recolección de los datos a través de un sistema Alduino con termopares o dataloguer especializados.

Cuadro 1. Sistemas de captación de energía solar instalados en las unidades productivas de leche en la zona de San Carlos

Unidad Productiva	Sistema instalado	Avance de operación
Lechería de la Sede Regional del ITCR	Termosifónico con sistema auxiliar eléctrico	Desde mayo de 2015
	Sistema fotovoltaico de 2K	Desde mayo de 2015
Escuela Técnica Agrícola e Industrial (ETAI)	Termosifónico con sistema auxiliar eléctrico	Desde octubre de 2015
Productores de lácteos LLAFRAK (Juanilama de Santa Rosa de Pocosol)	Térmico forzado, híbrido con sistema auxiliar de gas	Desde diciembre de 2015

El sistema de captación de energía solar de tipo térmico termosifónico, instalado tanto en la lechería de la Sede Regional del ITCR como en la lechería de la Escuela Técnica Agrícola e Industrial (ETAI), se define como el movimiento del agua por efecto de la gravedad y el calentamiento de ésta se produce por la radiación electromagnética solar. En este sistema, cuando el agua se calienta, se dilata y su densidad disminuye, lo que hace que entre al sistema más densa y por la gravedad, el agua caliente sube y se almacena en un depósito. Esto se produce al interior del colector solar como parte de un intercambio de calor por convección (Figura 1).

**Figura 1.** Sistema termosifónico de captación térmica instalado en la lechería de la Sede Regional del ITCR y en la Escuela Técnica Agrícola e Industrial de Santa Clara.

El sistema solar forzado, al igual que el sistema termosifónico, dispone de los mismos elementos, dispuestos de manera diferente y con equipos adicionales. Este sistema está compuesto un sistema primario de captadores, un acumulador solar, un grupo hidráulico, con bombas de movimiento, un sistema de regulación y un vaso de expansión (Fig. 2).

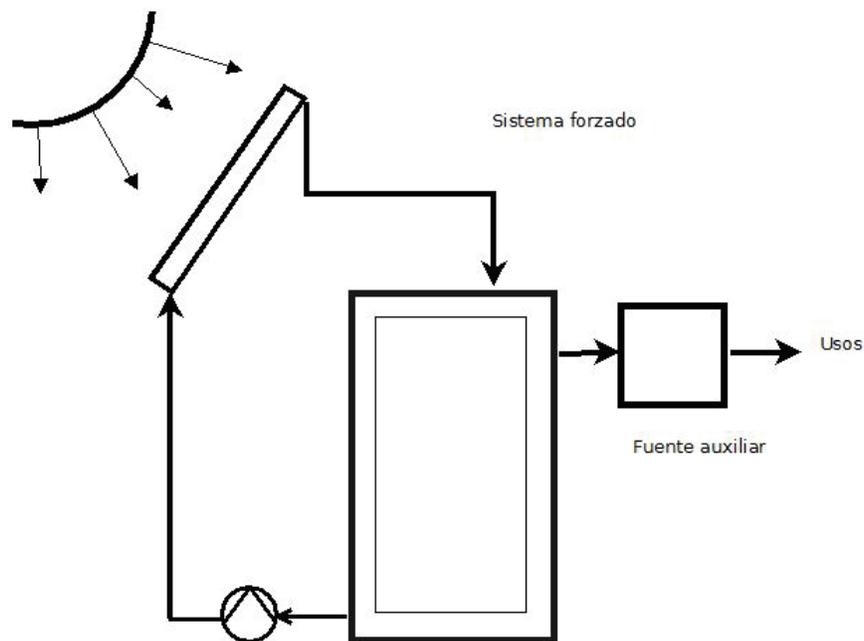


Figura 2. Sistema de captación de energía solar de tipo forzado híbrido, instalado en la planta de procesamiento de la Asociación de la Asociación de Productores de Lácteos LLAFRAK en Juanilama, Santa Rosa de Pocosol. En esta figura se presenta el detalle del termómetro que indica la temperatura que alcanza el agua al salir del sistema.

En general, ambos sistemas cuentan con un sistema de paneles solares térmicos para el calentamiento de agua, conectados a un tanque acumulador con capacidad para 302,40 L de agua y acoplados a un sistema eléctrico auxiliar. El tanque acumulador tiene tres previsiones en su interior para la conexión de termopares, los cuales están conectados a una computadora para registrar los datos de captación de energía y el uso del agua. Además, este tanque posee una válvula de escape, una de expansión y otra válvula de conexión del sistema solar con el sistema auxiliar eléctrico o de gas. El sistema también presenta un sistema de tuberías de conexión a los equipos para esterilización, termómetros y equipos de medición inalámbricos, sistemas auxiliares eléctricos y de gas.

Una vez instalados todos los sistemas se procedió al registro de la masa de agua fría y agua caliente captada por el sol, cálculo del diferencial (ahorro) con electricidad del sistema en función del uso de los sistemas solares, balance energético de los sistemas en función de la zona, determinación de la eficiencia energética y la disminución de los costos de producción, cálculo de la disminución de la huella de carbono por medio del producto del valor de los KWh anuales ahorrados y medidos por el sistema y el valor medio de Kg de CO₂ emitidos en la generación eléctrica, cuyos datos son proporcionados anualmente en Costa Rica por la Internacional Energy Agency (IEA).

El calor (Q) producido por el sistema se calculó por medio de la ecuación:

$$Q = C_p \cdot y \cdot V \cdot \Delta T$$

donde **Q** corresponde a la energía requerida para que se dé el cambio de temperatura en (kJ), **C_p** es el calor específico del agua (en este caso se utilizó un valor de 4,18 kJ/ K· kg), **y** corresponde a la densidad del líquido (1000 kg/m³), **V** el volumen de líquido en m³ (correspondiente a la capacidad de almacenamiento del sistema, la cual oscila entre 150 y 200 L) y **ΔT** es la variación de la temperatura (T, en grados Kelvin), calculada por la diferencia entre la temperatura alcanzada por el agua en el sistema (T_f) y la T de entrada o ambiente (T). Los resultados de este cálculo se expresaron en las unidades correspondientes del SI, por medio de las conversiones respectivas. En caso de no contar con el valor de la T_f alcanzada por el agua en el sistema, se calculó su estimación por medio de los valores de Q producido por el sistema, registrados diariamente en el sitio web <https://enlighten.enphaseenergy.com> (Enphase Energy Inc., Petaluna CA, EE.UU.)

Resultados

Como se mencionó anteriormente, la zona Huetar Norte es una de las dos mejores zonas con radiación solar en el país (Portilla 2014). De acuerdo con los datos obtenidos a través del software Enphase y registrados diariamente en su sitio web (<https://enlighten.enphaseenergy.com>), esta zona presenta una producción máxima promedio de aproximadamente 0,25 kWh, específicamente cuando el sol está en el cenit (entre las 11 y 12 h), según se presenta en la Figura 5.

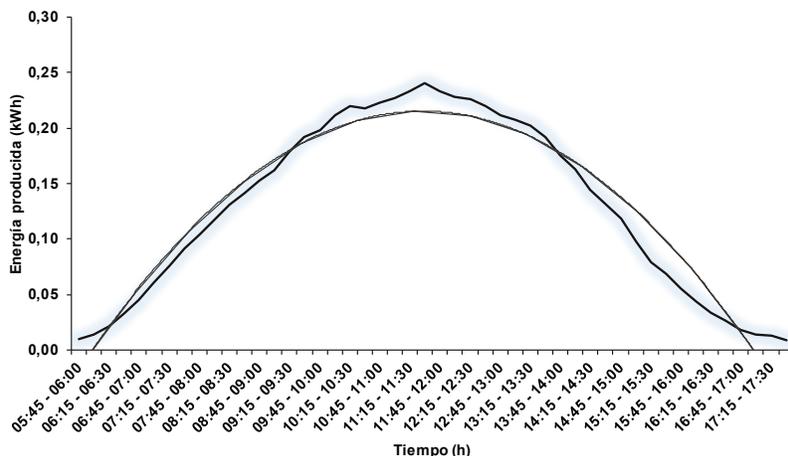


Figura 5. Producción horaria promedio de energía solar durante el día en la zona Huetar Norte de Costa Rica, de acuerdo con los datos registrados en el sitio web <https://enlighten.enphaseenergy.com>.

Esta zona genera una producción diaria promedio de energía solar de aproximadamente 7 kWh y una producción mensual promedio de aproximadamente 187 kWh, con lo cual se produce una reducción de emisión gases de efecto invernadero de aproximadamente 285 lb CO₂ durante los meses de agosto, octubre, noviembre y diciembre de 2015 (Figura 6; Tabla 2).

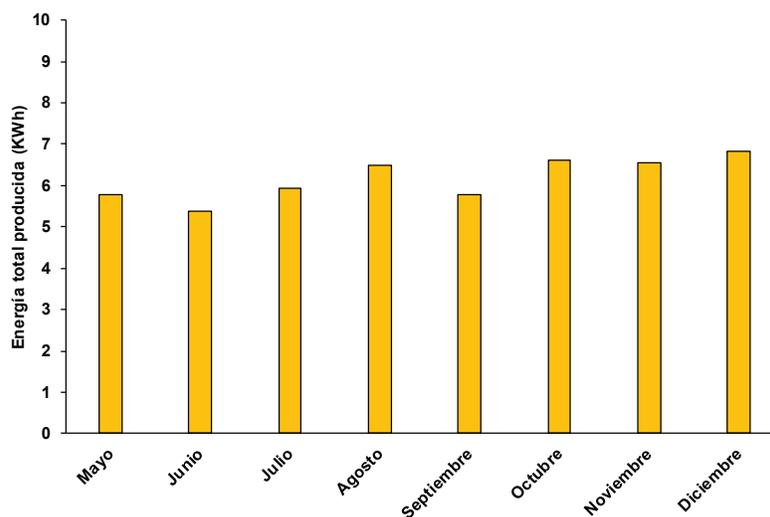


Figura 6. Energía solar promedio producida diariamente en la zona Huetar Norte de Costa Rica, de acuerdo con los datos registrados en el sitio web <https://enlighten.enphaseenergy.com>, del sistema de 2K instalado en la lechería del ITCR

Tabla 2. Producción total de energía solar y reducción de dióxido de carbono durante los meses de mayo a diciembre de 2015 en la lechería del ITCR

Mes	Energía total producida (kWh)	Reducción de emisión de dióxido de carbono (lb CO ₂)
Mayo	179	272
Junio	161	246
Julio	184	280
Agosto	201	306
Septiembre	173	264
Octubre	189	288
Noviembre	196	299
Diciembre	212	322

Con la producción de energía solar con el sistema termosifónico se ha logrado satisfacer cerca del 90% de la energía necesaria para elevar la temperatura del agua para las operaciones realizadas en la lechería de la Sede Regional del ITCR y de la ETAI (Figuras 5 y 6). En la Figura 7 se presenta tan sólo un avance de la eficiencia del sistema forzado híbrido para satisfacer la demanda de agua caliente para las operaciones de la planta de Productores de Lácteos LLAFRAK. De acuerdo con esta figura, el sistema ha logrado suplir cerca del 60% de la energía requerida para el calentamiento del agua para las operaciones de esta planta.

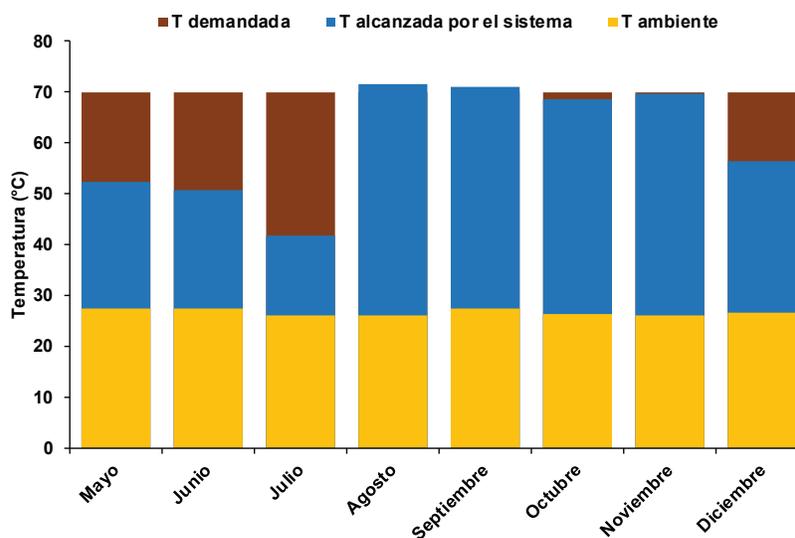


Figura 7. Eficiencia del sistema termosifónico en el calentamiento de agua para las operaciones realizadas en la lechería de la Sede Regional del ITCR

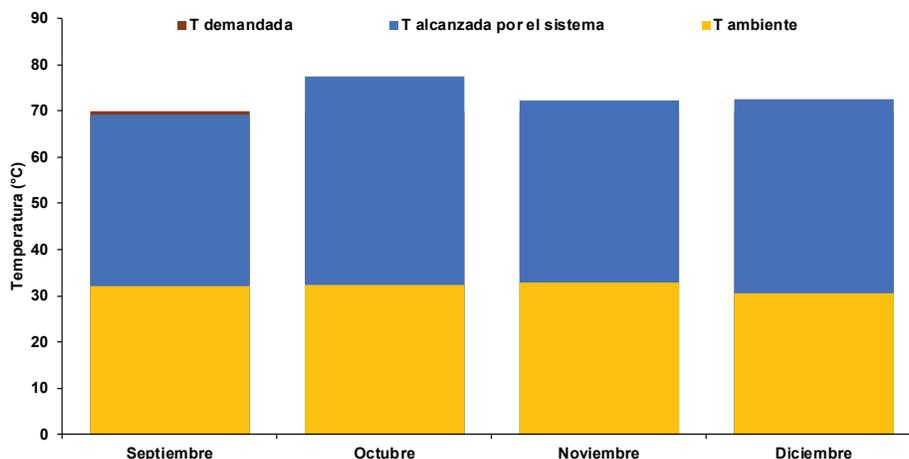


Figura 8. Eficiencia del sistema termosifónico en el calentamiento de agua para las operaciones realizadas en la lechería de la ETAI

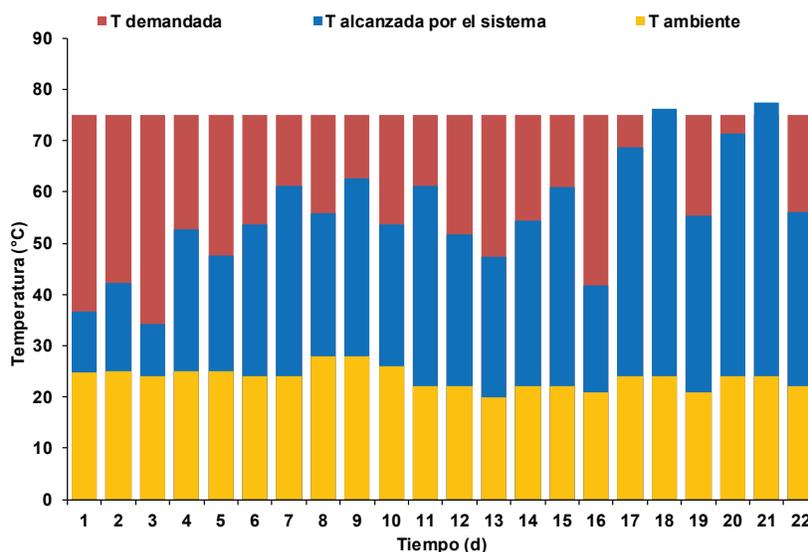


Figura 9. Eficiencia del sistema forzado híbrido en el calentamiento de agua para las operaciones realizadas en la planta de Productores de lácteos LLAFRAK

Conclusión

De acuerdo con lo anteriormente expuesto, se puede comprobar que la energía solar térmica y fotovoltaica es una alternativa para satisfacer, de una forma más limpia y eficiente, los requerimientos energéticos necesarios para la operación de las explotaciones ganaderas de la zona Huetar Norte de Costa Rica, lo cual a su vez repercute en la eficacia económica de estas explotaciones.

Bibliografía

- Berriz, P. L. 2012. La energía solar: base para el desarrollo sostenible. *Energía y Tú* 58: Abril -junio de 2012.
- Ekström, J.; Koivisto, M.; Millar, J.; Mellin, I.; Lehtonen, M. 2016. A statistical approach for hourly photovoltaic power generation modeling with generation locations without measured data. *Solar Energy* 132: 173-187.
- Guzmán, T. 2014. Uso de tecnologías para el aprovechamiento de la energía solar en actividades económicas agropecuarias en Costa Rica. En: *Memorias Congreso Internacional Clima, Agua y Energía, pilares para el desarrollo sostenible*. Universidad Nacional Campus Nicoya, Guanacaste, Costa Rica. pp. 67-84.
- International Energy Agency (IEA). 2011. *Solar Energy Perspectives: Executive Summary*.
- Landa, M. 2005. Energía solar en España. Disponible en http://www.consumer.es/web/es/medio_ambiente/energia_y_ciencia/2005/01/11/114942.php. Consultado el 10 de febrero de 2013.
- Matthews, C. 2006. La ganadería amenaza el medio ambiente. FAO. Disponible en <http://www.fao.org/newsroom/es/news/2006/1000448/index.html>. Consultado el 12 marzo de 2013.
- Portilla Pastor, R.; Álvarez Morales, C.; Segura López, W. 2014. Determinación de potenciales de energía solar para generación eléctrica en Costa Rica. En: *Memorias Congreso Internacional Clima, Agua y Energía, pilares para el desarrollo sostenible*. Universidad Nacional Campus Nicoya, Guanacaste, Costa Rica. pp. 231-244.
- Rizk, J.; Nagrial, M.H. 2008. Impact of reflectors on solar energy systems. *International Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering* 5: 743-747.
- Roman, H. 2007. Here comes the sun. Residential solar systems. *Power energy*. Disponible en www.techdirections.com. Consultado el 10 de febrero de 2013.
- Swift, K.D. (2011). Is a solar energy system right for your organization? *Management Accounting Quarterly* 12: 38-47.
- Tinajeros, S. M. (2011). Sistema de calentamiento de agua con energía solar en la ciudad de Arequipa. XVIII Simposio Peruano de energía solar y del ambiente. Universidad Nacional de San Agustín. Escuela de Física, Perú.
- Torpey E. (2009). You are a what? Solar photovoltaic installer. *Occupational Outlook Quarterly* 53: 34-35.

La energía solar en sistemas agropecuarios. Resultados de un programa local piloto en la zona norte de Costa Rica

Tomás de Jesús Guzmán Hernández; Freddy Araya Rodriguez; Guillermo Castro Badilla.
Instituto Tecnológico de Costa Rica, Sede Regional de San Carlos, Costa Rica.
Correo electrónico: tjguzman@itcr.ac.cr, _

Resumen

En la actualidad se debe trabajar en la aplicación de energías limpias, como alternativa para la adaptabilidad al cambio climático, para mitigar el efecto de invernadero.

El presente trabajo ha logrado diseñar, construir, instalar y comenzar a generar datos que muestren la potencialidad de la generación energética, a partir del uso de la energía solar en actividades agropecuarias en la región Huetar Norte de Costa Rica a través del uso de la energía solar térmica en sistemas termosifónicos y forzados, así como la generación de corriente a través de un sistema fotovoltaico.

Las unidades productivas seleccionadas son: dos lecherías y dos plantas de producción de quesos de la zona Norte. El uso de estos sistemas nos permite lograr el autoconsumo en energía eléctrica entre un 30-50 por ciento del consumo de la unidad productiva.

En el caso de la producción de energía para calentar el agua con el sistema solar nos aporta entre los 20 y 37 C^o, por día. Con esas temperaturas se suministran más del 50 por ciento de la energía requerida para elevar la temperatura del agua hasta los 70 C^o demandados por el sistema de lavado y esterilización de equipos de ordeño y otros.

Además, se ha instalado un equipo de transmisión de datos inalámbricos que registran el uso de la energía de los tanques térmicos, así como de la producción de energía eléctrica.

Se muestran los resultados de correlación entre producción potencial de energía solar, factura eléctrica, y la generación de agua caliente, para los meses de mayo a noviembre y los modelos matemáticos ajustados a ambos sistemas

Este uso nos acerca a una producción sostenible en Costa Rica, así como una reducción importante de la huella de carbono en los sistemas de producción animal en el país.

Palabras claves: Energía solar, sistemas térmicos y fotovoltaicos, empresas agrícolas, productores de leche y procesamiento de quesos.

Introducción

En la actualidad uno de los grandes desafíos a los que se enfrenta la humanidad es el denominado cambio climático; el continuo deterioro del medio ambiente está amenazando el acceso a recursos no renovables y el bienestar de las próximas generaciones. En el sector agropecuario es bien sabido que la producción de ganado bovino, tanto de leche como de carne, constituye un importante reto en cuanto a establecer sistemas productivos reduciendo las emanaciones de gases de efecto invernadero jugando un papel importante en el fenómeno de calentamiento global (Estrada 2001, Montenegro 2002 y Conde 2007).

Estudios realizados en Costa Rica indican que en promedio se emiten 2,3 KgCO₂e/ Kg FPCM (contenido de grasa y proteína corregido por la producción total de leche) y 11,5 KgCO₂e/Kg Carne. Para observar diferencias entre sistemas en el año 2011 se realizó una investigación sobre huella de carbono a través del ciclo de vida del sistema para los productores de leche en la zona de Santa Cruz de Turrialba. Los resultados obtenidos señalan que se emite en promedio 1,2 KgCO₂e/ Kg FPCM, estas emanaciones de CO₂ equivalente podrían variar de acuerdo a condiciones climáticas, sistemas productivos y factores de emisión utilizados en la construcción de la huella de carbono, (INTECO 2006, FAO 2009-2015 e IMN 2015).

Se entiende por huella de carbono de los productos (PCF) como el instrumento producto de un cálculo de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) de un bien o servicio de la cadena de suministros en su totalidad, contemplando desde la extracción de las materias primas, los procesos de producción e inclusive hasta la utilización de los consumidores. Dicha huella se cuantifica en CO₂ equivalente, dichas emanaciones pueden ser directas o indirectas y siendo cuantificables mediante normativas internacionales tales como el ISO 14064, PAS 2050 entre otras.

Según el VI Plan Nacional de Energía 2012-2030 del Ministerio de Ambiente y Energía y Telecomunicaciones, Costa Rica es un país con un alto potencial en recursos naturales renovables que podrían utilizarse con fines energéticos, sin embargo, nuestro país basa su desarrollo en el uso de los derivados del petróleo. El crecimiento promedio del consumo de hidrocarburos en los últimos 20 años fue del 4,7% anual y el de la electricidad del 5,3% anual (MINAET, 2011).

Cada fuente de energía tiene un potencial de emisiones de CO₂ diferente, por lo que, la composición de la matriz de la oferta de energía y las tecnologías de los equipos de consumo (vehículos, equipos industriales y agrícolas, entre otros) determinarán el nivel de emisiones del sistema energético del país. Ante la gran dependencia energética de los combustibles fósiles, cuyo consumo produce altos niveles de emisiones, es necesario impulsar medidas de uso racional y eficiencia energética, entonces podemos decir que la tendencia internacional de uso de energía, según la Agencia Internacional de las Energías Renovables (IRENA 2013), citada por MINAET (2011), plantea una mayor participación de fuentes renovables en la matriz energética mundial, como por ejemplo la energía geotérmica, solar, eólica y biomasa; así un descenso en el uso de las no renovables como carbón, petróleo y gas. Sobre la base de estos planteamientos, queda clara la necesidad de optar por sistemas de producción que utilicen fuentes renovables de energía.

Costa Rica, tal y como aparece en el VI Plan Nacional de Energía 2012-2030 (MINAET 2011), presenta un potencial teórico en el caso de fuente solar de 10 000 MW, del cual el grado de utilización es mínimo, aproximadamente 0,14 MW. Ante esta situación y enmarcados en la línea de acción de la estrategia 2.2 del MINAET para el sector Energía: *"Promover programas de ahorro energético en los macro-consumidores"*, en este trabajo se propone aplicar en los sistemas productivos lecheros y lácteos el uso de la energía solar tanto para el calentamiento de agua, la pasteurización, así como en la utilización de equipos fotovoltaicos que generen corriente eléctrica dentro del sistema.

Según el INTA (2011) *"Mitigar es pensar cómo la producción de carne y leche debe mejorar su eficiencia energética para reducir las emisiones de GEI por unidad de producto"*. Siendo así que es imperativo el aplicar tecnologías que minimicen este impacto generado por los procesos productivos del sector. La ganadería es responsable del 18% de las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero (GEI) de acuerdo al informe presentado por la FAO sobre el impacto ambiental de esta actividad (Matthews 2006, Abarca1997).

En el cantón de San Carlos se encuentran el 55% de los asociados de la Cooperativa de Productores de leche, “Dos Pinos RL”, con un total de 850 productores y una producción de más del 50% de la producción nacional 0,6 millones de kg de leche, (Paniagua 2005, Lorente 2010).

Sobre la base de lo anteriormente, planteado, el equipo de investigación ha estudiado las alternativas y estrategias de eficiencia energética, oportunidades y potencial presentes en la zona y ha decidido optar por la tecnología de captación de solar como una alternativa viable y efectiva para la generación y uso de energía eléctrica y calórica de origen renovable.

La energía del sol puede utilizarse en el país con ventajas en aplicaciones en pequeña y gran escala. En el caso de la zona Norte, existen una gran cantidad de productores de leche y de lácteos en pequeñas y medianas empresas que usan de manera sistemática agua caliente en sus unidades, calentadas a través de resistencias eléctricas, con intercambiadores térmicos, kerosene, bunker y gas.

Este trabajo se centró en la captación de la energía solar para hacer estos sistemas de producción más amigables con el ambiente.

Las tecnologías de uso de la energía solar están disponibles, y en uso en otros sectores y países, es confiable y sólida para la asimilación por los productores; el coste de inversión es asequible y los plazos de recuperación y amortización de la inversión son atractivos. Definitivamente se necesita la validación de esta tecnología en la región e introducirla en los procesos de innovación por parte de los productores lecheros y lácteos en la zona Norte.

Los objetivos del trabajo, han sido, diseñar, implementar y evaluar tres sistemas solares de captación térmica (termosifónico y forzado) y fotovoltaica para el calentamiento de agua y producción de energía eléctrica en lecherías y productores de lácteos de la región Huetar Norte de Costa Rica y transferir los resultados a través de un programa de capacitación a productores y estudiantes sobre el uso de sistemas solares térmicos y fotovoltaicos en los sistemas agropecuarios, como un programa local piloto.

Materiales y métodos

La ubicación de los productores de leche y de lácteos, se presentan en la tabla 1.

Dichas lecherías corresponden a productores asociados a la Cooperativa de Productores de Leche “Dos Pinos”, y productores independientes, cuyo gasto de agua caliente está entre 160 y 215 l/día a una temperatura de uso de 70° C.

Tabla 1. Unidades de producción lecherías y de procesamiento de lácteos seleccionadas para en la región Huetar Norte.

Lechería/Productores de lácteos	Ubicación	Equipo instalado
1. Instituto Tecnológico de Costa Rica, Sede Regional de San Carlos (ITCR-SSC)	Zona Norte, Florencia	Solar térmico termosifónico híbrido y sistema fotovoltaico
2. Escuela Técnica Agrícola e Industrial (ETAI)	Zona Norte, Florencia	Solar térmico termosifónico híbrido
3. Productores de lácteos LLAFRAK de Juanilama de San Rosa de Pocosol	Zona Norte	Solar térmico forzado

El trabajo se desarrolló entre los meses de febrero a diciembre del año 2015, registrándose los datos, desde un sistema computarizado provenientes de los sistemas de captación solar para la gestión/producción de energía/consumo de los sistemas termosifónicos, forzados y fotovoltaicos, desde mayo a diciembre. La característica productiva de cada unidad se puede apreciar en la tabla 2.

Tabla 2. Características productivas y económicas de las lecherías y de los productores de lácteos en las cuales se realizó el trabajo en las region Huetar Norte.

Lechería	Área	Kg leche	Volumen diario de uso de agua caliente	Volumen de agua caliente anual	Factura de agua anual	Factura eléctrica / anual en colones
ITCR-SSC	24 ha	500 kg	160 L / día	58,40 m ³	¢ 262 800 \$ 486,50 USD	¢ 1 800 000,00 \$ 3 333,30 USD
ETAI	36 ha	550 kg	120 L / día	43,80 m ³	¢ 197 100,00 \$ 365,00 USD	
Lácteos LLAFRAK	30	650 kg	215 L / día	78,47 m ³	¢ 353 137,50 \$ 653,95 USD	¢ 1 680 000,00 \$ 3 111,10 USD

Descripción de la investigación

En este trabajo de investigación, se diseñó, se construyó e implementaron tres sistemas solares a saber: dos termosifónicos, uno forzado y un sistema fotovoltaico. Se realizó el análisis, diseño e implementación de la infraestructura de captación de datos computarizados, para la gestión/producción de energía/consumo de los sistemas, a través de termopares y con data loguer.

Una vez ensamblados los sistemas se procedió a la toma de datos mediante el monitoreo de variables tales como iluminación, nubosidad, horas de luz, radiación solar directa y difusa, masa de agua calentada, temperatura del agua a la entrada y la salida del sistema, energía producida y su balance neto.

Los módulos instalados con los sistemas térmicos, contaron con las siguientes especificaciones: Colectores solares planos de calentamiento de agua. Tanque acumulador de 302,40 l de agua, con sistema eléctrico auxiliar acoplado. A este tanque se le dejaron tres previstos interiores para conexión de termopares. Estos termopares estarán se conectaron a una computadora que registró los datos de captación de energía y el uso del agua a través de un medidor. Válvula de escape. Válvula de conexión del sistema solar con el sistema auxiliar eléctrico. Sistema de tuberías de conexión a los equipos para esterilización. Base de montaje. Instalaciones varias de ajustes de acuerdo a la unidad que consumirá el agua caliente. Tanque elevado, en el caso de que sea necesario. Termómetros.

El sistema fotovoltaico contó con las siguientes especificaciones: Paneles solares fotovoltaicos, conectado a la red, destinado a autoconsumo. Regulador de carga. Inversor. Instalaciones varias de conexión. Base de montaje en suelo.

Además, se contó con un equipo adicional para el correcto establecimiento y ejecución de la investigación y medición de los parámetros energéticos: Un Módulo de medición de datos meteorológicos digital para la Sede Regional de San Carlos. Un CPU, como equipo servidor de base de datos, unidad de respaldo de datos, monitores, teclados y cables de conexión. Módulos de medición de datos meteorológicos según zona o coordinación con el Instituto Meteorológico Nacional.

Finalmente se generaron los datos que permiten poder utilizar modelos matemáticos de regresión lineal simple y múltiples que correlacionen, datos meteorológicos de radiación, iluminación de luz solar directa, difusa, temperaturas mínimas, medias y altas con la captación de energía en el sistema y su uso constante bajo las condiciones climáticas en la región Huetar Norte de Costa Rica.

Definición de variables a evaluar

Las variables que se analizaron fueron: Determinación del potencial real de la captación y generación de energía calórica y eléctrica a partir de energía solar en el cual se evaluaron las variables que se detallan en la tabla 3.

Tabla 3. Descripción de las variables a evaluar para la determinación de la eficiencia energética y disminución de costos de producción mediante la aplicación de energía solar en actividades económicas agropecuarias como alternativa al cambio climático en la región Huetar Norte

Tipo	Variable	Método de obtención	Frecuencia	Periodo de evaluación
1. Uso de los sistemas	1.1. Temperatura media de entrada de agua fría	Sensores computarizados	Diaria, mensual	Feb-dic 2015
	1.2. Temperatura de salida de los colectores			
	1.3. Temperatura de entrada al tanque colector			
	1.4. Temperatura de uso.			
2. Valoración Económica	1.5. Uso del agua en la lechería	Reloj de medición mecánica	Anual	
	1.6. Masa agua fría/caliente	Reloj de medición mecánica		
	1.7. kWh producidos/consumidos	Uso de sensores digitales		
	1.8. Diferencial económico	Recolección manual		

De acuerdo a las variables enumeradas en el cuadro 3 se estimaron el diferencial (ahorro) de electricidad del sistema en función del uso de los sistemas solares, el balance energético de los sistemas. Se determinó la eficiencia energética y la disminución de los costos de producción. Además, se evaluó el cálculo de la disminución de la huella de carbono, mediante el producto del valor de los kWh anuales ahorrados y el valor medio de Kg de CO₂

El calor (Q) producido por el sistema se calculó por medio de la ecuación:

$$Q = C_p \cdot y \cdot V \cdot \Delta T$$

donde Q corresponde a la energía requerida para que se dé el cambio de temperatura en (kJ), C_p es el calor específico del agua (en este caso se utilizó un valor de 4,18 kJ/ K· kg), y corresponde a la densidad del líquido (1000 kg/m³), V el volumen de líquido en m³ (correspondiente a la capacidad de almacenamiento del sistema, la cual oscila entre 150 y 200 L) y ΔT es la variación de la temperatura (T, en grados Kelvin), calculada por la diferencia entre la temperatura alcanzada por el agua en el sistema (T_f) y la T de entrada o ambiente (T_i). Los resultados de este cálculo se expresaron en las unidades correspondientes del SI, por medio de las conversiones respectivas.

En caso de no contar con el valor de la T_f alcanzada por el agua en el sistema, se calculó su estimación por medio de los valores de Q producido por el sistema, registrados diariamente en el sitio web <https://enlighten.enphaseenergy.com> (Enphase Energy Inc., Petaluma CA, EE.UU.)

Finalmente se muestran los modelos matemáticos de regresión y correlación, así como las gráficas generales de uso de las temperaturas en los tres sistemas.

Resultados y discusión

Se diseñaron y adaptaron tres sistemas a saber, dos térmicos termosifónicos, uno forzado y otro fotovoltaico.

Sistema térmico termosifónico.

El sistema térmico termosifónico, se define como el movimiento de un fluido (agua) que se mueve por dos factores, por la gravedad y por el calentamiento de este fluido por los rayos solares. Cuando el agua se calienta esta se dilata y entonces disminuye su densidad, por lo que el agua que entra al sistema es más densa y esta última, unidad a la fuerza de gravedad y la disminución de la densidad, hacen subir al agua caliente y almacenarse en un depósito. Esto se produce al interior del colector solar como parte de un intercambio de calor por convección, como se muestra en la figura 1.

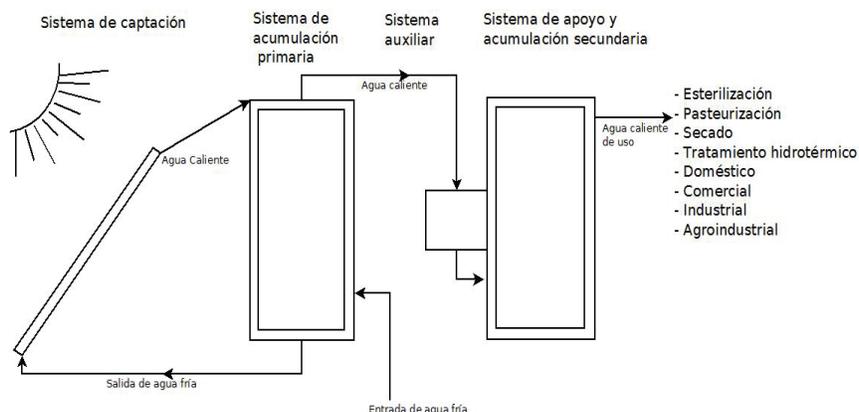


Figura 1.-Sistema básico de termosifón híbrido con resistencias eléctricas. La entrada de agua fría se produce desde un tanque elevado, por encima del sistema y el movimiento del agua se produce por gravedad y por cambio de densidad.

El sistema solar forzado

Al igual que el sistema termosifónico, el solar forzado dispone de los mismos elementos, dispuestos de manera diferente y con equipos adicionales. Este sistema está compuesto de captadores, un acumulador solar, un grupo hidráulico, con bombas de movimiento, un sistema de regulación y un vaso de expansión, como se puede observar en el esquema técnico 2 y 3, estos resultados son similares a los reportados por RES & RUE DISEMINATION 2005 y Quirós 2011

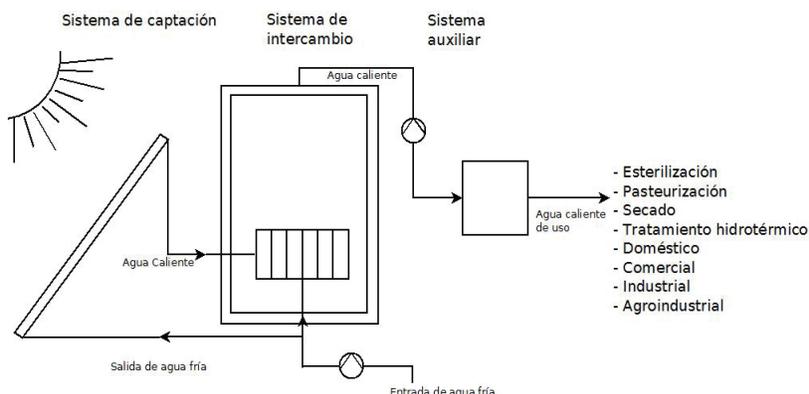


Figura 2.-Sistema forzado con sistema auxiliar de gas. La entrada de agua fría se produce desde un deposito que puede estar elevado o no y el movimiento, así como el uso del agua se produce a través de una o dos bombas según el caso y circunstancia de aplicación.

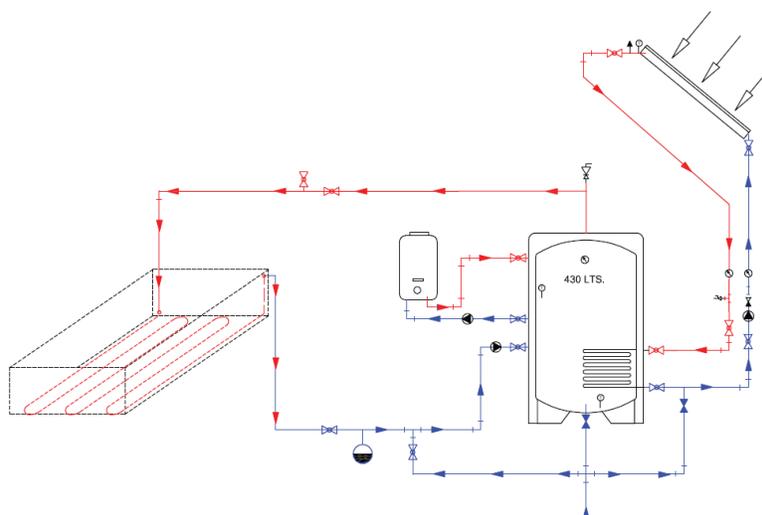


Figura 3.- Sistema de captación de energía solar de tipo forzado híbrido con gas, instalado en la planta de procesamiento de la Asociación de la Asociación de Productores de Lácteos LLAFRAK en Juanilama, Santa Rosa de Pocosol.

Sistema de captación fotovoltaico.

La energía solar fotovoltaica, se genera a partir del uso de paneles solares especiales, que producen electricidad a partir de la radiación solar directa o difusa, mediante un semiconductor denominado célula fotovoltaica. La energía producida se puede usar en muchas aplicaciones en la actividad económica en general, en sitios aislados, para alimentar equipos entre otros, Figura 4.

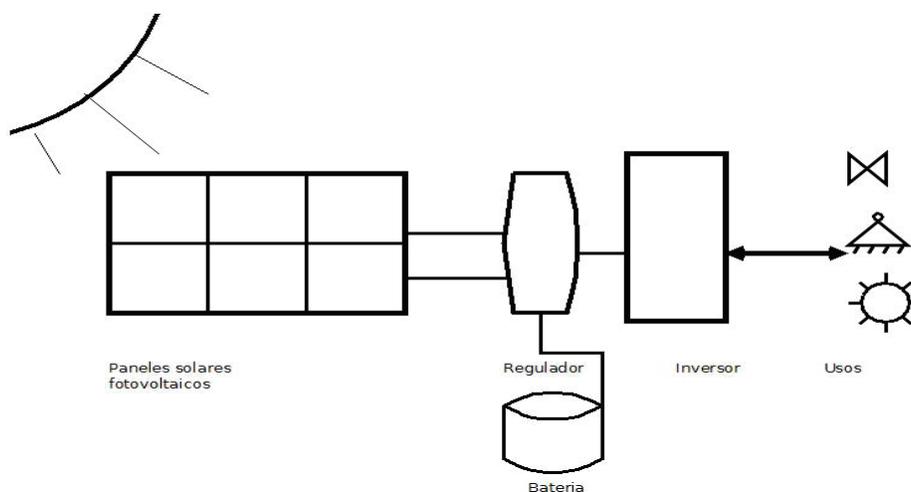


Figura 4.- Esquema básico de un sistema solar fotovoltaico.

En la zona donde se ubica la lechería de la Sede Regional del Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR) de la Escuela de Agronomía, perteneciente al Programa de Producción Agropecuaria (PPA), se presentaron temperaturas sobre los 25 °C desde mayo a diciembre de 2015. En el sistema térmico instalado en esta lechería se registraron temperaturas por encima de los 50 °C, a excepción del mes de julio, que fue aproximadamente de 42 °C. Los datos recolectados durante los meses de mayo a diciembre de 2015, se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4. Temperatura media de entrada y salida del agua en el sistema térmico, y temperatura final alcanzada, en la lechería de la Sede Regional del ITCR en el período de mayo- noviembre de 2015.

Mes	Temperatura ambiente de entrada del agua (°C)	Temperatura de salida del agua (°C)	Δ de temperatura	Temperatura demandada (°C)
Mayo	27,54	52,49	24,95	70,00
Junio	27,34	50,81	23,47	70,00
Julio	25,97	41,86	15,89	70,00
Agosto	26,09	71,71	45,62	70,00
Septiembre	27,39	71,08	43,69	70,00
Octubre	26,27	68,70	42,43	70,00
Noviembre	25,99	69,65	43,66	70,00
Diciembre	26,65	56,34	29,69	70,00

Fuente, cálculo propio.

En este sistema térmico termosifónico e híbrido, se obtuvo una producción de energía solar de aproximadamente 542,3 kWh, cuyo máximo rendimiento fue de 74 kWh/ día, esto se obtuvo durante el mes de agosto de 2015, mientras que en el mes de diciembre la producción de energía solar fue de tan sólo 42,3 kWh/día (tabla 5). Debido a este comportamiento, el sistema logró satisfacer por sí sólo la demanda de energía necesaria para las diferentes operaciones de la lechería de la Sede Regional del ITCR en los meses de agosto, septiembre y noviembre, mientras que en el mes de julio sólo fue capaz de suplir el 39% de la energía requerida (Figura 5). En general, esta producción energética logró disminuir entre 40 y 50 % la energía consumida en esta unidad, considerando un requerimiento medio de 128,17 kWh.

La energía producida se traduce en un total de 1007,9 Kg CO₂ capturado, lo que a su vez equivale a un total de 26 árboles y a un ahorro total de € 232 322.43 (\$ 434.24 USD) en la factura eléctrica de esta lechería (tabla 6).

Es importante destacar que este sistema suministra agua caliente, con temperaturas de 70° C, para los procesos de lavados y esterilización de equipos, de la lechería y los laboratorios de la Escuela de Agronomía, de Biocontroladores y el de Calidad de Carnes, ubicados de forma paralela.

Los resultados obtenidos coinciden con lo citado por otros autores, como (Eubank 1993, Montenegro 2002, Matthews 2006, Lorente 2010 y Papendieck 2010)

Tabla 5. Energía solar promedio producida mensualmente y energía suplida por el sistema térmico para la operación de la lechería de la Sede Regional del ITCR en kWh en función de las temperaturas logradas.

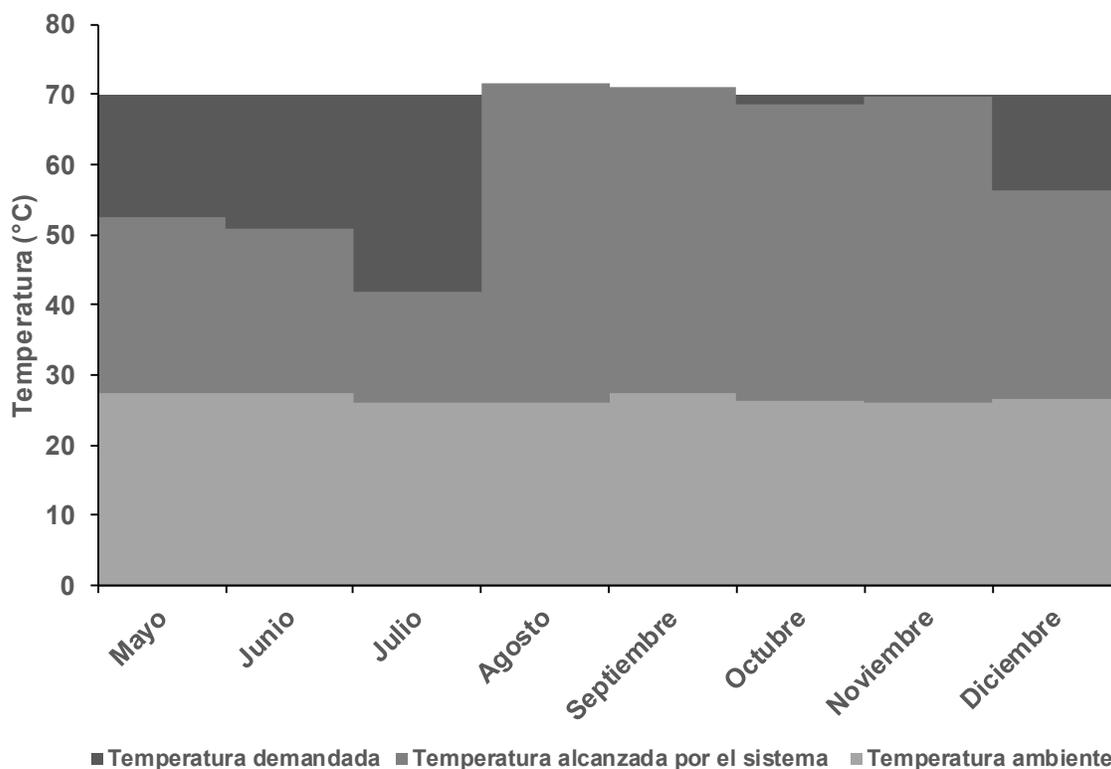
Mes	Energía promedio producida por el sistema térmico en kWh	Energía suplida por el sistema (%)
Mayo	69,2	59
Junio	68,9	49
Julio	67,4	39
Agosto	74,0	104
Septiembre	73,6	102
Octubre	73,3	97
Noviembre	73,6	99
Diciembre	42,3	68

Fuente, cálculo propio.

Tabla 6. Balance energético de los sistemas térmico y fotovoltaico instalados en la lechería de la Sede Regional del ITCR

Mes	Energía total producida por ambos sistemas el térmico y el fotovoltaico en kWh	Valor económico de la energía producida (¢)*	Carbono capturado (Kg CO ₂)	Árboles equivalentes (u)
Mayo	233	¢ 26.661,00	123,60	3
Junio	215	¢ 25.311,00	111,80	3
Julio	241	¢ 28.588,94	127,20	4
Agosto	273	¢ 31.108,62	139,00	3
Septiembre	263	¢ 30.321,22	120,00	3
Octubre	245	¢ 28.988,57	120,00	3
Noviembre	274	¢ 30.827,50	120,00	3
Diciembre	270	¢ 30.515,58	146,3	4
Total	2014,00	¢ 232 322,43	1007,90	26

* Fuente, cálculo propio. Datos obtenidos de acuerdo con la tarifa actualizada de la Cooperativa de Electrificación Rural de San Carlos R.L. (COOPELESCA R.L.)

**Figura 5.** Promedio mensual de temperaturas ambiente, alcanzadas por el sistema y demandada para la operación de la lechería de la Sede Regional del ITCR. Fuente, cálculo propio.

Sistema Fotovoltaico.

La energía promedio por hora durante el día de 6.00 am y hasta las 6.00 pm, producida por el sistema fotovoltaico durante los meses de mayo-diciembre, se puede observar en la figura 6, en donde la curva de mejor ajuste nos ofrece un coeficiente de determinación del 95 por ciento, con un modelo de regresión polinomial múltiple, en donde se muestra la ganancia de energía durante todo el día.

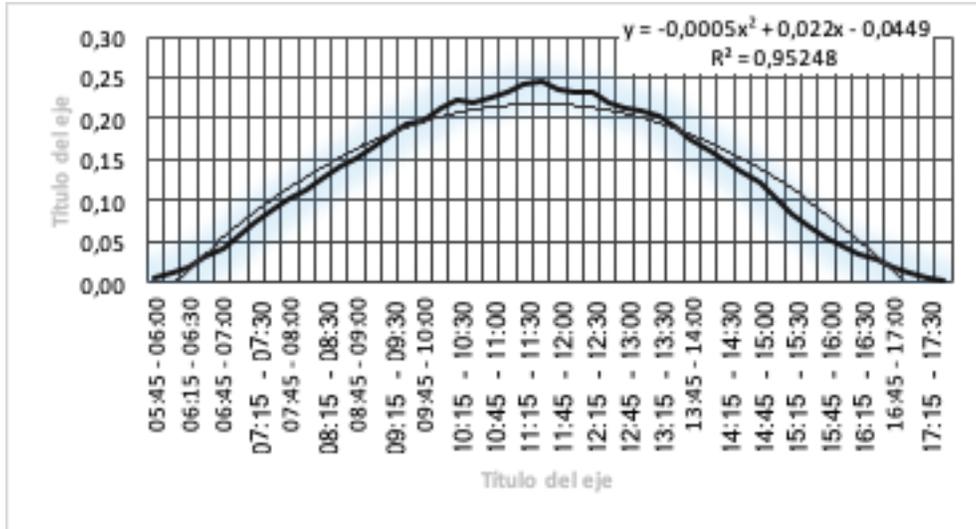


Figura 6.- Generación promedio durante el día en los paneles fotovoltaicos evaluados en la lechería del ITCR Sede San Carlos desde el mes de mayo a diciembre del 2015. Fuente, cálculo propio.

De la misma manera la energía promedio por día durante cada mes evaluado, del sistema se puede observar en la figura 7 y en el cuadro resumen 7.

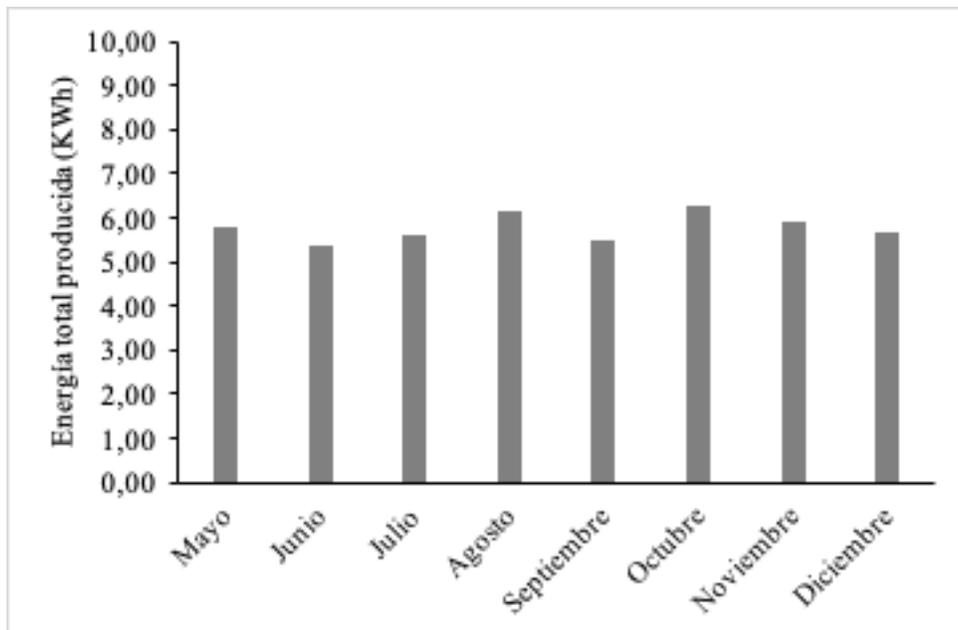


Figura 7.- Generación promedio por día y mes del sistema fotovoltaico. Fuente, cálculo propio.

Sistema	Variable	Media	Mín	Máx
Fotovoltaico	kWh/día	6,12	1,24	11,10

Conclusión

Los sistemas solares de captación térmica y fotovoltaica, se pueden usar con éxito en los procesos productivos agropecuarios de esterilización de equipos mecánicos de ordeño y en la pasteurización de leche.

De acuerdo con los resultados obtenidos en la lechería de la Sede Regional del ITCR se puede observar que los sistemas de captación de energía solar son una fuente eficiente para disminuir los costos operacionales por concepto de energía eléctrica en una explotación pecuaria, así como también la huella de carbono.

La tecnología solar contribuye a la disminución de los gases de efecto invernadero, reduciendo la huella de carbono de la unidad agropecuaria relacionada con la ganadería de leche.

Recomendaciones.

Continuar con el registro de datos y diseñar otros sistemas solares, para seguir usándolos en los sistemas agropecuarios en otras actividades como secado de semillas, frutas, vegetales y plantas medicinales.

Reconocimiento

Los autores agradecen los aportes y ayudas recibidas por parte del Programa de Regionalización Universitaria (PUR), a través de la Vicerrectoría de Investigación y Extensión del Instituto Tecnológico de Costa Rica y al Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG) de la región Huetar Norte. Así como también, agradecen el apoyo financiero por parte del señor MSc. Luis Paulino Mendez Badilla, Vicerrector de Docencia y el MBA. William Vives Brenes, Vicerrector de Administración, ambos del ITCR, para la puesta en marcha de esta propuesta de trabajo. A su vez los autores agradecen toda la cooperación y ayuda recibida por parte de la Dirección Administrativa de la Sede Regional de San Carlos, MSc. Egardo Vargas Jarquín, Lic. Mildred Zúñiga Carvajal y el Bach. Dennis Mendez Palma. A la Ing. Marcela María Chavez Alvarez, por su colaboración con el programa DIA.

Bibliografía Consultada

- Abarca, S. 1997. Ganadería de carne amiga del ambiente y los bosques: una alternativa de producción sostenible (en línea). Consultado el 15 de julio de 2015. Disponible en: http://www.mag.go.cr/rev_agr/v21n02_285.pdf
- Alonso, M; Ramírez, R; Taylor, J. 2012. El Cambio Climático y su impacto en la producción de alimentos de origen animal (en línea). Consultado el 12 de junio de 2015. Disponible en: <http://www.veterinaria.org/revistas/redvet/n111112.html>
- Conde, C; Saldaña, S. 2007. Cambio Climático en América Latina y el Caribe: Impactos, vulnerabilidad y adaptación (en línea). Consultado el 06 de junio de 2015. Disponible en: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0123-42262014000100009

- Estrada, M. 2001. Cambio climático global causas y consecuencias (en línea). Consultado el 06 de junio de 2015. Disponible en: http://www.academia.edu/6789690/Cambio_clim%C3%A1tico_global_causas_y_consecuencias
- Eubank, R; Davis, A. 1993. Pasteurización de la leche. Controles y exámenes (en línea). Consultado el 20 de noviembre de 2014. Disponible en: https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=6&ved=0CDsQF-jAF&url=http%3A%2F%2Fwww.salud.gob.mx%2FUnidades%2Fcdi%2Fdocumentos%2FDOSAL4935.doc&ei=BMRuVPbNO4egNrfRgsAE&usq=AFOjCNHLpzbQt35C54xilMz PnP4t-MOZA&sig2=C55R_w9ZP5juFEy9k6nz0A&bv=bv.80185997,d.eXY&cad=rja
- FAO. 2009. El estado mundial de la Agricultura y la Alimentación (en línea). Consultado el 12 de mayo de 2015. Disponible en: <http://www.fao.org/docrep/012/i0680s/i0680s.pdf>
- FAO. 2013. Mitigación de las emisiones de gases de efecto invernadero en la producción ganadera (en línea). Consultado el 14 de junio de 2015. Disponible en: www.fao.org/3/a-i3288s.pdf
- FAO. 2015. Estimación de emisiones de gases de efecto invernadero en la agricultura. Un manual para abordar los requisitos de los datos para los países en desarrollo (en línea). Consultado el 20 de julio de 2015. Disponible en: <http://www.fao.org/3/a-i4260s.pdf>
- FAO. sf. Ganadería y deforestación (en línea). Consultado el 20 de junio de 2015. Disponible en: <http://www.fao.org/3/a-a0262s.pdf>
- IMN. 2015. Factores de emisión GEI, quinta edición (en línea). Consultado el 20 de julio de 2015. Disponible en: <http://cglobal.imn.ac.cr/documentos/factores-de-emision-gei-quinta-edicion>
- INTA (Instituto nacional de Tecnologías Agropecuarias). 2011. Ganadería y efecto invernadero: mejor producción, menos contaminación. Consultado 11 marzo del 2013. INTA Informa. <http://intainforma.inta.gov.ar/?p=6579>
- INTECO. 2006. INTE-ISO 14064-1. Gases de efecto invernadero – Parte 1: especificación con orientación, a nivel de organizaciones, para la cuantificación y el informe de las emisiones y remociones de gases de efecto invernadero. Primera Edición. San José, Costa Rica. 34p
- IRENA (Agencia Internacional de energía renovable)(2013) http://www.irena.org/News/Description.aspx?NType=NW&PriMenuID=16&catid=84&mnu=cat&News_ID=312. Consultado en abril del 2013
- Khan, M; Abdul Malek, A; Mithu, M; Das, D. 2010. Design, fabrication and performance evaluation of natural circulation rectangular box-type solar domestic water system. International Journal of Sustainable Energy. Vol 2, No 3, sep 164-177.
- López, M. 2006. Energía solar térmica (en línea). Consultado el 03 de enero de 2015. Disponible en: http://www.energiasrenovables.ciemat.es/adjuntos_documentos/Energia_Solar_Termica.pdf
- Lorente, A. 2010. Ganadería y Cambio Climático: Una influencia recíproca (en línea). Consultado el 20 de junio de 2015. Disponible en: <http://web.ua.es/es/revista-geographos-giecryal/documentos/articulos/no-3-2010-art-lorente-saiz.pdf>
- Matthews, C. (2006). La ganadería amenaza el medio ambiente. Consultado 12 marzo del 2013. FAO Sala de Prensa. <http://www.fao.org/newsroom/es/news/2006/1000448/index.html>
- Matthews, C. (2006). La ganadería amenaza el medio ambiente. Consultado 12 marzo del 2013. FAO Sala de Prensa. <http://www.fao.org/newsroom/es/news/2006/1000448/index.html>.
- MINAET (Ministerio de Ambiente, Energía y Telecomunicaciones). (2011). VI Plan Nacional de energía 2012-2013 (en línea). Consultado 12 de marzo del 2013. Disponible en: http://www.dse.go.cr/es/03publicaciones/01PoliticaEnerg/VI_Plan_Nacional_de_Energia_2012-2030.pdf.

- Montenegro, J; Abarca, S. 2002. Los sistemas silvopastoriles y el calentamiento global: un balance de emisiones (en línea). Consultado el 12 de julio de 2015. Disponible en: http://www.mag.go.cr/rev_agr/v26n01_017.pdf
- Paniagua, W; Muñoz, G; Ramírez, C; Campos, J; Guzmán, T. 2005. Manejo Alternativo de Lecherías integradas en Sistemas Agropecuarios de bajos insumos externos. 53 p
- Papendieck, S. 2010. La Huella de Carbono como nuevo estándar ambiental en el comercio internacional de agroalimentos (en línea). Consultado el 10 de julio de 2015. Disponible en: http://www.iica.int/Esp/regiones/sur/argentina/Documents/2011/Novedades/Huella_Carbono/Papendieck.pdf
- Quirós, L. 2011. Calentando el agua y cuidando el ambiente (en línea). Consultado el 10 de febrero de 2013 Disponible en: <http://www.revistaconstruir.com/construccion-sostenible/836>
- RES & RUE DISEMINATION. 2005. Energía solar térmica. Proyecto de circulación natural y forzada (en línea). Consultado el 10 de febrero de 2013. Disponible en: <http://www.cesu.es/temas>

This paper should be cited as follows:

Guzman Hernandez, T. J., Rodriguez Araya, F. and Castro Badilla, G. (2016). "Solar Energy in Agricultural Systems. Results of a Local Pilot Program in the Northern Region of Costa Rica", Athens: ATINER'S Conference Paper Series, No: AGR2016-2015.

Aplicación de sistemas solares térmicos y fotovoltaicos en el sector agrícola y agroindustrial para disminuir los gases de efecto invernadero en la región Huetar Norte de Costa Rica.

Tomás J. Guzmán Hernández¹, Javier M. Obando Ulloa¹, Guillermo Castro Badilla²

¹ Doctorado en Ciencias Naturales para el Desarrollo, DOCINADE, Campus Tecnológico Local San Carlos, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Santa Clara, Costa Rica.

² Escuela de Ingeniería Electrónica, Campus Tecnológico Local San Carlos, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Santa Clara, Costa Rica.

Resumen

Los combustibles fósiles, que actualmente aportan cerca del 85% de la energía primaria consumida, seguirán siendo la principal fuente para cubrir la demanda energética de los próximos años. Ante esta perspectiva y, dentro de un marco de cambio climático global, las energías renovables deben tomar un mayor protagonismo como fuentes de energía limpia. Costa Rica, como la mayoría de los países en vías de desarrollo, presenta una alta dependencia de los combustibles fósiles, principalmente del petróleo. Sin embargo, a diferencia de otras zonas del planeta, la energía solar potencial en este país está cuantificada en 10000 MW, aunque su uso es mínimo.

Dado que el sector agrícola y agroindustrial presentan una alta dependencia de los combustibles fósiles y por ende, una alta emisión de gases de efecto invernadero (GEI), responsables de los efectos sobre el cambio climático, el Grupo de Investigación en Sistemas Térmicos Solares para la Agricultura del Programa de Doctorado en Ciencias Naturales para el Desarrollo (DOCINADE) del ITCR estudió la posibilidad de aplicar sistemas solares termosifónicos, forzados y fotovoltaicos en distintas unidades agrícolas de la región Huetar Norte de Costa Rica desde el 2015.

Por esta razón, el objetivo de este trabajo fue evaluar la aplicación de tecnologías térmicas solares y fotovoltaica para la esterilización de equipos de ordeño, pasteurización, escaldado y secado de productos agroindustriales y la generación de energía eléctrica como forma amigable con el ambiente.

Los sistemas termosifónicos y fotovoltaicos se implementaron en diferentes unidades productivas en la región Huetar Norte a través de un programa local piloto, apoyado por el Ministerio de Agricultura y Ganadería, el Instituto Nacional de Desarrollo Rural (INDER), la Fundación para el Fomento y Promoción de la Investigación y Transferencia de Tecnología Agropecuaria de Costa Rica (FITTACORI), el Programa Universitario de Regionalización (PUR) del Consejo Nacional de Rectores (CONARE).

Estos sistemas estaban equipados con dispositivos computarizados para el registro de datos. Los resultados obtenidos desde el 2015 hasta 2018 han permitido verificar la reducción del consumo de energía y las emisiones de gases de efec-

to invernadero, gracias al aprovechamiento de una fuente de energía limpia. Además, las unidades productivas que se beneficiaron con esta tecnología mejoraron sus procesos productivos al reducir los tiempos de trabajo y al aumentar la eficiencia de los procesos, la calidad e inocuidad de sus productos.

En resumen, por medio de este trabajo se ha evidenciado la independencia energética de las empresas proveedoras, por lo que los productos procesados podrían adquirir la categoría de ecológicos lo que representaría una ventaja competitiva en el mercado regional, nacional e internacional, de la producción local.

Palabras claves: agricultura, agroindustria, energía solar, sistemas fotovoltaicos, sistemas termosifónicos.

Introducción

En la actualidad, el consumo de energía a nivel global está en aumento y se proyecta que esta tendencia continúe en los próximos años. Además, dentro de la demanda global de energía actual, los combustibles fósiles aportan cerca del 85% de la energía primaria consumida (Hoffert *et al.*, 2002) y seguirán siendo la principal fuente de energía (Solangi *et al.*, 2011). Ante esta perspectiva, y dentro de un marco de cambio climático global, las energías renovables deben tomar un mayor peso como fuentes de energía limpia con bajos o incluso nulos niveles de emisiones y con la característica de la sostenibilidad en el tiempo.

Aunque desde el siglo XVIII, el desarrollo tecnológico apuntaba a la utilización del sol para fines productivos fue hasta en el siglo XX que se desarrolló y se mejoró las tecnologías de uso de la energía del sol para varios fines, entre los que destaca el calentamiento de fluidos, agua, producción de vapor, así como la generación de corriente eléctrica (Guzmán-Hernández *et al.*, 2017).

En el caso de Costa Rica, la producción energética está centrada fundamentalmente en tres fuentes renovables: hidroeléctrica (76%), eólica (4%) y geotérmica (12%) (MINAET, 2011). Sin embargo, Costa Rica presenta una alta dependencia de los combustibles fósiles, principalmente el petróleo, puesto que supone un 52% de la energía consumida en el país, principalmente dentro del sector transporte (MINAET, 2011). En cuanto a la energía solar, Costa Rica presenta un potencial cuantificado en aproximadamente 10000 MW, pero su grado de desarrollo es muy bajo.

La radiación solar que se recibe en la superficie terrestre puede ser captada y aprovechada mediante diferentes sistemas: captadores solares térmicos o módulos fotovoltaicos que han sido implementados y evaluados por el grupo de investigación del Programa de Doctorado en Ciencias Naturales para el Desarrollo (DOCINADE) (Guzmán-Hernández *et al.*, 2017).

Los módulos fotovoltaicos están formados por celdas organizadas en paneles en las que se genera electricidad a partir de la radiación solar. Para ello, se deben mantener unas condiciones estandarizadas de radiación (1000 W/m^2) y de temperatura (25°C). Los paneles fotovoltaicos pueden ser monocristalinos (con secciones de un único cristal de silicio), policristalinos (formados por pequeñas partículas cristalizadas) o amorfos (con el silicio no cristalizado). Su eficiencia es mayor cuanto mayores son los cristales, aunque también aumenta su peso, grosor y costo. El rendimiento de los paneles monocristalinos puede alcanzar el 20%, mientras que en los paneles amorfos no llega al 10%, aunque su costo es mucho menor (Guzmán-Hernández *et al.*, 2017; Espejo-Marín, 2004).

Por su parte, los colectores solares térmicos normalmente se emplean para uso doméstico y pueden ser de circuito abierto o cerrado. En los sistemas de circuito abierto, el agua circula a través de los propios colectores solares, mientras que en los sistemas cerrado el agua, tras el paso por los colectores, se almacena en un depósito para su posterior uso. El sistema cerrado tiene una mayor eficiencia y supone un mayor ahorro energético, pero presenta problemas en zonas con baja temperatura. Además, en los equipos de circuito cerrado se distinguen dos tipos de flujo: termosifónico, en el que el agua circula únicamente por diferencias de densidad y forzado, en el que se emplean bombas para la circulación del agua (Khan *et al.*, 2010; Quirós, 2011; Guzmán-Hernández *et al.*, 2017). En ambos sistemas se recomienda incorporar un sistema auxiliar de calentamiento (gas, resistencias eléctricas, biomasa u otros) para evitar problemas de abastecimiento de agua y/o aire caliente debido a la variación de la radiación solar (Nandwani, 2005; Guzmán-Hernández *et al.*, 2017).

Por tanto, basado en las posibilidades con las que cuenta el sector de la energía solar y su bajo grado de desarrollo, se plantea la alternativa de emplear la energía solar en diferentes procesos productivos del sector agropecuario, teniendo en cuenta el potencial que presenta la región Huetar Norte de Costa Rica. De esta forma, se abre un camino que pueda favorecer la producción limpia, reducir los niveles de emisiones y mejorar las condiciones de trabajo de los pequeños productores agropecuarios.

Objetivo

El objetivo de este trabajo es evaluar los sistemas solares térmicos o fotovoltaicos instalados en la región Huetar Norte por medio del análisis de la generación de energía, así como el ahorro energético, económico e impacto ambiental (en función del descenso en las emisiones de dióxido de carbono).

Metodología

La ubicación del proyecto ha respondido a la necesidad del uso de los sistemas solares en la región Huetar Norte de Costa Rica para las operaciones de esterilización, pasteurización, escaldado y secado de productos. La aplicación se ha realizado en lecherías (para esterilizar los equipos de ordeño), en las plantas procesadoras de leche (para el proceso de pasteurización), en una planta de productores de pimienta (para el procesamiento de escaldado) y para el proceso de secado de cacao.

El trabajo ha consistido en el diseño, construcción y evaluación de varios sistemas térmicos y fotovoltaicos en la región Huetar Norte (termosifónicos, forzados, híbridos activos y pasivos de agua y aire caliente; Cuadro 1), con la participación de varias instituciones públicas, tales como el Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG), el Instituto Nacional de Desarrollo Rural (INDER), la Fundación para el Fomento y Promoción de la Investigación y Transferencia de Tecnología Agropecuaria de Costa Rica (FITTACORI) y el Programa de Doctorado en Ciencias Naturales para el Desarrollo (DOCINADE) del Instituto Tecnológico de Costa Rica, apoyados por la Vicerrectoría de Investigación y Extensión del TEC, así como el Programa Universitario de Regionalización (PUR) del Consejo Nacional de Rectores (CONARE).

Cuadro 1. Detalle de los proyectos desarrollados sobre el uso de la tecnología térmica solar en actividades agropecuarias y agroindustriales en la región Huetar Norte de Costa Rica

Nombre del proyecto	Sistema térmico solar implementado	Uso	Institución beneficiaria
“Aplicación de energía solar en los sistemas productivos agropecuarios de la zona norte de Costa Rica”.	Termosifónico híbrido con resistencias eléctricas	Esterilización de equipos de ordeño y de laboratorio y, generación de la electricidad, respectivamente de la lechería del Programa de Producción Agropecuaria (PPA), del laboratorio de bio controladores y del laboratorio de calidad de carne de la Escuela de Agronomía	Campus Tecnológico Local San Carlos, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Santa Clara, Florencia, Alajuela
“Implementación de tecnologías solares en una planta de procesamiento de leche y lecherías, para pasteurizar, esterilizar y generar energía en la zona Huetar Norte de Costa Rica”. Programa local piloto.	Fotovoltaico con capacidad para la generación de 2 KW Pasivo Activo forzado híbrido	Secado de productos agrícolas	
Financiado por el IT-CR-VIE-FITTACORI-MAG	Termosifónicos híbridos con resistencias eléctricas (2 sistemas instalados)	Esterilización de equipos de ordeño de la lechería y de equipos en el laboratorio de biotecnología y de agroindustria	Escuela Técnica Agrícola e Industrial de Santa Clara (ETAI), Santa Clara, Florencia San Carlos.
	Forzados híbridos con sistema auxiliar de gas LP (2 sistemas instalados)	Pasteurización de leche para la elaboración de productos lácteos y esterilización de equipos	Asociación de Productores LLAFRAK y Asociación de Productores San Bosco, Santa Rosa de Pocosol, San Carlos
“Implementación de tecnologías solares en actividades económicas agropecuarias en la zona Huetar Norte de Costa Rica”. Programa local piloto.	Activo híbrido con aire y agua caliente y sistema auxiliar de gas LP Activo híbrido con agua caliente y sistema auxiliar de gas LP	Secado de cacao, frutas y semillas Escaldado de pimienta	Asociación de Productores Agro Ambientistas de Cacao (ASOPAC), Katira, Guatuso Asociación de Productores de Pimienta de Sarapiquí (APROPISA), CEPROMA LAKY, Puerto Viejo, Sarapiquí.
“Aplicación de tecnologías térmicas solares para el secado del cacao (Theobroma cacao L.) en la Región Huetar Norte de Costa Rica” Financiado por el ITCR-VIE-PUR-FITTACORI-MAG-INDER	semi-automatizado		

Durante el tiempo de ejecución de este trabajo se ha evaluado:

- La eficiencia de producción eléctrica de un sistema fotovoltaico compuesto por ocho paneles de 2 kW de potencia con 8 convertidores, el cual se instaló en la lechería del Campus Tecnológico Local San Carlos del Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR-CTLSC).
- La eficiencia de calentamiento de agua de un sistema solar termosifónico híbrido de ocho colectores con sistema auxiliar eléctrico también instalado en la lechería del ITCR en el Campus Local San Carlos.
- La eficiencia de calentamiento de agua de dos sistemas térmicos forzados híbridos con sistema auxiliar de gas LP compuesto por colectores solares planos de calentamiento de agua y un tanque acumulador de agua con capacidad para 302,4 l. Este tanque cuenta con termopares conectados a un sistema informático para registrar los datos de captación de energía y el uso del agua caliente. Estos sistemas se instalaron en las plantas de procesamiento de los Productores de lácteos LLAFRAK y Productores de lácteos San Bosco, ambos en Santa Rosa de Pocosol, San Carlos. Estas dos plantas procesadoras de leche se seleccionaron por ser una zona dedicada a la agricultura y ganadería, con un Índice de Desarrollo Social Distrital bajo (MIDEPLAN, 2017).
- La eficiencia del secado de cacao en ASOPAC-SIBAELI de Katira en la región Huetar Norte y la mejora del proceso.
- La eficiencia y la mejora del proceso de escaldado de la pimienta en APROPISA de Puerto Viejo de Sarapiquí.

Para evaluar los resultados de cada sistema se contó con la ubicación de sistemas computarizados de registro de datos.

Resultados y Discusión

Sistema fotovoltaico instalado en la lechería del Campus Tecnológico Local San Carlos del Instituto Tecnológico de Costa Rica

Desde la instalación del sistema solar fotovoltaico en la lechería del Campus Tecnológico Local San Carlos del Instituto Tecnológico de Costa Rica (CTLSC-ITCR; Figura 1) en mayo de 2015 hasta octubre de 2018, se ha generado un total de 8 296,86 kWh, con una media anual de 2 428,35 kWh. Esta producción eléctrica ha supuesto un ahorro económico de ₡ 1 717 442 desde mayo de 2015 (aprox. 500 000 colones anuales), suponiendo un ahorro en la factura eléctrica inicial de un 28% (Figura 2). Con este ahorro anual, la recuperación de la inversión inicial (₡ 3 630 000) se establecería en 7,2 años, lo cual es un tiempo de recuperación corto para una instalación de estas características (Guzmán-Hernández *et al.*, 2016; Guzmán-Hernández *et al.*, 2017).



Figura 1. Sistema fotovoltaico instalado en la lechería del Programa de Producción Agropecuaria de la Escuela de Agronomía, Campus Tecnológico Local San Carlos, Instituto Tecnológico de Costa Rica.

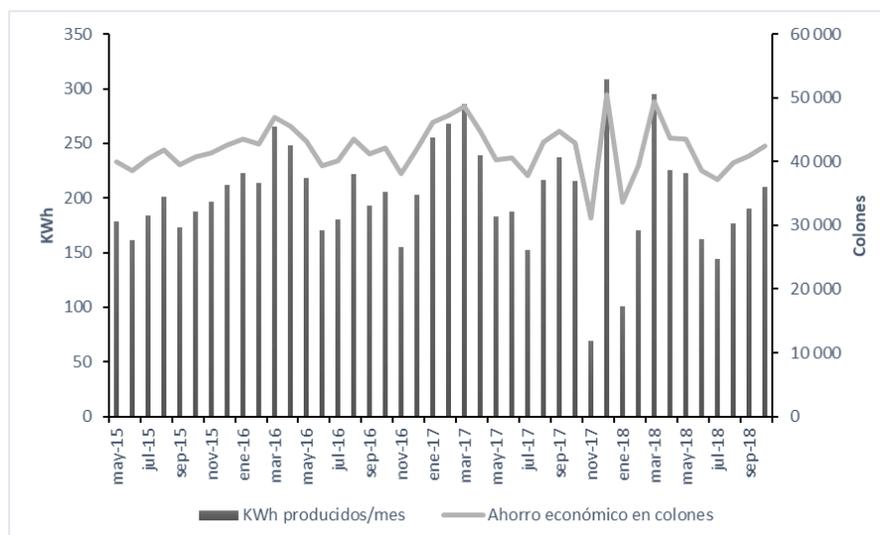


Figura 2. Producción eléctrica mensual y ahorro económico mensual en la factura eléctrica generado con la implementación del sistema fotovoltaico en la lechería del PPA del ITCR-CTLSC.

Por otro lado, la instalación de este sistema ha evitado la emisión de 1 642,86 kg de CO₂ anuales, de acuerdo con los datos registrados en el sistema Enlighten (Guzmán-Hernández et al., 2017).

Sistema solar termosifónico híbrido instalado en la lechería del Campus Tecnológico Local San Carlos del Instituto Tecnológico de Costa Rica

El sistema termosifónico híbrido instalado en la lechería del CTLSC-ITCR permite el empleo de la energía solar para el calentamiento de agua para la esterilización de los equipos de ordeño (Figura 3A). El esquema básico del sistema consta del sistema de captación solar, el sistema de acumulación y el de uso (Guzmán-Hernández et al 2017; Figura 3B).

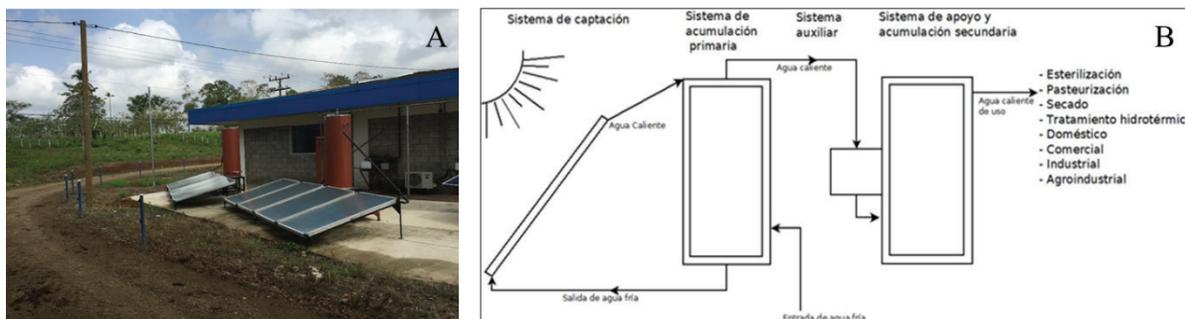


Figura 3. Sistema solar termosifónico híbrido implementado en la lechería del PPA del CTLSC-ITCR, Santa Clara, Florencia.

Desde su instalación en mayo de 2015 hasta mayo de 2018, este equipo ha generado un promedio anual de 1 603,16 kWh de energía equivalente, lo cual ha supuesto un ahorro económico de 436 000 colones anuales, evitando de esta forma la emisión de 1 106 kg de CO₂ equivalentes anuales (Figura 4).

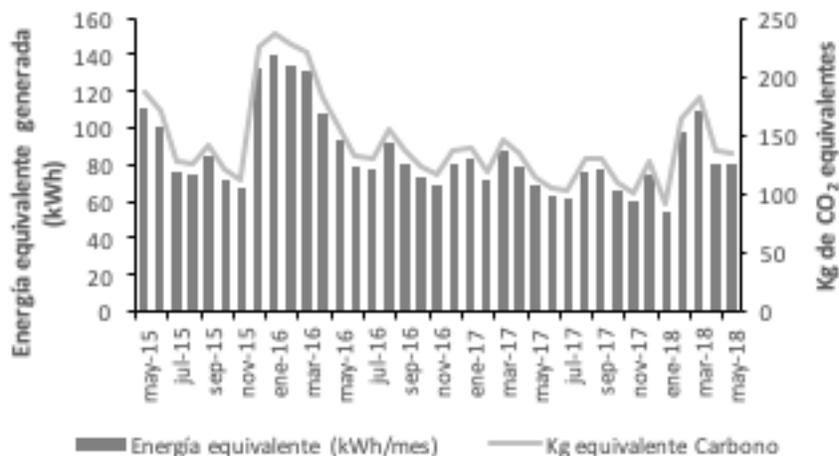


Figura 4. Producción eléctrica equivalente y emisiones de CO₂ evitadas por el sistema termosifónico instalado en el ITCR-SSC.

En este caso, la recuperación de la inversión inicial (¢ 5 000 000) se lograría en 11,5 años, suponiendo un ahorro económico importante, aunque en este caso la inversión inicial es algo más cuantiosa (Guzmán-Hernández *et al.*, 2017). En los meses más soleados del año, principalmente entre enero y marzo, el ahorro económico puede alcanzar cotas cercanas al 80%, superando ampliamente la barrera del 50% de ahorro, y manteniéndose cercano al 40% durante el resto del año (Figura 5).

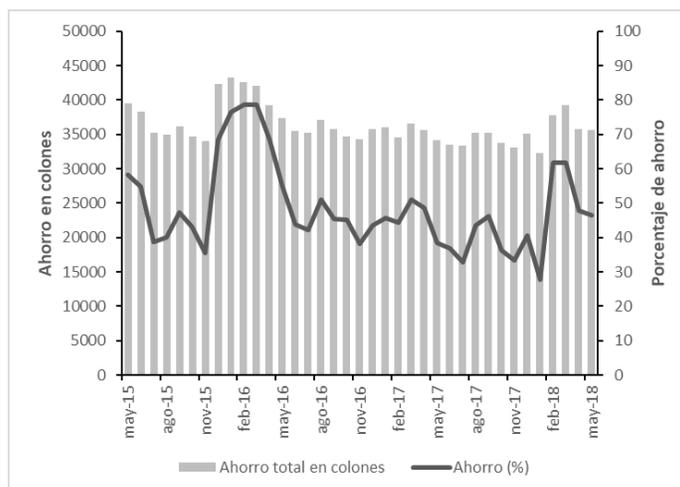


Figura 5. Ahorro económico mensual y porcentaje de ahorro sobre la factura eléctrica previa con la implementación del sistema termosifónico en la lechería del PPA en el ITCR-CTLSC.

El sistema termosifónico instalado en el CTLSC-ITCR fue replicado e instalado en la Escuela Técnica, Agrícola e Industrial de Santa Clara (ETAI) en Santa Clara de San Carlos, aunque este sistema es más pequeño, pero con la misma funcionalidad (Figura 6). Este sistema permitió comprobar los resultados obtenidos en el ITCR.



Figura 6. Sistema solar termosifónico híbrido implementado en la lechería de la Escuela Técnica Agrícola e Industrial (ETAI) en Santa Clara de San Carlos.

Sistema termosifónico híbrido forzado implementado en la planta procesadora de lácteos LLAFRAK

El esquema básico del sistema forzado híbrido implementado en la planta procesadora de lácteos LLAFRAK se puede observar en la figura 6. Este sistema consta del sistema de captación solar, el sistema de acumulación y el de uso, así como las bombas de conexión (Figura 7).

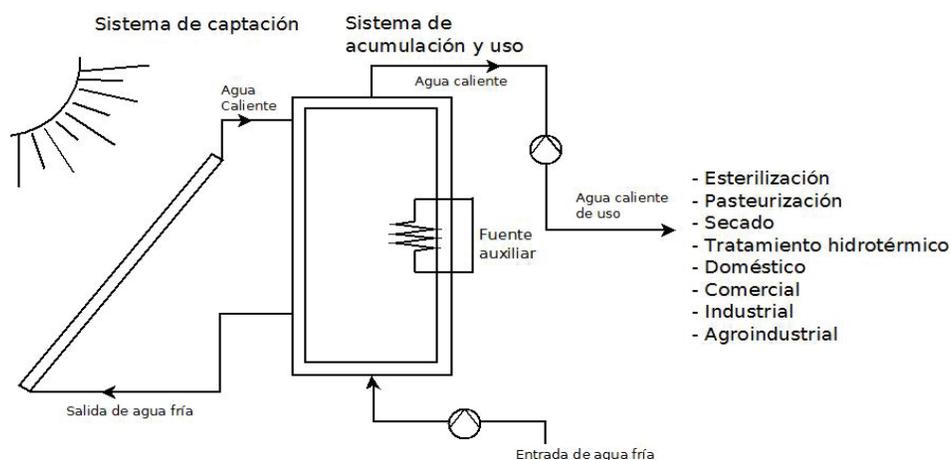


Figura 7. Esquema del sistema solar térmico forzado híbrido con sistema auxiliar de gas Lp implementado en la planta procesadora de productos lácteos LLAFRAK en Juanilama de Santa Rosa de Pocosol, San Carlos.



Figura 8. Detalle del sistema solar forzado híbrido con gas LP implementado en la planta procesadora de lácteos LLAFRAK. (A) . Sistema de colectores solares, ubicados a nivel del suelo, (B) Tanque para el almacenamiento y sistema de control de temperatura del agua, (C) Sistema de flujo del agua caliente (serpentines) para el intercambio de calor en la marmita recubierta (D).

Anterior a la implementación de este sistema, la lechería se valía de una caldera de leña de fabricación casera para calentar el agua hasta la temperatura necesaria para el proceso de pasteurización, la cual consumía aprox. 2,5 toneladas de leña al mes (Guzmán-Hernández *et al.*, 2016) y junto con la mano de obra necesaria para su manejo suponía un costo mensual de aprox. ₡ 202 250, mientras que el consumo de gas LP implica un gasto mensual de aprox. ₡ 36 000, lo cual se traduce en un ahorro total de ₡ 166 250 al mes (Guzmán-Hernández *et al.*, 2016).

Los datos recogidos entre marzo de 2017 y julio de 2018 muestran que, tras el paso por el sistema, el agua incrementa su temperatura desde aprox. 24,67°C hasta 60,95°C, por lo que el sistema es capaz de suministrar cerca del 87,20% de la energía total necesaria para la producción en esta planta (Figura 9).

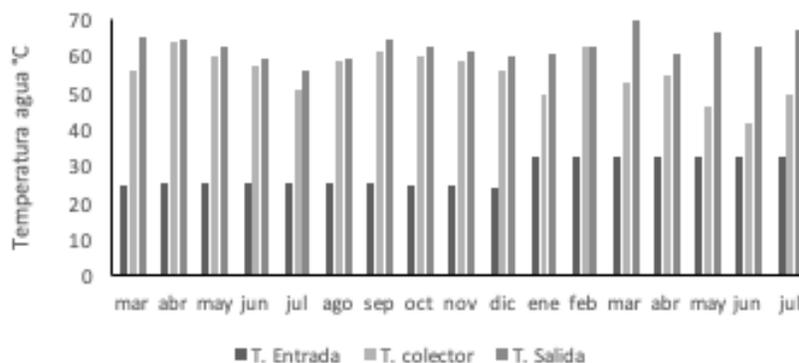


Figura 9. Comparación de las temperaturas de entrada, temperatura en colectores y temperatura de salida del agua a través del sistema solar térmico forzado híbrido implementado en la planta procesadora de productos lácteos LLAFRAK, en el periodo comprendido entre marzo de 2017 y julio de 2018.

Por otra parte, se debe tener en cuenta que, desde marzo de 2017 hasta julio de 2018, el sistema térmico de LLAFRAK ha generado un total de 11 962,24 kWh, lo que se corresponde con 8 254 kg equivalentes de carbono (Figura 10).

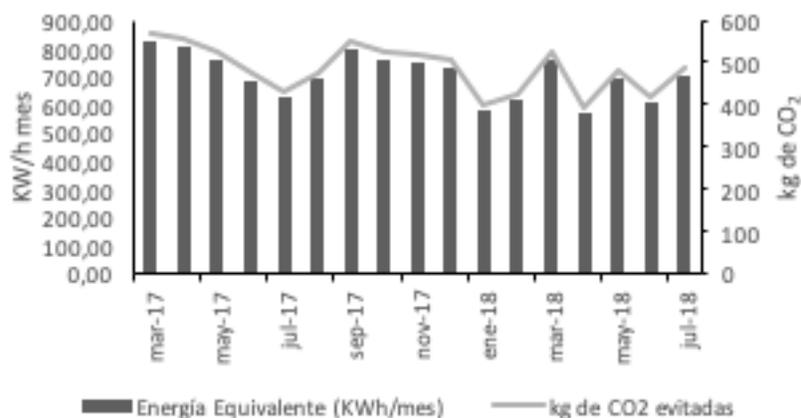


Figura 10. Producción de energía equivalente expresada en kWh/mes por el sistema solar térmico forzado híbrido, y emisiones de CO₂ evitadas por cada mes entre marzo de 2017 y julio de 2018.

En el caso de la leña, por cada kg de leña quemada se emiten 1,7 kg de CO₂ a la atmósfera. Teniendo en cuenta el uso de aprox. 2- 2,5 toneladas de leña mensuales, anualmente corresponde con 46,3 toneladas de CO₂ emitidas a la atmósfera, por lo que las emisiones se han reducido en 38 toneladas de CO₂, equivalente al 82,2% de las emisiones totales por año. Esta reducción en emisiones se traduce en un importante impacto ambiental generado por los productores de LLAFRAK y una mejora significativa en las condiciones de trabajo y salud de sus trabajadores (Guzmán-Hernández *et al.*, 2016).

Sistema termosifónico híbrido forzado implementado en la planta procesadora de lácteos San Bosco

El sistema solar implementado en la planta procesadora de lácteos San Bosco es similar al que se implementó en la planta procesadora de lácteos LLAFRAK. Sin embargo, en este caso los colectores se ubicaron en el techo de la planta procesadora por no disponer de espacios para ubicarlos en el suelo (Figura 11).



Figura 11. Sistema solar termosifónico forzado híbrido con sistema auxiliar de gas Lp implementado en la planta procesadora de lácteos San Bosco.

Entre junio de 2016 y mayo de 2018 el sistema solar térmico instalado fue capaz de elevar la temperatura del agua desde 24,72°C hasta 59,46°C, lo que supone un 83% de la energía requerida por los procesos productivos en la planta procesadora de lácteos San Bosco (Figura 12).

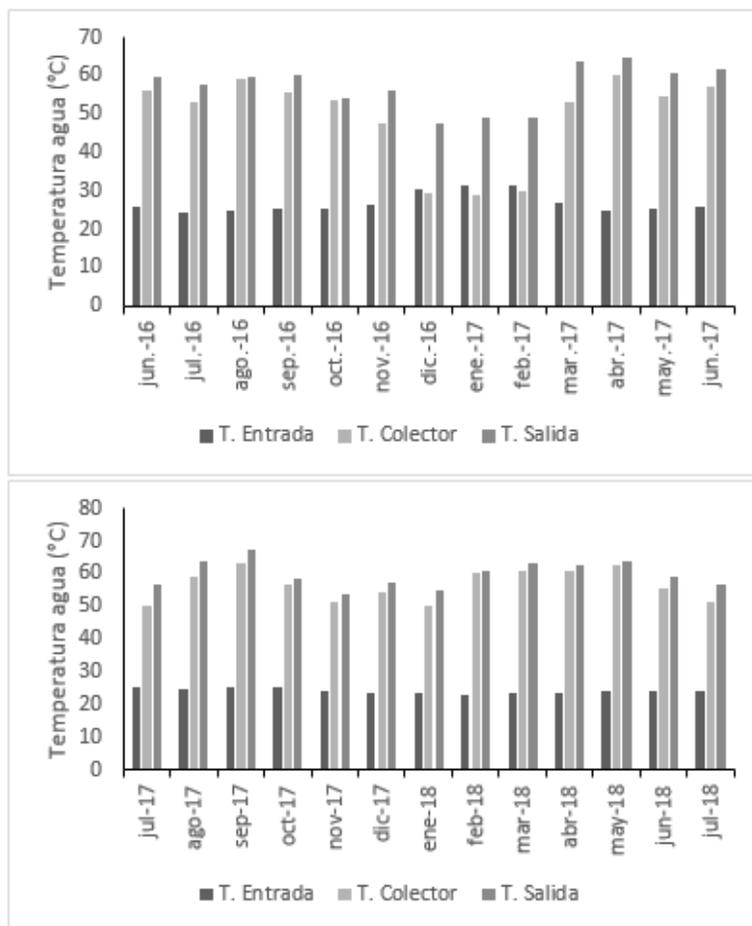


Figura 12. Gráfica comparativa de las temperaturas de entrada, temperatura en colectores y temperatura de salida del agua a través del sistema solar térmico forzado híbrido de San Bosco, en los periodos junio 2016 – junio 2017 (superior) y julio 2017 – agosto 2018 (inferior).

Como se puede comprobar, desde que San Bosco cuenta con el sistema solar se ha generado un total de 8749,92 kWh, con un promedio de 336 kWh/mes (Figura 13), lo cual ha generado una reducción total de 6037,44 kg de CO₂ totales.

En el caso de la lechería de San Bosco el total energético producido es menor que en LLAFRACK, ya que la temperatura alcanzada por el sistema térmico de LLAFRACK es 3,8°C mayor que en San Bosco, lo cual se puede deber a unas condiciones climatológicas de mayor nubosidad que afecten disminuyendo el rendimiento del sistema, pero que no impiden que, con ayuda del sistema auxiliar de Gas LP, se alcance un óptimo rendimiento para alcanzar la temperatura requerida para la realización correcta del proceso productivo (Figura 13).

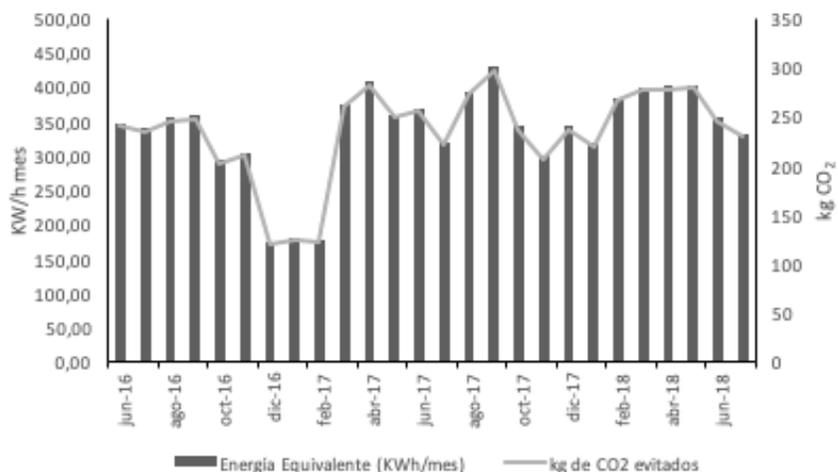


Figura 13. Producción de energía equivalente expresada en kWh/mes por el sistema solar térmico forzado híbrido de San Bosco y emisiones de CO₂ evitadas por cada mes correspondiente entre junio de 2016 y julio de 2018.

Sistema térmico solar activo híbrido con agua y aire caliente con sistema auxiliar de gas LP implementado en la Asociación de Productores Agroambientalistas de Cacao (ASOPAC)

El sistema térmico solar activo híbrido implementado en ASOPAC, específicamente en las instalaciones de la fábrica de chocolates Sibaeli, dispone de una cámara de secado con capacidad para 500-750 kg. Esta cámara está conectada a un área de tres colectores solares, ubicados en su parte superior para el calentamiento, almacenamiento y circulación de agua que se hace circular a través de un radiador para mantener la temperatura requerida para el proceso de secado, un sistema auxiliar de gas LP, un sistema forzado de calentamiento, flujo y circulación de aire, sistema de bombas para la circulación forzada de aire caliente, sistema de control y anaqueles de secado (Figuras 14 y 15).

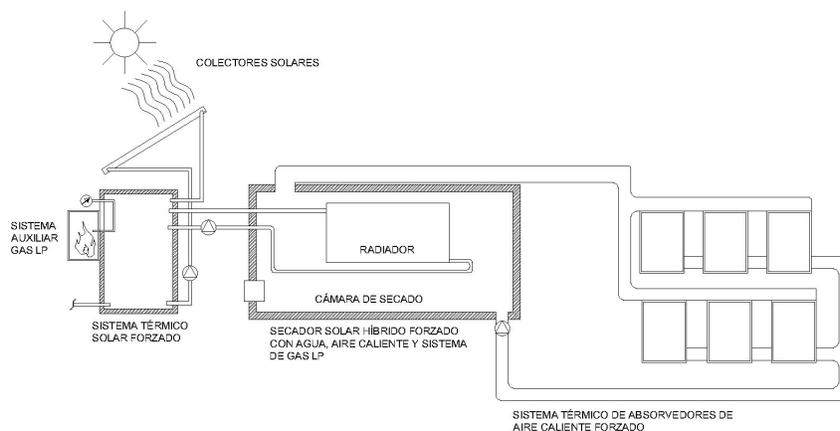


Figura 14. Esquema del sistema térmico solar híbrido con agua, aire caliente y sistema auxiliar con gas LP para secado de cacao.



Figura 15. Sistema térmico solar activo híbrido con agua y aire caliente con sistema auxiliar de gas LP, implementado en ASOPAC-SIBAELI para el secado de cacao.

El sistema térmico solar híbrido forzado fue capaz de mantener la temperatura de la cámara de secado por de 32 °C, la cual se requiere para lograr un proceso de secado adecuado para el cacao (Figuras 16). Este hecho redujo el tiempo de proceso de 15 a 5 d, teniendo en cuenta la comparación entre este secador solar y el sistema tradicional utilizado por los productores (manteados plásticos) los tradicionales de plásticos.

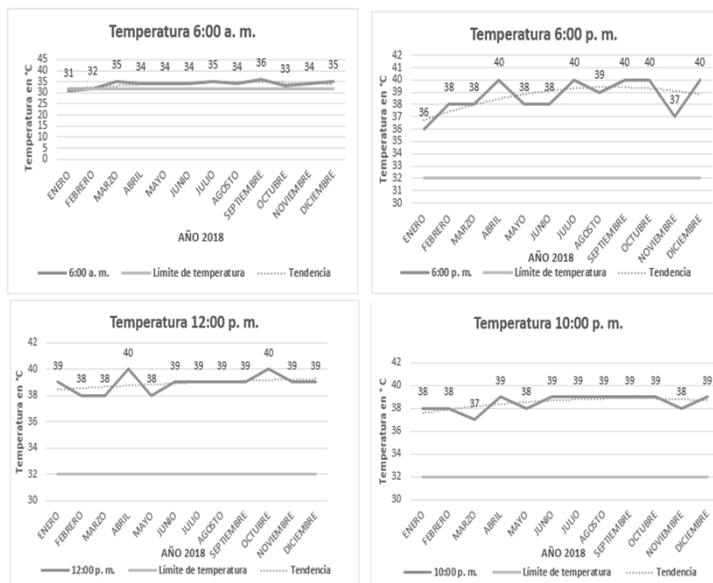


Figura 16. Evolución de la temperatura interna de la cámara de secado medida a diferentes horas del día desde enero a diciembre de 2018. La línea continua es la temperatura mínima requerida (32° C).

Sistema termosifónico solar forzado con sistema auxiliar de gas LP implementado en la planta procesadora de la Asociación de Productores de Pimienta de Sarapiquí (APROPISA)

En octubre de 2016, el Grupo de Investigación en Sistemas Térmicos Solares para la Agricultura del DOCINADE (CT-LSC-ITCR) realizó una visita a la planta procesadora de pimienta de APROPISA, a petición del INDER, para analizar la situación en la que se encontraba el proceso productivo de dicha planta. Tras un análisis del proceso, equipo usado y entrevistas a los operarios y personal administrativo, se determinó que uno de los problemas que se debía resolver para mejorar la eficiencia de este proceso consistía en la implementación de la tecnología térmica solar en el escaldado de la pimienta, ya que para realizar este proceso, la pimienta se colocaba en canastas metálicas con capacidad para 25 kg, las cuales se introducían en contenedores metálicos con agua a 80 °C que eran colocados sobre quemadores de gas LP y que permanecían encendidos de forma permanente (Figura 17), lo que afectaba la seguridad e higiene laboral de la planta procesadora.



Figura 17. Proceso de producción de pimienta negra en la planta de APROPISA. (A) Pimienta verde almacenada en contenedores plásticos con agua. (B) Canastas metálicas con pimienta verde (25 kg) lista para ser escaldada. (C) Introducción y retiro de las canastas metálicas en los contenedores con agua a 80°C. (D) Escurrido de la pimienta tras el escaldado. Fuente: Elaboración propia.

Dadas estas condiciones, el proceso productivo debía realizarse en batches o tandas, lo cual requería alrededor de 35 h para escaldar la cantidad de pimienta mínima necesaria (2 T) para hacer funcionar el secador, periodo durante el cual la pimienta se mantenía en reposo dentro del secador.

Por esta razón, el equipo de investigación del DOCINADE recomendó la implementación de un sistema térmico solar híbrido para el escaldado de la pimienta, con lo cual se mejoraría la productividad y el impacto ambiental de APROPISA.

Este sistema consiste en 14 paneles solares con capacidad para calentar 3 000 L de agua anuales que se requieren en APROPISA para el proceso de escaldado. Además, este sistema cuenta con un sistema auxiliar de gas LP para mantener la temperatura requerida del agua (80 °C) en aquellos casos en que la radiación solar no sea capaz de hacerlo (Figura 18).



Figura 18. Sistema térmico solar híbrido forzado instalado en la planta procesadora de la Asociación de Productores de Pimienta de Sarapiquí para el escaldado de la pimienta verde.

Los resultados obtenidos permitieron optimizar el tiempo de escaldado de 1 T de pimienta verde en 1,5 h. Se espera que con la implementación de este sistema se reduzca el consumo anual de gas LP (3 825 L), lo que equivaldría a 6,17 T CO₂e anuales que se dejarían de emitir a la atmósfera.

Conclusiones

Con la aplicación de las tecnologías térmicas solares se ha reducido el consumo de energía y se ha aumentado la independencia energética en las plantas procesadoras analizadas. Por otro lado, se han reducido las emisiones de gases de efecto invernadero gracias al aprovechamiento de una fuente de energía totalmente limpia y renovable como la energía solar.

Por lo tanto, estas tecnologías serían una alternativa de gran interés y con potencial en las actividades agropecuarias, mostrándose como opciones viables técnica y económicamente. Además, presentan un impacto positivo tanto en el medio ambiente como en las condiciones de vida de los productores, mejorando incluso la percepción del producto por parte del consumidor. Por todo ello, y teniendo en cuenta el escenario de cambio climático actual, parece imprescindible apostar por la energía solar, en los diferentes ámbitos en los que se requiere el consumo de energía.

Además, el uso de tecnologías solares permitiría diferenciar el producto final como ecológicamente sostenible, aportándole una etiqueta distintiva que le permita su diferenciación en el mercado nacional e internacional.

Bibliografía

- Ekechukwu, O. V., & Norton, B. (1999). Review of solar-energy drying systems II: an overview of solar drying technology. *Energy conversion and management*, 40(6), 615-655.
- Espejo-Marín, C. (2004). La energía solar fotovoltaica en España. *Nimbus*, 13-14.
- Guzmán-Hernández, T.J., Araya-Rodríguez, F., Obando-Ulloa, J.M., Rivero-Marcos, M., Castro-Badilla, G. & Ortega-Castillo, J.M. (2016). *Uso de tecnología solar en actividades agropecuarias de la Región Huetar Norte de Costa Rica*. Santa Clara de San Carlos: Unidad de Publicaciones TEC. ISBN Obra Independiente: 978-9968-641-99-9.
- Guzmán-Hernández, T.J., Araya-Rodríguez, F., Obando-Ulloa, J.M., Rivero-Marcos, M. & Castro-Badilla, G. (2017). Evaluación de sistemas térmicos y fotovoltaicos solares en unidades de producción agropecuaria, Región Huetar Norte, Costa Rica. *Agronomía Mesoamericana*, 28(3), 535-548.
- Guzmán-Hernández, T.J.; Obando-Ulloa, J.M.; Castro-Badilla, G.; Rodríguez-Rojas, D.A.; Arce-Hernández, N.; Ortega-Castillo, J.M.; Araya-Rodríguez, F. (2017). Aplicación de tecnologías solares térmicas híbridas, para la deshidratación y secado de productos agrícolas en la Región Huetar Norte de Costa Rica. *Ventana* 11 (1): 21-25.
- Guzmán-Hernández, T.J.; Obando-Ulloa, J.M.; Castro-Badilla, G.; Rodríguez-Rojas, D.A.; Araya-Rodríguez, F. (2018) "Application of Passive and Active Solar Thermal Technologies as an Alternative to Traditional Drying Systems in Agricultural Production Units in the Northern Region of Costa Rica". URL Conference Papers Series: www.atiner.gr/papers.htm. Printed in Athens, Greece by the Athens Institute for Education and Research. All rights reserved. Reproduction is allowed for non-commercial purposes if the source is fully acknowledged. ISSN: 2241-2891 . 10/12/2018. ATINER's Conference Paper Series AGR2018-2591.
- Hoffert, M. I., Caldeira, K., Benford, G., Criswell, D. R., Green, C., Herzog, H., Jain, A.K., Kheshgi, H.S., Lackner, K.S., Lewis, J.S., Lightfoot, H. D., Manheimer, W., Mankins, J.C., Mauel, M.E., Perkins, L.J., Schlesinger, M.E., Volk, T. & Wigley, T.M.L. (2002). Advanced technology paths to global climate stability: energy for a greenhouse planet. *Science*, 298(5595), 981-987.

- Khan, M., Abdul-Malek, A., Mithu, M., & Das, D. (2010). Design, fabrication and performance evaluation of natural circulation rectangular box-type solar domestic water system. *IJRER*, 2, 164-177.
- Kristensen, T., Mogensen, L., Knudsen, M. T., & Hermansen, J. E. (2011). Effect of production system and farming strategy on greenhouse gas emissions from commercial dairy farms in a life cycle approach. *Livestock Science*, 140(1-3), 136-148.
- Ministerio de Ambiente, Energía y Telecomunicaciones, MINAET. (2011). *VI Plan Nacional de Energía*. Dirección Sectorial de Energía.
- Ministerio de Planificación Nacional y Política Económica, MIDEPLAN. (2017). *Costa Rica. Índice de Desarrollo Social 2017*. Área de Análisis del Desarrollo.
- Nandwani, S. (2005). *Energía solar. Conceptos básicos y su utilización*. Departamento de Física de la Universidad Nacional, Heredia, Costa Rica.
- Quirós, L. (2011). Calentando el agua y cuidando el ambiente. *Construir*.
- Solangi, K. H., Islam, M. R., Saidur, R., Rahim, N. A., & Fayaz, H. (2011). A review on global solar energy policy. *Renewable and sustainable energy reviews*, 15(4), 2149-2163.

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 Obando-Ulloa², Mikel Rivero-Marcos², Guillermo Castro-Badilla³.

Resumen

Evaluación de sistemas solares en unidades de producción agropecuaria, Región Huetar Norte, Costa Rica. La alta dependencia por los combustibles fósiles insta a buscar alternativas que permitan una producción más limpia y que contribuyan a mitigar los efectos del cambio climático. 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. El estudio se desarrolló en la lechería de la Sede Regional San Carlos del Instituto Tecnológico de Costa Rica desde mayo de 2015 a abril de 2016. El uso de los sistemas térmicos y fotovoltaicos permitió lograr un autoconsumo de energía eléctrica entre un 30 y 40% del consumo de la unidad productiva. En la producción de energía para calentar el agua hasta 70 °C para la esterilización de los equipos de ordeño, entre otros, el sistema térmico aportó un incremento entre 20 y 37 °C. Este aporte representó más del 70% de la energía para alcanzar la temperatura requerida y un ahorro económico de aproximadamente \$90 por mes. Los resultados muestran que el uso de la energía solar permite lograr una producción sostenible y reducir los gastos operativos en esta unidad de producción agropecuaria de Costa Rica.

Palabras clave: Cambio climático, gases de efecto invernadero, huella de carbono, sistema fotovoltaico, sistema térmico.

Abstract

Evaluation of solar systems in agricultural production unit, Huetar Norte, Costa Rica. The high dependence on fossil fuels urges to seek clean energy alternatives to help mitigate the effects of climate change. The objective of this work was to determine the potential of solar energy use through thermal and photovoltaic systems for water heating and electricity generation, respectively, in the Costa Rica Institute of Technology dairy, San Carlos Headquarter. The use of thermal and photovoltaic systems can save between 30 and 50% of the electric power consumption in the production unit. In addition,

- 1 Proyecto de investigación de la Sede Regional del Instituto Tecnológico de Costa Rica (TEC) en San Carlos, desarrollado con fondos del Programa de Regionalización de CONARE, Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG) y Vicerrectoría de Investigación y Extensión del TEC.
- 2 Instituto Tecnológico de Costa Rica, Programa de Doctorado en Ciencias Naturales para el Desarrollo. 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

the solar thermal system gives an increase between 20 and 37 °C to heat the water up to 70 °C for equipment sterilization. This contribution represents more than 70% of the energy to reach the required temperature (70°C) and a cost saving around \$90 per month. The results show that the use of solar energy allows sustainable production and reduce operational costs in this agricultural production unit in Costa Rica.

Key words: Carbon footprint, climate change, photovoltaic system, greenhouse gases, 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, entendiendo por Desarrollo Sostenible 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 la 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 kilos 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. Aunque Costa Rica presenta un potencial teórico solar de 10.000 MW (VI Plan Nacional de Energía 2012-2030 MINAET, 2011), el grado de utilización es mínimo.

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 dos tipos distintos de paneles 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 los paneles. Además, en las instalaciones de circuito cerrado se distinguen dos sistemas 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 (Crocchi y Prosperi, 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 con un sistema convencional de calentamiento (Shyam, 1996).
- Paneles o módulos fotovoltaicos: están formados por un conjunto de celdas que producen electricidad a partir de la radiación solar que incide sobre ellos. El parámetro estandarizado para clasificar su potencia se corresponde con la potencia máxima que el módulo puede entregar bajo unas condiciones estandarizadas (1000 W/m²) y temperatura de célula de 25 °C.

Los paneles 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).

Enmarcados en la línea de acción de la estrategia 2.2 del MINAET para el sector Energía - la cual insta a promover programas de ahorro energético en los macro-consumidores - se han estudiado alternativas y estrategias de eficiencia energética, oportunidades y potencial presentes en la Región Huetar Norte. En este punto, se ha optado por la tecnología solar como alternativa viable y efectiva, puesto que junto con la Región Chorotega, la Región Huetar Norte es una de las mejores zonas de radiación solar en Costa Rica de acuerdo con el último estudio del Instituto Costarricense de Electricidad (ICE, 2010).

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

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

El trabajo de ubicación de los sistemas solares ha respondido a la necesidad del uso de éstos en la Región Huetar Norte de Costa Rica, y de interés en el ITCR-SSC por su vocación agropecuaria, especialmente lechera y ganadera.

Se diseñaron y construyeron dos instalaciones con sistemas solares fotovoltaicos e híbridos-termosifónicos en la unidad productora seleccionada de la lechería del ITCR-SSC. Una vez instalados y en funcionamiento se evaluó los datos generados desde mayo de 2015 a abril de 2016.

Se utilizó un software para monitorear las variables ambientales de temperatura media (°C), precipitación mensual acumulada (mm) y radiación solar (kWh/m²) registradas por la Estación Meteorológica del ITCR-SSC (Santa Clara de San Carlos), cada treinta minutos a lo largo de un año.

Sistema fotovoltaico

El sistema fotovoltaico instalado en la lechería del ITCR-SSC constaba de ocho paneles híbridos de 235 Wp y 1,26 m² cada uno (modelo HIT-N235SE10). Cada panel cuenta con un inversor para generar corriente alterna e introducirla directamente en la red eléctrica.

La energía generada por los paneles fotovoltaicos (en kWh) se registró cada 15 minutos a través de un equipo de transmisión de datos inalámbricos, accesible a través de Internet.

La eficiencia del sistema se calculó con base en la cantidad de energía eléctrica generada en función de la intensidad recibida de radiación solar (kWh/m²).

Sistema termosifónico

El sistema termosifónico instalado en la lechería del ITCR-SSC constaba de ocho colectores de placa plana con cubierta de poliuretano (modelo HIT-N235SE10) de 2,10 m² cada uno y con tubos de cobre en posición longitudinal por donde cir-

cula el agua. Por cada cuatro colectores se instaló un tanque acumulador primario con capacidad para 650 L de agua. De la parte superior de este tanque 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).

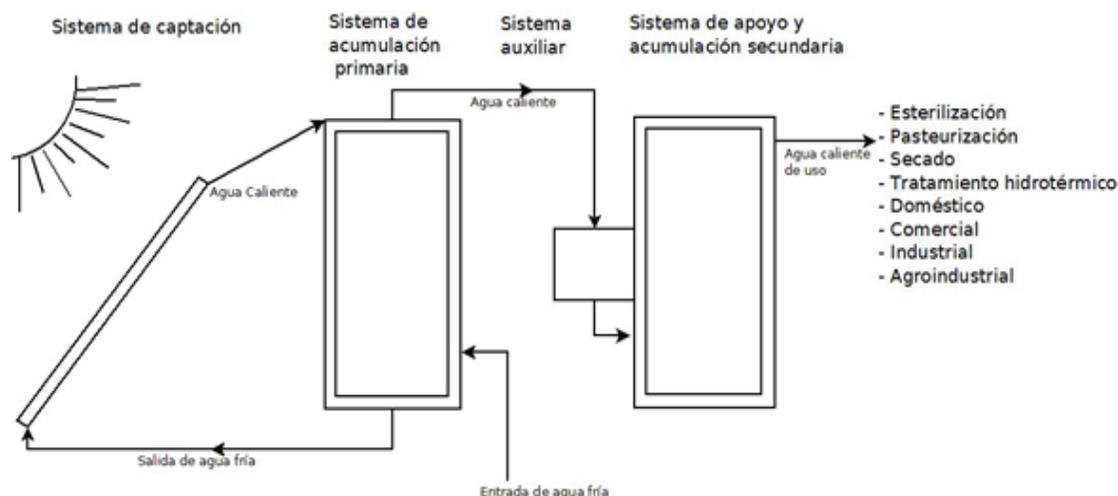


Figura 1. Esquema básico del sistema térmico híbrido-termosifónico instalado en la Lechería del Instituto Tecnológico de Costa Rica, Sede Regional de San Carlos (IT-CR-SSC), Costa Rica. 2015.

Figure 1. Basic diagram of the hybrid-thermosiphon thermal system installed on the Costa Rica Institute of Technology dairy, San Carlos Headquarter (CRIT-SCH), Costa Rica. 2015.

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 (de las cuales se hizo una media), y temperatura a la entrada del tanque acumulador secundario] se determinaron con un termómetro y un sistema automatizado de registro de datos. Con estas temperaturas se calculó la energía producida por unidad de tiempo a través de la fórmula de calor (Ecuación 1, Henley, 1973), estimando un consumo promedio de 200 l de agua al día.

$$Q_{\text{térmico}} \text{ (kWh)} = V \times P \times C_{\text{esp}} \times \Delta \text{Temp} \times 2,7 \cdot 10^{-7} \text{ kWh/J} \quad \text{(Ecuación 1)}$$

donde,

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

P: densidad del agua (1000 Kg/m³)

C_{esp}: calor específico del agua (4187 J/Kg·°C)

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

El rendimiento se calculó por medio de los valores de radiación incidente, temperatura ambiente, y de temperatura del agua a la entrada y a la salida del colector solar, según la Ecuación 2 (ASRHA, 2013).

$$R = \eta_0 - [U_L (T_m - T_a) / I] \quad \text{(Ecuación 2)}$$

donde:

η₀ = Rendimiento óptico indica el porcentaje de los rayos solares que penetran la cubierta transparente del colector

U_L = pendiente de la recta o coeficiente global de pérdidas

T_m = temperatura media del agua a su paso por el colector

T_a = temperatura media del agua previamente a su entrada al colector

I = radiación incidente total sobre el colector (W/m^2).

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. El rendimiento diario de los sistemas 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 y poseían un rango de temperatura que iba de los 10 a los 60°C, por lo que los valores orientativos que se tomaron de 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 de San Carlos (ITCR-SSC), Costa Rica. 2016.

Table 1. Parameter values to calculate the performance of thermal collectors. Costa Rica Institute of Technology dairy, San Carlos Headquarter (CRIT-SCH), 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 medio de la relación de los kg de CO_2 equivalentes que no se emiten a la atmósfera como consecuencia de los kWh generados por los paneles para uso eléctrico. De acuerdo con la Agencia Internacional de Energía (IAE, 2010), en Costa Rica un kWh de electricidad equivale a 0,0557064 Kg de CO_2 .

El estudio económico de la implementación de los sistemas solares se calculó por medio del ahorro generado en la factura eléctrica por medio del valor de cada kWh generado, según las tarifas mensuales fijadas por la Cooperativa de Electrificación de San Carlos (COOPELESCA), por cada kWh consumido en función de la potencia instalada (2 kW).

Resultados

Sistemas fotovoltaicos

En el período en estudio (mayo 2015 a abril de 2016) se registró en la zona de Santa Clara de San Carlos (Costa Rica) una temperatura media de aproximadamente 26 °C y un volumen de precipitaciones de 500 mm en los meses de agosto 2015 y marzo 2016, respectivamente (Figura 3).

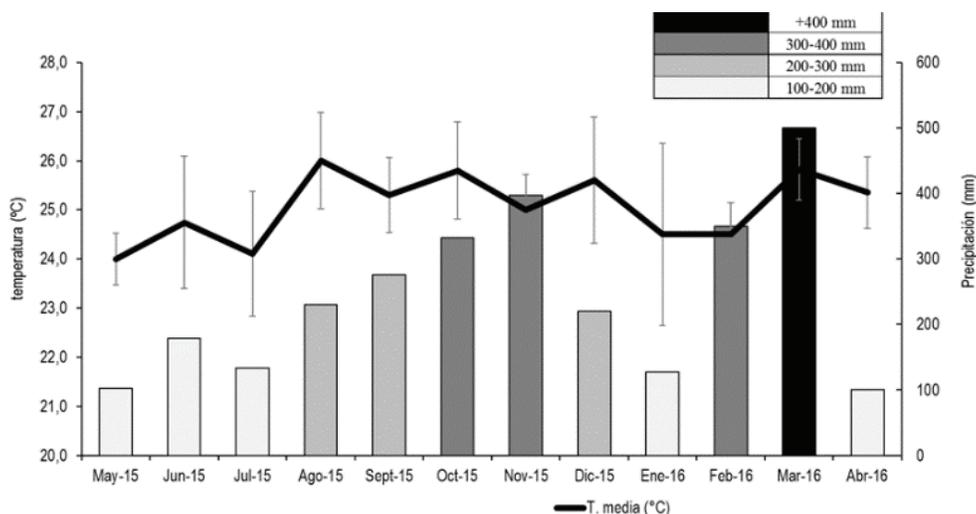


Figura 2. Climograma mayo 2015 a abril 2016. Santa Clara de San Carlos, Costa Rica.

Figure 2. Climograph May 2015 to April 2016. Santa Clara de San Carlos, Costa Rica.

De acuerdo con estas condiciones climatológicas, 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 un pico máximo en marzo de 2016 (aprox. 270 kW/h; Figura 3), la cual a su vez presentó una correlación alta ($r^2=0,63$) con la radiación solar (Figura 4).

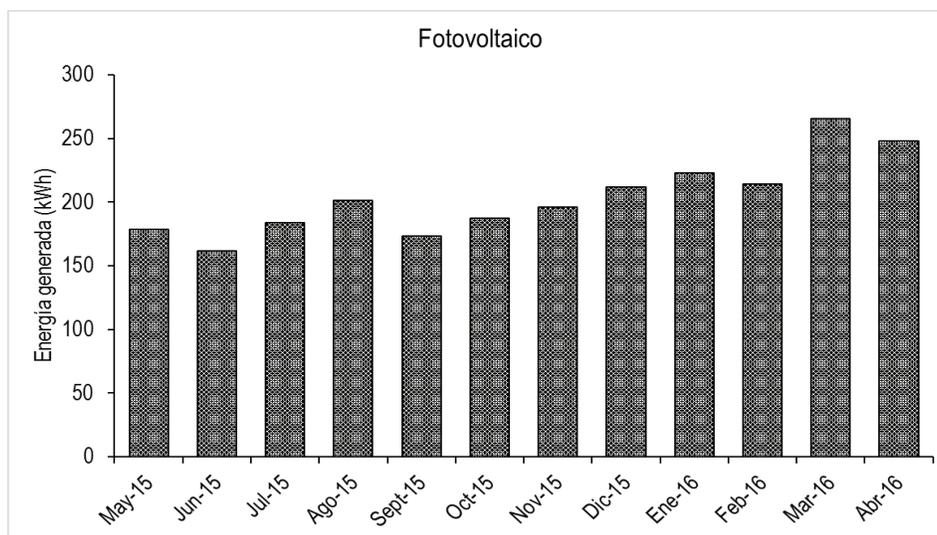


Figura 3. Energía generada por el sistema fotovoltaico de mayo 2015 a abril de 2016, Lechería del Instituto Tecnológico de Costa Rica, Sede Regional de San Carlos (IT-CR-SSC). Costa Rica.

Figure 3. Energy generated by the photovoltaic system since May 2015 to April 2016, Dairy Costa Rica Institute of Technology, San Carlos Headquarter (CRIT-SCH). Costa Rica.

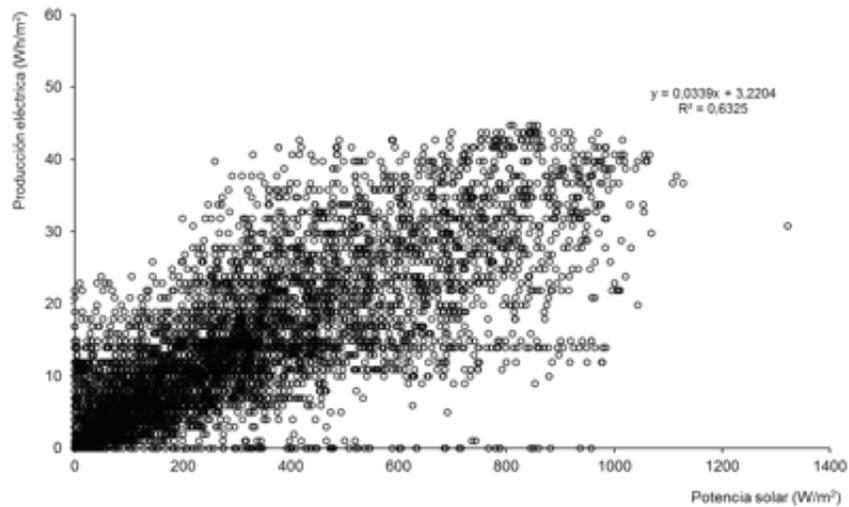


Figura 4. Correlación entre la cantidad de radiación solar mensual y la producción energética de los sistemas fotovoltaicos. Lechería del Instituto Tecnológico de Costa Rica, Sede Regional de San Carlos (ITCR-SSC), Costa Rica, mayo 2015 a abril 2016.

Figure 4. Correlation between the amount of monthly solar radiation and energy production of photovoltaic systems, Dairy Costa Rica Institute of Technology, San Carlos Headquarter (CRIT-SCH), May 2015 to April 2016.

La producción energética diaria de los paneles fotovoltaicos presentó un comportamiento gaussiano que tuvo su máximo punto en las horas centrales del día, entre las 11 y 12 h (Figura 5).

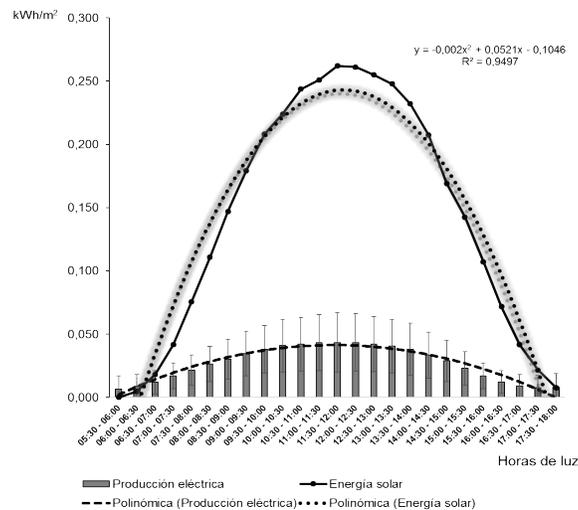


Figura 5. Cantidad de energía solar y generada en un día, promedio anual, mayo 2015 a abril 2016. Lechería del Instituto Tecnológico de Costa Rica, Sede Regional de San Carlos (ITCR-SSC), Costa Rica.

Figure 5. Amount of solar generated and energy in one day, annual average, May 2015 to April 2016. Dairy Costa Rica Institute of Technology, San Carlos Headquarter (CRIT-SCH), Costa Rica.

El rendimiento de los sistemas fotovoltaicos en el período analizado presentó una tendencia entre el 15% y el 21%. Los sistemas fotovoltaicos presentaron su máximo rendimiento en los meses de 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. Lechería del Instituto Tecnológico de Costa Rica, Sede Regional de San Carlos (ITCR-SSC), mayo 2015 a abril de 2016.

Table 2. Performance of photovoltaic systems based on energy generated from the incident radiation. Costa Rica Institute of Technology, San Carlos Headquarter (CRIT-SCH) dairy. May 2015 to April 2016.

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) y un ahorro total de \$543,63 (Cuadro 4), lo cual representa un 18% del gasto anual de electricidad de la lechería del ITCR-SSC.

Cuadro 3. Cantidad de CO₂ equivalente a la cantidad de energía generada procedente de la electricidad. Lechería del Instituto Tecnológico de Costa Rica, Sede Regional de San Carlos (ITCR-SSC), mayo 2015 a abril de 2016, Costa Rica.

Table 3. Amount of CO₂ equivalent to the amount of power generated from the electricity. Costa Rica Institute of Technology, San Carlos Headquarter (CRIT-SCH) dairy, May 2015 to April 2016, Costa Rica.

Mes	kWh generados por los paneles fotovoltaicos	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

Cuadro 4. Ahorro mensual y anual (en colones) por la electricidad generada por los paneles fotovoltaicos, y porcentaje representativo respecto al gasto en la lechería del Instituto Tecnológico de Costa Rica, Sede Regional de San Carlos (ITCR-SSC). Costa Rica. Mayo 2015 a abril 2016.

Table 4. Monthly and annual savings (in colones) for electricity generated by photovoltaic panels, and representative percentage of the spending in Costa Rica Institute of Technology, San Carlos Headquarter (CRIT-SCH) dairy. Costa Rica. May 2015 to April 2016.

Mes	KWh producidos/mes	\$/Energía KWh	\$/Potencia (2 KW)	Ahorro mensual (\$)
may-15	178,76	0,14	16,53	40,67
jun-15	161,34	0,14	16,53	38,32
jul-15	183,69	0,14	17,30	43,34
ago-15	201,04	0,14	17,30	45,80
sep-15	173,29	0,14	17,30	41,86
oct-15	187,394	0,14	17,35	43,99
nov-15	196,13	0,14	17,03	44,56
dic-15	211,63	0,14	17,03	46,74
ene-16	222,85	0,14	16,97	48,14
feb-16	214,01	0,14	16,97	46,91
mar-16	265,65	0,14	16,97	54,13
abr-16	248	0,13	16,14	49,18
TOTAL ANUAL	2.661,744	1,67	203,44	543,63

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 5).

Cuadro 5. Energía generada mensualmente por los sistemas solares termosifónicos instalados en la lechería del Instituto Tecnológico de Costa Rica, Sede Regional de San Carlos (ITCR-SSC). Costa Rica. Mayo 2015 a abril 2016.

Table 5. Monthly energy generated by thermosiphonic solar systems installed in Costa Rica Institute of Technology, San Carlos Headquarter (CRIT-SCH) dairy. Costa Rica. May 2015 to April 2016.

Mes	Ti (°C)	Tf (°C)	ΔT (°C)	T consumo (°C)	Ahorro energético (%)	Energía aportada (kWh/mes)
may-15	27,5	52,5	+25	70	75,0	179,97
jun-15	27,3	50,8	+23,5	70	72,6	163,75
jul-15	26	43,1	+17,1	70	61,6	123,82
ago-15	26,2	35,3	+9,1	70	50,4	79,05
sep-15	27,5	51,7	+24,2	70	73,9	115,45
oct-15	26,4	42,9	+16,5	70	61,3	119,33
nov-15	26	41	+15	70	58,6	104,61
dic-15	30,4	54,2	+23,8	70	77,4	171,29
ene-16	31,6	60,4	+28,8	70	86,3	197,54
feb-16	32,6	43,7	+11,1	70	62,4	74,50
mar-16	28,5	52,9	+24,4	70	75,6	175,86
Abr-16	28,3	53,9	+25,6	70	77,0	178,94
MEDIA mensual	28,2	48,5	+20,3	70	74	140,34

El agua entró al sistema termosifónico a una temperatura media de 28,19 °C. De los meses analizados en el período 2015-2016, se determinó que el agua registró la temperatura más alta en el mes de abril de 2016 (33,63°C; Figura 6L). El sistema termosifónico logró un incremento promedio de 23,3 °C, lo que indica que permitió cubrir aproximadamente 73,24% de la energía requerida para alcanzar la temperatura del agua exigida (de 70°C) para las operaciones que se realizan en la lechería del ITCR-SSC (Cuadro 2, Figura 7).

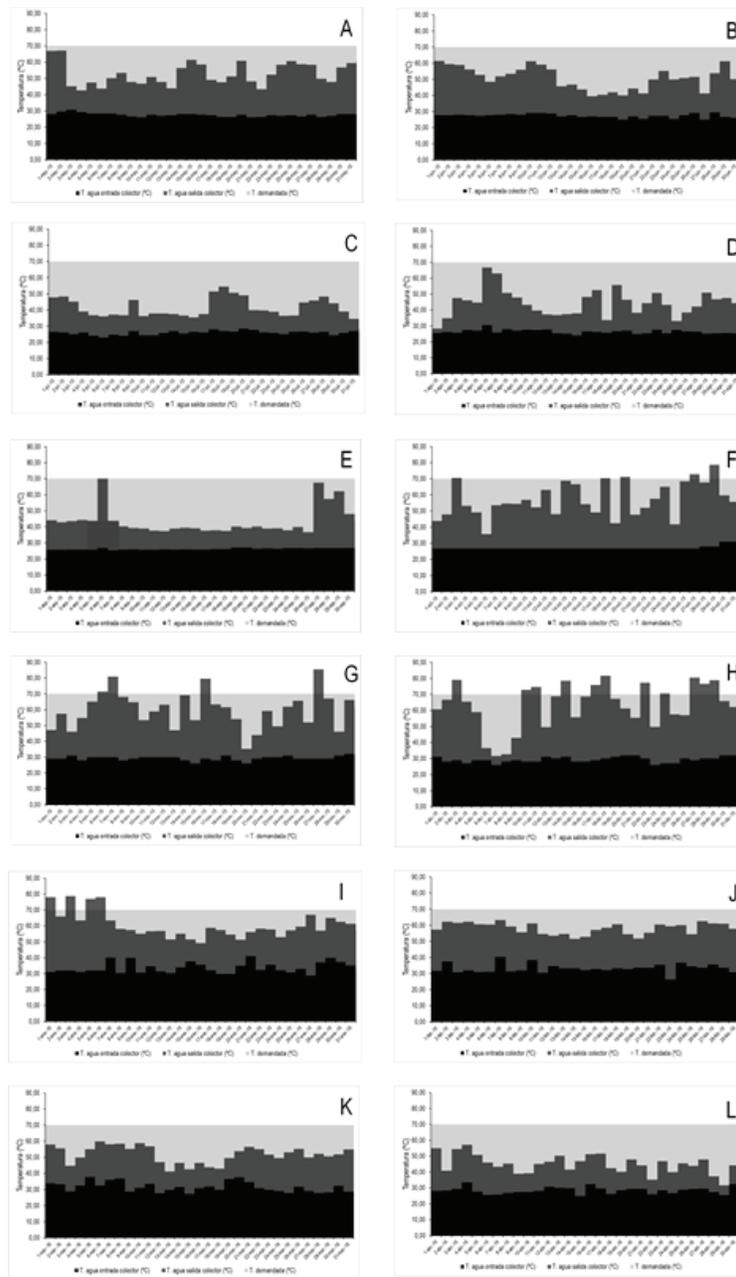


Figura 6. Temperatura media del agua a la entrada y salida del sistema solar termosifónico registrada en los meses de mayo (A), junio (B), julio (C), agosto (D), septiembre (E), octubre (F), noviembre (G) y diciembre (H) de 2015 y, enero (I), febrero (J), marzo (K) y abril (L) de 2016, en la lechería del Instituto Tecnológico de Costa Rica, Sede Regional de San Carlos (ITCR-SSC). Costa Rica.

Figure 6. Average water temperature at the entry and exit from thermosyphon solar system registered in the months of May (A), June (B), July (C), August (D), September (E), October (F), November (G) and December (H) and 2015, January (I), February (J), March (K) and April (L) of 2016, in Costa Rica Institute of Technology, San Carlos Head-quarter (CRIT-SCH) dairy. Costa Rica.

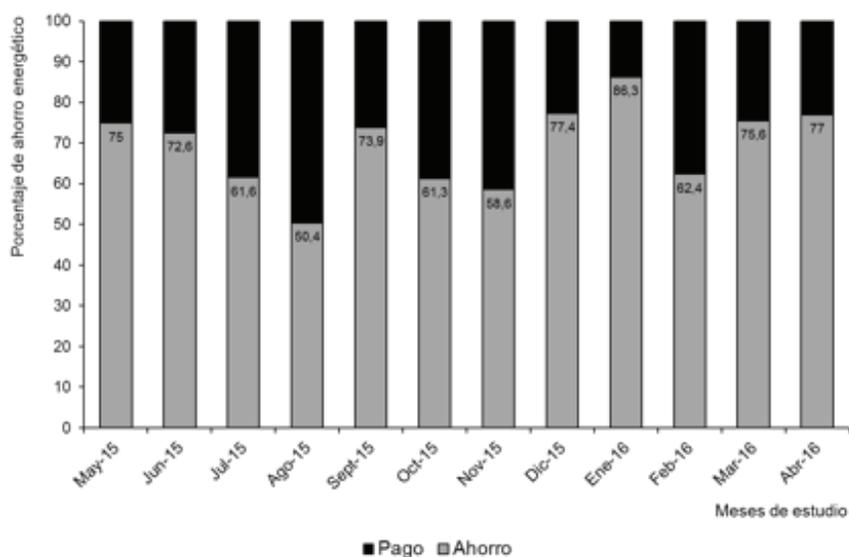


Figura 7. Porcentaje de ahorro energético para calentar el agua de mayo de 2015 a abril 2016, lechería del Instituto Tecnológico de Costa Rica, Sede Regional de San Carlos (ITCR-SSC). Costa Rica.

Figure 7. Percentage savings for heating water since May 2015 to April 2016, Costa Rica Institute of Technology, San Carlos Headquarter (CRIT-SCH) dairy. Costa Rica.

El sistema termosifónico, al igual que el fotovoltaico siguió un comportamiento gaussiano de producción, en donde su pico máximo se alcanzó entre las 11 y 12 h del día (Figura 10), lo que evidencia una eficiencia de aproximadamente 55,25%.

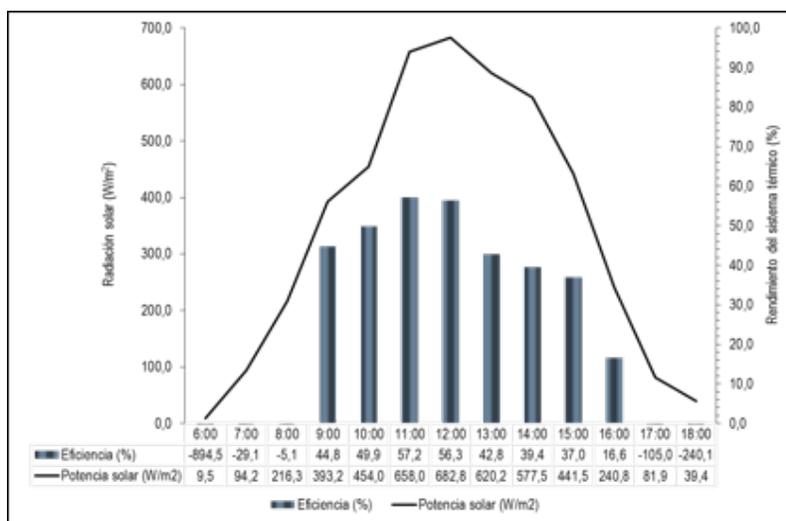


Figura 8. Rendimiento del sistema termosifónico a lo largo de un día (promedio anual), lechería del Instituto Tecnológico de Costa Rica, Sede Regional de San Carlos (ITCR-SSC). Costa Rica.

Figure 8. Thermosyphon system efficiency during a day (annual average). Costa Rica Institute of Technology, San Carlos Headquarter (CRIT-SCH) dairy.

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 6).

Cuadro 6. Kilogramos de CO₂ equivalente a la cantidad de energía generada por los colectores térmicos en la lechería del Instituto Tecnológico de Costa Rica, Sede Regional de San Carlos (ITCR-SSC) si procedieran de la electricidad. Cálculo de mayo 2015 a abril 2016. Costa Rica.

Table 6. Kilograms of CO₂ equivalent to the amount of energy generated by the thermal collectors in Costa Rica Institute of Technology, San Carlos Headquarter (CRIT-SCH) dairy if applicable electricity. Calculate May 2015 to April 2016. Costa Rica.

Mes	T.inicial (°C)	T.final (°C)	Energía aportada (KJ/día)	Energía aportada (kWh/mes)	Kg de CO ₂ equivalentes
may-15	27,5	52,5	20.900,11	179,97	10,0
jun-15	27,3	50,8	19.650,35	163,75	9,1
jul-15	26	43,1	14.379,35	123,82	6,9
ago-15	26,2	35,3	7.600,68	79,05	4,4
sep-15	27,5	51,7	20.273,23	115,45	6,4
oct-15	26,4	42,9	13.857,62	119,33	6,6
nov-15	26	41	12.552,79	104,61	5,8
dic-15	30,4	54,2	19.891,92	171,29	9,5
ene-16	31,6	60,4	22.940,62	197,54	11,0
feb-16	32,6	43,7	9.248,53	74,5	4,2
mar-16	28,5	52,9	20.422,11	175,86	9,8
abr-16	28,3	53,9	21.473,23	178,94	10,0
MEDIA mensual	28,8	48,4	16.939,40	140,34	7,62

Discusión

En el presente trabajo los sistemas solares lograron en conjunto una media de energía generada en torno a los 344 kWh mensuales y un volumen total de 4.442,66 kWh, equivalentes a \$1.152 anuales capaz de cubrir el 35% del consumo eléctrico anual de la lechería del ITCR-SSC (el cual es de aproximadamente \$3.240). 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 HT. Como además el agua tiene un alto poder calorífico, de 4.187 J/Kg·°C (Poling, Prausnitz y Reid, 1987) y una vez caliente se deposita en un tanque sellado, se puede disponer siempre de agua caliente para un protocolo tan importante para la seguridad alimentaria como es la limpieza e higiene de la lechería.

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 y precipitaciones de la zona, las cuales son constantes y abundantes a lo largo de todo el año en la Región Huetar Norte.

Si bien es cierto que la amplitud de las desviaciones típicas denota la enorme variabilidad de producción a lo largo del día debido a la cantidad de radiación solar recibida, es importante destacar que la relación entre la cantidad de radiación solar incidente y la energía generada a lo largo del día revela una alta correlación ($r^2 = 0,96$), y razón por la cual siempre es preciso colocar los paneles 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 paneles solares (González, 2009.). Se vio que el rendimiento decae cuando aumenta la diferencia de temperaturas respecto de la irradiación incidente, esto es, a la salida y puesta del sol y durante la noche. Al mediodía, tanto irradiación como 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.

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; es decir, el 93% de la energía generada en el país procede de fuentes no fósiles (ICE, 2010). Esto hace que la cantidad de CO_2 que se evita emitir a la atmósfera con los sistemas solares no es 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 GEI, esto no significa que no supongan un impacto ambiental sobre las regiones donde se construyen. Desvíos de los ríos e impacto directo sobre el microclima y fauna piscícola, deforestación y expropiación de tierras por inundación son algunas de sus negativas consecuencias. 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).

Esto hace que la cantidad de CO_2 que se evita emitir a la atmósfera con los sistemas solares no es tan significativo como puede serlo en otros países más dependientes de los combustibles fósiles. No obstante, aunque las centrales hidroeléctricas no contaminen en términos de 0 emisión de GEI, esto no significa que no supongan un impacto ambiental sobre las regiones donde se construyen. Desvíos de los ríos e impacto directo sobre el microclima y fauna piscícola, deforestación y expropiación de tierras por inundación son algunas de sus negativas consecuencias. Esto permite comprobar que la energía solar se 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. Y es que, actualmente, las empresas no contemplan en su contabilidad los costos medioambientales que generan. 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 solo 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

La eficiencia de los sistemas térmicos solares es una alternativa para la generación de energía limpias que pueden ser aplicadas en las explotaciones agropecuarias en Costa Rica, las cuales contribuyen a disminuir el efecto invernadero. Como se observó en este estudio, ambos tipos de sistemas solares produjeron en el periodo mayo 2015-abril 2016, el equivalente energético a 4.442,66 kWh anuales, lo que equivale a 250 Kg CO_2 no emitidos a la atmósfera y un ahorro en conjunto de \$1.152,46 según las tarifas vigentes en COOPELESCA para la electricidad. De esta forma, se demuestra que los sistemas

solares se convierten además en una posibilidad para los productores agropecuarios costarricenses de incorporar un sello ecológico a sus productos y distinguirlos de la competencia.

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.
- Croci, A., y M. Proserpi. 2005. Dossier solare térmico. Proyecto RES & RUE Disemination
- Energía solar térmica. Proyecto de circulación natural y forzada. <http://cecu.es/campanas/medio%20ambiente/res&rue/hm/dossier/3%20solar%20termica.htm> (consultado 7 sept. 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.
- IAE (International Agency Energy). 2010. Las emisiones de CO₂ por kWh de electricidad y calor. Sunearthtool.com. <http://www.sunearthtools.com/es/tools/CO2-emissions-calculator.php> (accessed 12-jul. 2016).
- 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=l8SK4gG (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.
- 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/Vl_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 4^a 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 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. p.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).

Uso de la energía solar en sistemas de producción agropecuaria: producción más limpia y eficiencia energética

Using solar energy in agriculture and livestock: cleaner production and energy efficiency

Tomás de Jesús Guzmán Hernández, Freddy Araya Rodríguez, Guillermo Castro Badilla y Javier M. Obando Ulloa. Instituto Tecnológico de Costa Rica, Sede Regional de San Carlos, Costa Rica. Correo electrónico: tjguzman@itcr.ac.cr; faraya@itcr.ac.cr

Resumen

Actualmente se busca nuevas opciones de energías limpias para mitigar el efecto de invernadero y lograr sistemas de producción verdaderamente sostenibles; entre éstas, la energía solar y el uso de biomasa y otras fuentes renovables se han recomendado particularmente para lograr la captura local de carbono y la adaptabilidad al cambio climático. Este artículo presenta el diseño de un sistema térmico y fotovoltaico, y los resultados preliminares obtenidos tras su instalación en lecherías y plantas procesadoras de lácteos ubicadas en la Región Huetar Norte de Costa Rica, con datos que demuestran la potencialidad de la producción energética a partir de la energía solar en actividades agropecuarias. Estos resultados preliminares han permitido comprobar que mediante estos sistemas se logra producir alrededor del 30% de la energía necesaria para estas actividades, contribuyendo de esta forma a disminuir los costos de producción, la emisión de gases de efecto invernadero y por ende, la huella de carbono.

Palabras clave: Energía solar, gases de efecto invernadero, huella de carbono, industria láctea, sistema fotovoltaico, sistema térmico

Abstract

New clean energy alternatives to mitigate the greenhouse effect and achieve real clean production are currently being sought. Among these alternatives, solar energy and use of biomass and other renewable sources have been recommended for their effectiveness in adaptability to climate change and local carbon sequestration.

This paper presents the design and preliminary results of a thermal system installed in a milk factory and dairy processing plants located in the North Huetar Region of Costa Rica. The generated data show the potentiality of energy production by solar energy systems in agricultural activities. These preliminary results have shown that these systems make it possible to produce about 30% of the energy needed for these activities, thereby allowing reduce production costs, emission of greenhouse gases and, consequently, carbon footprint.

Keywords: Solar energy, greenhouse gases, carbon footprint, dairy industry, photovoltaic system, thermal system

Introducción

Del 100% de radiación solar, sólo un 51% llega a la Tierra. Sin embargo, un 26% es dispersado por la atmósfera como radiación difusa, y sólo un 25% penetra directamente hasta la superficie del planeta. (Taiz & Zeiger, 2002; Camejo, 2012).

El porcentaje de la energía del sol que llega directamente a la Tierra se aprovecha en alguna medida para el calentamiento de agua, a través de colectores solares, o para producir corriente eléctrica mediante celdas fotovoltaicas. Estas formas de producción de energía son las más respetuosas con el medio ambiente, por lo que reducen la dependencia energética de energías fósiles y contaminantes como el petróleo (Landa, 2005; Roman, 2007; Rizk & Nagrial, 2008; Torpey, 2009; Tinajeros, 2011, y Swift, 2011). Berriz (2012) afirma la necesidad de que los países que disponen de radiación solar suficiente utilicen estos sistemas, para beneficiarse del avance a pasos agigantados de las aplicaciones de la energía solar, las cuales se evidencian en el aumento de la eficiencia de las celdas fotovoltaicas y su producción en masa, en los calentadores de agua comerciales y las tecnologías de concentración solar, entre muchas otras (ACESOLAR 2014).

A pesar de que los recursos energéticos del planeta son limitados, la demanda de energía solar se incrementa cada año, de ahí la importancia de fomentar el uso de energías renovables como la solar, especialmente bajo las formas de energía solar fotovoltaica y energía solar térmica, ambas por medio de paneles solares (Landa, 2005).

Los paneles solares son dispositivos que aprovechan la energía que llega a la Tierra en forma de radiación solar, los cuales están compuestos principalmente por células de silicio policristalino, cobre, aluminio, PVC y otros materiales. Estos paneles se clasifican de acuerdo con su utilización. Existe el panel solar para el calentamiento doméstico e industrial de agua y líquidos (colectores solares), que puede ser de circuito abierto o de circuito cerrado, y que es visible en techos y azoteas de casas, edificios e industrias. En este sistema, el agua pasa directamente por los colectores solares y se almacena en un depósito para su uso. El sistema cerrado reduce costos y es más eficiente, pero sus ventajas se reducen en zonas con temperaturas bajas, así como con alta concentración de sales, que acaban obstruyendo los paneles. En las instalaciones de circuito cerrado, se distinguen dos modalidades: flujo por termosifón y flujo forzado. Los paneles solares térmicos en general tienen un muy bajo impacto ambiental (RES & RUE DISEMINATION, 2005; Khan, Abdul Malek, Mithu & Das, 2010, y Quirós, 2011). Los otros paneles solares son para la producción o generación de electricidad, y se conocen como paneles fotovoltaicos.

Los paneles solares de uso doméstico e industrial (circulación natural o termosifón) pueden ser diseñados y construidos dependiendo de la disponibilidad de los materiales; pero el principio básico es el mismo para todos los diseños. El agua calentada por este procedimiento se utiliza también en hospitales, centros de recreo, hoteles y sistemas agropecuarios (Guzmán & Iglesias, 1986; Guzmán & Iglesias, 1987^a; y Guzmán & Iglesias, 1987^b).

En los paneles solares térmicos, los tubos del colector solar por los que circula el agua se colocan longitudinalmente, de manera tal que el agua fría, la cual proviene de un tanque de almacenamiento, entra por la parte baja y una vez que se calienta por la radiación solar, sale por la parte superior del colector debido a su menor densidad. Los procesos de entrada y salida de agua continúan hasta que la radiación solar haya disminuido al mínimo. De esta manera el agua caliente se acumula en el tranque. Con 1 m² de un colector plano, en el clima de Costa Rica, se puede calentar un promedio de 75 L de agua diariamente, a una temperatura de 20 °C hasta 55 o 60 °C (IMN 2013). Sin embargo, debido a que la radiación solar no es siempre suficiente para calentar agua todos los días durante el año, es recomendable conectar el sistema solar con un sistema convencional de calentamiento de agua (Shyam, 1996).

En la modalidad de flujo termosifónico para calentamiento de agua, el movimiento que se genera a partir del mismo calentamiento a través de la captación de la radiación solar, en un sistema cerrado, mantiene el sistema en funcionamiento. En esta modalidad, no se utiliza ningún tipo de energía, sino solamente la gravedad. No obstante, en función de los niveles en los tanques de agua, en la modalidad de flujo forzado se usa una bomba para el movimiento del agua dentro del sistema (Despaigne, Torres, Maceo & Cobián, 2003; Andersen, Furbo, Hampel, Heidemann & Müller-Steinhagen, 2007; Khan *et al.*, 2010; Anderson *et al.*, 2008; Alvarado, 1998; Wongsuwan, 2005, y RES & RUE DISEMINATION, 2005).

Desde 1993, CENSOLAR planteó la necesidad de utilizar los sistemas solares de captación de energía para diferentes usos en la industria, los sectores productivos y las zonas residenciales. Portilla (2014) indicó que el potencial previsto anual de

energía fotovoltaica en Costa Rica es de 576 747 MW, el cual se traduce en 656 195 GWh/año, suficiente para justificar el uso de paneles solares fotovoltaicos en todo el país, por lo que el Instituto Nacional de Transferencia de Tecnologías Agropecuarias (INTA) en su informe de 2011 expuso a la industria cárnica y lechera costarricense esta opción para mejorar su eficiencia energética, con el fin de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) por unidad de producto, puesto que la ganadería es responsable del 18% de las emisiones mundiales de GEI, porcentaje mayor que aquel generado por la industria de los transportes (Matthews, 2006).

Por su parte, Guzmán (2014) indicó que los sistemas solares térmicos y fotovoltaicos pueden ser usados en actividades agropecuarias y en unidades de producción del sector, entre ellas, las lecherías, las plantas de matanza, las empacadoras y las plantas procesadoras, en forma de autoconsumo, para bajar los costos por facturas eléctricas y disminuir la huella de carbono del sector ganadero. Anteriormente, Guzmán e Iglesias (1986, 1987, 1989, 1991 y 1999) habían planteado también la necesidad de aplicar estos sistemas solares térmicos en unidades de producción agropecuaria con el fin de controlar enfermedades y plagas.

Las fuentes citadas coinciden en la urgencia de aplicar tecnologías que minimicen el impacto generado en los procesos productivos del sector ganadero, ya que en la zona norte de Costa Rica existe una gran cantidad de lecherías, invernaderos de producción de hortalizas y de plantas ornamentales, fincas destinadas a producción de semillas y de otros tipos que usan de manera sistemática agua o aire en sus unidades, calentados por medio de resistencias eléctricas, intercambiadores térmicos y gas.

En el cantón de San Carlos se encuentra el 55% de los asociados de la Cooperativa de Productores Dos Pinos, es decir, un total de 850 productores de leche, cuya producción es más del 50% de la producción nacional (0,6 millones de kilos de leche).

En esta situación, se ha estudiado estrategias de eficiencia energética, oportunidades y potencial en la zona, y se ha determinado que se puede optar por la tecnología solar como alternativa viable y efectiva, debido a que en el último estudio del ICE, las dos regiones de mayor radiación solar en el país son la Huetar Norte y la Chorotega (Portilla 2014).

En las lecherías de la zona Norte, con una media de producción diaria de 500 a 1000 kg de leche, la reducción de emisiones de carbono a la atmósfera con la opción presentada sería de 5 a 10 t CO₂ por año. Extrapolando a la producción diaria de leche, tan sólo en San Carlos, se obtendría un potencial de reducción de emisiones de carbono de hasta 4, 38 t CO₂ anuales, estimando una emisión media de 0,94 kg de CO₂ por kW de electricidad generado con combustibles fósiles.

Estas consideraciones condujeron a proponer como objetivo de este trabajo evaluar la eficiencia de sistemas solares de captación térmica para el calentamiento de agua y la producción de energía en unidades de producción agropecuarias.

Materiales y métodos

El trabajo de ubicación de los sistemas solares ha respondido a la necesidad de uso de éstos en la Región Huetar Norte de Costa Rica, vinculada directamente con la Sede Regional del Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR) en San Carlos, por su vocación agropecuaria, especialmente lechera y ganadera.

Para tal efecto, se diseñó y construyó tres instalaciones con sistemas solares termosifónico y/o forzados, según el caso, en las unidades seleccionadas (cuadro 1). El trabajo se inició en julio del 2014, y se continúa trabajando. Sin embargo, para efectos de este artículo, sólo se presenta los datos procedentes de la lechería de la Sede Regional del ITCR durante los meses de mayo a diciembre de 2015, ya que los otros sistemas se encuentran en etapa de acondicionamiento para la recolección de la información por medio de un sistema computarizado.

Cuadro 1. Unidades de producción lecheras y de procesamiento de lácteos seleccionadas en la región Huetar Norte

Lechería / productores de lácteos	Equipo instalado	Estado de la instalación
Instituto Tecnológico de Costa Rica, Sede Regional de San Carlos (ITCR-SSC)	Solar térmico termosifónico, con sistema auxiliar eléctrico Sistema fotovoltaico	En operación desde el mes de mayo de 2015
Escuela Técnica Agrícola e Industrial (ETAI)	Solar térmico termosifónico, con sistema auxiliar eléctrico	En operación, desde el mes de octubre de 2015
Productores de lácteos LLAFRAK, de Juanilama de San Rosa de Pocosal	Solar térmico forzado, híbrido con sistema auxiliar de gas	En operación desde el mes de diciembre de 2015

Los equipos instalados están compuestos por un sistema de paneles solares térmicos para el calentamiento de agua, conectados a un tanque acumulador con capacidad para 302,40 L de agua y acoplados a un sistema eléctrico auxiliar. El tanque acumulador tiene tres previsiones interiores para la conexión de termopares, los que, a su vez, están conectados a una computadora para registrar los datos de captación de energía y el uso del agua por medio de un medidor. Además, este tanque tiene una válvula de escape, una de expansión y otra válvula de conexión del sistema solar con el sistema auxiliar eléctrico o de gas. El sistema también presenta un conjunto de tuberías de conexión a los equipos para esterilización, los termómetros, los equipos de medición inalámbricos y los sistemas auxiliares eléctricos y de gas.

Una vez instalados todos los sistemas se procedió a la toma de datos de la siguiente manera: registro de la masa de agua fría / agua caliente captada por el sol; cálculo del diferencial (ahorro) en electricidad con el sistema original, en función del uso de los sistemas solares; balance energético de los sistemas en función de la zona; determinación de la eficiencia energética y la disminución de los costos de producción; captación de la huella de carbono:

Captación de la huella de carbono = kWh ahorrados × kg CO₂ emitidos en la generación eléctrica

Los datos del valor medio de los kilogramos de CO₂ emitidos en la generación eléctrica son proporcionados anualmente en Costa Rica por la Internacional Energy Agency (IEA).

Resultados y discusión

Esquemas básicos solares instalados: Sistemas termosifónico y térmico forzado, ambos híbridos.

El sistema de captación de energía solar de tipo termosifónico híbrido se instaló tanto en la lechería de la Sede Regional del ITCR como en la lechería de la Escuela Técnica Agrícola e Industrial (ETAI). Este sistema se define como el movimiento de un fluido (agua) por medio de dos factores: la gravedad y el calentamiento de este fluido por la radiación solar. Cuando el agua se calienta, ésta se dilata y entonces disminuye su densidad, por lo que al entrar al sistema es más densa. La fuerza de la gravedad y la disminución de la densidad hacen subir el agua caliente y almacenarse en un depósito. Esto se produce en el interior del colector solar como parte de un intercambio de calor por convección. El sistema solar forzado y el sistema termosifónico disponen de los mismos elementos, ubicados de manera diferente y con equipos adicionales. El primero está compuesto por un sistema primario de captadores, un acumulador solar, un grupo hidráulico con bombas de movimiento, un sistema de regulación y un vaso de expansión (figura 1).

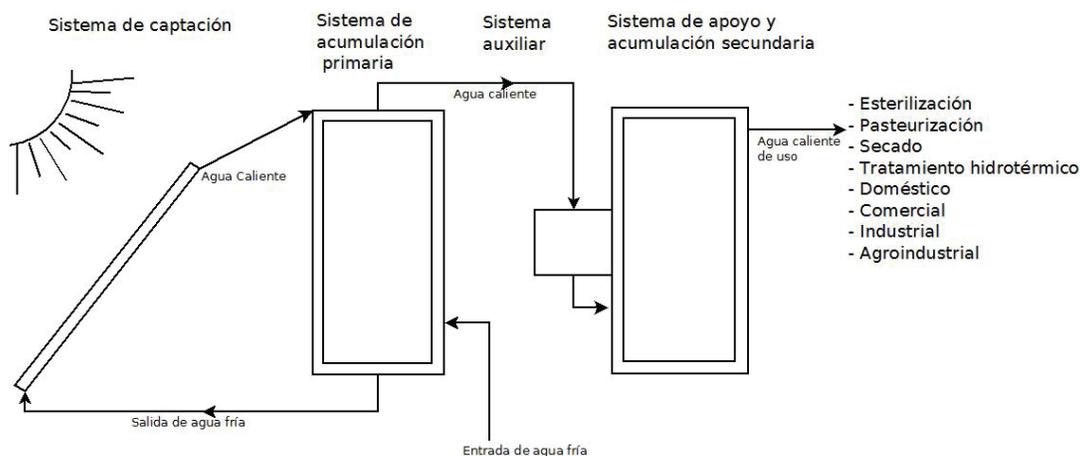


Figura 1. Sistema básico termosifónico de captación térmica instalado en la lechería de la Escuela de Agronomía de la Sede Regional de San Carlos, del Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR-SSC) y en la Escuela Técnica Agrícola e Industrial de Santa Clara (ETAI).

En la planta de procesamiento de lácteos de la Asociación de Productores de Lácteos LLAFRAK ubicada en Juanilama, de Santa Rosa de Pocosol, se instaló un sistema de tipo forzado (figuras 2 y 3).

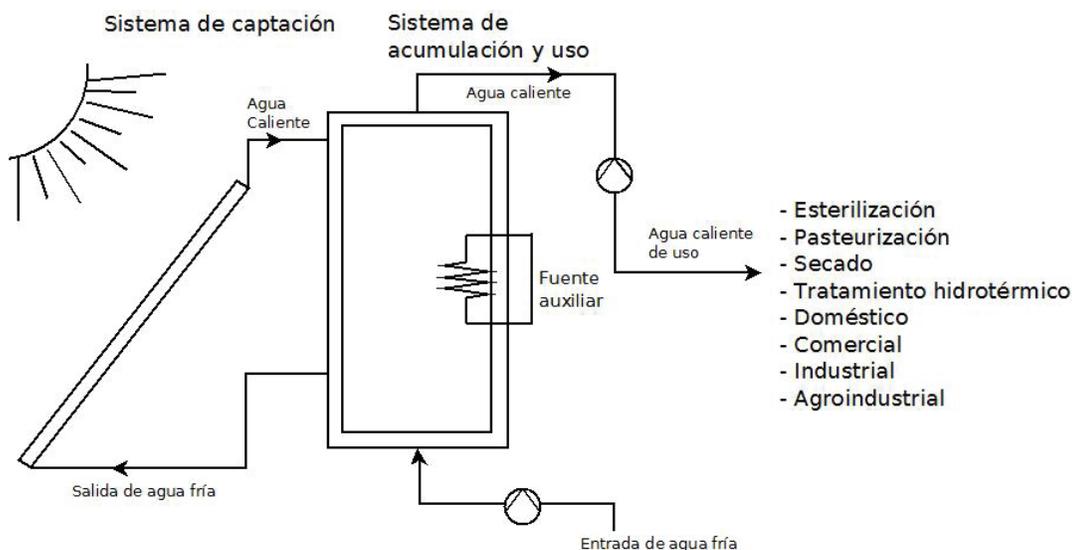


Figura 2. Esquema forzado básico

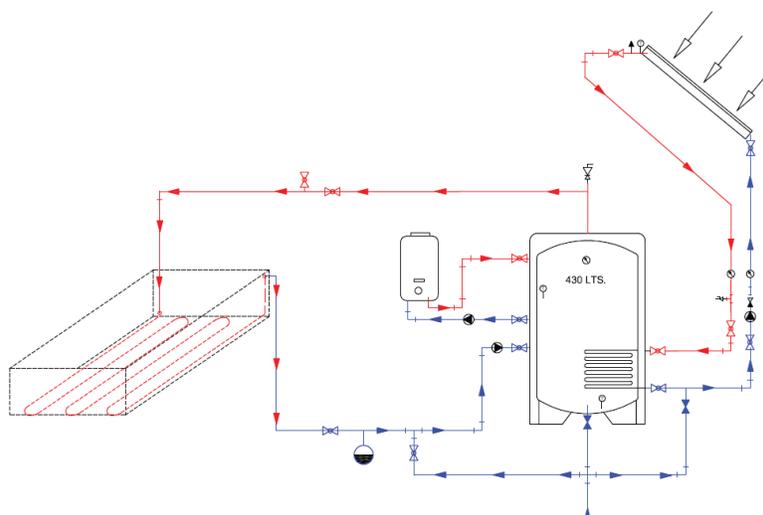


Figura 3. Esquema del sistema de captación de energía solar de tipo forzado híbrido, instalado en la planta de procesamiento de la Asociación de Productores de Lácteos LLAFFRAK, en Juanilama, Santa Rosa de Pocosal

Datos solares captados y registrados en los sistemas

Como se indicó anteriormente, en este trabajo sólo se presenta los datos recolectados en la lechería de la Sede Regional del ITCR, durante los meses de mayo a diciembre de 2015, ya que los otros sistemas se encuentran en la etapa de acondicionamiento del sistema de registro de datos.

En la zona donde se ubica la lechería de la Escuela de Agronomía de la Sede Regional del Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR), perteneciente al Programa de Producción Agropecuaria (PPA), se registró temperaturas sobre los 25 °C desde mayo hasta noviembre de 2015. En el sistema térmico instalado en esta lechería las temperaturas sobrepasaron los 50 °C, a excepción del mes de julio, en que fueron aproximadamente de 42 °C (tabla 2).

Tabla 2. Temperatura ambiente y temperatura alcanzada por el sistema térmico híbrido instalado en la lechería de la Sede Regional del ITCR, en el período de mayo a noviembre de 2015

Mes	Temperatura ambiente (°C)	Temperatura alcanzada por el sistema (°C)	Temperatura demandada (°C)
Mayo	27,54	52,49	70,00
Junio	27,34	50,81	70,00
Julio	25,97	41,86	70,00
Agosto	26,09	71,71	70,00
Septiembre	27,39	71,08	70,00
Octubre	26,27	68,70	70,00
Noviembre	25,99	69,65	70,00
Diciembre	26,65	56,34	70,00

En este sistema térmico termosifónico e híbrido, se obtuvo una producción de energía solar de aproximadamente 542,3 kWh, cuyo máximo rendimiento (74 kWh/día) se registró durante el mes de agosto de 2015, mientras que en el mes de diciembre la producción de energía solar fue de tan sólo 42,3 kWh/día (Tabla 3). Debido a esto, el sistema logró satisfacer por sí la demanda de energía necesaria para las diferentes operaciones de la lechería de la Sede Regional del ITCR en los meses de agosto, septiembre y noviembre, mientras que en el mes de julio sólo fue capaz de suplir el 39% de la energía requerida (figura 4). En general, esta producción energética logró economizar entre el 40 y el 50 % de la energía consumida en esta unidad, considerando un requerimiento medio de 128,17 kWh, lo cual se traduce en un total de 1007,9 kg CO₂ capturado, lo que a su vez equivale a un total de 26 árboles y a un ahorro total de €232 322,43 en la factura eléctrica de esta lechería (tabla 4).

Es importante destacar que este sistema suministra agua caliente, a una temperatura de 70 °C, para los procesos de lavado y esterilización de equipos de la lechería y los laboratorios de la Escuela de Agronomía, de Biocontroladores y de Calidad de Carnes.

Tabla 3. Energía solar promedio producida mensualmente y energía suplida por el sistema térmico para la operación de la lechería de la Sede Regional del ITCR

Mes	Energía promedio producida por el sistema (kWh)	Temperatura necesaria para el proceso °C	Energía suplida por el sistema (%)
Mayo	69,2	70	59
Junio	68,9	70	49
Julio	67,4	70	39
Agosto	74,0	70	104
Septiembre	73,6	70	102
Octubre	73,3	70	97
Noviembre	73,6	70	99
Diciembre	42,3	70	68

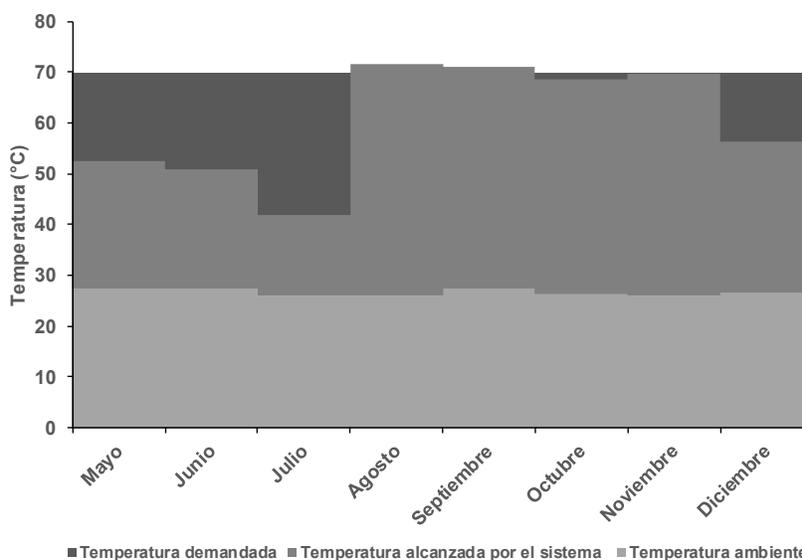


Figura 4. Promedio mensual de la temperatura ambiente, la temperatura alcanzada por el sistema y la demandada para la operación de la lechería de la Sede Regional del ITCR

Tabla 4. Balance energético de los sistemas térmico y fotovoltaico instalados en la lechería de la Sede Regional del ITCR

Mes	Energía media producida (kWh/día)		Energía total media producida por ambos sistemas (kWh)	Valor económico de la energía producida (¢)*	Carbono capturado (kg CO ₂)	Árboles equivalentes (u)
	Sistema termosifónico	Sistema fotovoltaico				
Mayo	54	179	233	26 661,00	123,60	3
Junio	54	161	215	25 311,00	111,80	3
Julio	57	184	241	28 588,94	127,20	4
Agosto	72	201	273	31 108,62	139,00	3
Septiembre	62	201	263	30 321,22	120,00	3
Octubre	72	173	245	28 988,57	120,00	3
Noviembre	78	196	274	30 827,50	120,00	3
Diciembre	58	212	270	30 515,58	146,30	4
Total	507,00	1507,00	2014,00	232 322,43	1007,90	26

* Datos obtenidos de acuerdo con la tarifa actualizada de la Cooperativa de Electrificación Rural de San Carlos, R.L. (COOPELESCA R.L.)

Conclusión

De acuerdo con los resultados obtenidos en la lechería de la Sede Regional del ITCR, se pudo comprobar que los sistemas de captación de energía solar son una fuente eficiente para la disminución de los costos operacionales por concepto de energía eléctrica en una explotación pecuaria, así como también de la huella de carbono que genera. Además, por medio de esta tecnología se contribuye a la disminución de los gases de efecto invernadero. Sin embargo, es necesario confirmar estos resultados con aquellos que se obtengan en otras explotaciones agropecuarias.

Reconocimiento

Los autores agradecen los aportes y ayuda recibidos de parte del Programa de Regionalización Universitaria (PUR), por intermedio de la Vicerrectoría de Investigación y Extensión del Instituto Tecnológico de Costa Rica; igualmente, de parte del Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG) de la Región Huetar Norte. También agradecen el apoyo financiero por parte del M.Sc. Luis Paulino Méndez Badilla, Vicerrector de Docencia, y el M.B.A. William Vives Brenes, Vicerrector de Administración, ambos del ITCR, para la puesta en marcha de la propuesta de trabajo. Los autores agradecen toda la cooperación y ayuda recibida de la Dirección Administrativa de la Sede Regional de San Carlos, del M.Sc. Edgardo Vargas Jarquín, de la Lic. Mildred Zúñiga Carvajal y del Bach. Dennis Méndez Palma. A la Ing. Marcela María Chávez Alvarez, le agradecen por su colaboración con el programa DIA.

Bibliografía

- ACESOSOLAR (2014). Investigación en Energía Solar en Costa Rica. Asociación Costarricense de Energía Solar.
- Andersen, E.; Furbo, S.; Hampel, M.; Heidemann, W. & Müller-Steinhagen, H. (2007). Investigations on stratification devices for hot water heat stores. *International Journal of Sustainable Energy*, 32: 255-263. En línea, recuperado el 29 de junio, de Wiley Interscience.
- Andersen, E. (2008). Hot water heat stores by termosiphonics system. *International Journal of Sustainable Energy*. En línea, recuperado el 29 de junio, de Wiley Interscience.
- Alvarado, R. (1998). *Boletín Meteorológico* (núms. 1, 2 y 3). San Carlos, Costa Rica: Publicaciones ITCR.
- Berriz, P. L. (2012). La energía solar: base para el desarrollo sostenible. *Energía y Tú*, 58, abril-junio. Cuba.
- Boletines informativos del IMN. Consultados en el 2013 en <http://www.imn.ac.cr>.
- Camejo, J. E. (2012). Conectar el sol con la red. *Energía y Tú*. 57, enero-marzo. Cuba.
- CENSOLAR. (1993). *Valores medios de irradiación solar sobre suelo horizontal*. España.
- Despaigne, H.; Torres, A.; Maceo, F., & Cobián, S. (2003). Sistema solar termosifónico de calentamiento de agua sanitaria en Cayo Las Brujas. *Memorias de la Primera Convención Internacional de Energía y Medio Ambiente*, Santiago de Cuba, 13-17 de noviembre.
- Guzmán, T. & Iglesias, J. (1986). Estudio preliminar del diseño, montaje y prueba de planta de tratamiento hidrotérmico a la semilla agámica de la caña de azúcar. *Proyección*, IPROYAZ, pp. 15 - 20, Cuba.
- Guzmán, T. & Iglesias, J. (1987a). *Energía solar para la agroindustria azucarera* [Informe técnico]. Edición ISP JAE.
- Guzmán, T. & Iglesias, J. (1987b). *Evaluación técnico-económica de una planta solar de tratamiento hidrotérmico a la semilla de caña de azúcar*. I Conferencia Científica de la ATAC en la AC de Cuba.
- Guzmán, T. & Iglesias, J. (1989). Planta solar para la termoterapia de la semilla agámica de la caña de azúcar. *Energía*, pp. 3-7, Cuba.
- Guzmán, T. & Iglesias, J. (1991). Instalación solar para termoterapia de la semilla de caña de azúcar. Conferencia Internacional de Arquitectura e Ingeniería, Nueva York.
- Guzmán, T. & Iglesias, J. (1999). Planta solar de hidrotratamiento para el control de enfermedades en cultivos económicos. *Memorias del Congreso Costarricense de la Caña de Azúcar* (p. 250). Condovac, Guanacaste, Costa Rica.
- Guzmán, T. (2014). Uso de tecnologías para el aprovechamiento de la energía solar en actividades económicas agropecuarias en Costa Rica. *Memorias Congreso Internacional Clima, Agua y Energía, Pilares para el Desarrollo Sostenible* (pp. 67-84), Universidad Nacional Campus Nicoya, Guanacaste, Costa Rica. ISBN: 978-9968-638-12-8.
- Instituto Meteorológico Nacional de Costa Rica (2013). Consultado el 9 de febrero del 2013 en www.imn.ac.cr.
- Insunza, J. (2013). *Meteorología descriptiva: Radiación solar y terrestre*. Recuperado el 9 de febrero del 2013 de http://www.met.igp.gob.pe/users/yamina/meteorologia/radiacion_doc_Univ_CHile.pdf,
- Instituto Nacional de Tecnologías Agropecuarias (2011). Ganadería y efecto invernadero: mejor producción, menos contaminación. *INTA Informa*. Consultado el 11 marzo del 2013 en <http://intainforma.inta.gov.ar/?p=6579>
- Agencia Internacional de energía renovable (2013). http://www.irena.org/News/Description.aspx?NType=NW&PriMenuID=16&catid=84&mnu=cat&News_ID=312. Consultado en abril del 2013.

- Khan, M.; Abdul Malek, A.; Mithu, M., & Das, D. (2010). Design, fabrication and performance evaluation of natural circulation rectangular box-type solar domestic water system. *International Journal of Sustainable Energy*, 2(3), September, 164-177.
- Landa, M. (2005). *Energía solar en España: El potencial solar de España es el más alto de Europa debido a su privilegiada situación y climatología*. Consultado el día 10 de febrero del 2013 en http://www.consumer.es/web/es/medio_ambiente/energia_y_ciencia/2005/01/11/114942.php.
- Matthews, C. (2006). La ganadería amenaza el medio ambiente. FAO Sala de Prensa. Consultado 12 marzo del 2013 en <http://www.fao.org/newsroom/es/news/2006/1000448/index.html>.
- Ministerio de Ambiente, Energía y Telecomunicaciones (2011). *VI Plan Nacional de energía 2012-2013*. Consultado 12 de marzo del 201 en. http://www.dse.go.cr/es/03publicaciones/01PoliticaEnerg/VI_Plan_Nacional_de_Energia_2012-2030.pdf.
- Portilla Pastor, R.; Álvarez Morales, C.; Segura López, W. 2014. Determinación de potenciales de energía solar para generación eléctrica en Costa Rica. En: Memorias Congreso Internacional Clima, Agua y Energía, pilares para el desarrollo sostenible. Universidad Nacional Campus Nicoya, Guanacaste, Costa Rica. pp. 231-244.
- Quirós, L. (2011). Calentando el agua y cuidando el ambiente. *Construir*. Consultado en <http://www.revistaconstruir.com/construccion-sostenible/836>
- RES & RUE DISEMINATION (2005). *Energía solar térmica: Proyecto de circulación natural y forzada*. Consultado el 10 de febrero del 2013 en <http://www.cesu.es/temas>
- Rizk, J. & Nagrial, M. H. (2008). Impact of reflectors on solar energy. Proceedings of the World Academy of Science. *Engineering and Technology*, 31, July.
- Roman, H. (2007). Here comes the sun: Residential solar systems. *Power energy*. Consultado el 10 de febrero del 2013 en www.techdirections.com.
- Shyam S. N. (2005). Energía solar: Conceptos básicos y su utilización. Departamento de Física de la Universidad Nacional, Heredia, Costa Rica.
- Shyam, S N. (1996). La energía solar y su utilización. Proyecto de investigación desarrollado en el Departamento de Física de la Universidad Nacional, Heredia, Costa Rica. Sistema por termosifón. Consultado el día 9 de febrero del 2013 en http://www.mimacsolar.es/equipos_forzados.html.
- Swift K.D. (2011). Is a solar energy system right for your organization? *Management Accounting Quarterly*, 12 (4).
- Sopian, K.; Syahrri, M.; Abdullah, S.; Othman, M., & Yatim, B. (2007). Unglazed fiberglass reinforced polyester solar water heater whit integrated storage system. *Journal of Energy Engineering* 133(1): 26.
- Taiz, L. & Zeiger, E. (2002). Photosynthesis: The light reaction. *Plant physiology* (Chapter 7). USA, pp. 112-115.
- Tinajeros, S. M. (2011). Sistema de calentamiento de agua con energía solar en la ciudad de Arequipa. *XVIII Simposio Peruano de Energía Solar y del Ambiente*, Universidad Nacional de San Agustín, Escuela de Física, Perú.
- Torpey, E. (2009). You are a What? Solar Photovoltaic installer. *Occupational Outlook Quarterly*, Bureau of Labor.
- Uribe, M. (2007). Cambio del sistema de calentamiento de agua empleando calderas por paneles y otros procesos. *Producción más limpia*, julio-diciembre, 2 (2).
- UPC (1999). Sistema de calentamiento con energía solar. Recuperado el 9 de febrero del 2013 de <http://melca.com.ar/archivos/apuntes/Sistemas%20solares%20termicos%20de%20baja%20temperatura/FI00701C.pdf>.
- Wongsuwam, W. (2005). Forced circulation solar water heater performance prediction by TRNSYS ANN. *International Journal of Sustainable Energy*, 24 (2), 69-86.

Producción mas limpia y eficiencia energética: caso del uso de la energía solar

Tomás de Jesús Guzmán Hernández; Gonzalo Quiroz Vindas; Freddy Araya Rodriguez. Instituto Tecnológico de Costa Rica, Sede Regional de San Carlos, Costa Rica.

Correo electrónico: tjguzman@itcr.ac.cr, faraya@itcr.ac.cr,

Resumen

En la actualidad se debe trabajar en la aplicación de energías limpias tales como energía solar, el uso de biomasa y otras fuentes renovables, como alternativa para la adaptabilidad al cambio climático y la captura local de carbono, para mitigar el efecto de invernadero y lograr verdaderos sistemas limpios de producción.

El presente trabajo ha logrado diseñar, construir, instalar y comenzar a generar datos que muestren la potencialidad y la generación de eficiencia energética a partir del uso de la energía solar en actividades agropecuarias en la región Huetar Norte de Costa Rica a través de sistemas de captación de energía solar térmico para el calentamiento del agua con un sistema termosifónico y la generación de corriente a través de un sistema fotovoltaico. Ambos sistemas nos sirven para dos funciones básicas, el calentamiento de agua para diversos usos y la generación de energía eléctrica.

Las unidades productivas seleccionadas en la región Huetar Norte en donde se van a instalar estos sistemas son: Lecherías y plantas de producción de quesos de la zona Norte. Las lecherías seleccionadas son tres (una en la Sede Regional de San Carlos del Instituto Tecnológico de Costa Rica(ITCR-SSC), en la lechería de la "Escuela Técnica Agrícola e Industrial" de Santa Clara (ETAI) y en un productor independiente de "Dos Pinos" y dos plantas procesadoras de quesos.

El uso de estos sistemas nos permite lograr el autoconsumo en energía eléctrica entre un 30-50 por ciento del consumo de la unidad productiva. En el caso de la producción de energía para el agua caliente para esterilizar equipos, pasteurizar leche, entre otros usos, el sistema solar nos aporta entre los 20 y 37 C⁰, adicionales por día. Con esas temperaturas se suministran más del 50 por ciento de la energía requerida para elevar la temperatura del agua hasta los 70 C⁰ demandados por el sistema de lavado y esterilización.

Además, se ha instalado un equipo de transmisión de datos inalámbricos que registran el uso de la energía de los tanques térmicos, así como de la producción de energía eléctrica.

Se muestran los resultados de correlación entre producción potencial de energía solar, factura eléctrica, y la generación de agua caliente, para los meses de mayo, junio y julio y los modelos matemáticos ajustados a ambos sistemas, encontrando altos niveles de correlación y coeficientes de determinación.

Otro aspecto importante de ambos sistemas es que funciona con la luz solar directa y la difusa. A su vez su uso nos acerca a una producción sostenible en Costa Rica, así como una reducción importante de la huella de carbono en los sistemas de producción animal en el país.

Palabras claves: Energía solar, sistemas termosifónicos y fotovoltaicos, empresas agrícolas o productores de leche o procesamiento de quesos.

Antecedentes

La tendencia internacional en uso de energía en los próximos años, según la Agencia Internacional de las Energías Renovables (IRENA 2013), debe ir a una mayor participación de fuentes renovables, como: energía geotérmica, solar, eólica y biomasa y un descenso en las no renovables: carbón, petróleo y gas.

Costa Rica, tal y como aparece en el “I Plan Nacional de Energía 2012-2030” (MINAET, 2011), presenta un potencial teórico en el caso de fuente solar de 10.000 MW, en el cual el grado de utilización es mínimo. Ante esta situación y enmarcados en la línea de acción de la estrategia 2.2 del MINAET para el sector Energía, la cuales “Promover programas de ahorro energético en los macro-consumidores”, el Programa de Producción Agropecuaria de la Escuela de Agronomía, ha aceptado incluir estos sistemas, como un área demostrativa, como una apuesta por la utilización e introducción de la energía solar, su adecuación y validación en una Unidad productiva y dos laboratorios de investigación.

Las lecherías de todo el país, usan agua caliente en diferentes proporciones, para desinfectar equipos de ordeño, instrumentos y tanques lecheros de enfriamiento, buscando mayor calidad en la leche y una disminución de bacterias en la misma. El agua para estos fines es calentada usando varias vías, como resistencias eléctricas, gas, diesel e intercambiadores de calor, con motores de diferentes tipos. Este uso genera una importante factura de pago de energía para los productores de leche. Con un sistema de energía renovable usando la energía solar en sistemas termosifónicos y con sistemas fotovoltaicos, esa factura disminuirá sensiblemente, entonces la producción será más eficiente y limpia y por el uso de este tipo de innovación tecnológica se reduciría considerablemente la huella de carbono, que genera la ganadería.

En este sentido es importante desarrollar estos sistemas en el ámbito de la producción agropecuaria toda vez, que los mismos son muy pocos usados en las áreas rurales y menos en unidades productivas agropecuarias, como por ejemplo las lecherías.

Introducción

Según el VI Plan Nacional de Energía 2012-2030 del Ministerio de Ambiente y Energía y Telecomunicaciones “Costa Rica es un país rico en recursos naturales renovables que podrían utilizarse con fines energéticos; sin embargo, basa su desarrollo en el uso de los derivados del petróleo (MINAET, 2011). El crecimiento promedio del consumo de hidrocarburos en los últimos 20 años fue del 4,7% anual y el de la electricidad del 5,3% anual.

Cada fuente de energía tiene un potencial de emisiones de CO₂ diferente, por lo que, la composición de la matriz de la oferta de energía y las tecnologías de los equipos de consumo (vehículos, equipos industriales y agrícolas, entre otros) determinarán el nivel de emisiones del sistema energético del país. Ante la gran dependencia energética de los combustibles fósiles cuyo consumo produce altos niveles de emisiones, es necesario impulsar medidas de uso racional y eficiencia energética” entonces podemos decir que la tendencia internacional de uso de energía, según la Agencia Internacional de las Energías Renovables (IRENA 2013), citada por MINAET (2011), plantea una mayor participación de fuentes renovables en la matriz energética mundial, como por ejemplo: energía geotérmica, solar, eólica y biomasa y un descenso en las no renovables: carbón, petróleo y gas.

La ganadería es responsable del 18% de las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero (GEI) de acuerdo al informe presentado por la FAO sobre el impacto ambiental de la actividad (Matthews, 2006).

Según el INTA (2011) “Mitigar es pensar cómo la producción de carne y leche debe mejorar su eficiencia energética para reducir las emisiones de GEI por unidad de producto”. Matthews (2006), plantea que la ganadería genera más gases de efecto invernadero que el transporte. Así pues, urge aplicar tecnologías que minimicen este impacto generado en los procesos productivos del sector.

En el cantón de San Carlos se encuentran el 55% de los asociados de la Cooperativa de Productores Dos Pinos, con un total de 850 productores de leche y una producción de más del 50% de la producción nacional (0.6 millones de kilos de

leche). Entre los procesos productivos del sector ganadero y lechero que genera huella de carbono se encuentra el consumo eléctrico de las plantas agroindustriales relacionadas, ya sean lecherías u otras.

En la lechería de la Sede Regional, con una media de producción diaria de leche de 500 kg, la reducción de emisiones de carbono a la atmósfera con la alternativa presentada sería de 5 a 10 t por año. Extrapolando a la producción diaria de leche, tan solo en San Carlos, se presentaría un potencial de reducción de emisiones de carbono de hasta 4.380.000 t anuales. (Se estima una emisión media de 0,94 Kg de CO₂ por Kw de electricidad generado con combustibles fósiles).

La tecnología disponible ya utilizada en otras aplicaciones, sectores y países, es confiable y sólida para la asimilación por los productores; el coste de inversión es asequible y los plazos de recuperación y amortización de la inversión son atractivos. Definitivamente se necesita la validación de esta tecnología en la región e introducirla en los procesos de innovación por parte de los productores lecheros de ambas zonas.

El Instituto Tecnológico de Costa Rica tiene la misión de extensión para el desarrollo de la región norte con diversos planes y programas de sensibilización y capacitación en sistemas de producción limpia.

La energía del sol y su uso: La radiación solar que llega al sistema tierra - atmósfera, se conoce también con el nombre de radiación electromagnética de onda corta. Del 100 % de radiación solar, sólo un 25% llega directamente a la superficie de la Tierra y un 26% es dispersado por la atmósfera como radiación difusa, esto hace que un 51 % de radiación llegue a la superficie terrestre. Un 19 % es absorbido por las nubes y gases atmosféricos. El otro 30 % se pierde hacia el espacio, de éstos, la atmósfera dispersa un 6 %, las nubes reflejan un 20 % y el suelo refleja el otro 4 %. Entonces la radiación solar que llega a la atmósfera puede ser dispersada, reflejada o absorbida por sus componentes. (Taiz y Zeiger, 2002, Camejo, 2012).

La energía del sol se usa para el calentamiento de agua, a través de colectores solares térmicos y para producir corriente eléctrica con celdas fotovoltaicas. (Landa, 2005, Roman, 2007, Rizk y Nagrial, 2008, Torpey, 2009, Tinajeros, 2011, Swift, 2011).

La demanda de energía se incrementa cada año, a pesar de que los recursos energéticos son limitados. De ahí la importancia de fomentar el uso de energías renovables como la solar, tales como: 1) "Energía solar fotovoltaica; 2) Energía solar térmica. (Landa, 2005)

Resulta imposible concebir un desarrollo sostenible que no esté basado en las fuentes renovables de energía en sus diferentes manifestaciones. Entonces la energía del sol puede utilizarse en el país con ventajas en aplicaciones en pequeña y gran escala para el calentamiento de agua y la producción de energía. En el caso de la zona Norte, existen una gran cantidad de productores de leche, que usan de manera sistemática agua caliente en sus unidades, calentadas a través de resistencias eléctricas, con intercambiadores térmicos y combustibles fósiles. En este sentido este proyecto se estaría centrandó en la captación de la energía solar, para calentamiento de agua y generación de energía que ayude a los pequeños y medianos productores a ser más amigables con el ambiente.

Las formas de captación de la energía del sol son: Los paneles solares son dispositivos que aprovechan la energía que llega a la tierra en forma de radiación solar, los componentes principales de los paneles solares son las células de silicio policristalino, el cobre, el aluminio, pvc y otros materiales. Hay dos tipos distintos de paneles solares dependiendo de su utilización: el primero es el panel solar para el calentamiento del agua, que puede ser de circuito abierto y cerrado. 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 los paneles. En las instalaciones de circuito cerrado se distinguen dos sistemas: flujo por termosifón y flujo forzado. Los paneles solares térmicos tienen un muy bajo impacto ambiental (RES & RUE DISEMINATION, 2005, Khan *et al*, 2010, Quirós, 2011). Los calentadores de agua de uso doméstico en termosifón: El agua caliente se utiliza para uso doméstico, comerciales, hospitales, centros de recreo, hoteles, e industrias, etc. También puede ser usada en sistemas agropecuarios. (Guzmán e Iglesias, 1986, Guzmán e Iglesias, 1987a, Guzmán e Iglesias, 1987b).

Los tubos del colector, por los que circula el agua, se colocan longitudinalmente de manera que el agua fría entre por la parte baja y una vez que se calienta por la radiación solar, sale por la parte superior del colector debido a su menor densidad.

Debido a que la radiación solar no es siempre suficiente para calentar agua todos los días durante el año, es recomendable conectar el sistema solar con un sistema convencional de calentamiento de agua (Shyam, 1996).

Un sistema termosifónico figura No1, es aquel que funciona a partir del movimiento que se genera a partir del calentamiento de la misma a través de la captación de la radiación solar, en un sistema cerrado. Este sistema no utiliza para el movimiento del agua, ningún tipo de energía, sino solamente usa la gravedad, en función de los niveles de los tanques de agua (Despaigne *et al*, 2003, Andersen *et al*, 2007, Khan *et al*, 2010, Anderson *et al* 2008, Alvarado, 1998, Wongsuwan, 2005 y RES & RUE DISEMINATION, 2005).

Diagrama de instalación termosifón

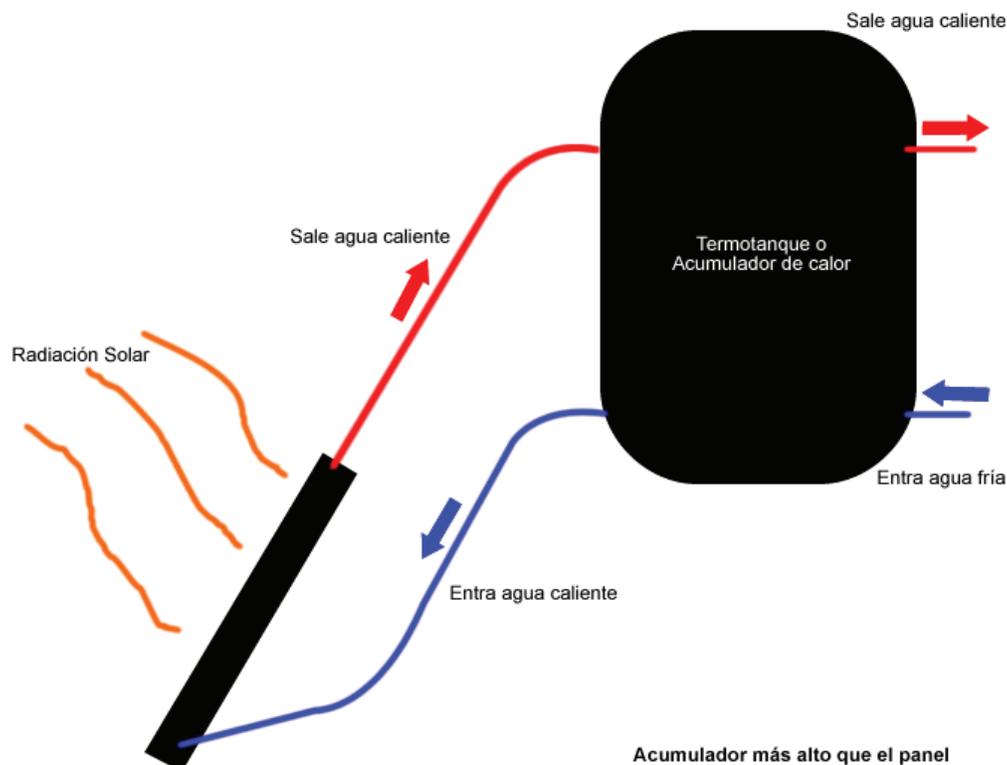


Figura No 1.- Esquema de un Sistema solar térmico termosifónico. Cortesía Termisolar S.A

Sistemas de captación fotovoltaicos figura No 2: Los paneles o módulos fotovoltaicos están formados por un conjunto de celdas que producen electricidad a partir de la luz que incide sobre ellos. Los paneles fotovoltaicos se dividen en: Cristalinos, Monocristalinos estos se componen de secciones de un único cristal de silicio (Si), y los Policristalinos: cuando están formados por pequeñas partículas cristalizadas, los Amorfos: cuando el silicio no se ha cristalizado. El rendimiento de las primeras puede alcanzar el 20% mientras que el de las últimas puede no llegar al 10%, sin embargo, su coste y peso es muy inferior. El coste de los paneles fotovoltaicos se ha reducido de forma constante desde que se fabricaron las primeras células solares comerciales.

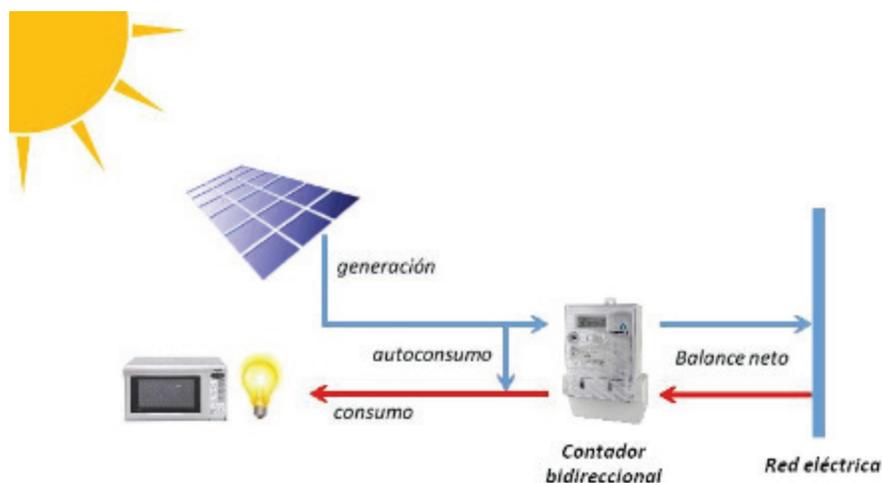


Figura No 2.- Esquema de un sistema fotovoltaico. Tomado de www.gstriatum.com

Los usos de los sistemas fotovoltaicos son muchos y variados dentro de los cuales podemos citar: Centrales conectadas a red para suministro eléctrico, (Como el caso de la planta de Bagaces en Guanacaste, Costa Rica, ICE 2011), sistemas de autoconsumo en generación distribuida, suministro eléctrico en instalaciones rurales alejadas, luminarias, faros, comunicaciones entre otras.

El uso de esta tecnología para ahorrar corriente eléctrica en un sistema de autoconsumo es la idea básica de este proyecto.

En este sentido los objetivos que nos hemos propuesto para el mismo son:

Objetivo General: Aplicar sistemas solares de captación térmica y fotovoltaica para el calentamiento de agua y producción de energía en la lechería del Programa de Producción Agropecuaria de la Escuela de Agronomía del ITCR. Los objetivos Específico son: 1.- Implementar dos sistemas solares de captación térmica y fotovoltaica para el calentamiento de agua y producción de energía en la lechería del PPA. 2.-Evaluar el potencial del sistema de captación térmica y fotovoltaica en la zona de Santa Clara de Florencia, mediante el registro de las variables climáticas y el procesamiento de estas a través de un sistema computarizado de base de datos. 3.-Transferir los resultados a través de un programa de capacitación a productores y estudiantes sobre el uso de sistemas solares térmicos y fotovoltaicos en un área demostrativa didáctica.

Metodología

Se instalaron equipos ubicados en la lechería del Programa de Producción Agropecuaria de la Escuela de Agronomía del ITCR y dos laboratorios, o sea el laboratorio de Calidad de carne y el de Biocontroladores como una Área para la validación de la tecnología en las unidades productivas y como unidades Didácticas.

Posteriormente se instalarán estos sistemas en la lechería de la "Escuela Técnica Agrícola e Industrial" de Santa Clara (ETAI) y en un productor independiente de "Dos Pinos" y dos plantas procesadoras de quesos en Santa Rosa de Pocosol, Alajuela, zona Norte.

El proyecto se enmarcará en cinco etapas, a saber:

Primera etapa

Diseño de un sistema solar termosifónico en la lechería del ITCR y un sistema fotovoltaico de generación eléctrica, así como un módulo fotovoltaico educativo.

Una vez montado el sistema en la lechería se procedió a la toma de datos de la siguiente manera: Monitoreo, de variables del sistema, tales como iluminación, nubosidad, horas de luz, radiación solar directa y difusa, masa de agua calentada, temperatura del agua a la entrada del sistema, temperatura del agua a la salida del sistema.

La información de la lechería está en los cuadros no 1, 2 y 3.

Cuadro 1. Lechería seleccionada:

Lechería	Uso de agua caliente	Ubicación
1.- ITCR-SSC Zona Norte	Limpieza de equipos de ordeño y refrigeración	Santa Clara
2.- Laboratorio de Calidad de carnes	Uso de agua caliente en el laboratorio para limpieza de huesos y grasas animales	
3.-Laboratorio de Biocontroladores	Uso de agua caliente para control y limpieza.	

Cuadro 2. Características de la lechería del ITCR

Lechería	Área	Kg leche	Volumen diario de uso de agua caliente	Volumen de agua caliente anual	Factura de agua anual	Factura eléctrica colones/mes	Factura eléctrica / anual en colones
ITCR-SSC	24 ha	500 kg	160 l / día	58,40 m ³	¢ 262 800,00	¢150 000,00	¢1 800 000,00

Cuadro 3. Ahorro total que "podría" generar el sistema por día, por mes y por año

Ahorro de energía	Día	Mes	Año
Ahorro de energía kWh	14,73	448,00	5.376,00
Ahorro de gas litros	2,65	80,74	968,91
Ahorro en us \$	\$1,75	\$53,29	\$639,48
Inversión: costo del sistema dólares	\$2.720,00		
Recuperación de la inversión	51,0 meses, Si se calentara el agua con gas		

Los equipos instalados tienen los siguientes componentes: **Módulos a instalados en lecherías:** Sistema de paneles solares térmicos: Paneles solares de calentamiento de agua, tanque acumulador de 302,40 l de agua, con sistema eléctrico auxiliar acoplado. Este tanque tendrá tres previstos interiores para conexión de termopares. Estos termopares estarán conectados a una computadora que registrará los datos de captación de energía y el uso del agua a través de un medidor, válvula de escape; válvula de conexión del sistema solar con el sistema auxiliar eléctrico, Sistema de tuberías de conexión a los equipos para esterilización, base de montaje; instalaciones varias de ajustes de acuerdo a la unidad que consumirá el agua caliente; tanque elevado, en el caso de que sea necesario; termómetros. Sistema de paneles solares fotovoltaicos: Paneles solares fotovoltaicos; sistema de almacenamiento (opcional). Puede ser conectado a la red en generación distribuida de autoconsumo, regulador de carga; inversor, instalaciones varias de conexión, base de montaje en suelo.

Equipo adicional, un CPU, equipo servidor de base de datos, unidad de respaldo de datos, monitores, teclados y cables de conexión.

Segunda etapa:

Montaje de sistema fotovoltaico.

Tercera etapa:

Medición de indicadores y variables. En la tercera etapa; se debe trabajar en mediciones de variables, tales como: Masa de agua fría / agua caliente captada por el sol; diferencial (ahorro) con electricidad del sistema en función del uso de los sistemas solares, balance energético de los sistemas en función de la zona; determinar la eficiencia energética y la disminución de los costos de producción, estudio comparativo entre unidades con sistemas y sin sistemas solares; cálculo de la disminución de la huella de carbono. La cual será calculada mediante el producto del valor de los Kwh anuales ahorrados y medidos por el sistema y el valor medio de Kg de CO₂ emitidos en la generación eléctrica en Costa Rica proporcionados anualmente por la Internacional Energy Agency IEA.

Cuarta etapa:

Montaje de los otros sistemas, en de la "Escuela Técnica Agrícola e Industrial" de Santa Clara (ETAI), un productor independiente de "Dos Pinos" y dos plantas procesadoras de quesos.

Quinta etapa:

Desarrollo de la divulgación de los sistemas

Para lograr que los estudiantes, empresarios, la comunidad y los productores conozcan estos sistemas se desarrollarán: Días de campo; clases a los estudiantes de la sede regional. Ficha técnica del módulo aplicado; desplegable del módulo; presentación de los resultados en eventos nacionales e internacionales, ya sean en congresos o seminarios. Publicación de al menos un artículo técnico y científico de los resultados obtenidos.

Este proyecto tiene tres escenarios académicos, a saber, extensión, innovación e investigación.

Resultados y discusión

En los sistemas de captación de energía solar térmicos y fotovoltaicos instalados hasta el momento en la lechería del Programa de Producción Agropecuaria (PPA) en los meses de mayo a julio del 2015, se pueden observar los siguientes resultados en el cuadro 4.

Cuadro 4. Resumen de las variables evaluadas en los paneles térmicos y fotovoltaicos ubicados en la lechería del ITCR Sede San Carlos durante los meses de mayo a julio del 2015.

Sistema	Variable	n	Media	D.E.	CV	Mín	Máx
Térmico	Temp_entrada	242	27,01	1,76	6,53	23,00	34,00
	Temp_final	242	49,06	10,34	21,08	26,00	75,00
	Δ Temp (C)	242	22,41	9,28	41,40	6,00	47,00
Fotovoltaico	kWh/Día	242	5,49	2,02	36,74	1,24	10,03

La temperatura de entrada del agua a los paneles térmicos tiene un coeficiente de variación bajo de 6,53, debido a que se refiere a una variable que mantiene su comportamiento bastante estable. Esto se debe a que la temperatura ambiente del agua dentro de la tubería está condicionada siempre los mismos factores. Dichos factores pueden ser el material de

la tubería, su aislamiento de ambiente (subterránea), volumen de agua en tubería (homogenización de temperatura por conducción) y normalmente no se somete a condiciones diferentes, ni variables.

En el caso de las otras tres variables evaluadas, Temperatura final (temperatura lograda al salir de los paneles), cambio de temperatura lograda (ΔC) y kWh/Día (kilowatt hora generado al día). Las dos primeras evaluadas en los paneles térmicos y la última en los paneles fotovoltaicos. Se puede observar como los coeficientes de variación son notablemente más elevados y además si se relacionan con sus rangos de mínimos y máximos se infiere la gran heterogeneidad que se podría tener para cada una de ellas en función del tiempo, esto se debe a la relación directa que hay entre las medias obtenidas y las condiciones ambientales presentes durante el proceso de generación, principalmente nubosidad y radiación solar.

Con lo anterior se infiere que el rendimiento de ganancia de energía lograda con este tipo de equipos es complementario a las fuentes energéticas convencionales que se utilizan en un sistema productivo, porque va a depender de la radiación solar.

El comportamiento de los coeficientes de variación se observan en la figura 3.

La tendencia que presenta es previsible en este tipo de sistemas de captación energética dado que como lo reporta la literatura la optimización del aprovechamiento de la energía solar depende de la cantidad y tipo de radiación recibida que varía según la época del año, así como de los materiales utilizados para su captación y de las formas de almacenamiento (EVE sf).

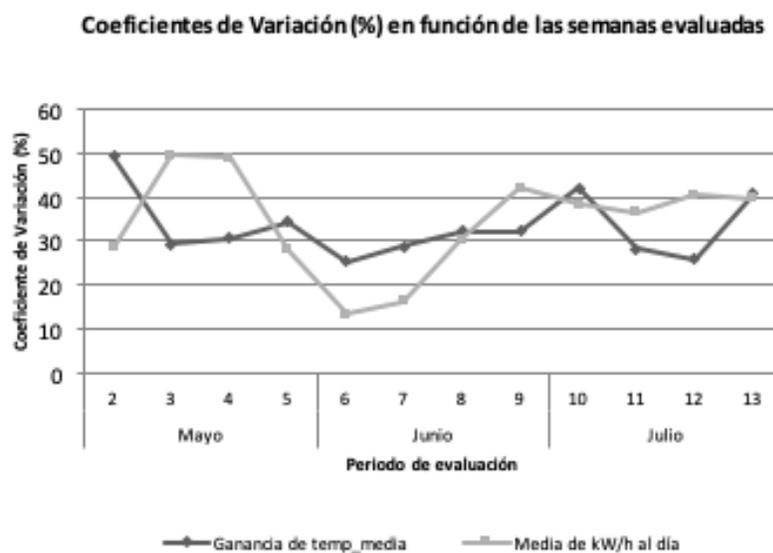


Figura 3. Coeficientes de variación en función del tiempo para las variables evaluadas en la producción energética de los paneles térmicos y fotovoltaicos instalados en la lechería del ITCR Sede San Carlos durante los meses de mayo a julio del 2015.

En la figura 4 se puede observar el comportamiento de las temperaturas de entrada del agua al sistema solar térmico y las temperaturas finales logradas al salir de los paneles en función del tiempo. Se presenta la temperatura demanda para el lavado del equipo de ordeño que es como mínimo de 70 grados inicialmente. Esto nos permite observar la relación entre la ganancia de temperatura proveniente de la energía solar captada y el restante que se debe suplir mediante un sistema auxiliar, con resistencias eléctricas.

La gran variabilidad que se observa gráficamente se debe a la fluctuación en el potencial de aprovechamiento energético condicionado por la intensidad de radiación solar recibida directamente, los ciclos diarios y las condiciones climatológicas como la nubosidad.

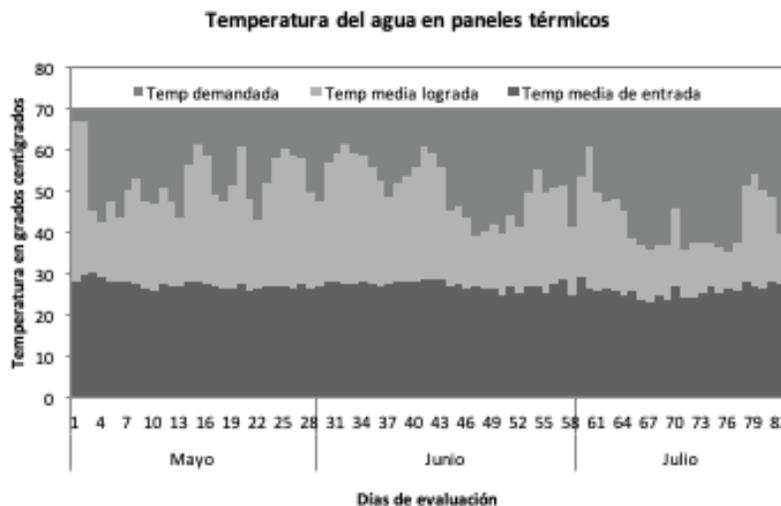


Figura 4. Temperaturas diarias registradas en el sistema de paneles térmicos instalados en la lechería del ITCR Sede San Carlos durante los meses de mayo a julio del 2015.

En la figura 5 se observa la distribución de la ganancia de temperatura diaria por medio de la implementación de los colectores solares térmicos en un sistema termosifónico. En el 95 % de los días evaluados el rango de temperatura ganada oscila entre los 11 y 31°C, analizando un poco más profundo queda claro como en el 68 % de los días evaluados el rango de ganancia de temperatura del agua va de los 21 a 37°C.

En el 68 % de los días evaluados se logró captar la radiación solar la mitad de la energía necesaria para lograr el cambio de temperatura necesario entre la temperatura media de entrada del agua al sistema y la temperatura demandada de 70° C, este comportamiento se observa en las medias para cada variable con una temperatura de entrada del agua de 27,01°C en promedio y una temperatura final de 49,06°C; supliendo en promedio 22,08°C lo que equivale a un 51% del diferencial necesitado para llegar a los 70°C que necesita el equipo de limpieza de la lechería. En el restante tercio de los días evaluados se registran porcentajes que oscilan entre el 35 y 49% de abastecimiento del diferencial de temperatura promedio necesitado.

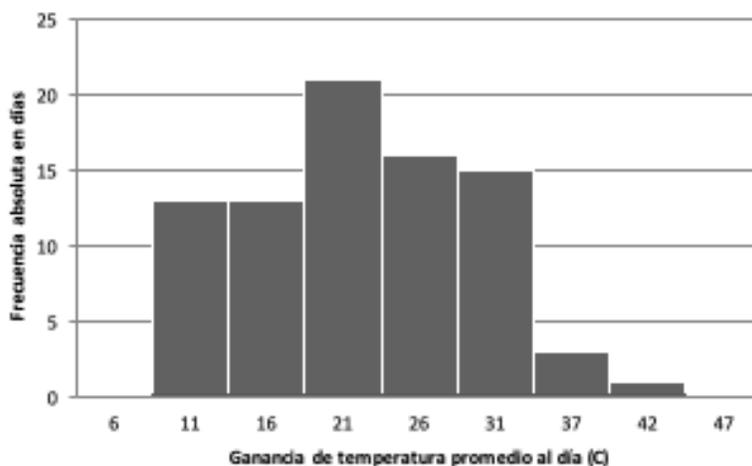


Figura 5. Distribución de las frecuencias absolutas y porcentuales para la variable Ganancia de temperatura promedio al día utilizando los colectores solares instalados en la lechería del ITCR Sede San Carlos durante el periodo de mayo a julio del 2015.

En la figura 6 se observa como en el 96% de los días evaluados se produjeron al menos 3 kWh/día, en el 79% de los días se produjo al menos 5 kWh/día y en el 67% de los días evaluados más de 6 kWh/día. Estas cantidades de energía no son despreciables en relación a la capacidad de abastecimiento que tendrían en los sistemas de iluminación o ventilación dentro de las instalaciones del sistema productivo. La principal generación de energía eléctrica lograda está entre los 5 y 8 kWh al día es la tendencia que se presentó el 65% de los días evaluados.

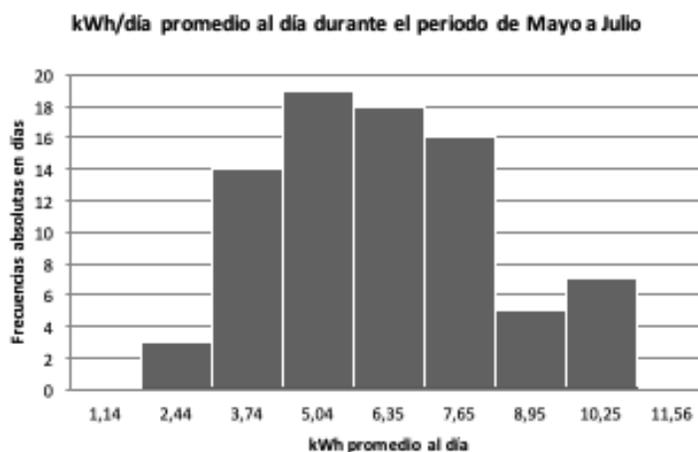


Figura 6. Distribución de las frecuencias absolutas y porcentuales para la variable kWh/día generados por los paneles fotovoltaicos ubicados en la lechería del ITCR Sede San Carlos durante el periodo de Mayo a Julio del 2015.

En la figura 7 se observa la acumulación de energía lograda por cada sistema de paneles solares instalados, tanto el sistema térmico, como el fotovoltaico en kWh al día. La tendencia en ambos casos son similares, esto obedece a que los dos reciben exactamente la misma radiación al estar colocados a la misma inclinación (10 grados respecto a la superficie terrestre) y orientación (Norte-Sur). Las tendencias son muy similares así como las magnitudes energéticas equivalentes; ya que el cálculo de los kW/h día de los paneles térmicos fue hecho mediante la conversión del diferencial de temperatura logrado a Joules en un volumen de agua igual al promedio del demandado por la lechería durante el periodo de evaluación, 220 L/día. Una vez realizado este cálculo se pudo evaluar la cantidad de CO₂e y disponer de un dato que nos permitiera dar razón de las emisiones indirectas por energía eléctrica que se podrían disminuir en un sistema productivo que implemente este tipo de tecnologías.

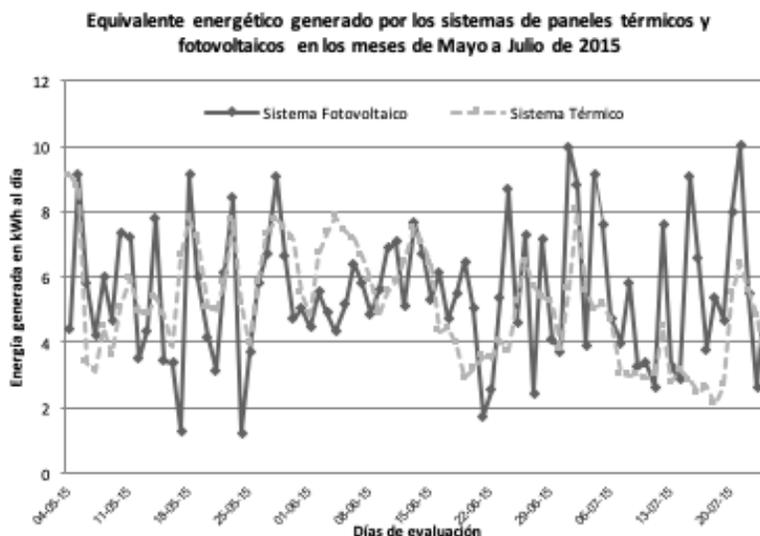


Figura 8. Comportamiento del equivalente energético generado (kW/h) en función del tiempo por cada sistema de captación solar instalada en la lechería del ITCR Sede San Carlos durante el periodo de mayo a julio del 2015.

En la figura 9 se observa la energía captada por ambos sistemas en los tres meses en estudio, en total se estimó que la energía generada en ambos sistemas fue de 875,80 kWh de los cuales el 52% corresponde a la energía capturada por los paneles térmicos y el 48% por los fotovoltaicos.

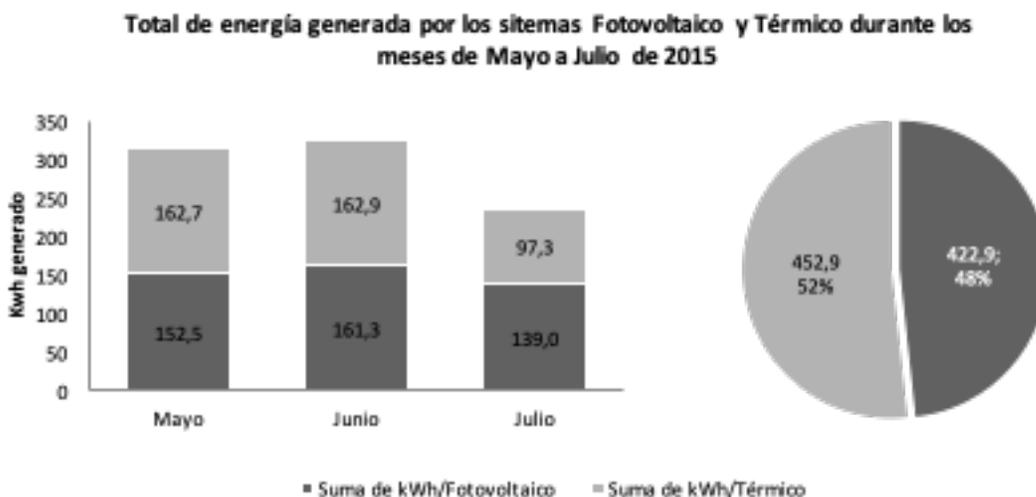


Figura 9. Equivalente energético (kW/h) generado por los sistemas fotovoltaico y térmico instalados en la lechería del ITCR Sede San Carlos durante los meses de mayo a julio del 2015.

Esta energía captada, si fuese a sustituir energía eléctrica dentro de un sistema productivo, equivaldría a una disminución de 0,103 t CO₂e. En términos económicos podríamos estar hablando de un monto total de ¢ 103 332,60 a un precio de ¢118 kWh, como se observa en el cuadro 5.

Con los datos actuales de estos tres meses, realizando la estimación a un año se podría disminuir una cantidad de 0,412 ton CO₂e de las emisiones provenientes de la matriz energética de un sistema productivo, en el caso de este sistema productivo esto equivaldría al 4,5% de la electricidad demandada, en sistemas convencionales con consumos registrados de 20 000 kWh al año esto equivaldría a poco más de un 18 % de la energía eléctrica demanda.

En términos económicos correspondería a un equivalente de ₡ 413 330 anuales a un precio de ₡118 el kWh.

Es necesario aclarar que esta estimación está sujeta a la gran variabilidad que representa la utilización de estos sistemas y la tecnología disponible; sin embargo, los sistemas son alternativas tecnológicas eficaces y viables.

Cuadro 5. Generación energética, potencial disminución de factura económica y disminución en las emisiones de GEI logrados por los sistemas de captación de energía solar ubicados en el sistema lechero del ITCR Sede San Carlos.

Sistema	Mes evaluado	Equivalente energético generado (kW/h)	Disminución potencial de la factura (₡)	Disminución potencial de emisiones de GEI (ton CO ₂ e)
Térmico	Mayo	162,7	19 198,60	0,019
	Junio	162,9	19 222,20	0,019
	Julio	97,3	11 481,40	0,012
Fotovoltaico	Mayo	152,5	17 995,00	0,018
	Junio	161,3	19 033,40	0,019
	Julio	139,0	16 402,00	0,016
Total del periodo		875,80	103 332,60	0,103

En cuadro 6, se observa que, entre los sistemas fotovoltaicos y térmicos, usados en la lechería se produce un ahorro energético que está entre el 20 y el 30 por ciento en función de los días y meses analizados hasta el momento.

Cuadro 6. Balance de energía lograda de los sistemas solares y su ahorro en porcentaje en los meses en estudio de mayo, junio y julio

Días	Energía consumida en la lechería, y los dos laboratorios del ITCR en kWh	Energía consumida en la lechería del ITCR en kWh	Promedio de la producción con el sistema fotovoltaico kWh	Promedio de la producción con el sistema térmico kWh	Producción promedio de ambos sistemas kWh	Ahorro energético neto por los dos sistemas
1	134,63	44,87	8,15	5,38	13,53	30,15 %
2	144,18	48,06	7,72	5,38	13,1	27,25 %
3	141,177	47,05	4,22	5,46	9,68	20,37 %
4	140,496	46,83	7,54	6,03	13,57	28,97 %
5	130,358	43,45	6,81	6,01	12,82	29,5 %
6	127,939	42,64	5,29	5,67	10,96	25,70 %
7	136,512	45,50	4,58	5,32	9,9	21,75 %
8	131,624	43,87	5,51	5,71	11,22	25,52 %
9	126,222	42,07	4,03	5,39	9,42	22,39 %
10	84,185	28,06	4,56	5,29	9,85	35,10 %
11	112,661	37,55	4,11	5,29	9,4	25,03 %
12	133,097	44,36	6,75	4,85	11,6	26,14 %
13	113,545	37,84	4,72	5,25	9,97	26,34 %
14	135,251	45,08	4,15	5,25	9,4	20,85 %
15	130,731	43,36	7,83	5,95	13,78	31,78 %
Total general	1922,608	640,59	85,97	82,23	168,2	26,25 %

En las figuras 10, 11 y 12 se observa la generación de energía eléctrica proveniente de la captación durante todo el día de los paneles fotovoltaicos, o sea desde las 6:00 am y hasta las 6:00 pm. Este sistema está instalado de manera directa, o sea la producción energética es utilizada en los sistemas de la lechería, sin ser esta energía almacenada. Otra opción sería almacenarla en una batería especial y usarla durante la noche.

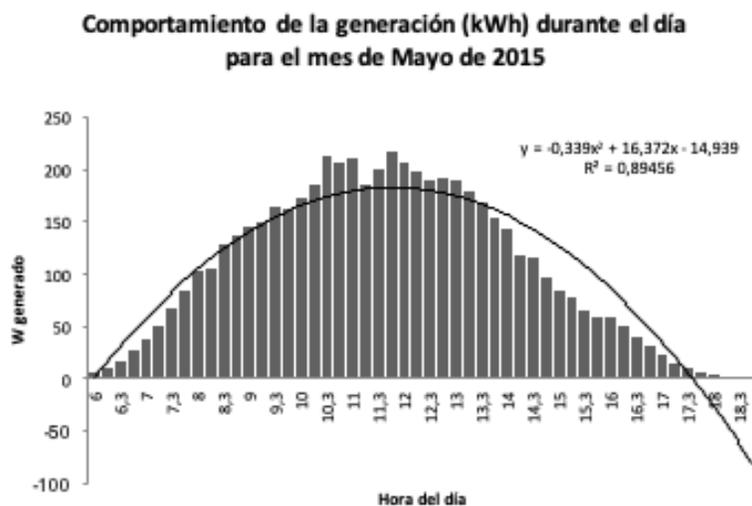


Figura 10. Comportamiento de la generación promedio durante el día en los paneles fotovoltaicos evaluados en la lechería del ITCR Sede San Carlos durante el mes de mayo del 2015.

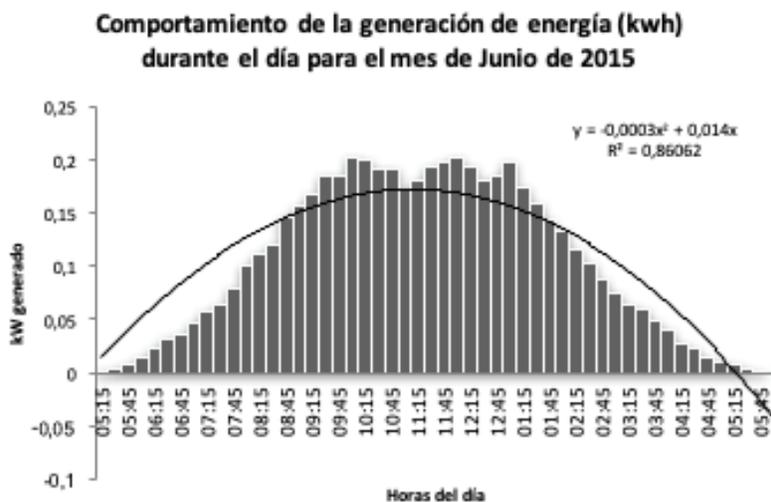


Figura 11. Comportamiento de la generación promedio durante el día en los paneles fotovoltaicos evaluados en la lechería del ITCR Sede San Carlos durante el mes de junio del 2015.

**Comportamiento de la generación de energía (kW)
durante el día para el mes de Julio del 2015**

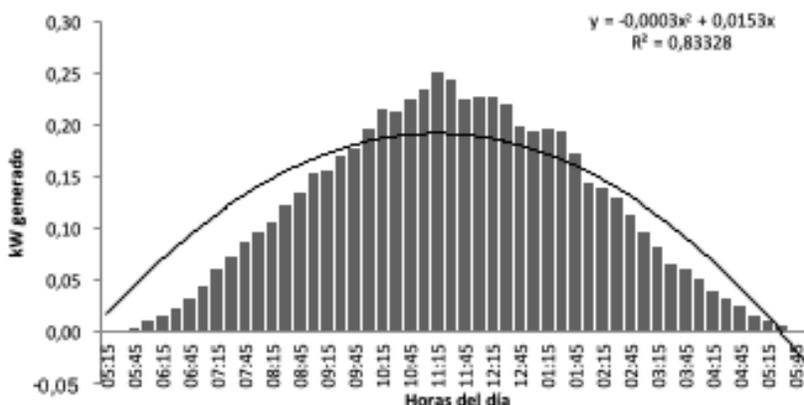


Figura 12. Comportamiento de la generación promedio durante el día en los paneles fotovoltaicos evaluados en la lechería del ITCR Sede San Carlos durante el mes de julio del 2015.

Respecto al consumo de agua caliente proveniente de los colectores solares se registró una demanda diaria de 220 litros, sobre la base a este volumen se hicieron todos los cálculos de generación equivalente de energía del sistema, sin embargo para poder relacionar el beneficio real en una lechería estándar es necesario que se cuantifique el volumen demandado para el lavado, esto para poder determinar el aprovechamiento energético. En este caso según recomendaciones técnicas del equipo utilizado en esta lechería se necesitan 35 litros para cada lavado, por tanto dos lavados al día corresponden a 70 litros de agua caliente, a esto debemos adicionar un pre-enjuague o enjuague de leche que se hace también con agua caliente por lo que podríamos estar hablando de un consumo diario cercano a los 140 litros solamente para el lavado de equipo de ordeño.

Existen numerosos controles que deben realizarse en el tiempo para lograr una mejor calidad de leche. Entre ellos se encuentran aquellos directamente relacionados con la limpieza de la máquina de ordeñar apuntando a aquellos parámetros a tener en cuenta para evitar el desarrollo de microorganismos y el depósito de residuos. Hay que recordar la forma de estratificación de los residuos en los caños. Estos se depositan en capas de grasa, proteínas y minerales sucesivamente hasta formar una "costra". Un correcto lavado de la máquina de ordeñar se hace para evitar esto, por lo que es vital el lavado con agua caliente para garantizar tanto el buen mantenimiento del equipo como la inocuidad del producto obtenido (Berti 2008).

Conclusiones

Bajo las condiciones en las que se realizó este estudio se proponen las siguientes conclusiones:

Los colectores solares durante el periodo de evaluación de mayo a julio del 2015 lograron en promedio una ganancia diaria de temperatura de $22,41 \pm 9,28$ °C; en el caso de los paneles fotovoltaicos se registró en promedio una producción diaria de $5,49 \pm 2,02$ kWh.

En el trimestre evaluado (mayo a julio) los sistemas de captación y generación de energía solar produjeron el equivalente energético de 875,90 kWh lo que equivale a 0,103 ton CO₂e y un ahorro de ₡103 332,60 según las tarifas vigentes en Coopelesca.

El ahorro energético que se produce entre los dos sistemas en los meses evaluados, están entre el 20-30 por ciento de kWh.

Los sistemas se convierten en una alternativa sostenible para los productores en las actividades productivas que realizan que les permite disminuir el impacto en el ambiente.

Recomendaciones

Se deberá continuar la evaluación de ambos sistemas durante al menos dos años y en diferentes lugares de la zona Norte.

Bibliografía

- Andersen, E., Furbo, S., Hampel, M., Heidemann, W., Müller-Steinhagen, H. (2007). Investigations on stratification devices for hot water heat stores. *International Journal of Sustainable Energy*, 32:255-263. Published on line 29 de junio in Wiley Interscience
- Andersen, E. (2008) Hot water heat stores by termosiphonics system. *International Journal of Sustainable Energy*. Published on line 29 de junio in Wiley Interscience.
- Alvarado, R. (1998). Boletín Meteorológico números 1, 2 y 3. Publicaciones ITCR, San Carlos. Costa Rica.
- Berriz, P. L. (2012). La energía solar: base para el desarrollo sostenible. *Energía y Tú*, Número 58. Abril - Junio de 2012. Cuba.
- Boletines informativos del IMN. <http://www.imn.ac.cr>. Consultados em el 2013.
- Camejo, J. E. (2012). Conectar el sol con la red. *Energía y Tú*. Número 57. Enero – Marzo. Cuba.
- CENSOLAR. (1993). Valores medios de irradiación solar sobre suelo horizontal. Primera Edición. España.
- Despaigne, H., Torres, A., Maceo, F., Cobián, S. (2003). Sistema solar termosifónico de calentamiento de agua sanitaria en Cayo Las Brujas. *Memorias Primera Convención Internacional de Energía y Medio Ambiente*. Santiago de Cuba: 13 -17 de noviembre.
- Guzmán, T., Iglesias, J. (1986.). Estudio preliminar del diseño, montaje y prueba de planta de tratamiento hidrotérmico a la semilla agámica de la caña de azúcar. *Rev. Proyección. IPROYAZ*. p. 15 - 20. Cuba.
- Guzmán, T., Iglesias, J. (1987a).Energía solar para la agroindustria azucarera. Informe técnico. Edición ISP JAE. 1987.
- Guzmán, T., Iglesias, J. (1987b) Evaluación técnico-económica de una planta solar de tratamiento hidrotérmico a la semilla de caña de azúcar. I Conf. Científica de la ATAC en la AC de Cuba.
- Guzmán, T., Iglesias, J. (1989.). Planta solar para la termoterapia de la semilla agámica de la caña de azúcar. *Rev. Energía*. pág. 3-7. 1989. Cuba.
- Guzmán, T., Iglesias, J. (1991). Instalación solar para termoterapia de la semilla de caña de azúcar. Conferencia. Internacional de Arquitectura e Ingeniería. Nueva York. Estados Unidos.
- Guzmán, T., Iglesias, J. (1999). Planta solar de hidrotatamiento para el control de enfermedades en cultivos económicos. *Memorias del Congreso Costarricense de la Caña de Azúcar*. Condovac. Guanacaste. Pag. 250.Costa Rica.

- IMN. (Instituto Meteorológico Nacional de Costa Rica) (2013). www.imn.ac.cr, consultado el día 9 de febrero del 2013.
- Insunza, J. (2013). Meteorología descriptiva. Radiación solar y terrestre, http://www.met.igp.gob.pe/users/yamina/meteorologia/radiacion_doc_Univ_CHile.pdf, tomado de internet el día 9 de febrero del 2013.
- INTA. (Instituto nacional de Tecnologías Agropecuarias) (2011). Ganadería y efecto invernadero: mejor producción, menos contaminación. Consultado 11 marzo del 2013. INTA Informa. <http://intainforma.inta.gov.ar/?p=6579>
- IRENA (Agencia Internacional de energía renovable) (2013) http://www.irena.org/News/Description.aspx?NType=NW&PriMenuID=16&catid=84&mnu=cat&News_ID=312. consultado en abril del 2013
- Khan, M., Abdul Malek, A., Mithu, M., Das, D. (2010). Design, fabrication and performance evaluation of natural circulation rectangular box-type solar domestic water system. *International Journal of Sustainable Energy*. Vol 2, No 3, sep 164-177.
- Landa, M. (2005). Energía solar en España. El potencial solar de España es el más alto de Europa debido a su privilegiada situación y climatología. http://www.consumer.es/web/es/medio_ambiente/energia_y_ciencia/2005/01/11/114942.php, consultado el día 10 de febrero del 2013.
- Matthews, C. (2006). La ganadería amenaza el medio ambiente. Consultado 12 marzo del 2013. FAO Sala de Prensa. <http://www.fao.org/newsroom/es/news/2006/1000448/index.html>.
- MINAET. (Ministerio de Ambiente, Energía y Telecomunicaciones) (2011). VI Plan Nacional de energía 2012-2013. Consultado 12 de marzo del 2013. http://www.dse.go.cr/es/03publicaciones/01PoliticaEnerg/VI_Plan_Nacional_de_Energia_2012-2030.pdf.
- Quirós, L. (2011). Calentando el agua y cuidando el ambiente. <http://www.revistaconstruir.com/construccion-sostenible/836>
- RES & RUE DISEMINATION (2005). Energía solar térmica. Proyecto de circulación natural y forzada. <http://www.cesu.es/temas>, CONSULTADO EL DIA 10 DE FEBRERO DEL 2013
- Rizk, J., Nagrial, M., H. (2008). Impact of reflectors on solar energy. *Proceedings of the world academy of Science. Engineering and Technology*. Vol 31, July.
- Roman, H. (2007). Here comes the sun. Residential solar systems. *Power energy*. www.techdirections.com. Tomado de internet el día 10 de febrero del 2013.
- Shyam S. N. (2005). Energía solar. Conceptos básicos y su utilización. Departamento de Física de la Universidad Nacional. Heredia. Costa Rica.
- Shyam, S N. (1996). La energía solar y su utilización. Proyecto de Investigación desarrollados en el departamento de Física de la Universidad Nacional. Heredia. Costa Rica.
- Sistema por termosifón. http://www.mimacsolar.es/equipos_forzados.html, tomado de internet el día 9 de febrero del 2013.
- Swift K.D. (2011). Is a solar energy system right for your organization?. *Rev. Mangement Accounting Quarterly*. Vol. 12, No 4.
- Sopian, K. Syahrri, M., Abdullah, S., Othman, M., Yatim, B. (2007). Unglazed fiber glass reinforced polyester solar water heater whit integrtated storage system. *International Journal of Sustainable Energy*. 10.1061/ (ASCE) 0733-9402, 133; 1 (26).
- Taiz, L., Zeiger E. (2002). *Plant physiology*. Chater 7. Photosynthesis. The light reaction. Pag 112-115. USA.

- Tinajeros, S. M. (2011). Sistema de calentamiento de agua con energía solar en la ciudad de Arequipa. XVIII Simposio Peruano de energía solar y del ambiente. Universidad Nacional de San Agustín. Escuela de Física, Perú.
- Torpey E. (2009). You are a What?.Solar Photovoltaic installer. Occupational Outlook Quarterly. Bureau of labor.
- Uribe, M. (2007). Cambio del sistema de calentamiento de agua empleando calderas por paneles y otros procesos. Rev. Producción más limpia, julio-diciembre Vol 2 , No 2.
- UPC (1999). Sistema de calentamiento con energía solar. <http://melca.com.ar/archivos/apuntes/Sistemas%20solares%20termicos%20de%20baja%20temperatura/FI00701C.pdf>. Tomado de internet el día 9 de febrero el 2013
- Wongsuwam, W. (2005). Forced circulation solar water heater performance prediction by TRNSYS ANN. International journal of sustainable energy, vol 24, No 2, 69-86.

Aplicación de tecnologías solares térmicas híbridas, para la deshidratación y secado de productos agrícolas en la Región Huetar Norte de Costa Rica

Dr. Tomás de Jesús Guzmán Hernández, Área académica del Programa de Doctorado en Ciencias Naturales para el Desarrollo. Escuela de Agronomía. Instituto Tecnológico de Costa Rica, Sede Regional San Carlos, tjguzman@itcr.ac.cr

Dr. Javier Mauricio Obando-Ulloa, Área académica del Programa de Doctorado en Ciencias Naturales para el Desarrollo. Escuela de Agronomía. Instituto Tecnológico de Costa Rica, Sede Regional San Carlos, jaobando@itcr.ac.cr

Lic. Guillermo Castro-Badilla, Escuela de Ingeniería Electrónica. Instituto Tecnológico de Costa Rica, Sede Regional San Carlos, gucastro@itcr.ac.cr

Deyver Antonio Rodríguez-Rojas, Estudiante de la Escuela de Producción Industrial. Instituto Tecnológico de Costa Rica, Sede Regional de San Carlos, deyver.rodriguez.cr@gmail.com

Lic. Natalia Arce Hernández, Estudiante del Programa de Maestría en Gestión de Recursos Naturales y Tecnologías de Producción. Instituto Tecnológico de Costa Rica, nataliahe@gmail.com

MAE. Ing. Juan Manuel Ortega Castillo, Área académica del Programa de Doctorado en Ciencias Naturales para el Desarrollo. Escuela de Agronomía. Instituto Tecnológico de Costa Rica, Sede Regional San Carlos, ocjmcr@gmail.com

Dr. Freddy Araya-Rodríguez, Área académica del Programa de Doctorado en Ciencias Naturales para el Desarrollo. Escuela de Agronomía. Instituto Tecnológico de Costa Rica, Sede Regional San Carlos, faraya@itcr.ac.cr

Introducción

Uno de los mayores problemas a los que se enfrenta actualmente la humanidad, es el balance entre la producción de alimentos y el consumo (Murthy, 2009). Este problema se acrecienta en la mayoría de los países en vías de desarrollo, debido a la inhabilidad de conservación de alimentos y no a la baja producción, lo que conlleva a un desequilibrio en la seguridad alimentaria (VijayaVenkataRaman et al., 2012; Jairaj et al., 2009).

Para solucionar este problema, se ha propuesto incrementar el abastecimiento de alimentos. No obstante, para alcanzar esta propuesta se requiere una considerable inversión de capital económico y tiempo. Otra solución más viable al problema del desabastecimiento incluye la reducción de las pérdidas de alimentos en países en desarrollo, las cuales representan un problema para los pequeños productores agrícolas (VijayaVenkataRaman et al., 2012; Jairaj et al., 2009; Murthy, 2009).

La información sobre estas pérdidas es limitada y aunque se ha registrado pérdidas de aproximadamente 21%, se cree que éstas son mayores y oscilan entre 40 y 50% (Jairaj et al., 2009; Murthy, 2009).

Una forma de reducir la pérdida de alimentos es por medio de diferentes técnicas de conservación, entre las que destaca el secado y la deshidratación. El secado es una de las técnicas más usadas para reducir el contenido de humedad, lo que hace que los microorganismos responsables del deterioro de los productos agrícolas no puedan proliferar. Además, esta técnica reduce las velocidades de las reacciones químicas y enzimáticas relacionadas con el deterioro de estos productos (Pirasteh et al., 2014; Jairaj et al., 2009). El secado al sol es la más sencilla y barata dada la disponibilidad de la radiación electromagnética del sol. Indudablemente esta energía juega un papel significativo en la mitigación de la emisión de los gases de efecto invernadero que contribuye a prevenir el calentamiento global al reemplazar el uso de combustibles fósiles, por lo que las energías renovables son una alternativa de energía más limpia. Obviamente, entre las diversas opciones de energía renovable, el uso de la energía térmica solar es la más viable y está disponible en forma directa e indirecta.

Las consideraciones ambientales y los daños causados por los gases de efecto invernadero debido al consumo de hidrocarburos, obligan a los gobiernos y a la industria y la agricultura a usar energías renovables como un recurso limpio y sostenible, como es el uso de la energía solar para ser aplicada en diferentes entornos, entre ellos el secado (Pirasteh et al., 2014).

El sol emite energía a razón de $3,8 \times 10^{23}$ kW, de los cuales, aproximadamente $1,8 \times 10^{14}$ kW se reciben en la Tierra. Una gran cantidad de energía solar está disponible para aplicaciones térmicas como cocción, calentamiento de agua y secado y deshidratación de cultivos, entre otros. En la tecnología de secado solar de productos agrícolas, el proceso es limpio e higiénico, mejora la calidad del producto y la eficiencia del proceso y lo más importante, protege el medio ambiente (Pirasteh et al., 2014).

Debido a esto, se ha desarrollado y adoptado diferentes métodos para secar los productos agrícolas para prolongar su vida útil. Entre los métodos desarrollados se puede mencionar el secado a sol abierto con y sin cobertura y el secado en bandejas, también conocido como secado a la sombra (Murthy, 2009).

El secado natural al sol de manera directa

En este tipo de secado la radiación electromagnética del sol se usa para evaporar la humedad presente en el producto. Debido a que la radiación solar es intermitente y variable, el producto puede secarse en exceso o presentar un pequeño contenido de humedad, por lo que la energía necesaria para que ocurra esta migración del agua depende del producto en particular. La influencia de la temperatura es crítica para este proceso, por lo que existe una temperatura máxima disponible para cada producto, la cual es por lo general 15- 20 °C más alta que la temperatura ambiente (Murthy, 2009).

Sin embargo, este proceso presenta varias desventajas, entre las que se incluye la contaminación por polvos externos, insectos, roedores, pájaros, falta de secado o secado en exceso de los productos, pérdida de color, sabor, olor, entre otros. Además, este proceso es laboriosamente intensivo, por lo que requiere grandes áreas y es un proceso muy lento (VijayaVenkataRaman et al., 2012; Jairaj et al., 2009; Murthy, 2009).

En algunos casos, este tipo de secado no puede ser usado, ya que decolora el producto, disminuye la calidad nutricional y funcional de los productos y ocasiona la pérdida del sabor y el aroma (Murthy, 2009).

Las desventajas del secado al sol han forzado a los productores en muchos países a buscar métodos de secado alternativos que representen una ventaja económicamente efectiva e higiénica de preservar frutas y semillas. En este sentido, el secador solar siendo económicamente efectivo, sin costos para ponerlo en marcha, crea una situación absolutamente higiénica para la conservación de las frutas, por lo que la introducción de los secadores solares puede reducir las pérdidas de las cosechas y mejorar significativamente la calidad de los productos en comparación con los métodos indirectos tradicionales de secado solar. Además, este tipo de secado representa una alternativa al uso de combustibles fósiles para mitigar la emisión de gases de efecto invernadero (Pirasteh et al., 2014; VijayaVenkataRaman et al., 2012; Jairaj et al., 2009).

Si se considera la rápida disminución de las fuentes de combustibles naturales y debido al alza de los precios de los combustibles fósiles, se espera que el secado solar tecnificado se convierta en una herramienta indispensable en el futuro para pequeños, medianos y grandes productores.

El secado solar térmico

En el secado solar térmico, se calienta grandes volúmenes de aire por medio del sol para hacerlo pasar sobre los productos para remover y eliminar la humedad. Aquellos equipos que usan la energía solar para calentar el aire y/o agua para secar los productos agropecuarios son conocidos como secadores solares. Un secador solar minimiza casi todos los problemas que enfrentan los productores con el secado natural al sol de manera directa y por tanto mejora la calidad de los productos finales (Murthy, 2009).

En un secador solar térmico, la cámara consiste en un espacio en donde se colocan anaqueles o mallas sobre las que se extiende el producto y a través del cual se hace circular aire caliente que pasa a través de éstas y la humedad del producto sale a la atmósfera, por diferencia de temperatura (Murthy, 2009). Dado que el consumo de energía es una de las consideraciones más importantes en los sistemas de secado (Pirasteh et al., 2014), el aire caliente puede ser recirculado para ahorrar energía (Murthy, 2009).

Además, al introducir ciertas características técnicas adicionales como sistemas de control para monitorear la temperatura del aire de secado y la humedad dentro de la cámara de secado, es posible incrementar la calidad de los productos para alcanzar los estándares de los mercados internacionales (Jairaj et al., 2009).

Una desventaja del secado solar térmico, si se usa como única fuente para el secado, es que la radiación electromagnética no siempre está disponible en la magnitud que se necesita y una opción para resolver esta situación son los secadores solares híbridos, en donde la energía solar se combina con otras fuentes energéticas convencionales o no (tales como los combustibles fósiles, biomasa o electricidad) como una fuente alterna a la energía solar para abordar esta desventaja (Pirasteh et al., 2014).

En general, los productores capaces de realizar inversiones moderadas pueden escoger los secadores solares de acuerdo con sus requerimientos individuales. Sin embargo, para motivar a los pequeños y medianos productores a usar secadores solares térmicos, es necesario desarrollar un secador solar convencional sencillo, efectivo, económico y multipropósito capaz de secar una variedad de productos agrícolas a gran escala (Jairaj et al., 2009).

Sobre la base de lo anteriormente expuesto, el Grupo de Investigación en Sistemas Térmicos Solares para la Agricultura, de la Sede Regional San Carlos, del Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR), adscrito al programa de “Doctorado en Ciencias Naturales para el Desarrollo” (DOCINADE), con el apoyo de la Vicerrectoría de Investigación y Extensión y, el Programa de Regionalización Universitaria (PUR) del ITCR, el Ministerio de Agricultura (MAG) y, la Fundación para el Fomento y Promoción de la Investigación y la Transferencia de Tecnologías Agropecuarias de Costa Rica (FITTACORI), se han planteado varios proyectos que han logrado el financiamiento necesario y básico, para diseñar, construir y evaluar sistemas de secado solar térmico híbrido en la Región Huetar Norte.

El Grupo de Investigación se enfocó en revisar la información disponible al respecto, el estado del arte del proceso de transformación sin afectar la calidad y las propiedades sensoriales del producto y así para mejorar la eficiencia del proceso de secado y reducir la huella de carbono.

Metodología

La idea del diseño de un secador solar híbrido para productos agrícolas de la Región Huetar Norte nació a raíz de una capacitación sobre el uso de la energía solar en explotaciones agrícolas a un grupo de productores de cacao de la zona de

Guatuso, específicamente en el poblado de Katira, todos ellos afiliados a la Asociación de Productores Agroambientalistas de Cacao (ASOPAC).

Dado el interés de estos productores, se propuso el proyecto al Programa Universitario de Regionalización del ITCR y a FITTACORI. Ambas instituciones aprobaron el proyecto "Aplicación de tecnologías térmicas solares para el secado del cacao (*Theobroma cacao* L.) en la Región Huetar Norte de Costa Rica".

Para implementar los sistemas de secado solar en la Región Huetar Norte fue necesario conocer las condiciones de trabajo de los productores de la zona para adaptar cada uno de estos sistemas a sus necesidades. Por lo tanto, se inició con el estudio de las posibles necesidades que éstos tenían en su cadena de producción de cacao para lograr una mayor eficiencia y calidad en los productos que generan.

Costa Rica se encuentra en la región del Neotrópico, por lo que presenta un clima tropical que se caracteriza por una intensa actividad lluviosa durante todo el año. Si nos ubicamos geográficamente en la Región Huetar Norte, ésta presenta un clima tropical seco y húmedo que genera precipitaciones entre 2000 y 5000 mm/año, lo cual dificulta el desarrollo óptimo de los procesos de transformación de los productos agrícolas debido a los altos porcentajes de humedad. De manera que se tiene que disponer de secadores pasivos y activos, que sean capaces de mitigar esos efectos climáticos en el proceso de secado y deshidratación.

Propuesta de los secadores pasivos y activos

Secador pasivo

El secador pasivo consta de un colector solar por el que ingresa el aire a temperatura ambiente (T_0), la cual se incrementa conforme asciende sobre el sistema (T_i) e ingresa a la cámara de secado para pasar en medio de las bandejas con producto hasta salir por la parte superior del secador (Figura 1).

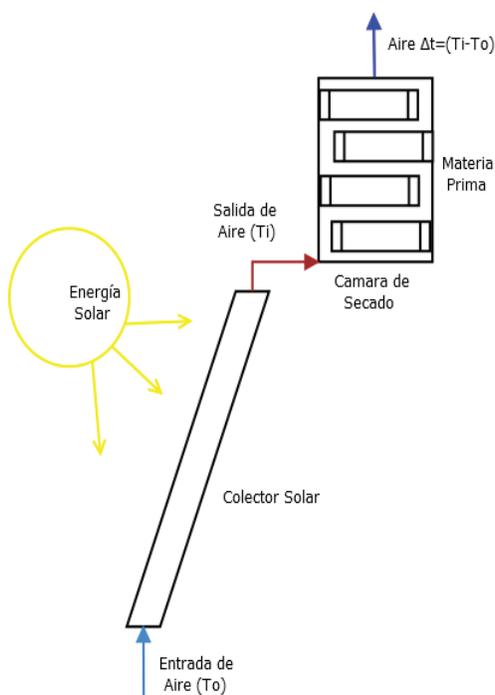


Figura 1. Diagrama de recorrido del aire por el sistema del secador pasivo.

Con la modalidad de secado pasivo es importante mencionar las siguientes ventajas con respecto al secado al aire libre:

- 1- Mayor concentración de energía que a su vez genera un secado más rápido, dado que el diferencial de temperaturas [$\Delta T = (T_i - T_o)$] hace que el aire se caliente y tenga un contacto directo con el producto que se desea secar.
- 2- Mayor inocuidad de los productos, dado que se eliminaría por completo la contaminación por polvo, insectos, roedores, aves, así como los altos porcentajes de humedad a los que está expuesta la materia prima al aire libre.
- 3- Mayor facilidad de transporte, dado que el secador de uso pasivo también tiene la característica de ser portátil, por lo que se puede trasladar de un lugar a otro sin la necesidad de estar trasegando grandes cantidades de materia prima que se desea secar y procesar.
- 4- Fácil uso y manejo, ya que no tiene grandes tecnologías en donde se requiera de técnicos para su uso. El secador está dotado de instrumentos de uso convencional para el control de temperaturas que requieren de un conocimiento básico para sus lecturas.
- 5- El mantenimiento del secador es muy sencillo dado que está confeccionado de materiales resistentes al óxido y se puede someter a lavados sin ningún tipo de cuidado, lo cual genera mayor confianza al productor para mantener el secador en las condiciones más adecuadas para el manejo de productos alimenticios y para mantener la calidad requerida para el consumo.

Secador activo, solar híbrido forzado

El secador forzado consta de varios módulos que, al unirlos, se logra un óptimo secado de los productos agrícolas que se desea procesar (Figura 2). El secado solar forzado consta también de un sistema auxiliar que utiliza gas licuado (LP), que ayuda a mantener la temperatura óptima dentro de la cámara cuando la energía del sol no es suficiente. A su vez, cuenta con otro sistema solar térmico forzado de agua caliente para ser usado durante la noche.

Este prototipo es conocido como secador solar híbrido forzado, dado que durante el día utiliza la energía solar y cuando esta energía no es suficiente, el sistema de calentamiento por gas entra en funcionamiento para generar la temperatura necesaria y asegurar un secado uniforme a través de un sistema de control térmico o termostato.

El prototipo consta de una serie de colectores solares para aire caliente, los cuales captan la energía solar y la transfieren al aire (T_o) que circula de manera forzada por las tuberías del mismo. Al realizar esta transferencia de energía, el aire alcanza una mayor temperatura (T_i), la cual es conducida hasta la cámara de secado en donde el aire es distribuido a lo largo y ancho del secador para así obtener uniformidad en el proceso de secado de los productos agrícolas.

Una vez ingresado el aire a la cámara de secado, unos abanicos se encargan de hacer circular el aire de manera uniforme dentro de la misma y conforme se capta la humedad de la materia prima, ésta se condensa y se expulsa fuera de la cámara por un sistema de tuberías. El proceso de circulación del aire es realizado a través de una bomba que hace ingresar el aire al colector solar para lograr durante el día un proceso continuo.

Este secador solar dispone de un sistema térmico auxiliar que consiste en aprovechar la radiación del día por medio de un colector solar para calentar el agua de los tanques de almacenamiento, la cual entra en funcionamiento en aquellos casos en que la temperatura dentro de la cámara sea menor a la requerida para el secado de los productos. Este sistema térmico solar forzado híbrido está formado por un serpentín por donde circula agua caliente que transfiere el calor al aire que se encuentra dentro de la cámara de secado. Si la temperatura del agua almacenada en los tanques es menor a la requerida para la transferencia de temperatura, entonces entra en funcionamiento el sistema auxiliar a gas LP que mantendrá la cámara a la temperatura requerida.

El secador solar está equipado con un sistema de control de datos que registra la temperatura de diferentes zonas del secador para un óptimo funcionamiento del mismo.

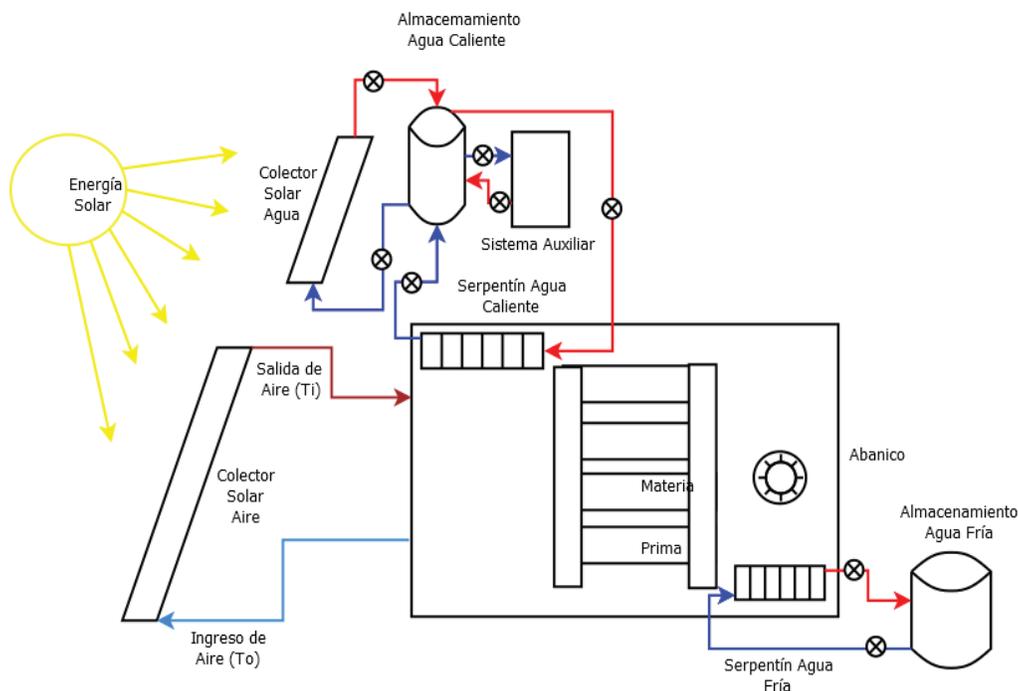


Figura 2. Diagrama de recorrido del sistema de secado forzado híbrido

Este tipo de secado muestra las siguientes ventajas:

- 1- El secado de la materia prima se realizará en menor tiempo, dado que se tiene un colector solar que capta la energía requerida. Si esta temperatura no es suficiente, se cuenta con dos sistemas adicionales que pueden generar el calor necesario para el óptimo funcionamiento.
- 2- El secado de los productos agrícolas se puede realizar en jornadas continuas de 24 horas, dado que se cuenta con sistemas que permiten procesar la materia prima tanto de día (aprovechando la energía del sol) como de noche (con los depósitos de agua calentada por medio de energía solar) y por último el sistema auxiliar que funciona con gas LP.
- 3- La calidad e inocuidad de los productos es mejor en comparación con el secado al sol de manera directa, dado que la cámara de secado es completamente hermética y mantiene los productos totalmente aislados de los posibles contaminantes como insectos, roedores, aves y polvo o bien, protegidos de la misma humedad relativa.
- 4- El uso y manejo de este secador es económico, dado que requiere de poca mano de obra, lo que disminuye los costos de operación.
- 5- El mantenimiento del secador no tiene gran complejidad, puesto que los materiales que se emplean en su confección son de alta resistencia y durabilidad.
- 6- El secador solar tiene un sistema de recolección de datos en tiempo real, lo cual permite al operador tener información disponible de manera continua, que le permita realizar acciones correctivas, en caso de presentarse algún problema durante el proceso de secado.
- 7- Dispone de un sistema normal de termómetros que pueden ser visualizados, desde el exterior para el control de la temperatura

Resultados

Se cuenta con un prototipo del secador propuesto por el Grupo de Investigación (Figura 3) y apoyado de manera voluntaria por una empresa privada. Este prototipo ha permitido realizar pruebas de secado de diferentes productos agrícolas. El tiempo del proceso de secado oscila entre 40 - 48 horas, alcanzando contenidos de humedad de 12% en piña, 11% en café, 7% en cacao, 12% en cúrcuma, 7% en jengibre, 8% en ayote, 11% en frijoles, los cuales se encuentran dentro de los rangos permitidos por las normas internacionales (INCAP, 2012). Sin embargo, se continúa trabajando en la definición de los detalles y en la estandarización de los procesos de secado de cada uno de los productos.



Figura 3. Prototipo de secador solar desarrollado por el Grupo de Investigación en Sistemas Térmicos Solares para la Agricultura, Sede Regional San Carlos, Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Conclusiones

El uso de la energía solar es una opción viable, a través de sistemas combinados, en secadores, tanto pasivos como activos, para lograr el secado, deshidratación y la conservación de los productos agrícolas.

La energía electromagnética emanada del sol es ilimitada y está disponible en promedio de 200 - 500 W/m² en la mayor parte del mundo. El secado solar con estos sistemas tiene un efecto positivo económico, ambiental y socialmente, por lo que puede ser usado por cooperativas, asociaciones de productores, pequeños y medianos productores y también por grandes empresas.

El secado solar contribuye a la mitigación de los gases de efecto invernadero, lo cual permite reducir el efecto del cambio climático a nivel global.

Bibliografía

- Instituto de Nutrición de Centro América y Panamá (INCAP). 2012. Tabla de composición de alimentos de Centroamérica. 2a edición. 128 pp.
- Jairaj, K.S.; Singh, S.P.; Srikant, K. 2009. A review of solar dryers developed for grape drying. *Solar Energy* 83: 1698-1712.
- Murthy, M.V.R. 2009. A review of new technologies, models and experimental investigations of solar driers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13: 835-844.
- Pirasteh, G.; Saidur, R.; Rahman, S.M.A.; Rahim, N.A. 2014. A review on development of solar drying applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 31: 133-148.
- VijayaVenkataRaman, S.; Iniyar, S.; Goic, R. 2012. A review of solar drying technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16: 2652-2670.

Estimación de la reducción de gases de efecto invernadero para la implementación de tecnología térmica solar en el proceso de escaldado de pimienta

Oviedo-Ortega, S.¹; Guzmán-Hernández, T.J.²; Obando-Ulloa, J.M.³

¹Instituto Tecnológico de Costa Rica – Programa de Maestría en Gestión de Recursos Naturales y Tecnologías de Producción- Sede Regional de San Carlos, Santa Clara, Florencia, Alajuela –teléfono (506) 8810-3064 – biocr@live.com

²Instituto Tecnológico de Costa Rica – Sede Regional de San Carlos, Santa Clara, Florencia, Alajuela –teléfono (506) 2401-3284 – email: tjguzman@tec.ac.cr

³Instituto Tecnológico de Costa Rica – Sede Regional de San Carlos, Santa Clara, Florencia, Alajuela –teléfono (506) 2401-3214 – email: jaobando@tec.ac.cr

Introducción

Durante los últimos 50 años, se ha generado una alerta mundial por las altas concentraciones de gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera. Se cree que entre 1960 y 2011, las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) aumentaron aproximadamente un 2,6% anual lo que ha provocado el incremento de 2°C de la temperatura del planeta (Frohmann y Olmos, 2013). Por esta razón, en el V Informe del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) se hace énfasis en detener este incremento, lo que a su vez se convirtió en uno de los principales compromisos de los gobiernos y que fue ratificado en diciembre de 2015 en el Acuerdo de París (IPCC, 2014).

En el 2012 se realizó la estimación de los GEI en Costa Rica, lo que puso en evidencia las principales actividades que generaban más emisiones. Según Corrales (2016), en ese año se emitió un total de 11.250,20 Gigatoneladas, de las cuales un 64% correspondió al sector energía, 16,6% a los residuos, 10,6% a la agricultura y otros usos de la tierra y, 8,7% a los procesos industriales.

Por otro lado, el IPCC y el Protocolo de Kyoto han determinado como principales GEI (aparte del CO₂), el metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O), hidrofluorocarbonos (HFC), perfluorocarbonos (PFC) y hexafluoruro de azufre (SF₆) (IMN, 2009; Jantzen y Raaz, 2015), de los cuales, los dos primeros junto con el CO₂ son emitidos por el consumo de gas licuado de petróleo (LP) y electricidad, por lo que una de las acciones para mitigar sus emisiones es la implementación de tecnología térmica solar.

Para la reducción de parte de los gases de efecto invernadero, se vienen aplicando tecnologías térmicas y fotovoltaicas en sistemas agropecuarios de la zona Huetar Norte, de acuerdo con Guzmán, Araya, Obando, Rivero, y Castro (2016), estas tecnologías han permitido un ahorro de aproximadamente 70% de la factura económica en unidades productivas,

como es el caso de la planta procesadora de la Asociación de Productores Lácteos LLAFRAK en Santa Rosa de POcosol, al comparar el uso de esta tecnología con un sistema convencional de generación energética (leña, gas o electricidad). Además, de acuerdo con estos autores, aquella organización que opte por instalar esta tecnología recupera la inversión con el ahorro de energía en aproximadamente 7 años, teniendo en cuenta que la vida útil del equipo es de 25 a 30 años. Los beneficios de esta tecnología renovable son la de proveer a la organización interesada autosuficiencia energética, reducir las emisiones de GEI, debido al escaso consumo de combustibles derivados de petróleo, cuyo precio aumenta de forma periódica, afectando gravemente los costos operativos.

Dadas las ventajas de la implementación de estas tecnologías renovables mencionadas anteriormente, el Grupo de Investigación en Sistemas Térmicos Solares para la Agricultura del Programa de Doctorado en Ciencias Naturales para el Desarrollo (DOCINADE) de la Sede Regional San Carlos del Instituto Tecnológico de Costa Rica (SSC-ITCR) recibió la solicitud por parte del Instituto de Desarrollo Rural (INDER) para el mejoramiento del proceso de pimienta en la planta procesadora de la Asociación de Productores de Pimienta de Sarapiquí (APROPISA) en El Roble de la Virgen de Sarapiquí. Esta asociación cuenta con alrededor de 19 asociados activos y próximamente se asociarán 26 productores jóvenes, quienes reciben capacitación técnica por parte del Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG) y del INDER. Esto indica que la producción en la planta procesadora aumentará y, por ende, se requiere un proceso eficiente que permita reducir las emisiones de los GEI.

Por tal motivo, el objetivo de este trabajo consiste en estimar la reducción de los gases de efecto invernadero en la planta de la Asociación de Productores de Pimienta de Sarapiquí (APROPISA) tras la implementación de la tecnología térmica solar en el proceso de escaldado de pimienta.

Metodología

En octubre de 2016, un equipo del Grupo de Investigación en Sistemas Térmicos Solares para la Agricultura del (DOCINADE, SSC-ITCR) realizó una visita a la planta procesadora de pimienta de APROPISA, a petición del INDER, para analizar la situación en la que se encontraba el proceso productivo de dicha planta. Tras un análisis del proceso, equipo usado y entrevistas a los operarios y personal administrativo, se determinó que uno de los problemas que se debía resolver para mejorar la eficiencia de este proceso consistía en la implementación de la tecnología térmica solar en el escaldado de la pimienta.

Además, el equipo de trabajo indicó a APROPISA y al INDER que una vez solucionado este problema, se debía determinar la disminución de la huella de carbono, de tal forma que sirva como distintivo comercial o ventaja competitiva en el mercado de pimienta, tanto a nivel regional, nacional e internacional.

Para determinar esta reducción, se analizó los registros de facturación por concepto de compra de gas LP del período enero a diciembre del 2016 para estimar las emisiones de gases de efecto invernadero del año 2016, según la ecuación 1 de la Norma INTE-ISO 14064:1 (Dirección de Cambio Climático [DCC], 2014).

$$\text{Emisiones de GEI (t GEI)} = \text{DA} \times \text{FE} \times \text{PCG} \text{ (Ecuación 1)}$$

donde:

DA: Dato de la actividad [cantidad de combustible consumido (kW/h, kg, entre otros)] que determina el grado de las emisiones de GEI generadas por una actividad específica.

FE: Factor de emisión de GEI por cada unidad de parámetro de la actividad. Los factores varían según la región y la actividad.

t GEI: Valor total de cualquier GEI

PCG: Capacidad de retención de calor de una unidad con base en la masa del GEI específico, durante un período de tiempo (ejemplo, 100 años) [Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), 2007; Organización Internacional de Normalización (ISO, por sus siglas en inglés), 2006].

En el presente trabajo se aplicó los factores de emisión y el potencial de calentamiento (Cuadro 1), establecidos por el Instituto Meteorológico Nacional (IMN, 2016).

Cuadro 1. Factor de emisión y potencial de calentamiento global para gas LP

Gas	Factor de emisión (g)	Potencial de calentamiento global (CO _{2e})
Dióxido de carbono (CO ₂)	1611000	1
Óxido nitroso (N ₂ O)	0,000002745	310
Metano (CH ₄)	0,000139	21

Fuente: Instituto Meteorológico Nacional, 2016.

Para estimar la reducción de las emisiones de GEI que se lograría con la implementación de un equipo térmico solar para el escaldado de pimienta, se utilizó un valor teórico 5 430,16 kWh/año de energía producida por un equipo térmico forzado híbrido con sistema auxiliar de gas en la planta procesadora de lácteos LLAFRAK (Sánchez, 2016), un poder calorífico de 0,02554 TJ/m³ y los valores del cuadro 2.

Cuadro 2. Equivalencias utilizadas para la conversión de kWh a kg de gas LP

Unidad	Equivalencia
1 kWh	3,6·10 ⁶ J
1 TJ	10 ¹² J
1 m ³ de gas LP	545 kg
1m ³	1000 L

Fuente: Chavarría, Molina, Gamboa y Rodríguez, 2016; Leiva, Alvarado, Camacho, Castillo y Chin-Wo, 2003.

Resultados

De acuerdo con las entrevistas a los miembros y a los trabajadores de la planta procesadora de APROPISA, se consideraba que era necesario cambiar la técnica de secado de la pimienta para hacer el proceso más eficiente y generar un ahorro a la empresa, ya que el secador utilizado tiene una capacidad para 4 T de pimienta.

En la visita realizada por el equipo del DOCINADE-SSC-ITCR, se observó que antes de secar la pimienta, ésta debe ser escaldada. Para este proceso, la pimienta se colocaba en canastas metálicas con capacidad para 25 kg, las cuales se introducían en contenedores metálicos con agua a 80 °C que eran colocados sobre quemadores de gas LP y que permanecían encendidos de forma permanente (Figura 1), lo que afectaba la seguridad e higiene laboral de la planta procesadora.

Dadas estas condiciones, el proceso productivo debía realizarse en batches o tandas, lo cual requería alrededor de 35 h para escaldar la cantidad de pimienta mínima necesaria para hacer funcionar el secador (2 t), periodo durante el cual la pimienta se mantenía en reposo dentro del secador. Este tiempo de espera provocaba pérdida en la calidad sensorial del producto y altos costos operativos, lo que a su vez afectaba la eficiencia y productividad de la planta procesadora. Por lo

tanto, se determinó que el proceso de escaldado era la operación que requería intervención para mejorar las condiciones productivas de la planta procesadora de APROPISA.



Figura 1. Proceso de producción de pimienta negra en la planta de APROPISA. **(A)** Pimienta verde almacenada en contenedores plásticos con agua. **(B)** Canastas metálicas con pimienta verde (25 kg) lista para ser escaldada. **(C)** Introducción y retiro de las canastas metálicas en los contenedores con agua a 80°C. **(D)** Escurrido de la pimienta tras el escaldado. Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con estas condiciones, se determinó que en 2016 se consumió un total de 7 754,58 litros de gas LP, lo que equivale a 12,50 ton de dióxido de carbono, 0,007 ton de óxido nitroso y 0,023 ton de metano, para un total de 12,52 ton CO₂e. Además, de acuerdo con las predicciones de la Junta Directiva de APROPISA, se espera que el volumen de procesamiento pueda incrementarse en los próximos años, dada la tendencia de la producción de los agricultores asociados a APROPISA, puesto que en los primeros meses de 2017 se ha registrado un incremento del 48% si se le compara con los años anteriores.

Por esta razón, el equipo de investigación del DOCINADE-SSC-ITCR recomendó la implementación de un sistema térmico solar híbrido para el escaldado de la pimienta, con lo cual se mejoraría la productividad y el impacto ambiental de APROPISA.

De esta forma, el INDER financió la instalación de esta tecnología en esta planta procesadora, la cual se terminó en marzo de 2018 (Figura 2). Este sistema consiste en 14 paneles solares con capacidad para calentar 3 000 L de agua, que son los que se requieren en APROPISA para el proceso de escaldado y al igual que en otros equipos similares (Guzmán-Hernández et al., 2017), éste cuenta con un sistema auxiliar de gas LP que aumenta la temperatura del agua solo en aquellos casos en que la radiación solar no sea capaz de hacerlo.



Figura 2. Sistema térmico solar híbrido forzado instalado en la planta procesadora de la Asociación de Productores de Pimienta de Sarapiquí para el escaldado de la pimienta verde. Fuente: Elaboración propia

Los primeros resultados obtenidos hasta el momento han permitido optimizar el tiempo de escaldado de 1 t de pimienta verde en 1,5 h. Además, se espera que con la instalación del sistema térmico solar híbrido forzado se reduzca el consumo anual de gas LP (3 825 L), lo que equivaldría a 6,17 tCO₂e anuales que se dejarían de emitir a la atmósfera. Sin embargo, esta reducción aún debe comprobarse, por lo que se está recopilando los datos de consumo de gas LP tras la instalación de este equipo, por lo que se espera contar con esta información en el corto plazo.

Conclusión

La tecnología térmica solar no solo es una herramienta que permite reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, sino que también permite mejorar la productividad de las empresas. Además, con esta tecnología se lograría alcanzar los objetivos que se ha propuesto el gobierno para hacer de Costa Rica un país carbono neutral. El cálculo del valor teórico permite predecir la cantidad de GEI que se podría reducir (en el caso de este estudio fue de un 50%). Sin embargo, este valor solo se podrá corroborar una vez que se tengan registros de la operación, de al menos un año, del equipo instalado en APROPISA.

Bibliografía

- DCC, (Dirección de Cambio Climático). (2014). Guía para diseñar un manual que permita a las PYMES realizar Declaraciones de carbono neutralidad bajo la norma INTE 12.01.06. Recuperado a partir de www.cambioclimaticocr.com
- Frohmann, A., y Olmos, X. (2013). Huella de carbono, exportaciones y estrategias empresariales frente al cambio climático. Recuperado a partir de <http://repository.eclac.org/handle/11362/4101>
- Guzmán-Hernández, T.J.; Araya-Rodríguez, F.; Obando-Ulloa, J.M.; Rivero- Marcos, M.; Castro-Badilla, G. 2017. Evaluación de sistemas térmicos y fotovoltaicos solares en unidades de producción agropecuaria, Región Huetar Norte, Costa Rica. *Agron. Mesoam.* 28 (3): 535-548. ISSN 2215-3608, doi:10.15517/ma.v28i3.26442
- Guzmán, T.; Araya, F.; Obando-Ulloa, J.; Rivero, M.; Castro, G. 2017. Uso de tecnología solar en actividades agropecuarias de la Región Huetar Norte de Costa Rica. Parte I. Unidad de Publicaciones: Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago. 102 p. ISBN: 978-9968-641-99-9.
- IMN, (Instituto Meteorológico Nacional, C. R.). (2009). Guía para la elaboración de acciones en cambio climático. Recuperado a partir de http://www.digeca.go.cr/sites/default/files/documentos/guia_elaboracion_inventario_gases_efecto_invernadero_v1.0_0.pdf
- IMN, (Instituto Meteorológico Nacional, C. R.). (2016). *Factores de emisión gases de efecto invernadero* (6 ed). Recuperado a partir de <http://cglobal.imn.ac.cr/documentos?catid=8>
- IPCC, (Intergovernmental Panel on Climate Change). (2014). Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp. Recuperado a partir de https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/SYR_AR5_FINAL_full_wcover.pdf
- Jantzent, F., y Raaz, D. A. (2015). *Estrategias de desarrollo del sistema de gestión ambiental de monitoreo de emisiones de gases de efecto invernadero. Caso estudio: Facultad de Ciencias Económicas y Sociales de la Universidad de Carabobo, Campus Bárbula* (Tesis de grado). Recuperado a partir de <http://www.riuc.bc.uc.edu.ve/handle/123456789/3524>
- Leiva, C., Alvarado, F., Camacho, A., Castillo, G., y Chin-Wo, A. (2003). Situación del gas licuado de petróleo en Costa Rica. Recuperado a partir de <http://www.dse.go.cr/es/03Publicaciones/04Tecnicas/situacionGLP.pdf>

- Organización Internacional de Normalización. (2006). Gases de efecto invernadero — Part 1: Especificación con orientación, a nivel de las organizaciones, para la cuantificación y el informe de las emisiones y remociones de gases de efecto invernadero. Recuperado el 21 de junio de 2018, a partir de <https://www.iso.org/obp/ui#iso:std:iso:14064:-1:ed-1:v1:es:fn:1>
- Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC). (2007). IPCC Fourth Assessment Report: Climate Change 2007. Recuperado el 21 de junio de 2018, a partir de https://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/es/tssts-2-5.html
- Sánchez, M. F. (2016). *Área Académica Agroforestal Maestría en Gestión de Recursos Naturales y Tecnologías de Producción* (Tesis de maestría). Recuperado el 10 de junio, a partir de <http://solarhuetarnorte.org/wp-content/uploads/2016/09/Mar%C3%ADa-Fernanda-S%C3%A1nchez-R.-Tecnolog%C3%ADa-Solar-H%C3%ADbrida.-Documento-Final-002.pdf>

Familias térmicas solares para procesamiento de productos agropecuarios y agroindustriales en la región Huetar Norte de Costa Rica: programa local piloto

Solar thermal equipments for the processing of agricultural and agroindustrial products in the Northern Huetar Region of Costa Rica: Local pilot program

Tomás de Jesús Guzmán-Hernández^{1,*}; Javier Mauricio Obando Ulloa²; Freddy Araya Rodríguez³; Guillermo Castro Badilla⁴

¹ Doctor en Ingeniería Agronómica. Tel. (506) 2401-3284. Correo electrónico: tjguzman@itcr.ac.cr. Programa de Doctorado en Ciencias Naturales para el Desarrollo (DOCINADE), sede regional San Carlos, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Costa Rica.

² Doctor en Tecnología Agraria y Alimentaria. Tel. (506) 2401-3214. Correo electrónico: jaobando@itcr.ac.cr. Programa de Doctorado en Ciencias Naturales para el Desarrollo (DOCINADE), sede regional San Carlos, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Costa Rica.

³ Doctor en Ciencias. Tel. (506) 2401-3240. Correo electrónico: faraya@itcr.ac.cr. Programa de Doctorado en Ciencias Naturales para el Desarrollo (DOCINADE), sede regional San Carlos, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Costa Rica

⁴ Ingeniero en Electrónica. Tel. (506) 2401-3040. Correo electrónico: gucastro@itcr.ac.cr. Escuela de Ingeniería Electrónica, sede regional San Carlos, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Costa Rica

* Autor correspondiente

Resumen

En las operaciones de procesamiento y conservación de productos agropecuarios se aplica diferentes fuentes de energía, cuyo precio ha aumentado en los últimos años. Con el apoyo del programa local piloto de uso de energía solar en la región Huetar Norte, en conjunto con el Instituto Tecnológico de Costa Rica y el Sector Agropecuario, se ha evaluado la aplicación de diversos sistemas térmicos solares en pequeñas y medianas explotaciones agrícolas para sustituir los métodos tradicionales de generación de energía por sistemas limpios para mejorar las condiciones productivas y disminuir la huella de carbono local. Por esta razón, se ha diseñado y evaluado sistemas termosifónicos solares híbridos con un auxiliar eléctrico para la esterilización de equipos de ordeño, así como sistemas térmicos solares forzados híbridos con agua y gas LP para la esterilización y pasteurización de leche o para el secado de productos agrícolas con agua, aire caliente y gas LP y un secador solar pasivo para diferentes tipos de productos agrícolas. Los resultados de la evaluación de estos sistemas

se obtuvieron por medio de la ubicación de termopares en lugares claves dentro de los sistemas y fueron almacenados en el espacio cibernético para facilitar su acceso mediante cualquier dispositivo electrónico. Estos resultados han permitido comprobar la disminución de los costos operativos relacionados con las facturas energéticas, el mejoramiento de la eficiencia de los diferentes procesos y la disminución de la huella de carbono de estas explotaciones, lo que representaría una ventaja competitiva en el mercado regional, nacional e internacional.

Palabras claves: Agroindustria, energía solar, sistemas solares térmicos, sistemas solares termosifónicos, secado solar

Abstract

Different energy sources are applied in the operations used for processing and preserving food and other agricultural products. The Technology Institute of Costa Rica and the agricultural sector of Costa Rica has supported the Local Pilot Program for the use of solar energy in the Northern Huetar Region of Costa Rica for the application and evaluation of different solar thermal systems in small and medium-sized agricultural units to replace the traditional methods of energy generation for clean production systems, reduce the local carbon footprint and improve production conditions. For this reason, in the Northern Huetar Region of Costa Rica, hybrid solar thermosiphonic systems with an auxiliary electric system have been designed and evaluated for the sterilization of milking equipment; hybrid solar thermal systems with water and LP gas for sterilization and pasteurization of milk; hybrid forced solar thermal systems with water, hot air and LP gas and a passive solar dryer for different types of agricultural products. The results of the evaluation of these systems were obtained by setting thermocouples in key places inside the systems and they were stored in the cybernetic space to facilitate their access through any electronic device. These results has allowed verify the decrease in operating costs related to energy bills, the efficiency improvement of the different processes and the carbon footprint decreasing of these farms, which would represent a competitive advantage in the regional, national and international markets.

Key words: Agroindustry, solar drying, solar energy, thermal solar system, thermosiphonic solar systems

Introducción

La energía ha tenido un papel fundamental no solo para impulsar el desarrollo de los países, sino para generar el bienestar de la población en todos los niveles [1], por lo que el abastecimiento de energía cumple un rol importante en el funcionamiento de cualquier actividad productiva de un país.

En las últimas décadas, la base de generación de energía ha utilizado recursos no renovables, principalmente combustibles fósiles (carbón, petróleo y gas); sin embargo, el encarecimiento de estos y sus derivados, los altos índices de emisiones contaminantes y los impactos ambientales irreversibles que han generado en el planeta, han conducido a los países a evaluar la llamada matriz energética (conjunto de energías utilizadas) con el propósito de encontrar alternativas menos contaminantes [2].

Esta necesidad del cambio en la matriz se formalizó con el uso de energías limpias, también llamadas *renovables*, para sustituir parte del consumo de energías fósiles y a la vez, impulsar el compromiso con el desarrollo sostenible por medio de cultivos energéticos o fuentes de energía renovables que hasta el momento no habían sido aprovechadas [1] [2] con el fin de minimizar los costos de producción, principalmente de aquellos que se reflejan en el pago de la factura energética [1].

En torno al tema, y de acuerdo con el VI Plan Nacional de Energía 2012-2030 del Ministerio de Ambiente, Energía y Telecomunicaciones (MINAET), Costa Rica presenta un potencial teórico solar de 10.000 MW aunque su grado de utilización es mínimo [3]. Dado lo anterior, el MINAET insta a promover programas de ahorro energético en los macroconsumidores, por lo que ha focalizado el estudio de las oportunidades y el potencial que tiene la región Huetar Norte con fuentes de energía alternativas.

Considerando que dicha zona es una de las mejores en cuanto a radiación solar en Costa Rica [4], el Grupo de Investigación en Sistemas Térmicos Solares para la Agricultura del Programa de Doctorado en Ciencias Naturales para el Desarrollo (DOCINADE) de la Sede Regional San Carlos del Instituto Tecnológico de Costa Rica (SSC-ITCR) ha decantado a favor de la tecnología solar como alternativa viable y efectiva, con el fin de generar la energía necesaria para las pequeñas empresas de la zona para beneficio propio y como distintivo comercial, la cual represente una ventaja competitiva en el mercado regional, nacional e internacional.

Partiendo de lo mencionado, el objetivo de este trabajo consiste en evaluar la aplicación de diversos sistemas térmicos solares en pequeñas y medianas explotaciones agrícolas para sustituir los métodos tradicionales de generación de energía por sistemas limpios para mejorar las condiciones productivas y disminuir la huella de carbono local.

Materiales y métodos

Considerando el informe emitido por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) en el que se afirma que la ganadería es responsable del 18% de las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero (GEI) [5] –por encima del transporte- y partiendo de que en el cantón de San Carlos (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 generan más del 50% de la producción nacional (0,6 millones de kilogramos de leche), el grupo de investigación se dio a la tarea de aplicar tecnologías que minimicen el impacto generado por el consumo eléctrico de las plantas agroindustriales en las que se desarrolla los procesos productivos del sector ganadero y lechero que inciden negativamente en la huella de carbono local.

Para lograrlo, se desarrolló un sistema térmico solar para para el calentamiento de agua para la desinfección de los equipos de ordeño y la pasteurización de leche, que cuenta con paneles solares térmicos, conectados a un tanque acumulador con capacidad para 302,40 L de agua, que posee un sistema eléctrico auxiliar que se activa en caso de que la radiación solar no sea suficiente para que el agua alcance la temperatura requerida (70 °C). El tanque también tiene tres previsiones internas para la conexión de termopares para registrar los datos de captación de energía y el uso del agua, tal como lo describe [6]. Estos sistemas han sido instalados y evaluados, tanto en la lechería de la SSC-ITCR como en la lechería de la Escuela Técnica Agrícola e Industrial (ETAI) y en la planta procesadora de las Asociaciones de Productores Lácteos LLA-FRAK y San Bosco [7].

Gracias a la capacitación que se impartió a los productores afiliados a la Asociación de Productores Agroambientalistas de Cacao de Guatuso (ASOPAC) sobre el uso de estos sistemas en explotaciones agrícolas, surgió la idea de aplicar esta tecnología al secado de productos agrícolas, de modo que se los productos tengan mayor eficiencia y calidad; por tanto, se diseñó dos sistemas de secado solar, uno de ellos híbrido con circulación forzada de aire y otro con circulación pasiva [8].

Una vez instalados todos los sistemas, se procedió al registro de la masa, tanto de agua fría y agua caliente como de aire frío y caliente, cálculo del diferencial (ahorro) de electricidad del sistema en función del uso de los sistemas solares, balance energético de los sistemas en función de la zona, determinación de la eficiencia energética y la disminución de los costos de producción, cálculo de la disminución de la huella de carbono por medio del producto del valor de los kWh anuales ahorrados y medidos por el sistema y el valor medio de Kg de CO₂ emitidos en la generación eléctrica, según se describe en [2] y [6].

Resultados y discusión

De acuerdo con [9], la región Huetar Norte es una de las dos mejores zonas con radiación solar en Costa Rica, la cual presenta una producción máxima promedio de 0,25 kWh, específicamente cuando el sol está en el cenit (entre las 11 y 12 h; figura 1).

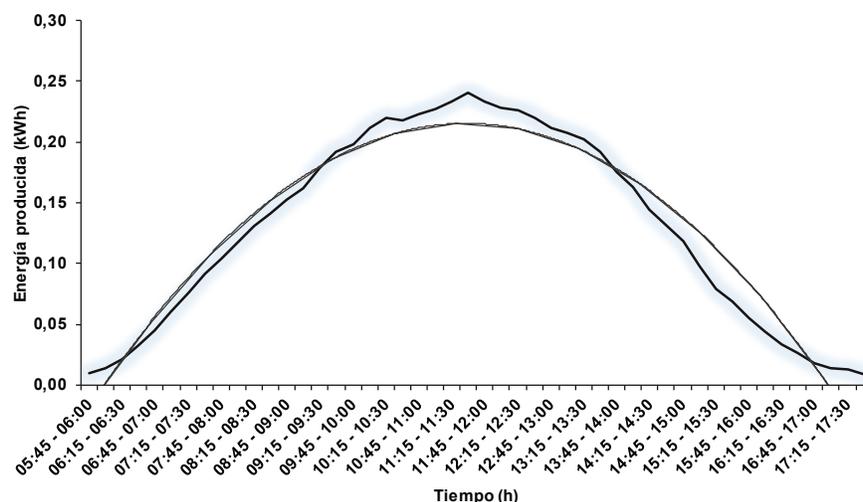


Figura 1. Producción horaria promedio de energía solar durante el día en la región Huetar Norte de Costa Rica, según los datos registrados en el sitio web <https://enlighten.enphaseenergy.com>

Con base en estos resultados, se ha determinado que en esta región es posible generar una producción diaria promedio de energía solar de 7 kWh y una producción mensual promedio de 187 kWh, lo cual ha permitido determinar que los sistemas térmicos solares instalados en LLAFRAK y San Bosco aportaron la mayor cantidad de energía necesaria para las operaciones que se realizan en la planta procesadora (97,75 y 87,81%, respectivamente), mientras que aquellos instalados en la lechería del ITCR-SSC y la ETAI tan solo aportaron 73,51% y 52,84% de la energía necesaria, respectivamente, para alcanzar la temperatura del agua requerida para las operaciones de limpieza, sanitización y pasteurización (Cuadro 1), lo que a su vez ha reducido la emisión de gases de efecto invernadero entre 85% y 99% en las unidades productivas donde se instaló estos sistemas (Cuadro 2).

Cuadro 1. Porcentaje de energía aportada por el sistema solar térmico para las operaciones de sanitización y pasteurización que se realizan en las unidades productivas donde se instaló los sistemas

Unidad productiva	Energía (KWh/mes)			Porcentaje de energía aportada por el sistema térmico solar (%)
	Demandada	Suministrada por el sistema térmico	Suministrada por el sistema auxiliar	
ITCR-SSC	458,70	242,04	216,04	52,84
ETAI	488,15	358,82	129,33	73,51
LLAFRAK	427,89	416,28	9,61	97,75
San Bosco	418,26	367,30	50,99	87,81

Cuadro 2. Porcentaje de reducción de las emisiones de CO₂ registradas en las unidades productivas donde se instaló los sistemas térmicos solares

Unidad productiva	Emisiones de CO ₂ (Kg)		Reducción (%)
	Antes de la instalación de los sistemas	Después de la instalación de los sistemas	
ITCR-SSC	165,00	11,88	92,80
ETAI	48,44	7,11	85,32
LLAFRAK	3855,60	2,25	99,94
San Bosco	3855,60	11,93	99,69

Con respecto de los sistemas térmicos solares de secado para productos agrícolas, se comparó el proceso de secado de cacao y frijol tanto en el sistema térmico solar con circulación de aire forzado como en el pasivo: los resultados permitieron determinar que en el sistema con circulación forzada fue más eficiente para alcanzar un porcentaje de humedad similar, puesto que presentó un tiempo de proceso más corto (48 y 40 h, respectivamente) en comparación con el sistema con circulación pasiva (Cuadro 3).

Cuadro 3. Comparación del tiempo de secado de cacao y frijol en dos tipos de sistemas térmicos solares implementados en la región Huetar Norte de Costa Rica

Producto	Sistema térmico solar de secado			
	Circulación forzada de aire		Circulación pasiva de aire	
	Tiempo de proceso (h)	Humedad (%)	Tiempo de proceso (h)	Humedad (%)
Cacao	48	7	122	7,52
Frijol	40	11	168	11,29

Además, otros productos agrícolas sometidos a secado con circulación forzada de aire alcanzaron los porcentajes de humedad permitidos por las normas internacionales [10] en aprox. 40 - 56 h (Cuadro 4).

Cuadro 4. Porcentajes de humedad alcanzados por los productos agrícolas secados en el sistema térmico solar híbrido con circulación forzada de aire

Producto	Tiempo de proceso (h)	Humedad (%)
Ayote	48	8
Café	56	11
Cúrcuma	48	12
Jengibre	48	7
Piña	40	12

Conclusiones

Este estudio ha permitido comprobar que la energía electromagnética emanada del sol es ilimitada y está disponible en promedio de 200 - 500 W/m² en la mayor parte del mundo, por lo que su uso es una opción viable, a través de sistemas combinados para las operaciones agrícolas y la conservación de los productos agropecuarios. Además, el uso de este tipo de energía contribuye no solo a la mitigación de los gases de efecto invernadero para reducir el efecto del cambio climático a nivel global, sino como un distintivo comercial que represente una ventaja competitiva para los productores de la región Huetar Norte en los mercados regionales, nacionales e internacionales.

Agradecimientos

Los autores de este trabajo agradecen a la Vicerrectoría de Investigación y Extensión del Instituto Tecnológico de Costa Rica y a la Fundación para el Fomento y Promoción de la Investigación y Transferencia de Tecnología Agropecuaria de Costa Rica por el apoyo económico a los proyectos VIE 1710-024, VIE 1701-180, VIE 1710-012 y F 0917, respectivamente.

Referencias bibliográficas

- [1] I. Briceño, *et al.* Potencial de generación de energía de la agroindustria de la palma de aceite en Colombia. *Rev. Palmas*, vol. 36, no. 3, pp. 43-53, Jul.- Sept. 2015.
- [2] T.J. Guzmán-Hernández, *et al.* Evaluación de sistemas térmicos y fotovoltaicos solares en unidades de producción agropecuaria, región Huetar Norte, Costa Rica. *Agron. Mesoam.*, vol. 28, no. 3, pp. 535-548, Sept.- Dic. 2017.
- [3] Ministerio de Ambiente, Energía y Telecomunicaciones (MINAET). (2011). VI Plan Nacional de energía 2012-2013. Disponible en http://www.dse.go.cr/es/03Publicaciones/01PoliticaEnerg/VI_Plan_Nacional_de_Energia_2012-2030.pdf.
- [4] Instituto Costarricense de Electricidad (ICE). (2010). Costa Rica: matriz eléctrica. Disponible en https://www.kolbi.cr/wps/wcm/connect/8823524c-7cc7-4cef-abde-a1f06e14da0e/matriz_folleto_web2.pdf?MOD=AJPERES&CVID=I8SK4gG.
- [5] Matthews, C. (2006). La ganadería amenaza el medio ambiente. Disponible en <http://www.fao.org/newsroom/es/news/2006/1000448/index.html>.
- [6] T. Guzmán-Hernández, *et al.* Uso de la energía solar en sistemas de producción agropecuaria: producción más limpia y eficiencia energética. *Tecnol. Marcha. Encuentro de Investigación y Extensión 2016*, pp. 46-56. 2016.
- [7] T. Guzmán, *et al.* Resultados de la implementación de tecnologías solares en sistemas de producción agropecuaria en Costa Rica. *Ventana Lechera*, vol. 35, pp. 4-17, Ene. 2017.
- [8] T.J. Guzmán-Hernández, *et al.* Aplicación de tecnologías solares térmicas híbridas, para la deshidratación y secado de productos agrícolas en la región Huetar Norte de Costa Rica. *Ventana* vol. 11, no. 1, pp. 21-25. 2017.
- [9] R. Portilla Pastor, *et al.* Determinación de potenciales de energía solar para generación eléctrica en Costa Rica. En: *Memorias Congreso Internacional Clima, Agua y Energía, pilares para el desarrollo sostenible*. Universidad Nacional Campus Nicoya, Guanacaste, Costa Rica. pp. 231-244. 2014.
- [10] Instituto de Nutrición de Centro América y Panamá (INCAP). *Cuadro de composición de alimentos de Centroamérica*. 2a edición. 128 pp. 2012.

Estimación de la reducción de gases de efecto invernadero en el escaldado de pimienta (*Piper nigrum* L.) en la planta procesadora de la Asociación de Productores de Pimienta de Sarapiquí (APROPISA)

Estimation of the reduction of the greenhouse gases in the pepper blanching (*Piper nigrum* L.) in the processing plant of the Pepper Producer Association of Sarapiquí (APROPISA)

Javier Mauricio Obando-Ulloa. Académico Programa de Doctorado en Ciencias Naturales para el Desarrollo. Campus Tecnológico Local San Carlos, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Apdo. Postal 223-21001, Alajuela, San Carlos, Ciudad Quesada, Costa Rica. Tel. (+506) 2401-3214, e-mail: jaobando@tec.ac.cr

Stephanie Oviedo- Ortega, Egresada del Programa de Maestría en Manejo de los Recursos Naturales y Tecnologías de Producción, Campus Tecnológico Local San Carlos, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Apdo. Postal 223-21001, Alajuela, San Carlos, Ciudad Quesada, Costa Rica. Tel. (+506) 2401-3200, e-mail: biocr@live.com

Tomás de Jesús Guzmán-Hernández. Académico Programa de Doctorado en Ciencias Naturales para el Desarrollo. Campus Tecnológico Local San Carlos, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Apdo. Postal 223-21001, Alajuela, San Carlos, Ciudad Quesada, Costa Rica. Tel. (+506) 2401-3284. e-mail: tjguzman@tec.ac.cr

Resumen

En las últimas décadas, el Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPPC, por sus siglas en inglés) ha demostrado que los cambios ambientales (períodos extensos de sequía, tormentas y huracanes más intensos, entre otros) afectan negativamente la economía y la población en general por efecto del aumento de gases de efecto invernadero (GEI; dióxido de carbono, óxido nitroso, metano, entre otros) emitidos en diversos procesos productivos. Estos gases absorben parte de la radiación solar y lo almacenan, generando un aumento en la temperatura mundial. El objetivo de este trabajo consistió en estimar la reducción de GEI en el escaldado de pimienta (*Piper nigrum* L.) con la implementación de tecnología térmica solar en la planta procesadora de la Asociación de Productores de Pimienta de Sarapiquí (APROPISA). Para el cálculo de la reducción de los GEI se utilizó las ecuaciones propuestas en la Guía para diseñar un manual que permita a las PYMES realizar Declaraciones de carbono neutralidad bajo la norma INTE 12.01.06 para inventariar los gases de efecto invernadero. Además, se realizó las conversiones de energía correspondientes para el cálculo de la reducción de GEI al implementar un sistema térmico solar. Este trabajo permitió observar que, en el período de enero a diciembre

del año 2016, en el proceso de escaldado se emitió 12,52 ton CO₂-eq, lo que corresponde a una cifra discreta, dado que no se contabilizó las aguas residuales por lavado y escaldado. Sin embargo, la instalación de un sistema térmico solar con capacidad de 3000 litros de agua para el proceso de escaldado permitiría reducir las emisiones de GEI en aprox. 50% (6,17 tCO₂-eq anual).

Palabras claves: escaldado, huella de carbono, inventario de gases de efecto invernadero, pimienta, tecnología térmica solar.

Abstract

In the recent decades, the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) has shown that environmental changes (extended periods of drought, storms and stronger hurricanes, among others) negatively affect the economy and the population in general. This is the product of the increase of Greenhouse Gas (GHG; mainly carbon dioxide), which are emitted by different productive processes and absorb and store part of the solar radiation, generating an increase in global temperature. The objective of this work was to estimate the reduction of GHG emissions in the blanching of pepper (*Piper nigrum* L.) in the processing plant of the Association of Pepper Producers of Sarapiquí (APROPISA). To calculate the Greenhouse Gas (GHG) reduction, the equations proposed in the *Guide to design a manual that allows SMEs to make Carbon Neutral Declarations under the INTE 12.01.06 standard to carry out the inventory of greenhouse gases* were applied. In addition, the corresponding energy conversions for the calculation of the GHG reduction of the solar thermal system were carried out. This work allowed us to observe that in the period from January to December 2016, 12.52 tCO_{2-eq} was emitted from the blanching process. However, with the installation of a solar thermal system with a capacity of 3 000 liters of water, an approx. 50 % reduction (6.17 tCO_{2-eq} per year) could be achieved.

Key words: blanching, carbon footprint, inventory of greenhouse gases, pepper, solar thermal technology.

Introducción

Los gases de efecto invernadero (GEI) se encuentran en la atmósfera. Algunos son de origen natural, mientras otros son emitidos por las actividades humanas. Estos gases tienen la capacidad de absorber y retener la radiación que luego es transferida a todas las direcciones en la atmósfera (Becerra y Mance, 2009).

De acuerdo con el Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio climático (IPCC, por sus siglas en inglés), durante los años 1970 a 1994 se estimó la emisión de 0,43 gigatoneladas de dióxido de carbono equivalente anuales (GtCO₂-eq anuales), la cual aumentó a 0,92 GtCO₂-eq anuales durante el período 1995 a 2004. Por lo tanto, los GEI (en especial el dióxido de carbono) aumentaron un 70% desde 1970 a 2004 (IPCC, 2007).

Con lo que respecta a Costa Rica, en el 2012 se emitió 11 250,20 GtCO₂-eq, donde el 8,7% correspondía al sector industrial, mientras que solo el sector energía emitió 7 213,83 GtCO₂-eq (Corrales, 2016 y Herrera, 2016). Esto se debe a que el 11,5% de la energía que se consume proviene de derivados de petróleo (Zúñiga, 2014). Por otro lado, el Sistema Eléctrico Nacional generó solo un 0,03% de energía solar en 2014, mientras que la producción más alta correspondió a la hidroeléctrica con 63,58%. Para este mismo año, la principal fuente de emisión de GEI fue la quema de combustible, vinculado al transporte y calor de uso industrial (Esquivel, 2014).

Ante este panorama, uno de los objetivos del marco político ambiental es convertir a Costa Rica en carbono neutral en 2021 mediante el "Programa País Carbono Neutral" (La Gaceta, 2012, 19 de jun). Este compromiso se consolida con la Estrategia Nacional de Cambio Climático, la Agenda Agroambiental y Cambio Climático, y el Plan Sectorial, todos ellos dirigidos al sector agroalimentario con el fin de disminuir las emisiones de GEI (López, 2013). Además, en 2015, Costa Rica

anunció su Contribución Prevista y Determinada a Nivel Nacional (INDC, por sus siglas en inglés) donde se comprometía a reducir sus emisiones de 2,41 a 1,73 toneladas netas per cápita para el 2030 (Corrales, 2016).

Para cumplir con sus contribuciones, el gobierno de Costa Rica ha establecido una metodología para definir el inventario de GEI, basada en la definición de las actividades que generan estos gases, medir su consumo y determinar la huella de carbono, según la guía de factores de emisión del Instituto Meteorológico Nacional (IMN, 2016).

Revisión de literatura

Cálculo del inventario de GEI

El IPCC y el Protocolo de Kyoto han determinado como principales GEI: el dióxido de carbono (CO_2); el metano (CH_4) y el óxido nitroso (N_2O), los cuales se generan en procesos industriales como consecuencia de la combustión de gas LP (Jantzen y Raaz, 2015; IMN, 2009).

Para inventariar estos gases, la Organización Internacional de Normalización 14064 (ISO 14064, por sus siglas en inglés) propuso el protocolo para realizar los cálculos de GEI emitidos en diversas actividades, como las agrícolas. Esta norma junto con la Norma INTE-ISO 14064-1:2006 fueron tomadas en consideración para el Programa País Carbono Neutral en Costa Rica como herramientas para realizar el cálculo de la huella de carbono (La Gaceta, 2012; Instituto de Normas Técnicas de Costa Rica [INTECO], 2006).

De igual forma, la Guía para diseñar un manual que permita a las PYMES realizar declaraciones de carbono neutralidad bajo la norma INTE 12.01.06 para efectuar el inventario de gases invernadero, establece las ecuaciones para el cálculo de GEI y factores de emisión (Dirección de Cambio Climático [DCC], 2014), los cuales han sido establecidos por IMN (2016; Tabla 1). Sin embargo, se podría aplicar también un valor de 63 kg CO_2/GJ cuando se está estimando los GEI para gas LP (González, 2010).

Tabla 1. Factor de emisión y potencial de calentamiento global para gas LP

Gas	Fórmula	Factor de emisión	Potencial de calentamiento global ($\text{CO}_2\text{-eq}$)
Dióxido de carbono	CO_2	1611 (kg)	1
Óxido nitroso	N_2O	0,000002745 (g)	310
Metano	CH_4	0,000139 (g)	21

Fuente: Instituto Meteorológico Nacional, 2016.

Estudios desarrollados sobre el cálculo y reducción de GEI según eficiencia del equipo térmico solar.

Se ha realizado diversos estudios para calcular la reducción de GEI al implementar una tecnología térmica solar. Como primer paso es el cálculo del inventario de GEI, para lo cual existen diversos métodos.

En el 2008, Segura y Andrade (2012) aplicaron los factores de emisión sugeridos por el IPCC en cadenas productivas de café, tomando en consideración registros por consumo de combustible, electricidad y uso de insumos. Por otro lado, Quirós (2015), Víquez (2015) y Chavarría, Molina, Gamboa, y Rodríguez (2016) aplicaron la Normativa INTE-ISO 14064-1: 2006 y factores de emisión del IMN para realizar el inventario de gases de efecto invernadero en sus estudios. Quirós (2015) tuvo como resultado que la lechería de la Finca Esmeralda en San Carlos emitió 199,10 t $\text{CO}_2\text{-eq}$, y el consumo de combustible fósil representó un 0.58%. Salazar (2015) tomó en consideración los factores de emisión del IMN para inventariar los GEI por consumo de gas LP en comedores de tres escuelas primarias públicas, en Belén de Heredia. Sus análisis indicaron

que se emitió $1,61 \text{ kgCO}_2$, $1,77 \cdot 10^{-4} \text{ kgCH}_4$ y $2,554 \times 10^{-7} \text{ kgNO}_2$. Sin embargo, estas emisiones se pueden reducir con la implementación de la tecnología térmica solar.

Existen varias metodologías para calcular la reducción de GEI al implementar esta tecnología, tales como la reducción en la facturación por consumo por electricidad, leña o combustible. Segura y Andrade (2012) estudiaron el impacto de la producción de café en relación a la huella de carbono en nueve fincas y ocho empresas que procesan el grano. Estos autores determinaron que dos de las ocho empresas procesadoras de café presentaron emisiones más bajas debido al uso de tecnología solar. El promedio de consumo de las ocho empresas fue de $39,5 \text{ tCO}_2\text{-eq}$ en electricidad, $339 \text{ tCO}_2\text{-eq}$ para leña y $1,7 \text{ tCO}_2\text{-eq}$ para combustible.

Además, Sánchez (2016) comparó las emisiones de CO_2 por el consumo de leña, gas LP y electricidad tras la instalación de un sistema de captación solar térmico - híbrido forzado en la planta de procesamiento de lácteos LLAFRACK en San Carlos (Alajuela, Costa Rica). Esta autora aplicó los datos de la Agencia Internacional de Energía y determinó que el sistema solar híbrido permitió reducir los GEI en un 99,68%.

Calvo, Gómez y Méndez (2014), calcularon la reducción de GEI con el procedimiento establecido por la norma ANSI/ASHRAE 93-1986, con el fin de determinar el rendimiento térmico del colector solar de placa plana. Esta metodología consistió en una ecuación que considera el calor específico de la temperatura media del agua, flujo másico de agua dentro del colector, área superficial del colector, temperatura de entrada y de salida del agua en el colector, absorptancia de la placa colectora y transmitancia de la cubierta transparente. Estos autores encontraron que el colector solar de uso doméstico redujo 15 kgCO_2 al año. En este sentido, Quirós (2015), determinó que $0,41 \text{ tonCO}_2\text{-eq}$ se reduce anualmente con la implementación de un sistema térmico y uno fotovoltaico, de acuerdo con el registro de facturas por consumo de electricidad.

Descripción del sistema térmico solar por implementar en el proceso de escaldado en APROPISA como solución de mitigación de GEI

El sistema de calefacción térmico solar que se pretende instalar en la planta procesadora de APROPISA para el proceso de escaldado de pimienta es un sistema forzado térmico indirecto que se compone de un tanque de acero vitrificado cubierto de acero galvanizado con aislante de 40 mm de espesor, cuya capacidad sea de al menos 3000 L. Este sistema tendrá instalado un colector solar plano con vidrio solar templado de 3,2 mm. Además, es necesario que cuente con un sistema de monitoreo que permita registrar los datos de temperatura del agua a entrada y salida del sistema térmico solar para determinar la cantidad de energía aportada al sistema (Quinteros, 2012). De acuerdo con Burbano, Restrepo y Sabogal (2006), estos sistemas deben estar equipados con un tanque de almacenamiento, para capturarla energía solar y transformarla en calor para mantener la temperatura del agua.

Esta tecnología puede ser usada en procesos industriales, dado que tienen la capacidad de aportar la energía necesaria para alcanzar temperaturas entre los 40°C a 70°C (Bergues y Alonso, 2017). Guzmán et al (2016) instalaron un sistema térmico solar híbrido forzado en la planta procesadora de la Asociación de Productores Lácteos LLAFRACK. Este sistema cuenta con una capacidad de 600 L al día, lo que permitió obtener un 82% de ahorro energético para calentar el agua.

Materiales y métodos

Descripción de la Asociación de Productores de Pimienta de Sarapiquí (APROPISA)

La Asociación de Productores de Pimienta de Sarapiquí (APROPISA) actualmente cuenta con 25 productores que poseen aproximadamente 14600 plantas de pimienta (Vega, 2015). Además, APROPISA impulsa un proyecto con el Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG) para incentivar a 26 productores jóvenes al cultivo de pimienta, quienes cuentan con 19 200 plantas (F. Salas, comunicación personal, enero 2017).

En el 2009 el Instituto de Desarrollo Agrario (IDA) le cedió un Centro de Procesamiento y Mercadeo de Alimentos (CE-PROMA) con una planta física de 325 m² a APROPISA. La planta procesadora cuenta con una sección donde se realiza el escaldado de pimienta. Este proceso consiste en sumergir la pimienta en agua a 70°C durante al menos 5 min (F. Salas, comunicación personal). Esta agua se calienta hasta la temperatura requerida en estañones de metal sobre quemadores de gas licuado de petróleo (LP), exponiendo a los trabajadores de la planta procesadora y vecinos a los GEI.

Identificación y cuantificación de los GEI en la planta procesadora de APROPISA

Para identificar y cuantificar los GEI se visitó la planta para comprender el proceso, se conversó con los trabajadores a cargo del proceso de escaldado. Además, se revisó los registros de la administración de la planta procesadora de APROPISA para la información sobre consumo de gas LP, rendimiento de producción, entre otros datos. Una vez que se recopiló los datos, se aplicó la ecuación para el cálculo de inventario de GEI (Ecuación 1; INTECO, 2006).

$$\text{Emisiones de GEI (t GEI)} = \text{DA} \times \text{FE (Ecuación 1)}$$

donde:

DA = Dato de la actividad. Parámetro que determina el grado de las emisiones de GEI que se generan por una actividad específica. [cantidad de combustible consumido (kW/h, kg, entre otros)]

FE = Factor de emisión. Cantidad de GEI emitidos por cada unidad de parámetro de la actividad. Los factores varían según la región y la actividad por lo que se aplicará los factores enlistados por el Instituto Meteorológico Nacional (IMN, 2016).

$$\text{CO}_2\text{-eq} = \text{t GEI} \times \text{PCG (Ecuación 2)}$$

donde:

t GEI: Valor total de cualquier GEI

PCG: potencial de calentamiento atmosférico específico de GEI. Este es el factor de radiación del gas.

INTECO (2006) indica que el dióxido de carbono equivalente (CO₂-eq) es la unidad para comparar la fuerza de radiación de un GEI con el dióxido de carbono mediante el uso del potencial de calentamiento global (PGC), el cual es el factor de radiación del gas. Por esta razón, los resultados se deben convertir a toneladas de CO₂-eq con la Ecuación 2, según la cual cada uno de los gases (metano, óxido nitroso, entre otros gases) se multiplica por el PCG que le corresponde según el IMN (2009).

Estimación de la reducción de GEI en el proceso de escaldado de la pimienta al implementar un sistema térmico solar

Para estimar la reducción de GEI se consultó diferentes trabajos de investigación relacionados con la eficiencia de equipo térmico solar, principalmente de sistemas térmicos forzados híbridos para implementar esta tecnología en la planta procesadora de APROPISA.

Se debe considerar que, en algunos casos los datos de gas LP se expresan en libras o kilogramos, por lo que se deben convertir a litros de gas para efectuar el cálculo de reducción de GEI mediante las ecuaciones descritas anteriormente (Chavarría, et al., 2016). Por lo tanto, se determinó que el valor teórico de energía producida sería 5 430,16 kWh/año para la estimación de la reducción de GEI al implementar esta tecnología en la planta procesadora de APROPISA, de acuerdo con los datos recopilados por Sánchez (2016) en la planta procesadora de LLAFRAK (San Carlos, Alajuela, Costa Rica).

Además, se estableció el procedimiento para realizar la conversión de kWh a litros de gas LP con el fin de realizar la estimación de reducción de GEI (Tabla 2). De acuerdo con Leiva, Alvarado, Camacho, Castillo y Chin-Wo (2003), se consideró que la densidad del gas LP es de 545 kg/m³, el poder calorífico de 0,02554 TJ/m³ y 1kWh es igual a 0,0000036 TJ.

Tabla 2. Equivalencias de conversión para kWh a kg de gas LP

Unidad	Equivalencia
1 kWh	$3,6 \cdot 10^6$ J
1 TJ	10^{12} J
1 m ³ de gas LP	545 kg
1m ³	1000L

Análisis de la efectividad del equipo térmico solar en la reducción de GEI

Para analizar la efectividad del equipo térmico solar en la reducción GEI, se tomó el resultado del inventario de GEI y se comparó con el resultado de estimación de reducción de gases de efecto invernadero al implementar energía térmica solar. Este análisis se realizó con base en información descrita por Sánchez (2016) y Quirós (2015).

Resultados y discusión

Inventario de GEI en el proceso de escaldado de pimienta en la planta procesadora de APROPISA

El proceso de escaldado de pimienta consiste en sumergirla en agua a aprox. 70 a 85°C durante al menos 7 min. Seguidamente, la pimienta se escurre para eliminar el exceso de agua (Figura 1).



Figura 1. Proceso de escaldado de la pimienta. **(A)** Pimienta en tanqueta de agua, **(B)** extracción de pimienta (25 kg) para escaldar, **(C)** Inmersión de la pimienta en agua caliente a 80°C, **(D)** Escurrido de la pimienta, una vez finalizado el proceso de escaldado.

Para realizar el proceso de escaldado, el agua se calentó en estañones sobre quemadores de gas, lo cual fue realizado por dos operarios. Cabe destacar que los quemadores de gas permanecen encendidos durante todo el tiempo en el que se realiza el proceso para garantizar la temperatura idónea del escaldado.

De acuerdo con los registros de APROPISA, del período de enero a diciembre del 2016, se procesó un total de 51 205 kg de pimienta en 745 horas. Del tiempo total requerido para el proceso completo, el tiempo destinado para el proceso

de escaldado representó el 36%; es decir, se procesó un promedio mensual de 4 267 kg de pimienta, en canastas con capacidad de 25 kg.

Debido a la lentitud del proceso de escaldado, en 2016 se consumió un total de 7 754,58 L de gas LP, lo cual emitió 12,52 ton CO₂-eq (12,52 CO₂, 0,007 tons NO₂ y 0,023 tons CH₄). Se espera que estas emisiones incrementen en los próximos años, dada la tendencia en el volumen de producción de APROPISA, ya que en 2017 hubo un incremento del 48% en comparación con los años anteriores (Figura 2).

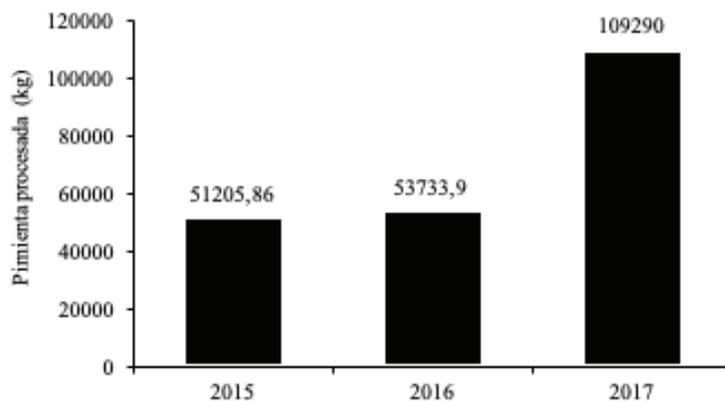


Figura 2. Producción total de pimienta de los agricultores afiliados a APROPISA

Estimación de la reducción de los GEI en el escaldado de pimienta con la implementación de tecnología térmica solar

La producción de pimienta de APROPISA ha aumentado y se espera que esta tendencia se mantenga para garantizar de esta forma la estabilidad laboral de pequeños y medianos productores. No obstante, con las mejoras en la planta procesadora de APROPISA que se planea realizar a corto plazo, se espera procesar otros productos.

Por esta razón se implementará un sistema térmico solar híbrido forzado con capacidad de al menos 3000 litros. Este sistema contará con un sistema auxiliar de gas LP, el cual entrará en funcionamiento cuando el calor aportado por el colector solar no sea suficiente para alcanzar la temperatura requerida para el proceso. Se pretende que con la implementación de este sistema se reduzca la emisión de los GEI, lo que aportaría un sello distintivo a los productos procesados por APROPISA.

Sánchez (2016) realizó un estudio en la Asociación de Productores Lácteos LLAFRAK, en donde se implementó un sistema térmico solar forzado híbrido para el calentamiento del agua para el proceso de pasteurización con capacidad de 600 L. Este proceso requiere que el agua alcance una temperatura de aprox. 70 °C, a diferencia del proceso de escaldado en APROPISA que se requiere una temperatura del agua de aprox. 80°C. Esta autora aplicó el factor de conversión (0,23400 kg) propuesto por la Agencia Internacional de Energía para el cálculo de CO₂ emitido por el gas LP y determinó una reducción mensual de 3842,15 kg CO₂-eq (3,84 tCO₂-eq), lo que representa un total de 46,11 tCO₂-eq por año.

Tomando en consideración la estimación teórica para la producción de energía por el sistema térmico solar implementado en LLAFRAK (5430.16 kWh) reportado por Sánchez (2016) y aplicando el proceso de conversión de kWh a litros de gas LP se obtiene que al instalar el sistema térmico solar híbrido forzado se estaría reduciendo 765 L de gas LP al año. Por lo tanto, se espera que con la implementación del sistema con una capacidad mayor (3 000 L) en APROPISA, se logre reducir 3 825L de gas LP al año, lo que equivaldría a 6,17 tCO₂-eq anuales que se dejarían de emitir a la atmósfera

Análisis de la efectividad de la instalación de un sistema solar térmico para la reducción de los GEI en APROPISA

Actualmente, APROPISA tiene un consumo anual de 7 754,58 litros de gas LP, lo que genera 12,52 ton CO₂-eq. Estas emisiones se podrían reducir hasta un 50% con la implementación del sistema térmico solar. En este sentido, el sistema que será instalado en APROPISA tendrá mayor capacidad que proveerá la cantidad necesaria de agua caliente para el proceso de escaldado pimienta y reducirá consecuentemente el tiempo de este proceso y el consumo de gas LP.

Herrera-Cleger; Lesme-Jaén and Despaigne-Wilson (2014) determinaron que con una eficiencia de 55% de los colectores solares, se logra reducir hasta 43 ton CO₂-eq.

Segura y Andrade (2012), inventariaron los GEI emitidos por consumo de combustible fósil, leña y electricidad de ocho empresas procesadoras de café, de las cuales dos de ellas destacaron debido a bajas emisiones de GEI (156 y 187 kg CO₂-eq/t café verde, respectivamente) al usar tecnología solar.

La reducción de GEI es un esfuerzo de mitigación que puede ser aplicado en el hogar, la instalación de un equipo pequeño de 2m² con capacidad de 100 a 200 L puede reducir hasta 15 kg CO₂ al año (Calvo, Gómez y Méndez, 2014), incluso se puede llegar a reducir 0,412 tCO₂-eq al instalar sistemas térmicos y fotovoltaicos para calentar hasta 220 L de agua al día (Quirós, 2015).

Otros beneficios que se obtiene al implementar sistemas térmicos solares, además de la reducción de GEI, son: disminución del ruido durante el proceso y el calor del área de una planta procesadora de alimentos (Mejía, 2007), lo cual mejoraría las condiciones laborales de los operarios en APROPISA, ya que los gases NO₂ y SO₂ a menudo provocan irritación en los ojos y problemas respiratorios y cardiovasculares (Herrera, Lesme y Despaigne, 2014). Por lo que, implementar equipo térmico solar también favorecerá la calidad de vida de los operarios de APROPISA.

Conclusiones

El inventario de gases de efecto invernadero en el escaldado de la pimienta se cuantifica solo para acercarse a APROPISA a lo que se refiere a un proceso más complejo como lo es el cálculo de la huella de carbono. Este nuevo parámetro conllevaría a tomar en consideración el proceso de secado de pimienta, aguas residuales del proceso de escaldado, uso de fertilizantes y otros insumos en la producción y trazabilidad de la pimienta desde las fincas hasta el mercado, así como otras emisiones indirectas.

La emisión de 12,52 ton CO₂-eq en un año solo en el proceso de escaldado es una cifra discreta, dado que no se contabilizó las aguas residuales por lavado y escaldado.

La implementación de tecnología térmica solar está por lo general, ligada a no depender de combustibles fósiles y obtener beneficios de ahorro económico en un mediano plazo. En ocasiones se omite el potencial de este tipo de tecnología en la reducción de GEI, lo que podría ser una razón más de peso para incentivar a las empresas que solo les interesa reducir sus costos, para que consideren esta posibilidad como parte de llegar a hacer carbono neutral mediante un plan de acción que pueden elaborar a un mediano o largo plazo.

La reducción de los GEI en un 50% mediante la implementación de tecnología térmica solar permitirá a APROPISA ajustar el proceso para reducir las emisiones de GEI y ser más eficiente en el proceso y competitivo en el mercado.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Vicerrectoría de Investigación y Extensión (Instituto Tecnológico de Costa Rica) y al Instituto de Desarrollo Rural (INDER, Costa Rica) por el apoyo económico y, a la Junta Directiva de la Asociación de Productores de Pimienta de Sarapiquí (APROPISA) por el apoyo técnico para el desarrollo de este trabajo.

Referencias bibliográficas

- Becerra, M. R. and Mance, H. 2009. Cambio climático: lo que está en juego. Foro Nacional Ambiental. Available at <http://www.19.iadb.org/intal/intalcdi/PE/2011/08789.pdf>
- Bergues-Ricardo, C. and Alonso-Mancebo, M. 2017. Option for thermal solar energy improvement. Domestic and industrial applications. *Tec. Quím.* 37, 2, 279-292.
- Burbano J. J. C., Restrepo, A. H., and Sabogal F., O. J. 2006. Diseño y construcción de un calentador solar de agua operado por termosifón. *Scientia et Technica* 12, 31, 85- 90.
- Calvo, R., Gómez, D., and Méndez, F. 2014. Diseño, construcción y evaluación teórico-experimental de la eficiencia de un colector solar de placa plana en Costa Rica. Available at <http://repositorio.sibdi.ucr.ac.cr:8080/jspui/bitstream/123456789/2114/1/35939.pdf>
- Chavarría, F., Molina, O. M., Gamboa, R., and Rodríguez, J. 2016. Medición de la huella de carbono de la Universidad Nacional de Costa Rica para el periodo 2012-2014. Rumbo a la carbono neutralidad. *Uniciencia* 30 (2): 47. DOI= <https://doi.org/10.15359/ru.30-2.4>
- Corrales, L. 2016. Cambio climático: impactos y desafíos para Costa Rica (2015) (No. XXII). Available at http://estadonacion.or.cr/files/biblioteca_virtual/022/Ambiente/Corrales_L_2016Cambio_climatico.pdf
- Esquivel, M. F. 2014. Situación Energética de Costa Rica, 2014 (No. XXI). Available at http://estadonacion.or.cr/files/biblioteca_virtual/021/ambiente/Esquivel_Energia.pdf
- Frohmann, A., and Olmos, X. 2013. Huella de carbono, exportaciones y estrategias empresariales frente al cambio climático. Available at <http://repository.eclac.org/handle/11362/4101>
- González, A. (2010). Comparación de energías y gases de efecto invernadero en calentamiento de agua para cocción de alimentos con electricidad y gas natural. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* 14, 7- 25.
- Guzmán-Hernández, T.J.; Araya-Rodríguez, F.; Castro-Badilla, G.; Obando-Ulloa, J.M. 2016. Uso de la energía solar en sistemas de producción agropecuaria: producción más limpia y eficiencia energética. *Tecnología en Marcha* Número Especial Encuentro de Investigación y Extensión 2016, 46-56. DOI = <http://dx.doi.org/10.18845/tm.v29i8.2984>
- Herrera, J. 2016. Situación energética de Costa Rica (2015) (No. XXII). Available at http://estadonacion.or.cr/files/biblioteca_virtual/022/Ambiente/Herrera_2016.pdf
- IMN, (Costa Rica National Meteorological Institute). (2009). Guía para la elaboración de acciones en cambio climático. Available at http://www.digeca.go.cr/sites/default/files/documentos/guia_elaboracion_inventario_gases_efecto_invernadero_v1.0_0.pdf
- IMN, (Costa Rica National Meteorological Institute). 2016. Factores de emisión gases de efecto invernadero (6 ed). Available at <http://cglobal.imn.ac.cr/documentos?catid=8>
- IPCC, (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2007. Cambio Climático 2007: Informe de Síntesis. Geneva: Switzerland. Available at https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr_sp.pdf

- Jantzent, F. and Raaz, D. A. 2015. Estrategias de desarrollo del sistema de gestión ambiental de monitoreo de emisiones de gases de efecto invernadero. Caso estudio. Facultad de Ciencias Económicas y Sociales de la Universidad de Carabobo, Campus Bárbula. Available at www.riuc.bc.uc.edu.ve/handle/123456789/3524
- La Gaceta. (2012, 19 de jun). Acuerdo 36-2012. Oficializa el Programa País Carbono Neutralidad. Available at https://www.imprentanacional.go.cr/pub/2012/06/19/ALCA79_19_06_2012.pdf
- Leiva, C., Alvarado, F., Camacho, A., Castillo, G., and Chin-Wo, A. 2003. Situación del gas licuado de petróleo en Costa Rica. Available at <http://www.dse.go.cr/es/03Publicaciones/04Tecnicas/situacionGLP.pdf>
- López-Gordo, J.F. (2006). Medio ambiente comunitario y armonización de la imposición energética o un Mercado sobre emisiones de efecto invernadero. Available at <http://digibug.ugr.es/bitstream/handle/10481/1395/16540852.pdf?sequence=1>
- Mejía, C. M. 2007. Change of the heating water systems by the use of boilers to solar panels and other C+P. *Producción + Limpia*, 2, 2, 31–37.
- Penela, A. C. 2010. Utilidad de la huella ecológica y del carbono en el ámbito de la responsabilidad social corporativa (RSC) y el ecoetiquetado de bienes y servicios. *DELOS: Desarrollo Local Sostenible*, 3, 8, 7.
- Quinteros, D. (2012). Estudio de la eficiencia del sistema solar térmico en el barrio San Valentín, Comuna de lo Prado. Available at http://trafficlight.bitdefender.com/info?url=http%3A/www.fisica.usach.cl/sites/fisica/files/tesis_denisse_quinteros_massardo.pdf?language=en_US
- Quirós, G. (2015). Determinación de la huella de carbono y utilización de energía solar en unidades productoras de leche como alternativa al cambio climático en la Región Huetar Norte de Costa Rica. Available at <http://repositoriotec.tec.ac.cr/handle/2238/6471>
- Salas, F. (2017). Diagnóstico en planta de APROPISA [Personal].
- Salazar, E. (2015). Inventarios de Gases de efecto invernadero de las escuelas primarias de Belén, Heredia, Costa Rica. *Greenhouse gases produced by primary schools in Belén, Heredia, Costa Rica. Cuadernos de Investigación UNED*, 7, 2, 193- 200.
- Sánchez, M. F. (2016). Análisis social, económico y ambiental de la Implementación de una Tecnología Solar Híbrida, en la Planta de Productos Lácteos de LLAFRAK, San Carlos. Available at <http://solarhuetarnorte.org/wp-content/uploads/2016/09/Mar%C3%ADa-Fernanda-S%C3%A1nchez-R.-Tecnolog%C3%ADa-Solar-H%C3%ADbrida.-Documento-Final-002.pdf>
- Segura, M. and Andrade, H. (2012). Huella de carbono en cadenas productivas de café (*Coffea arabica* L.) con diferentes estándares de certificación en Costa Rica. *Luna Azul*, 36, 60- 77.
- Viquez, J. E. (2015). Diseño de eficiencia energética, para el aprovechamiento de calor residual y disminución de huella carbono, en planta PEPSI. Available at <http://repositoriotec.tec.ac.cr/handle/2238/6104>
- Zúñiga, M. (2014). Elaboración de una guía práctica para el uso eficiente de la energía en empresas MiPYMES del sector alimenticio en Costa Rica. Available at <http://bibliodigital.tec.ac.cr/handle/2238/3302>

Aplicación de tecnologías térmicas solares pasivos y activas como alternativa a los sistemas tradicionales de secado en unidades de producción agropecuarias en la zona Huetar Norte de Costa Rica

Tomás de Jesús Guzmán Hernández; Freddy Araya Rodríguez; Javier M. Obando Ulloa; Guillermo García Castro; Cristian Moreira Segura

Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Resumen

A la luz de los cambios que se están produciendo a nivel de variabilidad climática y de aumento de gases de efecto invernadero producidas a nivel local, regional e internacional, por las diferentes actividades humanas, así como la actual dependencia de los combustibles fósiles, debemos actuar sustituyendo las tecnologías existentes, por otras más limpias, seguras e inocuas.

Existe una necesidad urgente de encontrar nuevas alternativas para apoyar con tecnologías limpias los procesos productivos de los pequeños y medianos productores agropecuarios, agroindustriales y lograr la mitigación de los efectos de gases de invernadero para contribuir a disminuir el impacto del cambio climático desde lo local, así como mejorar los procesos productivos y su inocuidad en las fincas y las pequeñas agroindustrias.

El objetivo de este trabajo fue diseñar, construir y evaluar la implementación de sistemas solares térmicos para el secado y la deshidratación de granos, semillas, frutas y otros productos agropecuarios y agroindustriales. Los sistemas diseñados fueron activos y pasivos a saber: termosifónico e híbrido forzado, con aire y agua caliente, así como con gas LP de sistema auxiliar. Los mismos han podido suministrar más del 50 % de la energía requerida por el proceso de secado y deshidratación de varios productos. Los resultados muestran la eficiencia de los sistemas solares como un recurso alternativo y de energía limpia para las unidades de producción de Costa Rica, listas para ser usadas eficientemente reduciendo la huella de carbono a nivel local y mejorando sus procesos productivos, así como la calidad de sus productos.

Introducción

Las formas de lograr la conservación de semillas, frutas y otros productos agrícolas a lo largo de los años, han sido la utilización de diversos procesos vinculados todos, con la disminución de la carga microbiana, la deshidratación y el secado. Estos procesos forman parte de la incorporación de valor agregado que se usan a los productos agropecuarios y agroindustriales para darles un periodo mayor de vida y conservación.

La industria de alimentos deshidratados constituye un sector muy importante por todo el mundo, según (Fito et al 2016, Amruta 2016) y es importante empoderar a los pequeños y medianos productores en este tipo de labor.

Se entiende por deshidratación la operación mediante la cual se elimina total o parcialmente el agua del producto y esta definición puede ser aplicada a sólidos, líquidos o gases y sirve para describir varias operaciones unitarias como la evaporación, la adsorción y otras (Babalís et al 2007, Bancho 2008).

Otro aspecto son los métodos utilizados para lograr los productos secos, deshidratados o transformados, haciendo uso de diferentes tipos de energía, entre ellas el uso de biomasa, combustibles fósiles, energía eléctrica, y la energía solar. Los métodos utilizados son varios, entre ellos los sistemas tradicionales y los tecnificados. Los sistemas tradicionales de secado al sol, aunque efectivos y usados históricamente, poseen una serie de desventajas entre ellas: son procesos lentos, requieren de grandes extensiones, no se tiene un control adecuado del proceso, los productos finales se obtienen con muy poca calidad sensorial y los mismos son poco inocuos (Berriz et al 1996 y Bergues et al 2008). Los sistemas de secados tecnificados, son más viables, rápidos e inocuos. Por esta razón hemos diseñado, construido y evaluado estos últimos.

Desde la antigüedad se ha reconocido que los alimentos con mayor contenido en humedad son los más perecederos, de tal manera que el control en el contenido en humedad de un producto es una herramienta para su conservación.

Revisión de literatura

La operación de deshidratación conlleva además una apreciable reducción del peso y volumen de los alimentos que se deshidratan, consiguiéndose así una importante reducción de los costos de transporte y almacenamiento. El secado en operaciones unitarias es "la extracción de humedad de una sustancia", es decir, en el mismo se procede a retirar, por medio de métodos artificiales o naturales, el agua que está contenida en los sólidos (Ekechukwua et al 1997, Moya et al 2011, Espinoza 2016, Treyball 2016, FAO 2018).

En el secado por medios "artificiales" se usan métodos termodinámicos controlados, en donde se puede extraer un porcentaje determinado de humedad, controlando igualmente las propiedades de los alimentos que determinan su calidad tales como el color, aroma, sabor, capacidad de rehidratación, vida útil, etc., (Sogari 1998, Tarigan et al 2007, Fito et al 2009, Machado et al 2010)

El proceso de secado es una operación, básicamente, de transferencia de masa y esta se da durante el contacto del sólido con el aire; el contenido de agua que se encuentra en el sólido se transfiere por evaporación hacia el gas; esto ocurre en base a la diferencia de presiones entre el vapor del sólido húmedo y el aire (Costa 2007, Yunus 2007, Ferreira 2009, Tiwari 2016).

El mecanismo del proceso de secado depende considerablemente de la forma en la que el agua está relacionada con el sólido: mientras más compacto y molecularmente unido esté el alimento, más difícil será remover su humedad por lo que podemos decir: "Durante el secado el enlace de la humedad con el material se altera".

En este proceso cuya interacción es "sólido-gas", la parte sólida se considerará como el material húmedo a deshidratar y la parte gaseosa es la representación del aire caliente utilizado en el proceso de deshidratación. El fenómeno de equilibrio térmico que se da en el secado de alimentos es, en pocas palabras, el siguiente:

"El sólido húmedo ingresa en el túnel de secado, donde una corriente de aire caliente pasará directamente sobre la superficie del alimento; esto producirá que el agua que se encuentra tanto en la superficie como en el interior del sólido iguale su temperatura con la del aire, evaporándose y dando paso al proceso de deshidratación".

Otro de los objetivos que se persiguen con la deshidratación de alimentos es la transformación de éstos en materias primas adecuadas para el mezclado y formulación de nuevos productos.

Las técnicas de deshidratación en productos agropecuarios

La deshidratación puede llevarse a cabo por diferentes métodos entre ellos los mecánicos y físico-químicos a saber: Prensado; ósmosis; centrifugación; liofilización; congelación; absorción y evaporación superficial. En nuestro caso nos vamos a detener en esta última pues es uno de los métodos más utilizado, también llamado deshidratación por aire caliente (Hernández et al 2010, Michalewicz et al 2011).

El consumo de energía en la deshidratación y secado de alimentos y productos agrícolas es muy importante y el costo de estos procesos deben ser disminuidos buscando soluciones entre ellas:

- a) La modificación de los procesos y las técnicas de deshidratación, buscando la eficiencia de los deshidratadores industriales con el objeto de buscar un máximo rendimiento energético.
- b) Utilización de energías alternativas. De todas las energías alternativas, la utilización de desechos o subproductos agrícolas usados como combustibles y la energía solar parecen ser las más viables, (Busso, 1996, Busso 1997, Costa 2007, MacManus 2010, Espinoza 2016, Fahim 2016, FAO 2018).

Los diferentes tipos de secadores se basan en la manera de transmitir el calor haciendo uso de variadas fuentes de energía, el cual puede ser por convección, conducción y radiación.

En el secado por convección el calor se transfiere al sólido que se está secando o deshidratando mediante una corriente de aire caliente que además de transmitir el calor necesario para la evaporación del agua es también el agente transportador del vapor de agua que se elimina al sólido. En los secadores por convección, el aire caliente es impulsado a través del secador por medio de ventiladores y las fuentes de energía utilizadas para calentar el aire son muy variadas.

Principio de deshidratación

La deshidratación se basa en los principios de la psicrometría, que estudia las propiedades termodinámicas del aire húmedo y sus efectos. El aire húmedo se define como una mezcla de aire seco y vapor de agua y esto es humedad relativa.

La condición natural del aire húmedo es saturarse, en otras palabras, alcanzar el 100 % de humedad relativa, por ello si el aire tiene un 14 de humedad, baja humedad relativa, al entrar en contacto con un objeto, alimento, fruta, semilla y grano, está obligado a absorber su humedad y por consecuencia deshidratarlo. El porcentaje máximo de humedad relativa que asegura una correcta conservación de los alimentos es debe estar por debajo del diez y ocho por ciento.

Los parámetros que permiten la desecación son las temperaturas de ingreso y salida de la cámara de deshidratación, calor específico a presión constante, entalpía del aire a la entrada y salida, flujo másico, masa de aire presente en la cámara para cualquier instante. Sus características son masa, calor latente a temperatura media, humedad relativa con la que ingresa y la deseada para ser deshidratado.

La utilización de energía solar

El secado solar al aire libre ha sido utilizado desde tiempos inmemorables para el secado de carne, pescado, madera y otros productos agrícolas como medio de conservación. También el secado solar puede ser indirecto con sistemas híbridos (Fito 2016).

Con el objeto de aprovechar los beneficios de la energía limpia y renovable proporcionada por el sol, en los últimos años se han desarrollado secadores solares principalmente para la conservación de productos agrícolas y forestales de diferentes tipos y niveles.

Sin embargo, debido a la variabilidad de la radiación solar durante los días en los diferentes países, zonas o regiones siempre deberá hacerse uso de una fuente de energía auxiliar. De esta manera la energía solar puede ser utilizada si el objetivo del proceso de secado puede coordinarse con las características específicas de la radiación solar. Por tanto, la ubicación geográfica que determinan el número de días soleados al año y la intensidad de radiación en las diferentes zonas son las que van a definir el uso de estos sistemas y su aplicabilidad. También éste tipo de energía es más adecuada para procesos de secado en donde se necesiten pequeñas demandas de energía. Un aspecto importante para la utilización de la energía solar es su costo, durabilidad en el tiempo y la rentabilidad.

El secado de productos agropecuarios puede ser directos o por convección o indirectos o por conducción:

Secadores directos o por convección: Se caracterizan por utilizar gases calientes que entran en contacto directo con el sólido húmedo al que transmiten calor por convección fundamentalmente y que arrastran fuera del secador los vapores producidos. Los gases calientes pueden ser: - Aire calentado por vapor de agua - Productos de la combustión - Gases inertes - Vapor recalentado - Aire calentado por radiación solar.

En este tipo de secadores el consumo de combustible es tanto mayor cuanto más bajo es el contenido de humedad residual del producto final. Este tipo de secadores pueden ser continuos o intermitentes. Para este tipo de secadores se pueden encontrar dos tipos, Secadores de horno o estufa y Secadores de bandejas o de armario

Secadores por conducción o indirectos: Se caracterizan porque en ellos la transmisión de calor hasta el material húmedo tiene lugar por conducción a través de una pared, generalmente metálica. La fuente de calor puede ser: Vapor de agua que condensa, agua caliente, aceites térmicos, gases de combustión, resistencia eléctrica. Los secadores indirectos permiten la recuperación del disolvente y son apropiados para la desecación a presiones reducidas y en atmósferas inertes, lo que les hace recomendables para deshidratar productos termolábiles o fácilmente oxidables, pudiendo utilizar métodos de agitación para asegurar una mejor transmisión de calor y eliminar los gradientes de humedad en el producto. Al igual que los directos, pueden funcionar en régimen continuo o intermitente. (Busso et al 1996, Kamaruzzaman 2011)

Considerando todo lo expresado anteriormente nuestro trabajo se encaminó a lograr diseños adecuados de secadores, deshidratadores haciendo uso de la energía solar.

Materiales y Métodos

El trabajo se inició en febrero del 2016, en la zona Norte de Costa Rica, y aún continua. El Intervalo de radiación solar en el lugar está entre 1 500 – 1900 KWh/m²

Para el desarrollo de la aplicación de la energía solar en los procesos de incorporación de valor agregado a la producción agropecuaria y agroindustrial en las condiciones rurales de Costa Rica especialmente en el secado y la deshidratación para lograr una mayor durabilidad de las semillas, las frutas y otros productos, se realizó una búsqueda bibliográfica exhaustiva de la información internacional disponible relacionada con el tema (Vega 2005, Saravia 2007, Sivipaucar et al 2007, Orozco et al 2007, Salas et al 2008, Guía asit 2010, Michalewicz 2011, Queiroz 2011, García et al 2012, Martín 2012, Iglesias 2013, Nixon et al 2013, Martínez et al 2013, Taransum 2015, Kamaruzzaman 2016, Fahim et al 2016, Mutombo et al 2016, Comunidad de Madrid 2016, FAO 2017, Quintanar 2017, Sreerag et al 2017)

En función de dicha revisión se procedió a diseñar prototipos de secado y deshidratación pasivo y activo, cuyo principio es mixto, o sea directo por convección y a su vez indirecto por conducción y con un sistema auxiliar para garantizar el nivel continuo de intercambio de calor sólido-gas.

En ambos prototipos de secado solar se utiliza la energía solar para calentar el aire, el agua y secar cualquier sustancia alimenticia o producto que esté cargado dentro de la cámara de tratamiento.

Se presentan los croquis de los diseños realizados para secar o deshidratar cualquier producto agrícola.

Las ecuaciones que modelan el comportamiento del deshidratador que más se ajustan a nuestro trabajo son:

- Energía de Deshidratación: Energía necesaria para deshidratar la fruta (kW).

$$Qd = \dot{m}fp \times Cv = \dot{m}a \times Ca \times (Ti - Ts)$$

Donde:

"mfp" es la masa de agua perdida en el proceso (kg);
 "Cv", el calor latente del agua a temperatura media (kJ/kg);
 "ma", la masa del aire en un instante dado;
 "Ca", el específico del aire a presión constante (kJ/kg*K);
 "Ti/Ts", temperatura de ingreso y salida del aire (°C).

- Masa de Agua Perdida: Condicionada por la humedad relativa deseada

$$(mfp). mfp = m \times \phi i - \phi s 100 - \phi s \quad (2.12)$$

Donde la masa del objeto está representada por m;

La humedad relativa, al ingreso y a la salida del proceso, definida por "φ".

- Potencia de Absorción:

La cantidad de agua vaporizada por tiempo define la potencia de absorción Pa expresada en kW.

$$Pa = \dot{m}a \times Ca \times (Ti - Ts) = \dot{m}a \times (hi - hs)$$

ma: flujo másico del aire.

hi: entalpía de ingreso al sistema.

hs: entalpía de salida del sistema

El consumo energético que se necesita para eliminar un kg de agua es de 1 000 kcal. Esta cantidad se compone de la siguiente manera FAO 2018

Calor necesario para la evaporación de 1 kg de agua	600 kcal
Pérdida por el calor sensible que se va en el aire usado	300-320 cal
Perdidas de calor por conducción, radiación y convección hacia el exterior	30 kcal
Pérdida por el calor transportado por el grano	80 kcal
Total	1 010-1 030 kcal

El valor de 600 kcal/kg de agua no puede ser disminuido de ninguna forma, pues es el calor mínimo que se requiere para evaporar el agua.

Para implementar los sistemas de secado solar en la Región Huetar Norte fue necesario conocer las condiciones de trabajo de los productores de la zona para adaptar cada uno de estos sistemas a sus necesidades. Por lo tanto, se inició con el estudio de las posibles opciones de aplicación de secadores que éstos deben utilizar en su cadena de producción de diferentes productos tales como, cacao, frijoles y frutas para lograr una mayor eficiencia, durabilidad y calidad.

En función del trabajo anterior se diseñaron varios secadores solares los cuales fueron:

1. Secador solar térmico pasivo o de circulación natural, prototipo No 1
2. Secador solar térmico activo híbrido de circulación forzada, prototipo No 2
3. Secador solar térmico activo híbrido de circulación forzada, sistema comercial modelos I y II.

Para la evaluación de los equipos se midieron temperaturas horarias durante el día y varios meses.

Se sometieron a deshidratación varios productos agrícolas, entre ellos café, frijoles, maíz, cacao, piña, banano, cúrcuma, camote, yuca. SE muestran solo los resultados del cacao. El resto de los productos tuvieron un comportamiento similar a este.

El registro de datos se realizó a través de un sistema computarizado.

Resultados y discusión.

En función del trabajo realizado de diseño, construcción y evaluación preliminar pasamos a revisar cada uno de ellos.

1.- Secador solar térmico pasivo o de circulación natural, prototipo No 1

Ubicado en la Sede Regional de San Carlos del Instituto Tecnológico de Costa Rica, zona Norte, en la provincia de Alajuela, en la Ciudad de Santa Clara.

Este sistema pasivo dispone de dos colectores de aire caliente, una en la parte inferior colector solar plano No 1 del sistema y otro en la parte superior colector solar plano No 2.

El colector solar plano No 1 contiene una ventana de control manual que regula la entrada de aire (T_i), a la cámara de tratamiento o secado. La cámara contiene un grupo de nueve bandejas con capacidad para 100-250 kg. Esta cámara a su vez dispone de otra ventana superior móvil manual, que permite, abrir o cerrar la salida del aire caliente (T_f), para lograr el paso del aire de manera natural por diferencia de densidad. El colector No 2, se encuentra ubicado en la parte superior de la cámara de tratamiento (Fig. No 1).

El funcionamiento de este secador es natural y no necesita ningún tipo de energía adicional para lograr el secado de los productos y su principio de funcionamiento es el de un termosifón, en donde el movimiento del aire se logra a través de la diferencia de temperatura entre la parte baja del colector por donde entra el aire frío y sube por la inclinación del mismo entrando a la cámara de tratamiento, la cual también dispone de otro colector solar en la parte superior.

El sistema dispone de tres termómetros de control de temperatura, dispuestos de la siguiente manera, dos en la cámara de tratamiento, uno en la parte inferior y otro en la parte superior y otro en el colector solar plano.

Las partes y dimensiones de este sistema se pueden observar en el cuadro No 1.

Los costos de todo el sistema en dólares, se pueden observar en el cuadro No 2.

Cuadro No 1.- Partes componentes y dimensiones del secador solar térmico pasivo o de circulación natural

Partes componentes del sistema/ estructura	Colector solar No 1	Colector solar No 2	Soporte del sistema	Cámara de tratamiento
Dimensiones	1,02 x2,45 m	1x1,5x1 m	1x1,5x0,65 m	1x 1,5x1,5 m
Área de los colectores	2,50 m ²	1,5 m ²		
Volumen del secador				2,25 m ³
Capacidad de secado/ tanda				250 kg
Termómetros de control	1			2

Fig. No 1. Colector solar plano No 1

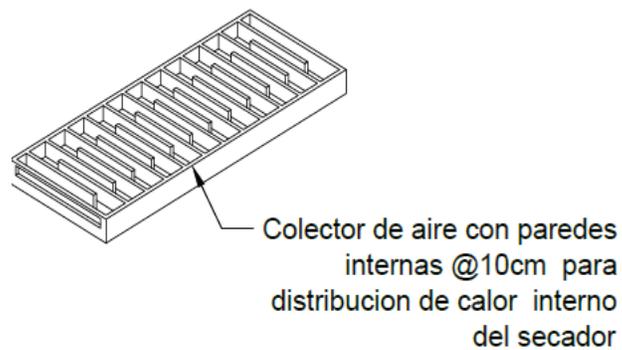
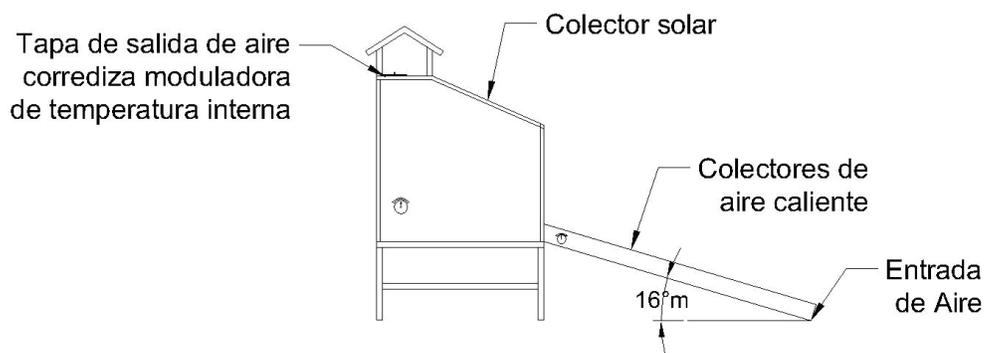
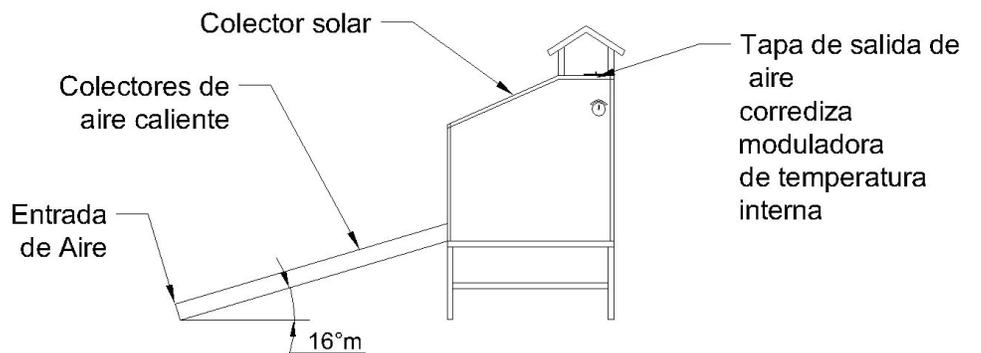


Fig No 2. Cámara de tratamiento y segundo colector solar.



Elevaciones laterales

ESCALA 1:50

Cuadro No 2. Costos generales del secador solar pasivo.

Lista de Materiales para Secador solar pasivo portátil		Precio total estimado USD
Total materiales		\$ 2 322,98
Equipos básicos		
3	Termómetro bimetálico 0/100 °C.	\$ 486,95
Total materiales y equipos		\$ 2 775,15
Construcción e instalación		
Total de construcción e instalación		\$ 2 581,83
TOTAL GENERAL		\$ 5 357,48

Pruebas de secado en el Secador pasivo

Para evaluar el funcionamiento del secador solar pasivo se realizaron pruebas de secado y de medición de las temperaturas y se secaron tres productos: cacao, frijol y maíz. La curva de secado de maíz y frijol se muestran en la figura 2a. Las curvas de mejor ajuste para maíz y frijol se muestran en las figuras 2b y 2c. La curva de secado de cacao se muestra en la curva 2d.

Se midieron las temperaturas del secador durante el día y tres meses, como se muestra en las figuras 2e y 2f.

Curvas de humedad:

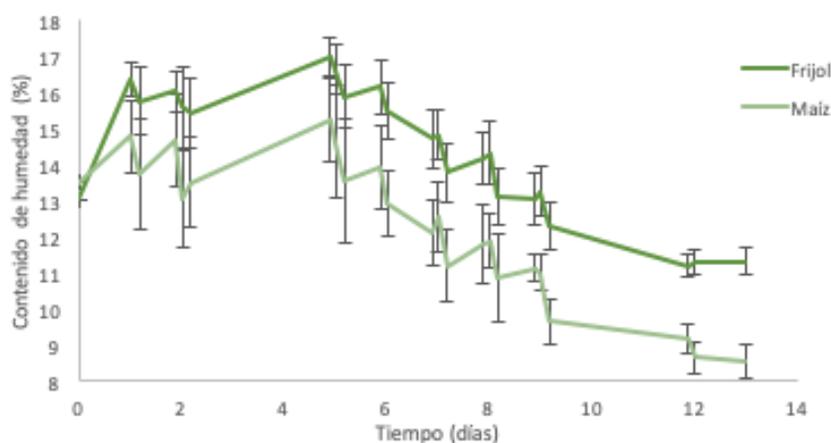


Figura 2a Cambios en el porcentaje de contenido de humedad de semillas de maíz y frijol secadas en un secador solar pasivo en Santa Clara de San Carlos.

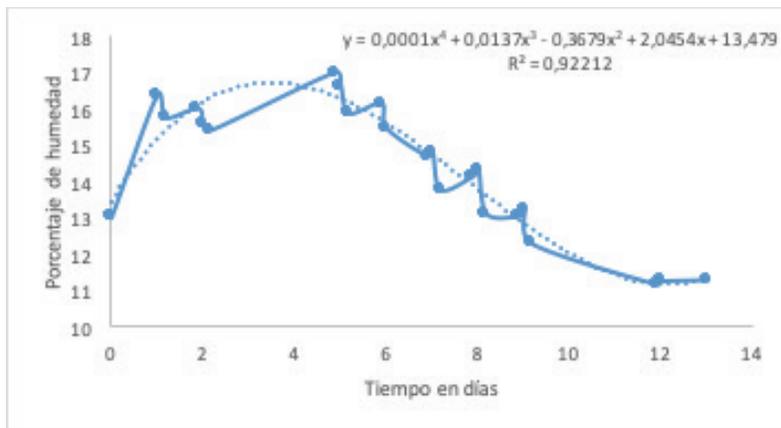


Figura 2b. Ecuación de mejor ajuste para curva de secado de maíz en secador pasivo, Santa Clara de San Carlos

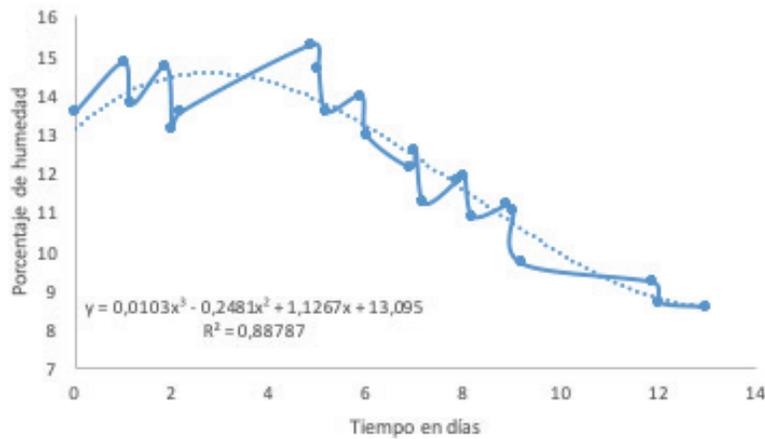


Figura 2c . Ecuación de mejor ajuste para curva de secado de frijol en secador pasivo, Santa Clara de San Carlos

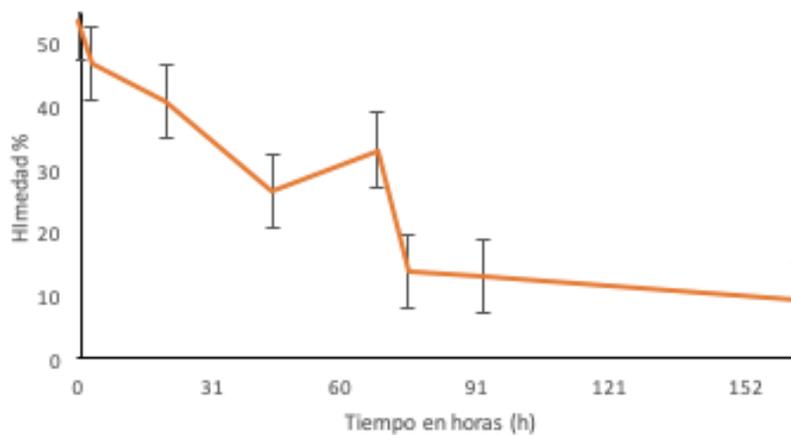


Figura 2d Pérdida de humedad (%) del cacao

Temperatura del sistema

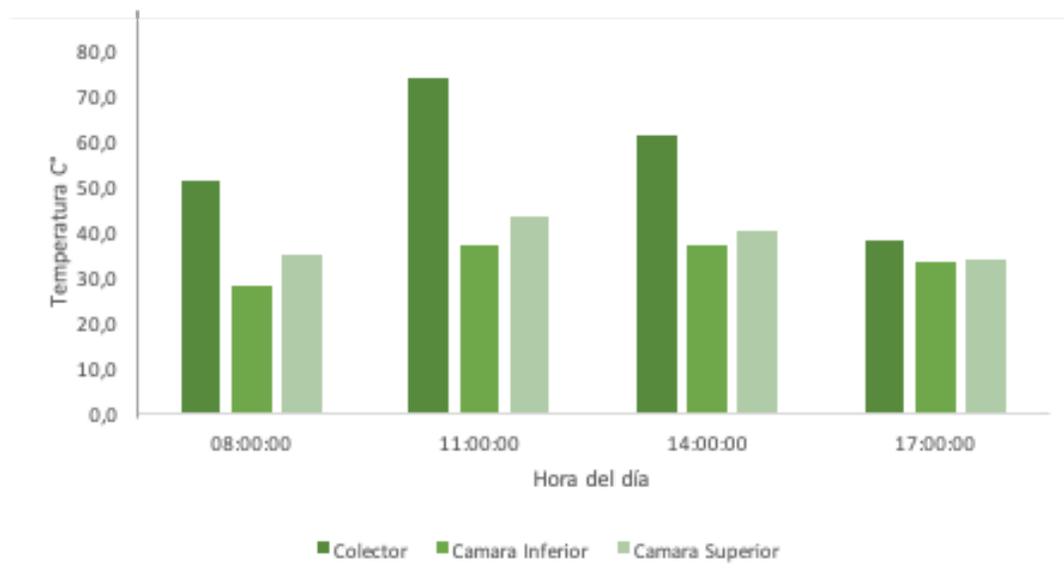


Figura 2e . Temperaturas media, mínima y máxima para el secador pasivo en Santa Clara de San Carlos, Costa Rica, para los meses de agosto a octubre de 2017.

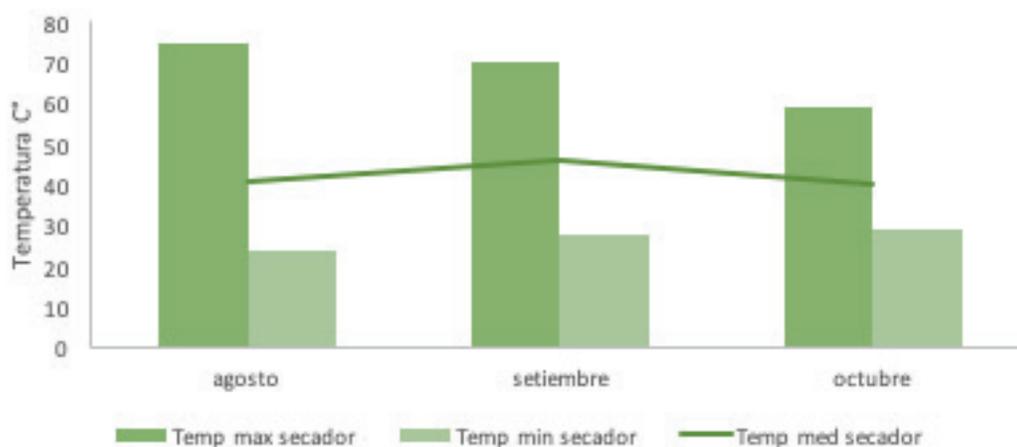


Figura 2f. Fluctuación de temperatura por mes en la cámara de secado de un secador solar pasivo en Santa Clara de San Carlos.

La temperatura varió ligeramente de un mes a otro, durante el mes de octubre se presentan temperaturas menores. Es importante tener en cuenta la época del año en que se pondrá el producto a secar, así como la radiación solar disponible y las temperaturas que se logran.

Cuadro 2a. Temperaturas máximas registradas con los termómetros integrados

Temperaturas máximas (C°)	Hora del día			
	8:00	11:00	14:00	17:00
Colector	100	100	99	70
Cámara Inferior	40	45	44	45
Cámara Superior	53	52	49	46

2.- Secador solar térmico activo híbrido de circulación forzada, prototipo No 2

Ubicado en San Rafael de Alajuela en la capital San José, fue diseñado por el Instituto tecnológico de Costa Rica y una Empresa privada.

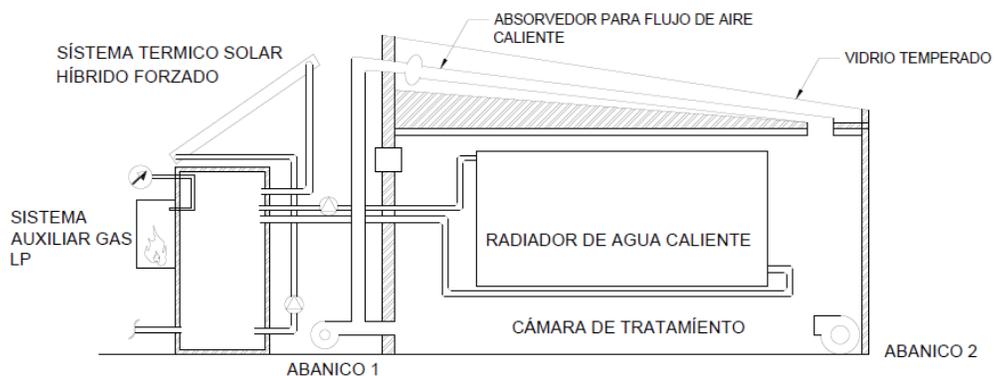
El secador solar térmico forzado híbrido consta de varios módulos integrados que, al unirlos, se logra un óptimo secado de los productos agrícolas que se desean procesar Figura No 3.

El equipo consta de un sistema solar forzado para el calentamiento de aire, que está formado por una bomba de recirculación del aire, tres colectores de aire caliente y un sistema de conducción y salida del aire caliente, que usa el valor inicial de la temperatura del aire inicial (T_i) y la inyecta con un valor final (T_f) cuyo flujo de aire se muestra en la Fig. No 4.

Dispone de un sistema solar forzado de agua caliente, con tres colectores solares térmicos, un sistema de tuberías que conducen el agua con temperatura ambiente (T_i) y la almacena en el tanque con temperatura (T_f) Figura No 3 y Cuadro No 3. Dos bombas para circulación y recirculación del agua a temperatura ambiente y el agua caliente, un termostato, un sistema de control de temperatura y humedad, un sistema auxiliar con gas LP, para homogenizar la temperatura, cuando sea necesario, en función de la radiación local. El agua caliente se hace circular por un radiador que logra la convección de la temperatura en lo interno de la cámara. El agua caliente, puede ser usado durante la noche o el día cuando la radiación solar no es suficiente. Este prototipo es conocido como secador solar térmico híbrido forzado, ya que cuenta con aire, agua y gas LP, el sistema de calentamiento por gas entra en funcionamiento para generar la temperatura necesaria y asegurar un secado uniforme a través de un sistema de control térmico o termostato, por convección y conducción. El secador solar está equipado con un sistema de control de datos que registra la temperatura y la humedad de diferentes puntos del secador para un óptimo funcionamiento del mismo.

Cuadro No 3. Partes componentes y dimensiones

Partes componentes del sistema/ estructura	No de equipos adicionales	Tres colectores solares para aire caliente	Dos colectores solares para agua	Radiador de control	Cámara de tratamiento o secado
Dimensiones		3,2 x 1,6 m	1,45 x 0,8 m	2,80 x 1,5 m	3,6 x 1,9x 1,8 m
Área		15, 36 m ²	2,32 m ²	4,2 m ²	6,84 m ²
Volumen					12,31 m ³
Capacidad de secado/ tanda					500-650 kg / carga
Termómetros	4				
Ventiladores/ abanicos	2				
Bombas	3				
Termostato	1				
Dataloguer	1				



SISTEMA SOLAR HÍBRIDO CON SISTEMA TÉRMICO FORZADO CON AGUA CALIENTE Y RADIADOR INTERNO, SISTEMA DE ABSORVEDOR DE AIRE CALIENTE Y GAS LP

Figura No 3. Secador solar térmico activo forzado híbrido, con sistema solar forzado de agua y aire caliente y sistema auxiliar con gas LP.

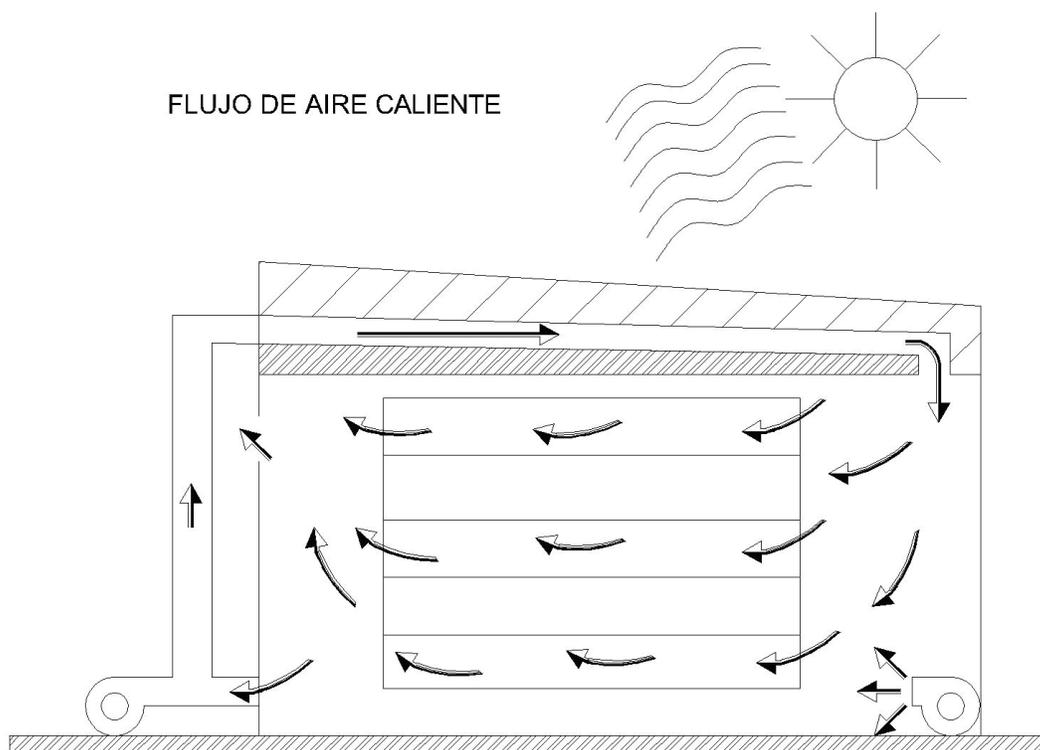


Figura No 4.- Flujo de aire caliente en el secador solar térmico activo forzado híbrido

A partir de los resultados obtenidos con este prototipo experimental se diseñaron dos más. Uno ubicados en San Rafael de Guatuso, en la Asociación de Productores ambientalistas de cacao de Katira en la PYME SIBAELI y el otro en Santa Clara de San Carlos en la Sede del Instituto Tecnológico de Costa Rica, ambos en la zona Norte.

3.- Secador solar térmico activo híbrido de circulación forzada, prototipo No I y II

Este prototipo se construyó sobre la base de los resultados del anterior, y está ubicado en San Rafael de Guatuso, Katira, en la pequeña empresa de procesamiento de cacao para producir chocolate y consta de las mismas partes del anterior, pero ampliadas, para lograr mayor área de calentamiento solar Figura No 5.

Dispone de un sistema solar forzado para el calentamiento de aire, que está formado por una bomba de recirculación del aire, seis colectores de aire caliente al lado del sistema, con un sistema de conducción de entrada y salida del aire caliente, con un valor inicial de la temperatura del aire (T_i) y la inyecta con un valor final (T_f) Figura No 5 y 6, se muestra el prototipo No 3 y en la figura No 7 se muestra el prototipo No 4. También tiene sistema solar forzado de agua caliente, con tres colectores solares térmicos, un sistema de tuberías que conducen el agua con temperatura ambiente (T_i) y la almacena en el tanque con temperatura (T_f). Dos bombas para circulación y recirculación del agua a temperatura ambiente y el agua caliente, un termostato, un sistema de control de temperatura y humedad (dataloguer), un sistema auxiliar con gas LP, para homogenizar la temperatura, cuando sea necesario, en función de la radiación local. Las partes componentes del sistema, así como sus dimensiones se pueden observar en el cuadro No 4. El agua caliente se hace circular por un radiador que logra la convección de la temperatura en lo interno de la cámara de tratamiento. Este prototipo es conocido como secador solar térmico híbrido forzado, ya que cuenta con aire, agua y gas LP para cuando la energía solar no es suficiente, el sistema de calentamiento por gas entra en funcionamiento para generar la temperatura necesaria y asegurar un secado uniforme a través de un sistema de control térmico o termostato, por convección y conducción. El secador solar forzado híbrido está equipado con un sistema de control de datos que registra la temperatura de diferentes puntos del secador para un óptimo funcionamiento del mismo.

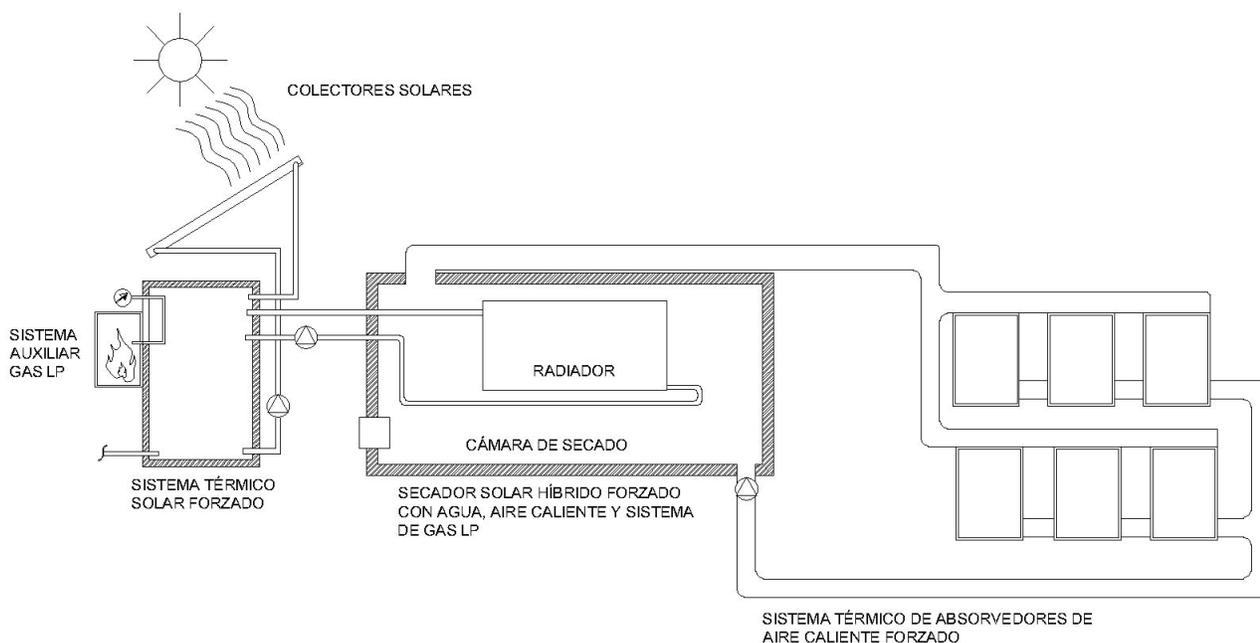


Figura No 5.-Secador solar activo forzado híbrido, con sistema solar forzado de agua y aire caliente y sistema auxiliar con gas LP de San Rafael de Guatuso y del Instituto Tecnológico de Costa Rica Prototipo No 3.

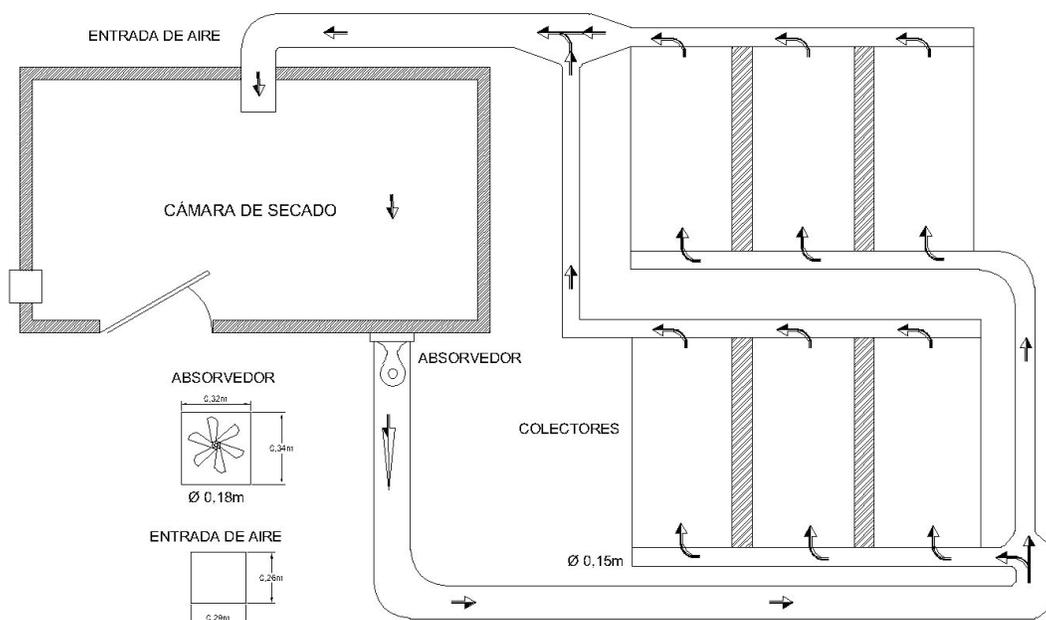


Figura No 6.- Flujo de aire caliente del secador solar térmico activo prototipo No 3

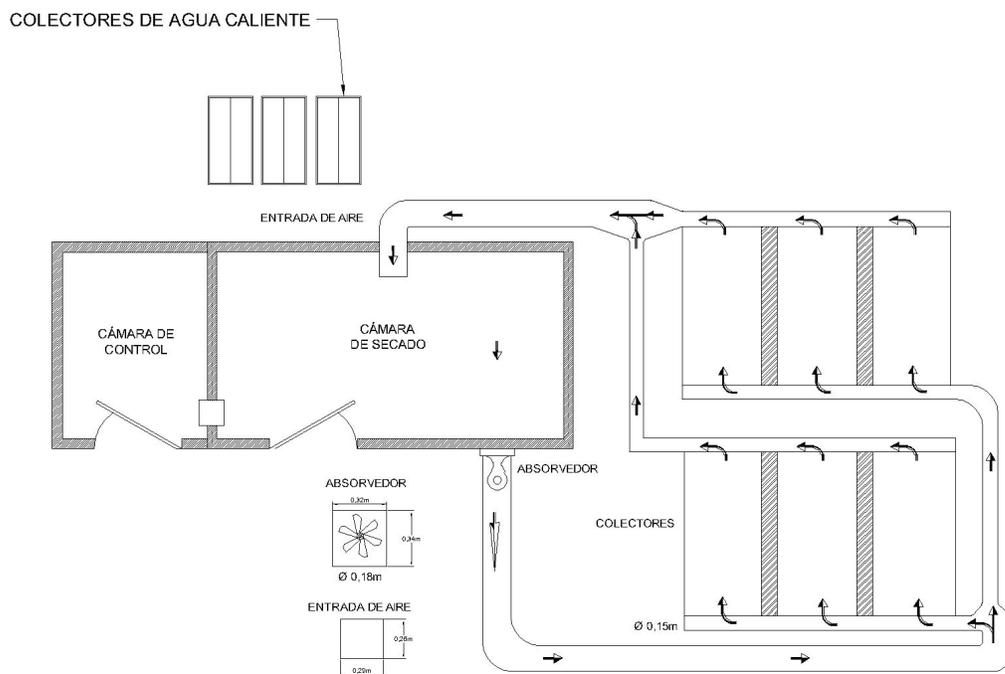


Figura No 7.- Secador solar activo forzado híbrido, con sistema solar forzado de agua y aire caliente y sistema auxiliar con gas LP de San Rafael de Guatuso y del Instituto Tecnológico de Costa Rica Prototipo No 4.

El costo general de este sistema se puede observar en los Cuadros No. 5; 5a, 5b, 5c, 5d.

Cuadro No 4.- Componentes del sistema y dimensiones

Partes componentes del sistema/ estructura	No de equipos adicionales	Seis colectores solares para aire caliente	Tres colectores solares para agua	Tanque de agua	Radiador	Cámara de tratamiento
Dimensiones		1,06 x 2,95 m	1,0 x 2,10 m		2,5 x 1,5 m	3 x 2,88 m
Área		18,76 m ²	2,10 m ²		7,5 m ²	8,64 m ²
Volumen				200 L		3 x 2,88 x 1,98 17,10 m ³
Capacidad de secado/ tanda						750 - 1 500 kg / carga
Radiador	1					
Ventiladores/ abanicos	2					
Bombas	3					
Termostato	1					
Dataloguer	1					

El costo del sistema solar híbrido forzado de secado y deshidratación con aire y agua caliente y gas LP, se puede observar en los cuadros No 5, 5a, 5b, 5c y 5d.

Cuadro No 5. Sistema solar térmico de calentamiento de agua forzado

Unidades	Descripción	Valor	Observaciones
1	Tanque presurizado vertical para agua caliente. Sistema indirecto con un serpentín intercambiador de calor interno. • Respaldo eléctrico incorporado		Esto es un sistema integrado completo
3	Colectores solares planos • Absorbedor selectivo de alta eficiencia • Marco de aluminio anodizado AL6063-T5 • Vidrio temperado solar de 3.2 mm de espesor • Fondo de aluminio con aislamiento de poliuretano y lana de piedra.		
1	Grupo hidráulico		
15 m	Long line tubería Tubería doble aislada entre colectores y tanque Cable de sensor		
	Costo total de este sistema	\$ 4 200,00	

Cuadro No 5a .- Sistemas adicionales utilizados en el interior del secador

Unidades	Descripción	Valor	Observaciones
1	Instalación eléctrica e iluminación	\$ 300,00	Iluminación de las cámaras
1	RC Recirculación en el sistema de secado Bomba con timer	\$ 460,00	Para la circulación diurna/ nocturna del agua caliente
1	Respaldo de gas <ul style="list-style-type: none"> • Quemador de paso Modelo RTS 1316 • Capacidad: 13 L/ min. Delta T 25° K 	\$ 1 204,00	Sistema híbrido
1	Dataloguer del sistema forzado	\$ 500,00	
1	Radiador (2 partes)	\$ 500,00	
2	Dos Estructuras especiales para montar colectores en el suelo planos y paneles fotovoltaicos	\$ 1200,00	
1	Instalación del sistema solar y sus componentes adicionales	\$ 1 655,00	
1	Deshumificador de 28 m ³	\$ 201,00	
Total		\$ 6 020,00	

Cuadro No 5b.- Sistema de calentamiento de aire forzado

Unidades	Descripción	Valor	Observaciones
6	Absorbedor solar para cámara de tratamiento solar	\$ 4 120,00	
2	Bombas / Abanico para aire forzado 1200-1500 m ³ / ft	\$ 600,00	
1	Tuberías especiales metálicas para instalación	\$ 300,00	
1	Sistema de aislamiento de tuberías externas	\$ 350,00	
1	Montaje e instalación	\$ 1 120,00	
Total		\$ 6 490,00	

Cuadro No 5c.- Anaqueles de bandejas para secado

Unidades	Descripción	Valor	Observaciones
2	Anaqueles para depósito de bandejas para secado Altura x ancho x largo: 1.80 m x 0.90 m x 0.75 m. Separación entre bandejas 0.15 m Número de bandejas 24	\$ 1 206,00 \$ 2 275,80	
Total		\$ 3 481,80	

Cuadro No 5d.- Cámara de tratamiento de secado

Unidades	Descripción	Valor	Observaciones
1	Cuarto frigorífico con techo impermeable Panel thermo acústico de 6.00 m de largo x 2.975 m ancho x 1.98 m de altura y espesor de 50 mm con pared divisoria y 2 puertas tipo abatible de 1.10 m x 2 m de alto. Panel de techo para cuarto de 4.00 m largo x 2.975 de ancho 30 mm de espesor Incluye perfiles, angulares, selladores, tornillos Instalación	\$ 8 492,00	
1	Transporte, instalación y llave en mano	\$ 1 034,00	
Total		\$ 9 526,00	
Gran total		\$ 29 717,00	

Las ventajas de estos tipos de secadores térmicos solares son: Se obtiene productos con mejor calidad sensorial, con una carga microbiológica menor (mayor inocuidad de los productos), el proceso es más corto y eficiente, se controla mejor el secado al poder controlar las variables de humedad y temperatura, se puede recuperar la inversión en un período entre 3-5 años, con una durabilidad del sistema de 25-30 años de uso. Ayuda a reducir el balance local de los gases de efecto invernadero, ya se sustituye la leña o combustibles fósiles para generar energía, por la energía radiante del sol.

Los resultados en el secador térmico solar forzado híbrido prototipo no 3 se muestra en figura No 7 y las temperaturas logradas en la figura no 8.

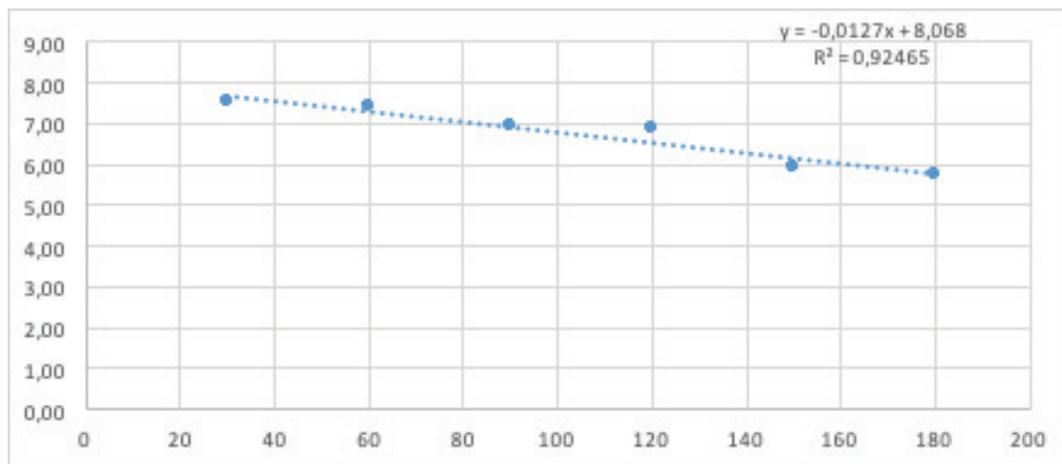


Figura No 7 Curva de ajuste de secado de cacao en el secador solar híbrido prototipo No 3.

Temperatura del sistema

El sistema de secado híbrido presenta temperaturas máximas de hasta 66 °C con el sistema forzado de calentamiento para los meses que se mantuvo encendido el sistema de calentamiento forzado. Las temperaturas aumentan considerablemente con respecto a la temperatura ambiente. Las temperaturas ideales para secado de granos oscilan entre 35 y 65 grados dependiendo del tipo de semilla que se utilice por eso es importante notar que tal como lo indica la literatura el tiempo de secado aumenta con las altas temperaturas por la radiación.

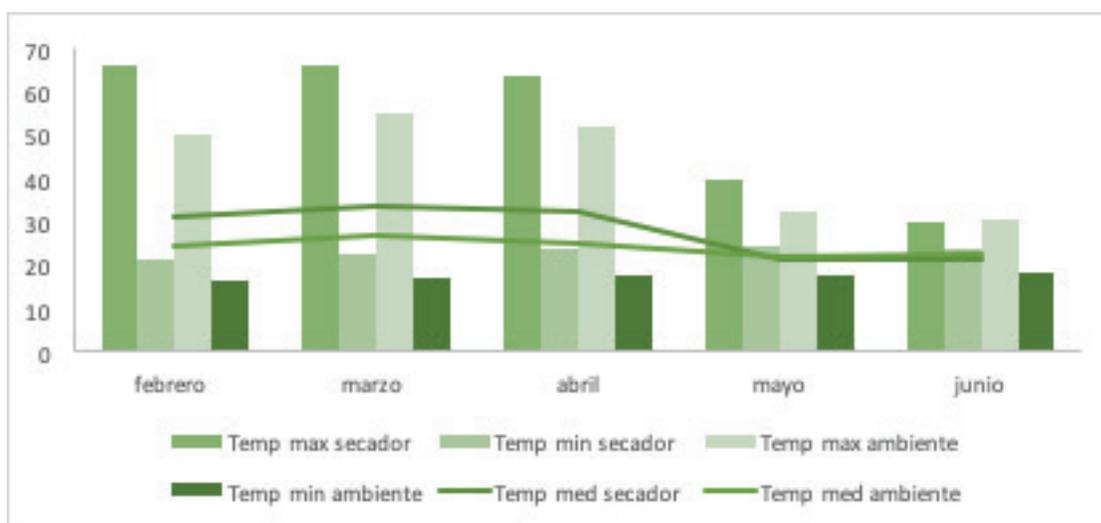


Figura no 8 Temperaturas máximas y mínimas para el secador solar activo híbrido prototipo No 2 de febrero de 2017 a junio 2017.

Conclusiones

Los cuatro prototipos diseñados, construidos y evaluados lograron secar o deshidratar los productos agrícolas o agroindustriales sometidos a la acción de estos sistemas de manera eficiente y en menos de la mitad del tiempo de los sistemas tradicionales.

Recomendaciones

Se deberá seguir trabajando en el registro de datos de estos sistemas, así como en nuevos diseños en función de las necesidades de los productores y las pequeñas y medianas empresas.

Reconocimiento

El grupo de trabajo relacionado con el uso y sistematización de sistemas solares en unidades de producción agropecuaria y agroindustrial, agradecen el apoyo recibido del Programa de Regionalización Universitaria (PUR), a la Dirección de Proyectos (DP) ambas perteneciente a la Vicerrectoría de Investigación y Extensión (VIE) del Instituto Tecnológico de Costa Rica. Agradecemos también el apoyo recibido por parte del Ministerio de Agricultura y Ganadería y la Fundación para el Fomento y Promoción de la Investigación y Transferencia de Tecnología Agropecuaria de Costa Rica (FITTACORI), así como a las asociaciones de productores y empresas privadas que han apoyado esta iniciativa y nos han permitido poder usar los sistemas en sus instalaciones.

Bibliografía

- Amruta R. Eswara and M. Ramakrishnarao. J. 2013. Solar energy in food processing—a critical appraisal. *Food Science of Technology*. 2013 Apr; 50(2): 209–227. Published online 2012 Jun 6. doi: 10.1007/s13197-012-0739-3
- Babalís, S.; Papanikolaou E.; Belessiotis, V. 2007. Investigation of the solar energy utilization for meeting part of the thermal demands of agricultural-product mechanical dryers. *Solar & Energy Systems Lab, NCSR “Demokritos” 153 10 Ag. Paraskevi Attikis – Greece. Proceedings of ISES Solar World Congress 2007: Solar Energy and Human Settlement*
- Banchero, L.; Carballo, S.; Telesca J. 2008. Manual de secado solar de especies medicinales y aromáticas para predios familiares. INIA - DIGEGRA - MGAP ISBN: 978-9974-563-49-0 Editado por la Unidad de Comunicación y Transferencia de Tecnología del INIA Andes 1365, Piso 12. Montevideo - Uruguay <http://www.inia.org.uy>
- Bergues, R.; Bèrriz, P. L.; Griñán, V. P. 1996. Generalización de secadores solares directos en Cuba. Análisis numérico de sus tendencias actuales. *DELOS. Revista Desarrollo Local Sostenible*. Vol 3, mNº 8. Cuba.
- Bérriz, P. L.; Manuel Álvarez González, A.M. 2008. Manual para el cálculo y diseño de calentadores solares. Editorial CUBASOLAR. calle 20 no. 4113, esq. a 47, Miramar, Playa, Ciudad de la Habana, Cuba. <http://www.cubasolar.cu>. ISBN 978-959-7113-36-2
- Busso, A.; Aeberhard, A.; G. Figueredo, G.; Martina, P.; Cocca, V. 1996. Optimización de un secadero solar por convección natural: análisis del colector solar de aire. Dpto. de Termodinámica - Facultad de Ingeniería - UNNE - Av. Las Heras 727 - 3500 Resistencia - Chaco - Argentina.
- Busso, A.; Sogari, N. .Secado solar de productos hortícolas en el nordeste Argentino. Departamento de Física, FACENA, Universidad Nacional del Nordeste - UNNE Campus Libertad, Av. Libertad 5600, 3400 Corrientes – Argentina.
- Costa A.R.; Ferreira S.R. 2007. Sistema de Secado Solar para Frutos Tropicales. *Drying Solar System for Tropical Fruits. Información Tecnológica-Vol. 18 N°4- pág.: 49-58. ALIMENTOS Y AGROQUÍMICA*
- Comunidad de Madrid. 2016. Guía sobre energía solar térmica. www.madrid.org
- Ekechukwua O.V.; Norton B. 1997. Drying systems II: an overview of solar drying technology. *Review of solar-energy Energy Conversion & Management*. Energy Research Centre, University of Nigeria, Nsukka, Nigeria.
- Espinoza S.J. 2016. Innovación en el deshidratado solar (Innovation on solar dehydrator). *Revista chilena de ingeniería*, vol. 24. Número Especial, 2016, pp. 72-80. Chile.
- Fahim, U.; Kang, M. 2016. Impact of drying method of figs with small-scale flat-plate solar collector. *World Journal of Engineering*, Vol. 13 Iss 5 pp. 407 – 412. Downloaded by Instituto Tecnológico de Costa Rica At 20:25 30 January
- FAO. Capítulo IX - Secado de diversos granos. <http://www.fao.org/docrep/X5028S/X5028S0e.htm>, Recuperado el día 13 de marzo del 2018
- FAO.CONSUMO DE ENERGIA. Capítulo 2. 2.1 Energía consumida por la industria. <http://www.fao.org/docrep/T0269S/t0269S06.htm>
- FAO. Colectores planos de energía solar para Calentamiento de aire forzado. <http://www.fao.org/docrep/x5058s/x5058S04.htm>
- Ferreira S.R.; Costa, A.R. 2009. Parámetros de Transferencia de Materia en el Secado de Frutas. *Mass Transfer Parameters in Fruit Drying*. versión On-line ISSN 0718-0764. *Inf. tecnol.* v.20 n.2 La Serena 2009. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642009000200012>. Información Tecnológica-Vol. 20 N°2-pág.: 89-104 doi:10.1612/inf.tecnol.4034it.08.INGENIERIA EN ALIMENTOS
- Fito M. P.; Andrés G. A.; Barat J. M.; Albors S.A.M. 2016. Introducción al secado de alimentos por aire caliente. EDITORIAL UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA. ISBN: 978-84-9705-025-8. España. file:///D:/Usuarios/tjguzman/Documents/D%20INVESTIGACIONES/bibliografia/2018/secadores%20solares%20con%20aire%20caliente%201.pdf

- García, E.L.; Mejía M.F.; Mejía D.J.; Valencia, A.C. 2012 .Diseño y construcción de un deshidratador solar de frutos tropicales. (Design and building of solar dryer equipment for tropical fruits). AVANCES Investigación en Ingeniería Vol. 9 - No. 2 (2012)
- Guía ASIT de la energía solar térmica. 2010. file:///D:/Usuarios/tjguzman/Documents/D%20INVESTIGACIONES/bibliografia/Guia_ASIT_Energia_Solar.pdf
- Hernández R, J.; Martínez V, O.; Quinto D, P.; Cuevas D, J.; Acosta O., R.; Aguilar, J. O. 2010. SECADO DE CHILE HABANERO CON ENERGÍA SOLAR. Revista Iberoamericana de Tecnología Postcosecha, vol. 10, núm. 2, pp. 120- 127 Asociación Iberoamericana de Tecnología Postcosecha, S.C. Hermosillo, México.
- Iglesias Ferrer, Jesús M.; Morales Salas, Joel. 2013. Dimensionado de un sistema térmico solar mediante simulación y su validación energética. Ingeniería Energética, vol. XXXIV, núm. 1, enero-abril, pp. 56-65 Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría La Habana, Cuba
- Kamaruzzaman S. 2011. Report on The Solar Dryers and Solar Drying Technology and Design Prepared by Project: TF/CMB/04/001. Report on The Solar Dryers and Solar Drying Technology and Design Prepared by UNITED NATIONS INDUSTRIAL DEVELOPMENT ORGANIZATION Vienna International Centre, P.O. Box 300, 1400 Vienna, Austria.
- Machado A.V.; Oliveira, E.L.; Santos E.S.; Oliveira, J.A. 2010. Estudio del Secado de Anacardo (*Anacardium occidentale* L.) mediante Secador Solar de Radiación Directa. (Cashew-nut (*Anacardium occidentale* L.) Drying Study Using a Solar Dryer with Direct Radiation). Versión On-line ISSN 0718-0764. Inf. tecnol. v.21 n.1 La Serena 2010. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642010000100006> .Información Tecnológica-Vol. 21 N°1-2010, pág.: 31-37. doi:10.1612/inf.tecnol.4137it.08.ENERGIA Y MEDIO AMBIENTE
- Martín, Y. C. 2012. Colectores solares de aire para el secado de maíz. Universidad Carlos III de Madrid. Repositorio institucional. PROYECTO FIN DE CARRERA INGENIERÍA TÉCNICA INDUSTRIAL – MECÁNICA. e-Archivo <http://e-archivo.uc3m.es>.
- MacManus Ch. N.; Ogunlowo, A.S.; Olukunle, O.J. 2010. Cocoa bean (*Theobroma cacao* L.) drying kinetics, CHILEANJAR. Chilean Journal of Agricultural Research. 70(4):633-639 (OCTOBER-DECEMBER)
- Martínez, E. P.; Noceto, F.; Rodrigo, A. S. 2013. Manual Técnico de Energía Solar. Térmica Volumen II: Aspectos Técnicos y Normativos .2013 Publicación electrónica: Facultad de Ingeniería, Universidad de la República. <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/>
- Michalewicz, J.S.; Henriquez, J. R.; Charamba, J.C. 2011. Secado de Cajuil (*anacardium occidentale* L.): Estudio Experimental y Modelado de la Cinética de Secado. Información Tecnológica Vol. 22(6), 63-74 (2011) doi: 10.4067/S0718-07642011000600007.
- Moya, R.; González, Prevez, P. L.; Sheyla, A. S.; José Guzmán, J.; Bello, M. 2011. El uso de la energía solar para la deshidratación de frutas y vegetales. Instituto de Investigaciones en Fruticultura Tropical. Ave. 7ma No. 3005 e/ 30 y 32. Miramar. Playa. La Habana. Cuba. Revista CitriFrut, Vol. 28, No. 2, julio-diciembre.
- Mutombo, F. I.; Glen, B. 2016. Performance analysis of thermosyphon hybrid photovoltaic thermal collector .Engineering, University of KwaZulu-Natal, South Africa. Journal of Energy in Southern Africa .Vol 27 No 1 .
- Nixon, J.; Kumar, P.; Davies, P. 2013. An interdisciplinary approach to designing and evaluating a hybrid solar-biomass power plant . School of Engineering and Applied Science, Aston University, Birmingham, UK. International Journal of Energy Sector Management Vol. 7 No. 3, 2013 pp. 321-337 q Emerald Group Publishing Limited 1750-6220 DOI 10.1108/IJESM-04-2013-0002
- Orozco, H. C.; Bedoya, L. F. 2007. CALCULO DEL FLUJO MÁXICO Y CAUDAL DE AIRE PARA UN VENTILADOR UTILIZADO EN SILOS PARA SECADO PARA DEL CAFÉ (Fan mass air flow rate for drying coffee). Scientia et Technica Año XIII, No 35, Agosto. Universidad Tecnológica de Pereira. ISSN 0122-1701.
- Queiroz, A.; Hermeval J. Dantas; Rossana M. F. de Figueirêdol; Karla dos S. Melo. 2011. Solar drying of jack fruit almonds. Secagem solar de amêndoas de jaca. Engenharia Agrícola. POST-HARVEST SCIENCE AND TECHNOLOGY. Print version ISSN 0100-6916, Eng. Agríc. vol.31 no.6 Jaboticabal Dec. 2011. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-69162011000600012>, SCIENTIFIC PAPERS

- Quintanar, O. J.; Roa, D. R. 2017. Thermal and financial evaluation of the drying process of coffee bean in a active solar dryer type greenhouse. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* Vol.8 Núm.2 15 de febrero o - 31 de marzo, 2017 p. 321-331.
- Salas, G. C.; Moya, R. M.; Córdoba F. R. 2008. Diseño y construcción de un secador solar para madera. Instituto Tecnológico de Costa Rica Escuela de Ingeniería Forestal Centro de Investigación en Integración Bosque Industria (CIIBI). Kurú: *Revista Forestal (Costa Rica)* 5 (14). Costa Rica.
- Saravia, L.; Alía, D.; Sánchez, B. 2007. El diseño de secadores solares usando las curvas de secado del producto. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* Vol. 11. Impreso en la Argentina. ISSN 0329-5184. Centro de Desarrollo e Investigación en Termofluidos CEDIT.
- Sivipaucar, C.; Curo,H.; Eder Huanchuari, Víctor Llantoy, & Andrés Valderrama. CALCULATION AND CONSTRUCTION OF A SOLAR DRYER BY NATURAL CONVECTION FOR DRYING OF NON-TRADITIONAL MEDICINAL PLANTS
- Sreerag T.S.; Jithish K.S. 2016. Experimental investigations of a solar dryer with and without multiple phase change materials (PCM's). Department of Mechanical Engineering, SNG College of Engineering, Kerala, India. *World Journal of Engineering*. Vol. 13 Iss 3 pp. 210 – 217. Downloaded by Instituto Tecnológico de Costa Rica At 20:28 30 January 2017 (PT)
- Sogari, N. ; A. Busso. 1998. Secadero solar: balance energético. Escuela Regional de Agricultura, Ganadería e Industrias Afines. (ERAGIA) U.N.N.E. Av. Del Centenario y Ruta 12.- 3400 – Corrientes. Argentina.
- Treyball, R. E. 2016. "Operaciones con transferencia de masa", Capítulo XII, Secado. Pág. 653.Repositorio digital de Universidad de las Américas. <http://dspace.udla.edu.ec/bitstream/33000/4132/1/UDLA-EC-TIPI-2007-13%28S%29.pdf>, recuperado el día 21 de marzo del 2018
- Tarigan, E.; Kalirungkut, R.; Perapong Tekasakul, P. 2007. A small scale solar agricultural dryer with biomass burner and heat storage back-up heater. Universitas Surabaya, 60292 Indonesia Prince of Songkla University Hat Yai, Songklha 90110 Thailand. *Proceedings of ISES Solar World Congress: Solar Energy and Human Settlement*.
- Taransum, B., Neeru, G., Prashant, K. T. 2015. INNOVATIVE SOLAR DRYERS FOR FRUITS, VEGETABLES, HERBS AND AYURVEDIC MEDICINES DRYING. *International Journal of Engineering Research and General Science*. Volume 3, Issue 5, September-October, ISSN 2091-2730 883 www.ijergs.org
- Tiwari, A. 2016. A Review on Solar Drying of Agricultural Produce. Department of Food Science and Technology, NIF-TEM, Kundli, India. *Journal of Food J Processing & Technology*. Tiwari. *J Food Process Technol* 2016, 7:9 DOI: 10.4172/2157-7110.1000623. file:///D:/Usuarios/tjguzman/Downloads/a-review-on-solar-drying-of-agricultural-produce-2157-7110-1000623.pdf, recuperada 22 de marzo del 2018
- Vega, A.; Andrés A. ;Fito, P.2005. Modelado de la Cinética de Secado del Pimiento Rojo (*Capsicum annuum L. cv Lamuyo*). (Modeling the Drying Kinetics of Red Pepper (*Capsicum annuum L. cv Lamuyo*). *Información Tecnológica*-Vol. 16 N°6-2005, págs.: 3-11. INDUSTRIA ALIMENTARIA. Chile
- Yunus, C. 2007. Transferencia de calor y masa. Un enfoque práctico. McGraw-Hill Companies, Inc. University of Nevada, Reno. ISBN-13: 978-970-10-6173-2; ISBN-10: 970-10-6173-X. México

This paper should be cited as follows:

- Guzmán-Hernández, T. J., Rodríguez-Araya, F., Castro-Badilla, G., Obando-Ulloa, J. M. and Moreira-Segura, C. (2018). "Application of Passive and Active Solar Thermal Technologies as an Alternative to Traditional Drying Systems in Agricultural Production Units in the Northern Region of Costa Rica", Athens: ATINER'S Conference Paper Series, No: AGR2018-2591.

Energía solar: tecnología aplicada al secado de productos agrícolas de la Región Huetar Norte de Costa Rica

Tomás de Jesús Guzmán Hernández¹, Javier Mauricio Obando Ulloa¹, Freddy Araya Rodríguez¹, Guillermo Castro Badilla², Valentina Arguelles Ulloa³, Jacobo Ortiz Martínez³

¹ Área académica del programa de Doctorado en Ciencias Naturales para el Desarrollo. Instituto Tecnológico de Costa Rica, Campus Local San Carlos.

² Escuela de Ingeniería Electrónica. Instituto Tecnológico de Costa Rica, Campus Local San Carlos.

³ Unidad Académica de Ciencias de la Tierra, Benemérita Universidad Autónoma de Zacatecas.

Introducción

La incorporación de la tecnología en los sectores productivos, específicamente en actividades agropecuarias, ha sido de gran impacto hoy en día; reflejando el interés por beneficiar al productor abarcando criterios de eficiencia, optimización de procesos, incremento de su producción, control de calidad y puntualización sobre el valor agregado de sus productos. Dicha incorporación, también es integrada por el aspecto ambiental en la inclusión de energías alternas, que se enfoca en cumplir con las metas propuestas en el VII Plan Nacional de Energía 2015 - 2030, donde se resume como llevar a Costa Rica a una *"sostenibilidad energética con bajo nivel de emisiones"* (MINAE 2015), esto encadena a todos los sectores productivos del país, dando como desarrollo la innovación en el uso y eficiencia de la energía.

En la dimensión ambiental, el sector de energía del país encara el reto de contribuir con un desarrollo económico cada vez más bajo en emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), se debe tener en cuenta que el sector energía produce cerca del 80% de la emisión total de gases efecto invernadero del país (MINAE 2015). De tal manera las alternativas energéticas, son actualmente, una opción viable para reducir las emisiones de CO₂ a la atmósfera; una de ellas es la energía solar, que al paso del tiempo ha ido creciendo conforme se limita el uso de combustibles fósiles y se promueve el empleo de energías limpias.

Dentro del Instituto Tecnológico de Costa Rica campus San Carlos, el grupo de investigación DOCINADE (Doctorado en Ciencias Naturales para el Desarrollo) está trabajando en la aplicación de energía solar que va encaminada a procesos de secado y deshidratación de diferentes productos, teniendo así, una técnica de conservación con la cual se pretende mantener una buena calidad del alimento y reducción en pérdidas, dando objetividad a las pequeñas asociaciones de productores del sector agropecuario en la región Huetar Norte como los son la Asociación de Productores de Agroambientalistas de Cacao (ASOPAC), donde se instaló un equipo de secado solar (Guzmán. et al. 2019).

Influencia Solar en Costa Rica

Costa Rica presenta un potencial solar teórico de 10000 MW, y su utilización es mínima. (Guzmán. T. et al 2016). Poco potencial utilizado, es el de la energía solar en el país, pues actualmente solo un 0,34% de la energía que se consume viene de fuentes solares (Flores, 2018).

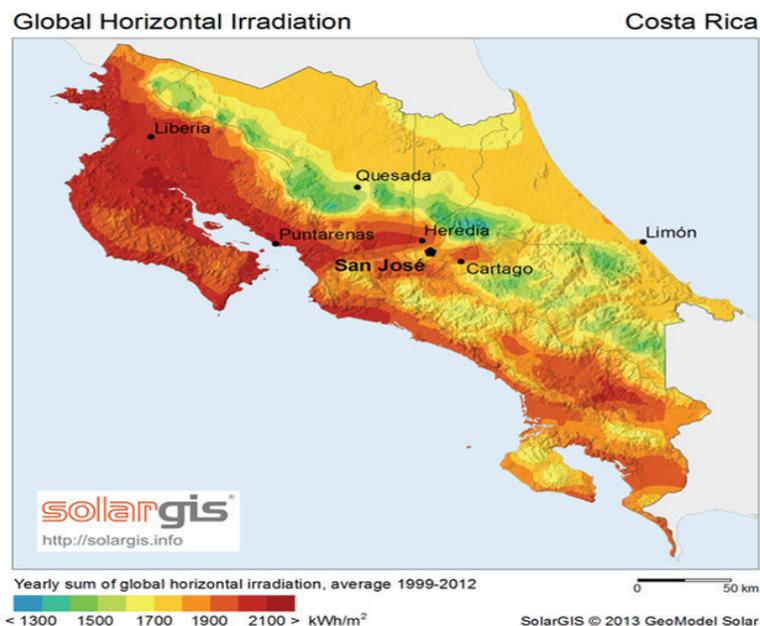


Figura 1. Radiación global recibida en Costa Rica

Conforme al último estudio del Instituto Costarricense de Electricidad (ICE) las dos mejores zonas de radiación solar del país son la Región Huetar Norte y la Región Chorotega, estas con irradiación mayor a 1.700 kWh/m² anual.

EL SECADO

“Es el método universal de acondicionar los granos por medio de la eliminación del agua hasta un nivel que permita su equilibrio con el aire ambiente, de tal forma que preserve su aspecto, sus características de alimento, su calidad nutritiva y la viabilidad de la semilla” (Marques 1993). Es un proceso de gran importancia en la cadena de producción de alimentos. Se realiza para inhibir la germinación de las semillas, reducir el contenido de humedad hasta un nivel que impida el crecimiento de los hongos, y evitar las reacciones de deterioración.

Para determinar parámetros de secado es importante tomar en cuenta las características del producto que se va a secar o deshidratar, tales como: porcentaje de humedad, contenido de humedad mínimo requerido, forma, tamaño, si es necesario realizar algún corte en el producto para optimizar el secado y el uso final que tendrá el producto. Hay que tener en cuenta la apariencia final y el mercado donde se desea colocar el producto (Arce, 2018).

SISTEMAS DE SECADO

Los secadores utilizados tienen por objetivo minimizar el tiempo de secado y mano de obra (principalmente se ha usado para secar semillas), reducir el espacio utilizado para secar, mejorar la calidad del producto, reducir costos y gastos en combustibles. Dentro de las tecnologías desarrolladas actualmente los sistemas de secado están siendo utilizados dentro de pequeñas asociaciones donde los resultados han sido positivos.

Existen muchas maneras de clasificar los secadores solares: por la forma en que fluye el aire, el tipo de incidencia de la radiación con respecto al producto, o el uso compartido de diferentes fuentes de energía (Mora, 2014).

I. TENDIDO AL SOL

Esta técnica consiste en exponer directamente el producto a los rayos solares y al aire, por un periodo de tiempo determinado hasta alcanzar la humedad necesaria para el almacenamiento del mismo.

El secado solar natural es una técnica ampliamente utilizada de preservación de los alimentos en muchos países. Este es el caso de Costa Rica donde esta técnica sigue siendo muy utilizada por pequeños productores en diversas zonas del país, debido al alto costo de los métodos mecánicos, a la falta de infraestructura y porque las condiciones climáticas permiten su uso a un costo muy reducido.

II. SECADOR SOLAR PASIVO

Un secador solar, en general consta de un recinto de secado donde se ubica el material a deshidratar, este puede ser un recinto aislado con conducto de entrada de aire caliente y un conducto de evacuación de aire húmedo, a menudo se utiliza una cámara o túnel como recinto para secar. Un sistema de calentamiento de aire, colocado antes del recinto, denominado colector solar, es la principal fuente de energía para el proceso; básicamente, estos dos componentes definen un deshidratador. Adicionalmente, se puede utilizar ductos para conducir el aire, ventiladores, chimeneas, sistemas de control y medida, y mecanismos de acumulación de energía, o en última instancia fuentes auxiliares para calentar el aire y permitir la circulación de este (L. E. Mealla - Sánchez y J. D. Morales – Olaciregui, 2018).

III. SECADOR SOLAR HÍBRIDO FORZADO

El secador solar híbrido forzado consta de una serie de colectores (de fondo color negro para incrementar la absorción térmica) donde se hace circular agua o aire para que estos tomen una temperatura mayor a la del ambiente. Este secador consta de una cabina por donde el aire caliente es forzado a circular entre el material a deshidratar, posteriormente, el aire es recirculado por tuberías que lo llevan de nuevo hasta los colectores. El secador necesitará de un sistema auxiliar ya sea gas o eléctrico, ya que en ocasiones las condiciones climáticas impedirán su buen rendimiento.

En algunos casos la orientación de los colectores es diferente debido a la influencia climática y zona geográfica donde se requiera instalar, además varían los tamaños en cuanto al volumen y producto que se desee secar.

Metodología

Conforme lo antes mencionado, se están evaluando los equipos de tecnología solar instalados en las unidades de producción seleccionadas por el área del Doctorado en Ciencias Naturales para el Desarrollo (DOCINADE) del ITCR. Se instalaron dos sistemas de secado:

1. Un secador solar pasivo - híbrido en el TEC campus San Carlos

El dispositivo se diseñó para que funcione 100% con energía solar, este cuenta con dos partes principales (Arce, 2018):

- Colectores solares: cuenta con colectores solares externos unidos a la cámara de secado, con una inclinación de 16° que se instaló con dirección suroeste, por dentro este presenta un serpentín para que por medio de diferencia de temperaturas el aire a temperatura ambiente ascienda mientras va aumentando su temperatura hasta entrar a la cámara de secado.
- Cámara de secado: Con capacidad de colocar ocho bandejas de secado de 135 x 65,5 x 11 cm.
- Paneles fotovoltaicos: Dos de 270 y uno de 255 Watts



2. Un secador térmico solar híbrido forzado en Katira de Guatuso (Arce, 2018):

- Cámara de secado: El secador tiene una cámara de secado con colectores solares independientes, un sistema de calefacción forzado y un sistema alternativo de calefacción que funciona con gas butano.
- Colectores: el secador tiene un sistema de colectores planos, separados de la cámara de secado, el sistema presenta un total de seis colectores planos de 3,63 m x 1,97 m para un área total de colectores de 42,9 m².
- Sistema auxiliar de secado: sistema de calefacción auxiliar de gas para secado nocturno. El gas calienta el agua que entra al sistema de secado forzado, el sistema tiene un tanque de agua que puede almacenar hasta 500 litros.

Análisis y resultados

SECADO TENDIDO AL SOL

Datos del secado de cacao tendido al sol (secador tipo túnel) de la asociación de productores de ASOPAC en Guatuso. Específicamente se analiza el caso de la empresa SIBAELI.



(Secado tradicional tipo túnel)

Tabla 1. Datos de secado de cacao implementando un sistema tradicional

Año	Kg totales	Kg Secos	Pérdidas (Kg)
2015	2241	1746	495
2016	1792	1458	334
2017	4474	3080	1394

Fuente: propia

El productor Juan Carlos Sibaja menciona que: el secado de cacao con esta técnica tardaba hasta 15 días en completarse, y las pérdidas se debían a crecimiento de hongos y humedad en el cacao, debido a exposición al ambiente.

SECADOR SOLAR PASIVO - HÍBRIDO

Para el año 2019 en los meses de marzo, abril y mayo (temporada seca) se realizó un nuevo monitoreo de temperaturas (esta vez sin muestra) con la ayuda de una pistola de infrarrojo, tomando datos del secador en diferentes puntos:

- Tres tomas en el colector: una corresponde a la parte inferior (entrada del aire), la segunda en la parte media del colector, la última corresponde a la parte superior del colector (donde el aire caliente pasa a la cámara).
- Una toma dentro de la cámara.
- Una toma en la parte superior de la cámara (salida venturi).

De igual manera, se registraron los datos de temperatura de los 3 termómetros que están integrados al secador, donde se pudieron observar los siguientes resultados:

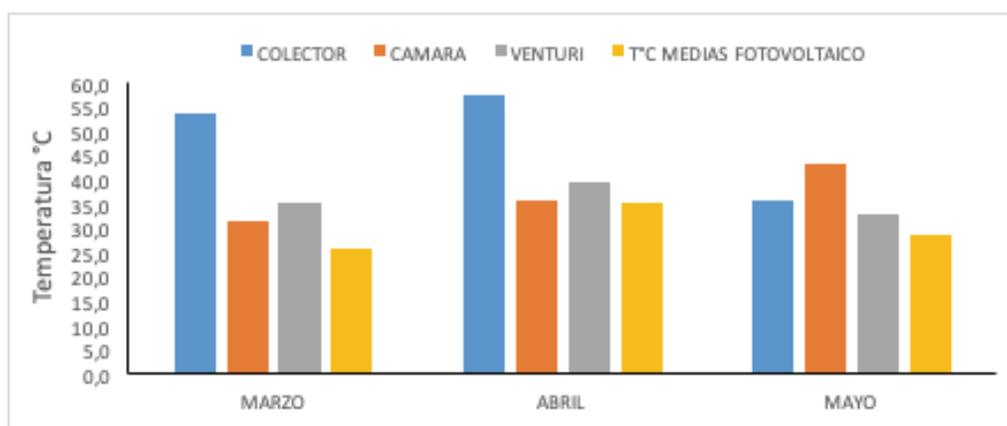


Figura 2. Temperaturas alcanzadas por termómetros del secador pasivo durante marzo a mayo del 2019

Actualmente se expresan temperaturas que fluctúan entre los 34 - 56° C, y se observa que las máximas se alcanzan alrededor del mediodía, por tal motivo, el sistema descrito es propicio para el secado de productos (Tabla 2) como: semillas, hortalizas y frutas.

Tabla 2. Productos agrícolas considerados para el secado en sistema pasivo-híbrido.

Producto	Fresco (Humedad %)	Seco (Humedad %)	Temperatura °C
Cacao	65	8	45
Café	50	11	<60
Arroz	24	14	50
Frijol	20	15	45
Papa	75	13	55
Cebolla	80	4	55
Zanahoria	70	5	60
Ajo	80	10	55
Manzana	84	14	50
Uva	80	20	55

Fuente: Arce 2018

Durante el mes de marzo de 2019 se implementaron tres paneles fotovoltaicos (*figura 3*), esto con el propósito de mantener las temperaturas óptimas de secado en el periodo nocturno, es decir, evitar que los productos vuelvan a humedecerse y que por ello, el proceso de secado tarde más.

Estos paneles, alimentan una batería que hace funcionar dos resistencias ventiladas que están dentro del secador.

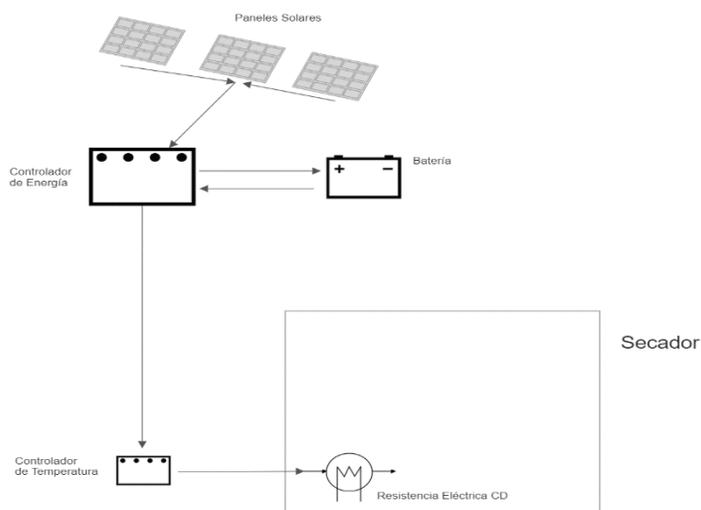


Figura 3. Esquema del circuito eléctrico del secador pasivo-híbrido.

Añadido a esto, se tomaron tres lecturas de irradiancia (en 3 puntos circundantes al secador), con un piranómetro portátil, para estimar la influencia de radiación a la que el secador está expuesto.

El secador solar estuvo bajo una influencia promedio de 1.971 KWh/m² durante el periodo marzo – mayo.

SECADOR SOLAR ACTIVO HÍBRIDO FORZADO

Los datos analizados corresponden al secado de cacao de la empresa SIBAELI, que forma parte de los productores de cacao de ASOPAC. Estos se analizaron en el año 2018, su evaluación mostró resultados positivos en el tiempo de secado,

ya que este se redujo hasta un máximo de 5 días por lote de cacao. También se evidenció que no hay registro de pérdidas para este año.

El análisis se basó en el comportamiento de las temperaturas del sistema durante el secado, como se muestra a continuación:

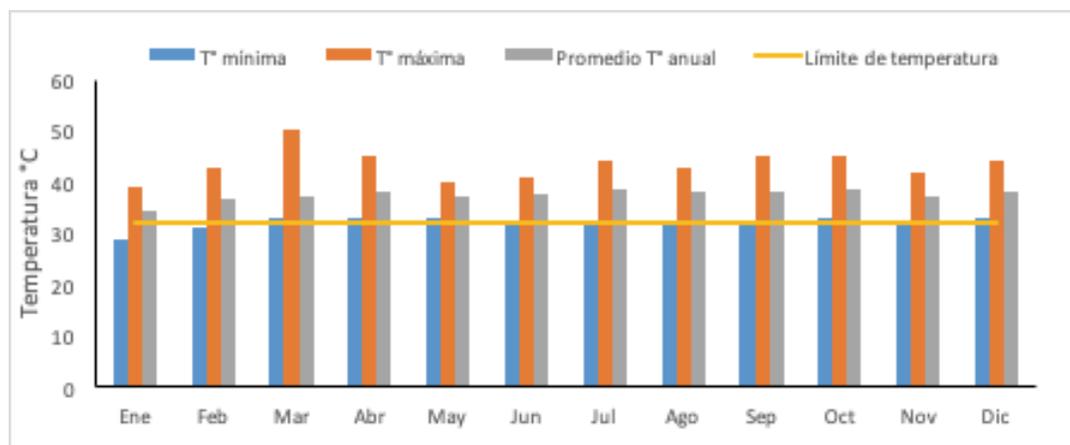


Figura 4. Temperaturas alcanzadas por el secador, se marca el límite mínimo de temperatura (32 °C) para el secado eficiente de cacao.

En general, el sistema mantuvo un promedio anual de 37,4 °C. El equipo ha logrado el secado homogéneo del cacao, este tuvo un ahorro de gasto energético del 83% aproximadamente.

Conclusiones

Por lo anteriormente expuesto, podemos concluir que el uso de energía solar aplicada al secado o deshidratación, ha resultado ser una herramienta eficiente para preservar las cualidades organolépticas de productos alimenticios, optimiza el tiempo del proceso y mantiene la inocuidad inquiriendo en la disminución de pérdidas.

Existen ventajas que dan pauta para un producto de mayor calidad, es decir:

- El sistema pasivo – híbrido evita que el producto que está secándose quede expuesto a polvo, insectos y animales, menos probabilidad de enmohecerse, se mantienen las cualidades organolépticas y el tiempo de secado es menor; esto respecto al sistema de tendido al sol.
- El sistema activo híbrido forzado mantiene las temperaturas constantes (día y noche) que garantizan un mejor secado, se reduce el tiempo, mayor capacidad, la calidad e inocuidad son superiores, sistema de lectura de datos, mínima mano de obra y operación.

Los resultados han demostrado que el método de secado es una opción viable, ya que se observa un impacto positivo a nivel social; ayudando a pequeños productores a emprender sus negocios, a nivel económico; se perciben beneficios ya que se incorpora un valor agregado al producto, a nivel ambiental; por el uso de energías limpias que mitigan la emisión de gases de efecto invernadero. Por tales motivos, ambos secadores implementados por el ITCR SSC son un impulsor sostenible para el desarrollo agropecuario de la Zona Norte de Costa Rica.

Bibliografía

- Arce, N. (2018) Diseño y evaluación de cuatro prototipos de secado solar para productos agrícolas en Costa Rica, p.22. Tesis Máster Gestión de Recursos Naturales y Tecnologías de Producción.
- Flores, B. (2018) ¿Qué tan rentable es utilizar la energía solar? La República. Recuperado de <https://www.larepublica.net/noticia/que-tan-rentable-es-utilizar-energia-solar>
- Guzmán, T. et al (2016) Uso de tecnología solar en actividades agropecuarias de la Región Huetar Norte de Costa Rica, p.23. Revista
- Guzmán, T. (2019) Familias térmicas solares para el procesamiento de productos agropecuarios y agroindustriales en la región Huetar Norte de Costa Rica: programa local piloto.
- L. E. Mealla - Sánchez y J. D. Morales - Olaciregui (2018) Evaluación del comportamiento térmico de secadores solares en régimen pasivo. Tecnológicas, vol. 21, no. 41, pp.33, 2018. Recuperado de <http://www.scielo.org.co/pdf/teclo/v21n41/v21n41a03.pdf> Marques, I. (1993). Manual de manejo poscosecha de granos a nivel rural. Capítulo III. SECA-DO DE LOS GRANOS. Disponible en: <http://www.fao.org/3/x5027s/x5027S05.htm>
- MINAE (Ministerio de Ambiente, Energía) (2015). VII Plan Nacional de Energía 2015 - 2030. pp(1,2) Disponible en <https://minae.go.cr/recursos/2015/pdf/VII-PNE.pdf>
- Mora, A. (2014). Dimensionamiento, construcción y puesta en marcha de un sistema de secado de granos de café con uso de colectores solares, p.18: Tesis Lic. Ing. químico. Recuperado de <http://repositorio.sibdi.ucr.ac.cr:8080/jspui/bitstream/123456789/3501/1/36174.pdf>

Sistemas fotovoltaicos y su posible uso en sistemas pasivos y activos de secado

Introducción

El avance a pasos agigantados de las aplicaciones de la energía solar tiene sus bases en la investigación básica y aplicada como lo demuestran el aumento en la eficiencia de las celdas fotovoltaicas y su producción en masa, los calentadores de agua comerciales, las tecnologías de concentración solar, entre muchas otras aplicaciones y dispositivos (ACESOLAR 2014).

Según el VI Plan Nacional de Energía 2012-2030 del Ministerio de Ambiente y Energía y Telecomunicaciones "Costa Rica es un país rico en recursos naturales renovables que podrían utilizarse con fines energéticos; sin embargo, basa su desarrollo en el uso de los derivados del petróleo (MINAET, 2011). El crecimiento promedio del consumo de hidrocarburos en los últimos 20 años fue del 4,7% anual y el de la electricidad del 5,3% anual.

Cada fuente de energía tiene un potencial de emisiones de CO₂ diferente, por lo que, la composición de la matriz de la oferta de energía y las tecnologías de los equipos de consumo (vehículos, equipos industriales y agrícolas, entre otros) determinarán el nivel de emisiones del sistema energético del país.

Ante la gran dependencia energética de los combustibles fósiles cuyo consumo produce altos niveles de emisiones, es necesario impulsar medidas de uso racional y eficiencia energética, entonces podemos decir que la tendencia internacional de uso de energía, según la Agencia Internacional de las Energías Renovables (IRENA 2013), citada por MINAET (2011), plantea una mayor participación de fuentes renovables en la matriz energética mundial, como por ejemplo: energía geotérmica, solar, eólica y biomasa y un descenso en las no renovables: carbón, petróleo y gas.

La tecnología disponible ya utilizada en otras aplicaciones, sectores y países, es confiable y sólida para la asimilación por los productores; el coste de inversión es asequible y los plazos de recuperación y amortización de la inversión son atractivos. Definitivamente se necesita la validación de esta tecnología en la región e introducirla en los procesos de innovación por parte de los productores lecheros de ambas zonas.

El Instituto Tecnológico de Costa Rica tiene la misión de extensión para el desarrollo de la región norte con diversos planes y programas de sensibilización y capacitación en sistemas de producción limpia.

La energía del sol y su uso:

La radiación solar que llega al sistema tierra - atmósfera, se conoce también con el nombre de radiación electromagnética de onda corta. Del 100 % de radiación solar, sólo un 25% llega directamente a la superficie de la Tierra y un 26% es dispersado por la atmósfera como radiación difusa, esto hace que un 51 % de radiación llegue a la superficie terrestre. Un 19 % es absorbido por las nubes y gases atmosféricos. El otro 30 % se pierde hacia el espacio, de éstos, la atmósfera dispersa un 6 %, las nubes reflejan un 20 % y el suelo refleja el otro 4 %. Entonces la radiación solar que llega a la atmósfera puede ser dispersada, reflejada o absorbida por sus componentes. (Taiz y Zeiger, 2002, Camejo, 2012).

La energía del sol se usa para el calentamiento de agua, a través de colectores solares térmicos y para producir corriente eléctrica con celdas fotovoltaicas. (Landa, 2005, Roman, 2007, Rizk y Nagrial, 2008, Torpey, 2009, Tinajeros, 2011, Swift, 2011).

La demanda de energía se incrementa cada año, a pesar de que los recursos energéticos son limitados. De ahí la importancia de fomentar el uso de energías renovables como la solar como la energía solar fotovoltaica (Landa, 2005)

Resulta imposible concebir un desarrollo sostenible que no esté basado en las fuentes renovables de energía en sus diferentes manifestaciones. Entonces la energía del sol puede utilizarse en el país con ventajas en aplicaciones en pequeña y gran escala para la producción de energía.

Sistemas de captación fotovoltaicos

Los paneles o módulos fotovoltaicos están formados por un conjunto de celdas que producen electricidad a partir de la luz que incide sobre ellos. El parámetro estandarizado para clasificar su potencia se denomina, y se corresponde con la potencia máxima que el módulo puede entregar bajo unas condiciones estandarizadas, que son: Radiación de 1000 W/m²; Temperatura de célula de 25 °C (no temperatura ambiente).

Los paneles fotovoltaicos se dividen en: Cristalinos, Monocristalinos estos se componen de secciones de un único cristal de silicio (Si), y los Policristalinos: cuando están formadas por pequeñas partículas cristalizadas, 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 puede no llegar al 10%; sin embargo, su coste y peso es muy inferior.

CENSOLAR (1993) plantean la necesidad de utilizar los sistemas solares de captación de energía para diferentes usos en la industria, los sectores productivos y las zonas residenciales.

Guzmán (2014) plantea que los sistemas solares térmicos y fotovoltaicos deben ser usados en sistemas agropecuarios y en unidades de producción del sector, entre ellos, las lecherías, plantas de matanza, empacadoras y plantas procesadoras en forma de autoconsumo, para bajar facturas eléctricas y disminuir la huella de carbono del sector ganadero.

Los usos de los sistemas fotovoltaicos son muchos y variados dentro de los cuales podemos citar: Centrales conectadas a red para suministro eléctrico, (Como el caso de la planta de Bagaces en Guanacaste, Costa Rica, ICE 2011), sistemas de autoconsumo en generación distribuida, suministro eléctrico en instalaciones rurales alejadas, luminarias, faros, comunicaciones entre otras.

Desde el punto de vista ambiental estos sistemas, nos permiten hacer uso de una energía renovable inagotable, hasta ahora y con precios asequibles en este momento, que les permite a los empresarios producir su propia energía o parte de ella, para ser usadas en sus procesos productivos. Los precios de las mismas se han ido abaratando con el tiempo y permite una amortización de la inversión entre 3-5 años, para una instalación que puede durar entre 20-25 años, con un buen cuidado y mantenimiento.

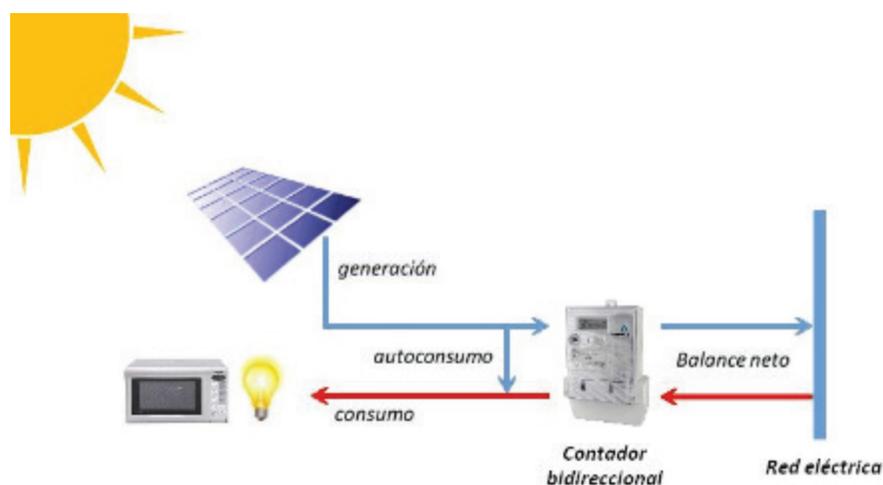


Figura N°1.- Esquema de un sistema fotovoltaico (www.gstriatum.com)

Resultados

Los componentes del sistema Fotovoltaico son: el panel fotovoltaico, que es el principal componente del sistema; el regulador de Carga, si la batería no se va a conectar al sistema normal de corriente (en nuestro caso usaremos generación distribuida, o sea lo vamos a conectar a la red); el inversor o convertidor, o sea el transforma la corriente directa a corriente alterna y finalmente los demás componentes los cuales son cables eléctricos, breakers, fusibles, la caja que contiene las celdas y forma el panel, de aluminio algunas, pvc, sellantes, recubrimientos contra la corrosión.

Con el diseño del sistema fotovoltaico de generación eléctrica una vez montado, se procedió a la toma de datos y monitoreo de variables que afectan al sistema como iluminación, nubosidad, horas de luz, radiación solar directa y difusa, etc. Dichos paneles solares fotovoltaicos puede ser conectado a la red en generación distribuida de autoconsumo.

Cuadro 1.- Resumen de las variables evaluadas en los paneles fotovoltaicos ubicados en la lechería del ITCR Sede San Carlos durante los meses de Mayo a Noviembre del 2015.

Sistema	Variable	Media	Mín	Máx
Fotovoltaico	kWh/Día	6,12	1,24	11,10

El total de energía producida en kWh por mes desde Mayo hasta Noviembre nos deja un total de 1 283.06 kWh producidos, generando una media de 183,29 kWh/mes.

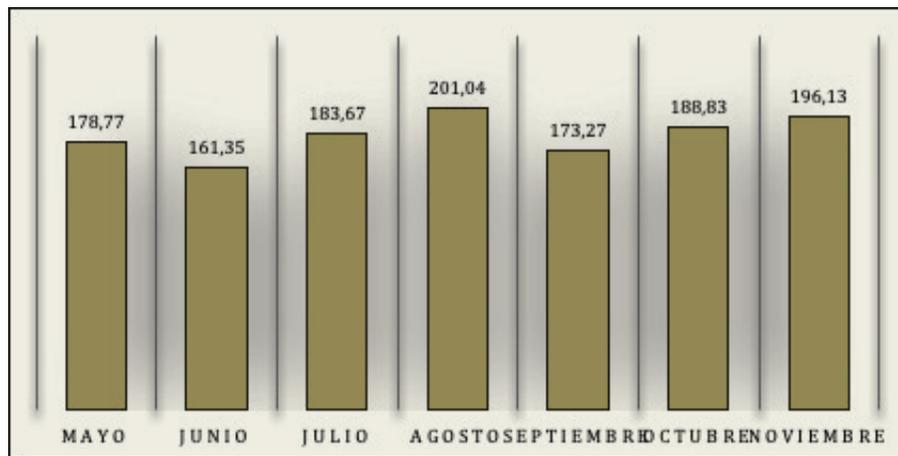


Figura N°2.- kWh producidos por mes desde Mayo hasta Noviembre en la lechería del ITCR Sede San Carlos.

Con lo anterior se infiere que el rendimiento de ganancia de energía logrado con este tipo de equipo es complementario a las fuentes energéticas convencionales que se utilizan en los sistemas productivos, porque va a depender de la radiación solar.

Cuadro N°2.- Generación energética, potencial disminución de factura económica y disminución en las emisiones de GEI logrados por los sistemas de captación de energía solar ubicados en el sistema lechero del ITCR Sede San Carlos.

Sistema	Mes evaluado	Equivalente energético generado (kWh)	Disminución potencial de la factura (¢)	Disminución potencial de emisiones de GEI (ton CO ² e)
Fotovoltaico	Mayo	178,77	21 088,32	0,021
	Junio	161,35	19 033,40	0,019
	Julio	183,67	21 666,34	0,022
	Agosto	201,04	23 715,36	0,024
	Septiembre	173,27	20 439,52	0,020
	Octubre	188,83	22 275,04	0,022
	Noviembre	196,13	23 136,17	0,023
Total del periodo		1 283,06	151 352,15	0,151

Con los datos actuales de estos meses, realizando la estimación a un año se podría disminuir una cantidad de 0,312 ton CO²e de las emisiones provenientes de la matriz energética de un sistema productivo, en el caso de este sistema productivo esto equivaldría al 4.5% de la electricidad demandada, en sistemas convencionales con consumos registrados de 20 000 kWh al año esto equivaldría a algo más de un 18 % de la energía eléctrica demanda.

En términos económicos correspondería a un equivalente de ¢ 313 330 anuales a un precio de ¢118 el kWh.

Es necesario aclarar que esta estimación está sujeta a la gran variabilidad que representa la utilización de estos sistemas y la tecnología disponible, sin embargo, los sistemas son alternativas tecnológicas eficaces y viables.

Si evaluamos la energía producida por día durante este periodo de tiempo, obtenemos la gráfica de la figura N°3.

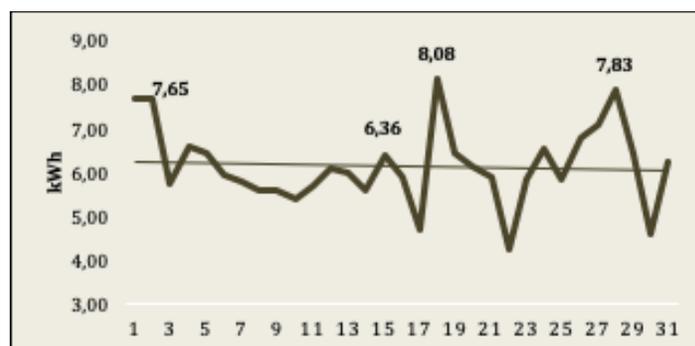


Figura N°3.- Media de la energía producida diariamente durante los meses de Mayo a Noviembre de 2015 en en la lechería del ITCR Sede San Carlos.

En las figuras N° 4, 5, 6, 7, 8, 9 y 10 se observa la generación de energía eléctrica proveniente de la captación durante todo el día de los paneles fotovoltaicos, desde las 5:30 am hasta las 6:00 pm durante los meses de Mayo a Noviembre. Este sistema está instalado de manera directa, es decir la producción energética es utilizada en los sistemas de la lechería, sin ser esta energía almacenada.

Otra opción sería almacenarla en una batería especial.

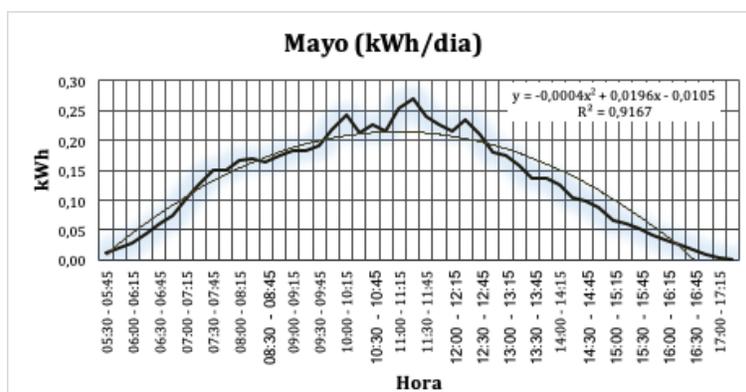


Figura N°4.- Generación promedio durante el día en los paneles fotovoltaicos evaluados en la lechería del ITCR Sede San Carlos durante el mes de mayo del 2015.

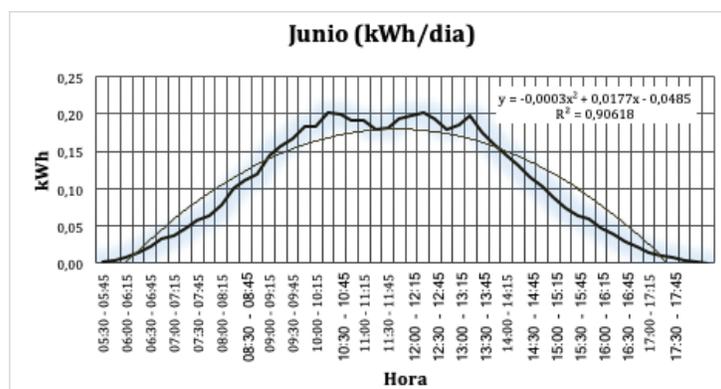


Figura N°5.- Generación promedio durante el día en los paneles fotovoltaicos evaluados en la lechería del ITCR Sede San Carlos durante el mes de junio del 2015.

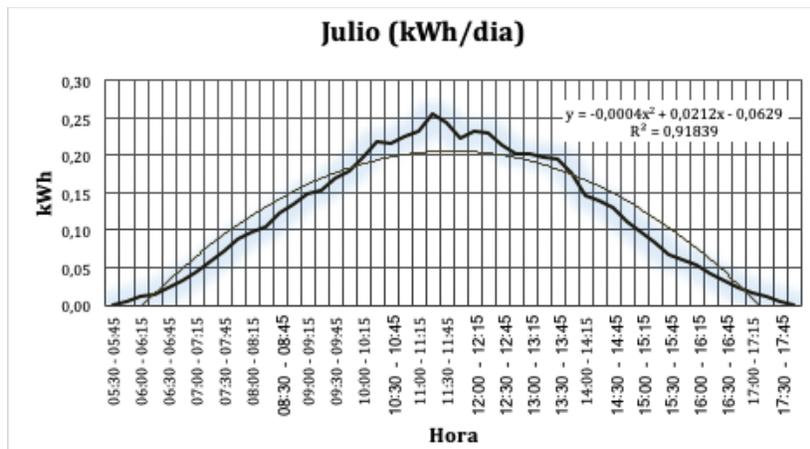


Figura N°6.- Generación promedio durante el día en los paneles fotovoltaicos evaluados en la lechería del ITCR Sede San Carlos durante el mes de julio del 2015.

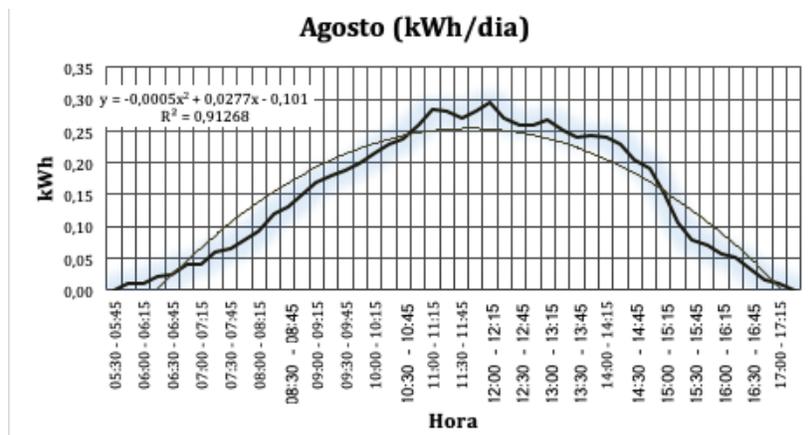


Figura N°7.- Generación promedio durante el día en los paneles fotovoltaicos evaluados en la lechería del ITCR Sede San Carlos durante el mes de agosto del 2015.

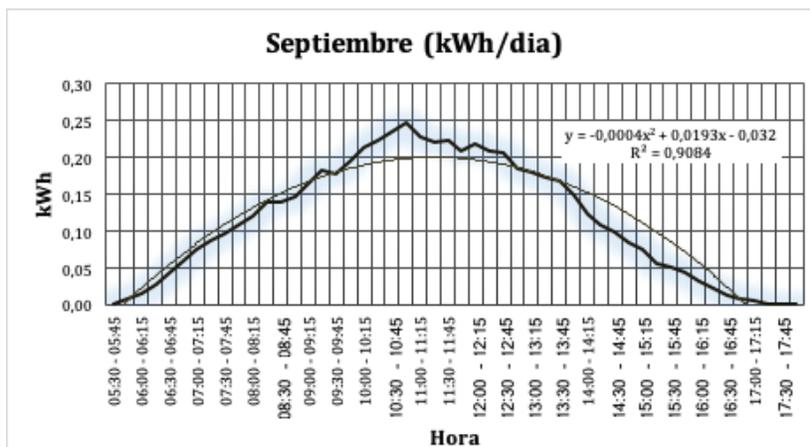


Figura N°8.- Generación promedio durante el día en los paneles fotovoltaicos evaluados en la lechería del ITCR Sede San Carlos durante el mes de septiembre del 2015.

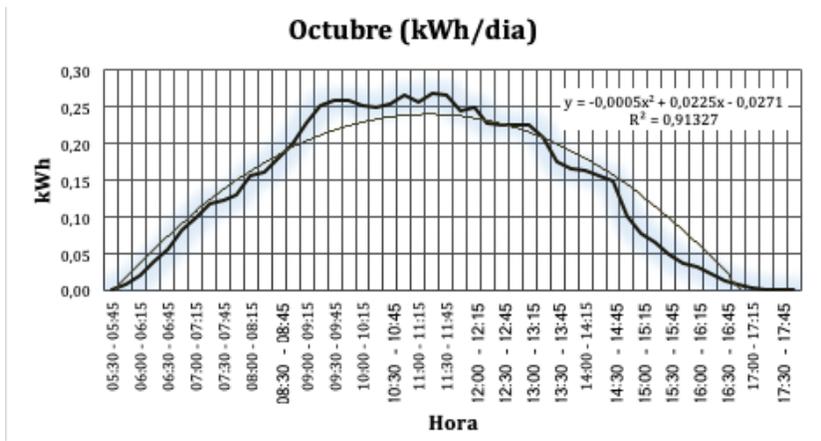


Figura N°9.- Generación promedio durante el día en los paneles fotovoltaicos evaluados en la lechería del ITCR Sede San Carlos durante el mes de octubre del 2015.

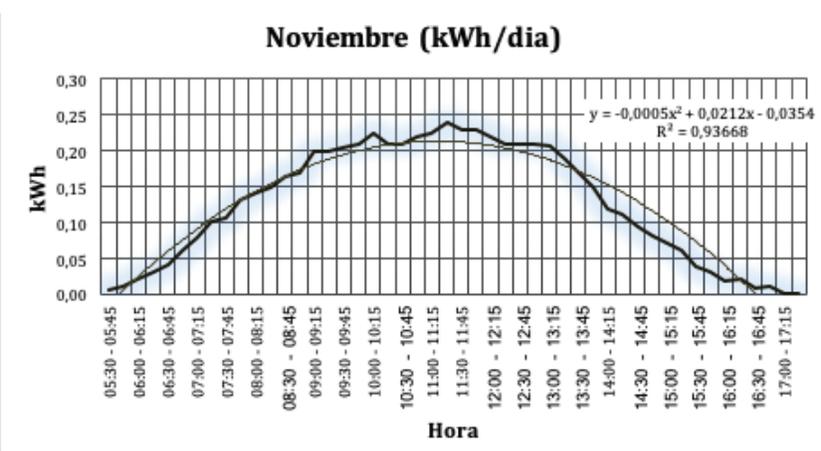


Figura N°10.- Generación promedio durante el día en los paneles fotovoltaicos evaluados en la lechería del ITCR Sede San Carlos durante el mes de noviembre del 2015.

Estableciendo un promedio de las gráficas anteriores, desde del 1 de Mayo al 30 de Noviembre, obtenemos la siguiente gráfica en la que podemos observar la producción diaria de energía en kWh.

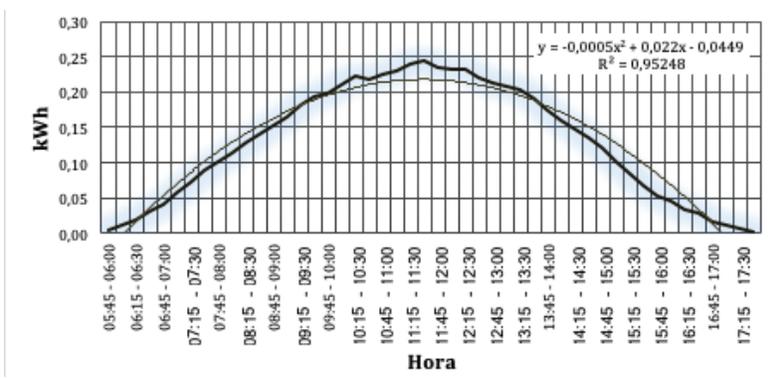


Figura N°11.- Generación promedio durante el día en los paneles fotovoltaicos evaluados en la lechería del ITCR Sede San Carlos desde el mes de mayo a noviembre del 2015.

La reducción de los gastos por concepto de pago de facturas eléctricas, se pueden ver reducidas en función de las necesidades que quieran cubrir las personas que lo instalen, o sea, se puede trabajar en un porcentaje de reducción que puede llegar a ser de 20%, 30%, 50% o más.

Es importante hacer notar que la energía solar por sí sola, no brinda toda la opción completa de uso de energía en cualquier instalación ya sea productiva, comercial o residencial, por lo general, siempre se necesitará un sistema auxiliar. Sin embargo, lo que sí es claro, es que la misma, puede reducir sustancialmente el consumo energético de estas instalaciones.

Todo esto, nos permite generar datos de regresión que correlacionen, datos meteorológicos de radiación, iluminación de luz solar directa, difusa, temperaturas mínimas, medias y altas, con la captación de energía en el sistema y su uso constante bajo las condiciones climáticas de la zona Huetar Norte de Costa Rica en unidades de producción agropecuaria.

Así, con los sistemas instalados en la sede de San Carlos del Instituto Tecnológico de Costa Rica y con los datos obtenidos, se pretende concienciar a la comunidad estudiantil y a los productores de la zona Huetar Norte de Costa Rica de los beneficios del uso de sistemas de energías limpia, y poder desarrollar y fomentar el uso de estos sistemas energéticos renovables.

Bibliografía

- Andersen, E., Furbo, S., Hampel, M., Heidemann, W., Müller-Steinhagen, H. (2007). Investigations on stratification devices for hot water heat stores. *International Journal of Sustainable Energy*, 32:255-263. Published on line 29 de junio in Wiley Interscience
- Andersen, E. (2008) Hot water heat stores by termosiphonics system. *International Journal of Sustainable Energy*. Published on line 29 de junio in Wiley Interscience.
- Alvarado, R. (1998). Boletín Meteorológico números 1, 2 y 3. Publicaciones ITCR, San Carlos. Costa Rica.
- Berriz, P. L. (2012). La energía solar: base para el desarrollo sostenible. *Energía y Tú*, Número 58. Abril - Junio de 2012. Cuba.
- Boletines informativos del IMN. [http:// www.imn.ac.cr](http://www.imn.ac.cr). Consultados em el 2013.
- Camejo, J. E. (2012). Conectar el sol con la red. *Energía y Tú*. Número 57. Enero – Marzo. Cuba.
- CENSOLAR. (1993). Valores medios de irradiación solar sobre suelo horizontal. Primera Edición. España.
- Despaigne, H., Torres, A., Maceo, F., Cobián, S. (2003). Sistema solar termosifónico de calentamiento de agua sanitaria en Cayo Las Brujas. *Memorias Primera Convención Internacional de Energía y Medio Ambiente*. Santiago de Cuba: 13 -17 de noviembre.
- Guzmán, T., Iglesias, J. (1986.). Estudio preliminar del diseño, montaje y prueba de planta de tratamiento hidrotérmico a la semilla agámica de la caña de azúcar. *Rev. Proyección. IPROYAZ*. p. 15 - 20. Cuba.
- Guzmán, T., Iglesias, J. (1987a). Energía solar para la agroindustria azucarera. Informe técnico. Edición ISP JAE. 1987.
- Guzmán, T., Iglesias, J. (1987b) Evaluación técnico-económica de una planta solar de tratamiento hidrotérmico a la semilla de caña de azúcar. I Conf. Científica de la ATAC en la AC de Cuba.
- Guzmán, T., Iglesias, J. (1989.). Planta solar para la termoterapia de la semilla agámica de la caña de azúcar. *Rev. Energía*. pág. 3-7. 1989. Cuba.

- Guzmán, T., Iglesias, J. (1991). Instalación solar para termoterapia de la semilla de caña de azúcar. Conferencia. Internacional de Arquitectura e Ingeniería. Nueva York. Estados Unidos.
- Guzmán, T., Iglesias, J. (1999). Planta solar de hidrotratamiento para el control de enfermedades en cultivos económicos. Memorias del Congreso Costarricense de la Caña de Azúcar. Condovac. Guanacaste. Pag. 250. Costa Rica.
- IMN. (Instituto Meteorológico Nacional de Costa Rica) (2013). www.imn.ac.cr, consultado el día 9 de febrero del 2013.
- Insunza, J. (2013). Meteorología descriptiva. Radiación solar y terrestre, http://www.met.igp.gob.pe/users/yamina/meteorologia/radiacion_doc_Univ_CHile.pdf, tomado de internet el día 9 de febrero del 2013.
- INTA. (Instituto nacional de Tecnologías Agropecuarias) (2011). Ganadería y efecto invernadero: mejor producción, menos contaminación. Consultado 11 marzo del 2013. INTA Informa. <http://intainforma.inta.gov.ar/?p=6579>
- IRENA (Agencia Internacional de energía renovable) (2013) http://www.irena.org/News/Description.aspx?NType=NW&PriMenuID=16&catid=84&mnu=cat&News_ID=312. consultado en abril del 2013
- Khan, M., Abdul Malek, A., Mithu, M., Das, D. (2010). Design, fabrication and performance evaluation of natural circulation rectangular box-type solar domestic water system. International Journal of Sustainable Energy. Vol 2, No 3, sep 164-177.
- Landa, M. (2005). Energía solar en España. El potencial solar de España es el más alto de Europa debido a su privilegiada situación y climatología. http://www.consumer.es/web/es/medio_ambiente/energia_y_ciencia/2005/01/11/114942.php, consultado el día 10 de febrero del 2013.
- Matthews, C. (2006). La ganadería amenaza el medio ambiente. Consultado 12 marzo del 2013. FAO Sala de Prensa. <http://www.fao.org/newsroom/es/news/2006/1000448/index.html>.
- MINAET. (Ministerio de Ambiente, Energía y Telecomunicaciones) (2011). VI Plan Nacional de energía 2012-2013. Consultado 12 de marzo del 2013. http://www.dse.go.cr/es/03publicaciones/01PoliticaEnerg/VI_Plan_Nacional_de_Energia_2012-2030.pdf.
- Quirós, L. (2011). Calentando el agua y cuidando el ambiente. <http://www.revistaconstruir.com/construccion-sostenible/836>
- RES & RUE DISEMINATION (2005). Energía solar térmica. Proyecto de circulación natural y forzada. <http://www.cesu.es/temas>, CONSULTADO EL DIA 10 DE FEBRERO DEL 2013
- Rizk, J., Nagrial, M., H. (2008). Impact of reflectors on solar energy. Proceedings of the world academy of Science. Engineering and Technology. Vol 31, July.
- Roman, H. (2007). Here comes the sun. Residential solar systems. Power energy. www.techdirections.com. Tomado de internet el día 10 de febrero del 2013.
- Shyam S. N. (2005). Energía solar. Conceptos básicos y su utilización. Departamento de Física de la Universidad Nacional. Heredia. Costa Rica.
- Shyam, S N. (1996). La energía solar y su utilización. Proyecto de Investigación desarrollados en el departamento de Física de la Universidad Nacional. Heredia. Costa Rica.
- Sistema por termosifón. http://www.mimacsolar.es/equipos_forzados.html, tomado de internet el día 9 de febrero del 2013.
- Swift K.D. (2011). Is a solar energy system right for your organization? Rev. Management Accounting Quarterly. Vol. 12, No 4.

- Sopian, K. Syahrri, M., Abdullah, S., Othman, M., Yatim, B. (2007). Unglazed fiberglass reinforced polyester solar water heater with integrated storage system. *International Journal of Sustainable Energy*. 10.1061/ (ASCE) 0733-9402, 133; 1 (26).
- Taiz, L., Zeiger E. (2002). *Plant physiology*. Chapter 7. Photosynthesis. The light reaction. Pag 112-115. USA.
- Tinajeros, S. M. (2011). Sistema de calentamiento de agua con energía solar en la ciudad de Arequipa. XVIII Simposio Peruano de energía solar y del ambiente. Universidad Nacional de San Agustín. Escuela de Física, Perú.
- Torpey E. (2009). You are a What?. Solar Photovoltaic installer. *Occupational Outlook Quarterly*. Bureau of labor.
- Uribe, M. (2007). Cambio del sistema de calentamiento de agua empleando calderas por paneles y otros procesos. *Rev. Producción más limpia*, julio-diciembre Vol 2 , No 2.
- UPC (1999). Sistema de calentamiento con energía solar. <http://melca.com.ar/archivos/apuntes/Sistemas%20solares%20termicos%20de%20baja%20temperatura/FI00701C.pdf>. Tomado de internet el día 9 de febrero el 2013
- Wongsuwam, W. (2005). Forced circulation solar water heater performance prediction by TRNSYS ANN. *International journal of sustainable energy*, vol 24, No 2, 69-86.

Modelo estratégico para la implementación de sistemas térmicos solares híbridos forzados al proceso de incorporación de valor agregado del cacao en la Región Huetar Norte

Marcela Fernández Rodríguez

Correo electrónico: mfernandez@itcr.ac.cr. Escuela de Ciencias Naturales y Exactas.
Instituto Tecnológico de Costa Rica, Campus Local San Carlos

Este modelo estratégico está basado en el Modelo de Innovación Triple Hélice e incluye acciones de vinculación para que los productores de cacao de la Región Huetar Norte (RHN) puedan acceder a fondos que les permita adquirir los sistemas térmicos solares híbridos forzados para potenciar el valor agregado de su materia prima y obtener un producto competitivo en el mercado internacional.

Modelo Innovación Triple Hélice

En la década de los noventa, el desarrollo tecnológico permitió que el internet y las tecnologías de la comunicación conectaran el mundo entero, el inicio de la globalización fue un hecho y se pasó de la era postindustrial a la sociedad de la información.

Esta revolución tecnológica permitió la dinamización de los mercados y obligó a las empresas a mejorar continuamente para alcanzar la calidad necesaria que les permitiera competir y sobrevivir a los cambios vertiginosos. Los departamentos de investigación y desarrollo empezaron a ser parte importante de la mayoría de grandes empresas donde la innovación era vital para permanecer en el mercado.

En países en vías de desarrollo como Costa Rica, solo las grandes transnacionales tienen el poder económico para poder llevar por sí mismas todo el proceso de investigación, desarrollo e innovación (ID+i), mientras que las pequeñas y medianas empresas deben recurrir a un modelo diferente, ya que requiere de aliados estratégicos para lograr innovar. Este modelo de vinculación estratégica ha sido teorizado desde la década de los noventa por los investigadores Henry Etzkowitz de la Universidad Estatal de Nueva York y Loet Leydesdorff de la Universidad de Amsterdam y se le denominó Modelo de la Triple Hélice (Etzkowitz H., Leydesdorff, L., 1995).

El modelo se fundamenta en la estrecha vinculación entre la Universidad, la Industria y el Estado (Figura 1), la cual ha evolucionado con el tiempo y puede ser adaptada a diferentes contextos, sectores productivos, necesidades y objetivos, por lo que ha llamado la atención en el mundo occidental para fomentar las innovaciones y el crecimiento económico.



Figura 1. Modelo de Triple Hélice III. Fuente: Etzkowitz, H. & Leydesdorff, L. (2000)

Para Etzkowitz y Klofsten (2005), el modelo de la Triple Hélice consta de tres elementos básicos:

- Supone una mayor importancia en el papel de la universidad en la innovación, a la par con la industria y el gobierno basado en la sociedad del conocimiento.
- En segundo lugar, hay un movimiento hacia las relaciones de colaboración entre los ámbitos institucionales en lo que la política de innovación es cada vez más un resultado de la interacción y no de una receta de gobierno.
- En tercer lugar, además de cumplir con sus funciones tradicionales, cada ámbito institucional también toma el papel de los roles de otros, que operan en un eje de su nuevo papel, y en otro de su función tradicional. Una universidad empresarial, que toma los papeles tradicionales de la industria y el gobierno, que es la institución central para innovar en las regiones.

Un objetivo importante del gobierno dentro de sus Planes de Desarrollo Nacionales, Regionales e Institucionales, debe ser lograr un entorno innovador, donde las universidades como entes de desarrollo tecnológico basado en el conocimiento, generen alianzas estratégicas con las empresas (grandes, medianas y pequeñas) que requieran de investigación académica.

Modelo propuesto para la implementación de sistema térmico solar híbrido forzado

Basados en la teoría del modelo de la Triple Hélice, se ha propuesto el siguiente modelo estratégico para que los productores de cacao de la Región Huetar Norte, logren determinar las vías posibles de financiamiento que les permita adquirir los sistemas térmicos solares híbridos forzados para mejorar el proceso de secado y la calidad de su producto.

En la Figura 2, se muestra una variación del Modelo de Triple Hélice que, según consulta con especialistas en la materia, puede contextualizar la realidad del sector productivo de cacao en Costa Rica y sus necesidades.

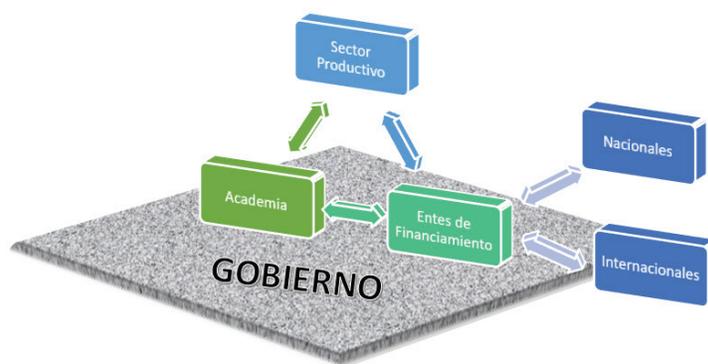


Figura 2. Modelo estratégico propuesto. Fuente: Elaboración propia

Gobierno

En este modelo propuesto, el gobierno es la plataforma que fundamenta y da sostén a los demás elementos. La estabilidad política es importante para el desarrollo económico de una región y del país, es un factor clave para inversionistas extranjeros y otros entes sociales que estén interesados en apoyar los diferentes sectores de la economía para impulsar así el bienestar común.

En el caso específico del sector productor de cacao, el Plan Nacional Cacao, es la clave para planificar todas las actividades que apoyen e impulsen la producción de cacao en Costa Rica, tanto para consumo nacional como para exportación. Este Plan es muy reciente por lo que, la fase de acción o implementación está en proceso, de ahí la importancia de generar información científica en todos los procesos productivos y agroindustriales de este valioso producto, de manera que se oriente de forma adecuada todos los esfuerzos. Es muy importante recalcar que la implementación de este Plan está en manos de la Comisión Interinstitucional de Cacao, formada por 20 miembros, donde se integran todos los elementos de este modelo propuesto y por eso es importante que las políticas generales y específicas, así como las acciones estén correctamente orientadas y vinculadas, para que los pequeños productores encuentren la ruta adecuada para mejorar la cantidad y calidad de su producción.

Todos los entes que conforman esta comisión juegan un papel importante, sus funciones han sido descritas a lo largo de este documento, pero es clave destacar el papel de la Promotora de Comercio Exterior de Costa Rica (PROCOMER), dentro del modelo para la implementación de los sistemas térmicos solares híbridos forzados. Los beneficios económicos y ambientales al implementar estos sistemas son muchos, pero el costo de este tipo de tecnología no está al alcance de la mayoría de los pequeños productores, por lo que deben recurrir a buscar fondos no reembolsables o financiamiento a intereses bajos. La inversión solo se justifica para el productor, si hay un mercado nacional e internacional a precios justos y con cuotas establecidas.

Para estabilizar el producto en el mercado, la certificación de la calidad y sostenibilidad es muy importante y los productores deben explorar las diferentes certificaciones existentes, pero como primer paso, PROCOMER a través de su estrategia Marca País *ESENCIAL COSTA RICA*, es una excelente opción para posicionar el cacao costarricense, que ya sobresale a nivel internacional por sus características, ganando premios en el International Chocolate Awards 2018-2019, incluso en dos empresas de la región Huetar Norte (RHN) han destacado, chocolates Maleku y chocolatera Estukurú (La Región, 2019).

Según PROCOMER, uno de los criterios de esta estrategia es Competitividad País y su objetivo es cumplir la promesa realizada al mundo, garantizando que las empresas representen valores como: Excelencia, Sostenibilidad, Innovación,

Progreso social y Origen costarricense (PROCOMER, s.f.). Un cacao producido y transformado con tecnologías limpias e innovadoras cumple con todos estos valores.

Sector Productivo

Según datos del Censo Nacional Agropecuario (CENAGRO), realizado en 2014 por el Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC) y ajustes realizadas por SEPSA en 2017, se logró establecer que, en Costa Rica existen 1441 fincas con una extensión total de 3286,6 hectáreas (donde 79% son menores a las 2 hectáreas y solo un 2% sobrepasan las 10 ha); a su vez solo 2672,4 hectáreas se encontraban en edad de producción el 81%. La zona Caribe registró el 40% del total de hectáreas, seguida por la zona Norte con el 23% del total y el tercer lugar fue para la zona Sur con el 19%. Asimismo, un dato relevante es que el 90% de la producción de cacao se concentra en manos de pequeños productores en territorios rurales (Comisión Interinstitucional de Cacao, 2018).

Cuadro 1. Cultivo de cacao según total de fincas, área sembrada y en edad de producción de la RHN por cantones, 2014.

Región / cantón	Hectáreas		
	Total de fincas	Sembrada	En edad de producción
Huetar Norte	343	1.040,1	742,9
Guatuso	51	110,7	73,7
Los Chiles	8	20,7	19,7
San Carlos	14	236,1	130,4
San Ramón	4	4,1	3,6
Sarapiquí	24	116,8	109,0
Upala	242*	551,8*	406,5*

Fuente: SEPSA 2017.

En el cuadro anterior se indica claramente que el cantón de Guatuso, lidera en la RHN la producción de cacao.

La Universidad de Costa Rica ha trabajado desde hace varios años en la RHN con el objetivo de caracterizar a los pequeños y medianos productores de cacao. Por medio del Programa de Trabajo Comunal Universitario (TCU), ha elaborado tres Censos de Productores de Cacao, el primero en 2014, el segundo en 2015 y el tercero está en proceso de análisis de datos. La muestra para estos censos son productores activos de la Asociación de Productores Agroambientalistas de Cacao (ASOPAC).

Para el informe 2014, se entrevistaron 45 miembros activos de ASOPAC, entre todos suman 431,45 hectáreas para un promedio de 9,81 ha por productor y específicamente para el cultivo de interés en este estudio, el cacao, se contabilizan un total 50,04 hectáreas (11% del área total), con un promedio de 1,56 ha por productor, las cuales se encuentran en su mayoría en el distrito de Katira seguido de San Rafael. En cuanto a la producción de cacao se estableció la producción correspondiente a un año de cosecha sumando un total de 2.610 kg, un poco más de 2,5 toneladas, para un promedio por productor de 237,27 kg o el equivalente a 5,15 quintales de cacao en baba. Los productores cosechan durante todo el año, pero destacan los meses de setiembre, octubre y noviembre como los de más alta producción. La mayoría de ellos dijeron vender su producto en seco en Upala, muy pocos a intermediarios de San José y algunos retienen parte de su cosecha para consumo propio. Ninguno de ellos indicó que esté exportando actualmente.

Los precios promedio de venta en 2015, se muestran en el Cuadro 2, así entonces el ingreso promedio anual por productor, si comercializan los 237,27 kg promedio de cacao en baba sería de ₡237 270.

Cuadro 2. Rango de precios en el mercado para la venta de cacao.

Estado del producto	Rango de Precios (₡)
Baba	500-1500
Seco	1015-1500
Molido	4000-7000

Fuente: Informe Censo de Productores de Cacao, 2015. TC-488

En el informe 2015, elaborado de igual manera por el Programa de TCU, la cantidad de productores aumentó en un año en 4 productores, por lo que pasa de 45 a 49 productores de cacao, distribuidos en toda la región de Guatuso de Alajuela. Además, se da un aumento a 2 ha promedio por productor. Estos datos en aumento, significan que la producción tiende a crecer, lo cual ayuda a generar fuentes de ingresos y empleo, que a futuro, si se incorpora valor agregado a la materia prima, generarán mayor crecimiento económico y social a la comunidad. Así mismo, 28 de los productores entrevistados (57%) planean sembrar más cacao próximamente, lo que hace ver que los productores están animados con el cultivo y ven futuro en el negocio.

El cultivo de cacao, se caracteriza por utilizar otras especies para poder brindar la sombra necesaria para que el producto llegue a su mejor desarrollo. Algunas de las especies utilizadas son frutales como banano, plátano y aguacate, o forestales como el laurel. Además, los productores de cacao combinan su producción con otros productos como: naranja, aguacate, limón, anona, maracuyá, chile, maíz, yuca, ayote, ñampí, granos básicos, cedro, pejibaye, ganadería doble propósito, camote, piña, coco, pimienta, pasto y rambután. Esto quiere decir que los productores tampoco se quedan con un solo producto, lo cual ayuda a generar ingresos a partir de distintos productos.

Según indican los productores en el Informe 2015, algunas instituciones que les han brindado capacitación se encuentran: el Ministerio de Agricultura y Ganadería, el CATIE, INFOCOP, UNA, COOPESANCARLOS, COOPECACAO, INTA, INA, IICA, Cooperativa de Cacaoteros de Guatuso. Algunos de los productores comentan que recibieron capacitación en temas como manejo de plagas, poda, injertos, distancia de siembra, variedades de cacao, mantenimiento de las plantaciones, deshija, viveros, fermentación y secado, mercadeo.

Pero en estos dos informes, los productores indicaron que, para poder seguir creciendo, debe solventar sus grandes necesidades, las cuales se resumen a continuación:

- Mejorar los procesos pos cosecha del cacao de la zona, diferenciando y dando valor agregado al mismo.
- Más capacitación y asistencia técnica, por parte de expertos, para mejorar la producción, la post cosecha y los procesos de transformación y comercialización, ya que los mismos productores han tenido que buscar consejos y ayuda entre ellos mismos sobre todo recargados sobre los productores que llevan más tiempo en el cultivo o los que por tradición ya conocen todos los procesos y siguen aplicándolos, pero hay que recordar que de 1970 al año 2000, los productores estuvieron inactivos por el debacle de la producción a causa de la monillia. Por lo tanto, todos los productores están conscientes de que el cultivo de cacao ha evolucionado con el tiempo adaptando nuevas técnicas y procesos los cuales han surgido producto de los avances científicos y tecnológicos. Su idea es poder tener un producto final de alta calidad que sea competitivo en el mercado.
- Apoyo para poder llegar hasta instituciones gubernamentales o privadas con el fin de ganar relevancia y apoyo para alcanzar el desarrollo agro ambientalista del cantón de Guatuso, mediante el crecimiento de la Asociación y de la producción de cacao. Ellos indican que ocupan capacitación para llevar registros de producción y contables.

En el caso específico de ASOPAC, ninguno de sus miembros cuenta con certificaciones de calidad y sostenibilidad ambiental.

Academia

El papel de la academia dentro del modelo de implementación propuesto, es muy importante como ente generador de conocimiento científico-tecnológico, así como generador de capacidades y habilidades en la población.

Dentro de la mayoría de las instituciones de educación superior en Costa Rica, existen programas de investigación, extensión y acción social. En los programas de investigación se desarrollan todos los proyectos que generen nuevos conocimientos científico tecnológicos con el objeto de establecer teorías, descubrir nuevos paradigmas o encontrar respuestas. Con los programas de extensión se pretende transferir los conocimientos y capacidades que tiene la Academia a las comunidades para resolver sus problemas o necesidades, con la meta final de lograr en mayor desarrollo económico. Por último, los programas de acción social, donde se incluye, por ejemplo, el Trabajo Comunal Universitario de la UCR, donde profesores y estudiantes llegan a todos los rincones del país aportando al bienestar social de las comunidades.

La Academia está integrada por Universidades Públicas y Privadas, Institutos de formación técnica como el Instituto Nacional de Aprendizaje, Institutos y Centros de Investigación, la mayoría asociados o vinculados con las Universidades, el Gobierno u organizaciones internacionales.

Son muchos los estudios realizados en cacao a través de los años, pero es obligatorio mencionar el aporte del Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE), a través de su Programa de Mejoramiento Genético del Cacao, con más de 30 años trabajando en crear variedades de cacao mejoradas, de alta calidad y tolerantes a la monilia. En 2009, las variedades CATIE-R4 y CATIE-R6 fueron seleccionadas dentro de los mejores cacaos del Salón du Chocolat de París (CATIE, s.f.).

La UCR mediante su Programa de Trabajo Comunal, específicamente el TC-488 *Iniciativas Comunitarias para el Desarrollo Rural*, coordinado por la profesora MSc Vanessa Villalobos Ramos, ha recopilado información muy valiosa de los cacaoteros de la RHN. El TEC a través del Programa de Regionalización Universitaria contribuye desarrollando tecnologías, como el secador solar térmico híbrido forzado, con el objetivo de mejorar la etapa de secado dentro del proceso de transformación de la materia prima.

Por la gran cobertura que tiene la Academia en un país tan pequeño como Costa Rica, su rol como ente vinculante dentro del modelo es fundamental. El Sector Productivo debido a sus carencias de conocimiento, que se traducen en falta de capacidades y habilidades para mejorar su producción, transformación y comercialización, requieren de la Academia o de la asesoría técnica de Instituciones de Gobierno para poder acceder a insumos o tecnologías, algunas de ellas a costos elevados para su poder adquisitivo, por lo que deben recurrir a entes de financiamiento, si quieren alcanzar el nivel productivo y la calidad requerida por los mercados nacionales e internacionales, los cuales son cada vez más altos.

Entes de Financiamiento

Los Entes de Financiamiento son socios estratégicos para el crecimiento y desarrollo del Sector Productivo, sobre todo para el pequeño y mediano productor quienes, por su tamaño, no cuentan con los recursos para por si solos financiar sus proyectos.

En el caso específico de los productores de cacao de la RHN, por la caracterización de sus miembros y su capacidad productiva, su vinculación con los Entes de Financiamiento es fundamental.

Entes de financiamiento Locales

A continuación, se detallan las principales instituciones con programas de financiamiento, ya sea con fondos del Estado o del Sistema Bancario Nacional.

MAG

El MAG como institución del Gobierno, debe de atender las prioridades establecidas para el periodo 2019-2022 y que orientarán la formulación del Plan Nacional de Desarrollo y de Inversiones Públicas. Según el informe del Ministerio de Hacienda, sobre la distribución del presupuesto 2019 del MAG, las prioridades están basadas en:

- Introducir esquemas de producción sostenible y adaptada al cambio climático, que incluyan gestión de riesgo y minimización de pérdidas.
- Impulsar una producción con mayor valor agregado mediante investigación e innovación tecnológica agropecuaria.
- Establecer un programa de certificaciones de productos regionales para que obtengan sellos de calidad.
- Incrementar el volumen de la producción agrícola comerciada en los mercados nacionales de diversa escala.
- Impulsar una inserción inteligente en mercados externos y defensa comercial.

Para lo anterior el Gobierno, contempla recursos para la "Fundación para el Fomento y Promoción de la Investigación y Transferencia de Tecnología Agropecuaria (FITTACORI)", donde se destinan para financiar proyectos de investigación y transferencia de tecnología agropecuaria que lleven a una mayor productividad en el sector agropecuario costarricense, principalmente para el mediano y pequeño productor. FITTACORI abre una convocatoria todos los años y en su página de internet despliega toda la información necesaria para la presentación de los proyectos (Ministerio de Hacienda, 2019).

También se incluye en su presupuesto, fondos para el reconocimiento de beneficios ambientales (200 productores orgánicos ubicados en las 8 regiones del país y proyectos para el financiamiento de Sistemas de Producción Agropecuarios Orgánicos, así como para el reconocimiento de beneficios por buenas prácticas agrícolas y pecuarias, correspondientes a proyectos de organizaciones y sujetos privados que incorporen en sus procesos productivos buenas prácticas de producción sostenible, nuevas prácticas de comercialización, mejoras en la tecnología e innovaciones en el proceso de producción, orientado al manejo de fincas integrales, actualmente cuenta con 150 productores bajo sistemas de producción sostenible (Ministerio de Hacienda, 2019).

Otros programas y proyectos dirigidos a apoyar al pequeño y mediano productor son:

Red Costarricense de Agricultura Familiar (REDCAF): La Red tiene como meta fortalecer la agricultura familiar en Costa Rica, facilitando la articulación de la institucionalidad con los territorios, contribuyendo con el desarrollo tecnológico de las unidades productivas y el avance socioeconómico de las familias, organizaciones y sus comunidades. Reconoce que es muy importante promover el acceso oportuno, equitativo y de calidad a los factores de producción, servicios y bienes públicos, así como el manejo sostenible de los recursos por parte de los agricultores y agricultoras familiares y sus organizaciones. Sus estrategias están diseñadas para contribuir con la asignación de recursos y fortalecimiento de las unidades productivas familiares y sus organizaciones, con la construcción colectiva del conocimiento, para favorecer el desarrollo de destrezas y habilidades en los agricultores y agricultoras familiares que contribuyan con la innovación tecnológica y social, por último con el empoderamiento local y nacional, con miras al desarrollo territorial sustentable y a la soberanía y seguridad alimentaria y nutricional (MAG, 2019).

Proyectos de transferencia: Este programa tiene como propósito apoyar el fortalecimiento de las pequeñas y medianas organizaciones agropecuarias, mediante la asignación de fondos no reembolsables. Para inscribir un proyecto debe gestionarse en primera instancia a nivel local y regional, conocer los lineamientos y criterios establecidos, los requisitos de idoneidad y llenar los formularios de perfiles de proyectos agropecuarios dentro de las fechas establecidas. Estos parámetros pueden variar en el tiempo de acuerdo a los planes estratégicos nacionales e institucionales, por lo que deben consultarse en el momento que se necesite obtener fondos (MAG, 2019).

INDER

En el 2012, mediante la Ley N.º 9036, se transforma al Instituto de Desarrollo Agrario en el Instituto de Desarrollo Rural y con esto se define una nueva ruta institucional, se da un nuevo impulso para el desarrollo de la ruralidad, mediante una acción planificada y ordenada, dentro del marco de políticas innovadoras, para enfrentar las inequidades territoriales (INDER, 2018).

Dentro de su Plan Estratégico Institucional, se encuentra como uno de los ejes principales, la Gestión por Proyectos; cuyo objetivo es promover el desarrollo integral de los territorios rurales, por medio de la generación y ejecución de proyectos sociales y productivos sostenibles, impulsados y consensados desde los territorios por los Comités Directivos de los Consejos Territoriales de Desarrollo Rural, en el marco de los Planes de Desarrollo Rural Territorial (INDER, 2018).

El INDER cuenta con una instancia técnica denominada Fondo de Desarrollo Rural, cuya función es promover y ejecutar proyectos de desarrollo en los territorios rurales, facilitando así el acceso a los servicios básicos para el desarrollo socioeconómico de los beneficiarios. La jefatura del Fondo de Desarrollo Rural es responsable del programa presupuestario Gestión para el Desarrollo Territorial, mediante el cual se realiza la asignación presupuestaria para la provisión de los siguientes servicios que presta el Fondo:

- Asesoría para la constitución de organizaciones sin fines de lucro
- Fortalecimiento de capacidades a las organizaciones
- Asesoría para la generación de valor agregado y encadenamientos productivos
- Estudios de pre-inversión para proyectos de desarrollo
- Financiamiento por transferencias de capital
- Obras de infraestructura como componente de proyectos
- Obras de infraestructura para el bien común
- Dotación de crédito rural para el fomento a la producción y seguridad alimentaria

Sistema de Banca para el Desarrollo (SBD)

En el año 2014, la Asamblea Legislativa, mediante la Ley 9274 "Reforma Integral de la Ley N.º 8634, Ley del Sistema de Banca para el Desarrollo y reforma de otras leyes" crea el Sistema de Banca para el Desarrollo como un mecanismo para financiar e impulsar proyectos productivos viables, acordes con el modelo de desarrollo del país (Asamblea Legislativa, 2014).

Según el Artículo 2 de esta ley:

El SBD está integrado por todos los intermediarios financieros públicos, el Instituto de Fomento Cooperativo (INFO-COOP), el INA y las demás instituciones públicas prestadoras de servicios no financieros y de desarrollo empresarial, y las instituciones u organizaciones estatales y no estatales que canalicen recursos públicos para el financiamiento y la promoción de proyectos productivos, de acuerdo con lo establecido en esta ley. Queda excluido de esta disposición el Banco Hipotecario de la Vivienda (Banhvi). También podrán participar los intermediarios financieros privados fiscalizados por la Superintendencia General de Entidades Financieras (Sugef) y las entidades privadas acreditadas por el Consejo Rector, el cual se crea en esta ley, independientemente de su naturaleza jurídica, que cumplan los parámetros de valoración de riesgo aprobados por el Consejo Rector y demás aspectos normativos, de control y supervisión que se establezcan vía reglamento. Asimismo, podrán participar las instituciones y organizaciones privadas prestadoras de servicios no financieros y de desarrollo empresarial, según las condiciones indicadas en esta ley.

Dentro de los objetivos de SBD citados en el Artículo 4, se pueden citar algunos específicos, de interés para los pequeños productores, por ejemplo:

- Establecer políticas crediticias aplicables al SBD, que promuevan el desarrollo, la productividad y la competitividad de los sectores productivos, tomando en consideración el Plan Nacional de Desarrollo y las Políticas Públicas que se emitan al respecto

- Financiar proyectos productivos mediante la implementación de mecanismos de financiamiento, avales, garantías y servicios no financieros y de desarrollo empresarial.
- Establecer condiciones financieras de acuerdo a las características específicas, así como requerimientos del proyecto y de la actividad productiva que se apoye.
- Fomentar la innovación, transferencia y adaptación tecnológica orientada a elevar la competitividad de los sujetos beneficiarios. En el caso de sector agropecuario se podrá canalizar por medio de instancias públicas como privadas que fomenten la innovación, investigación y transferencia de tecnología
- Coadyuvar el desarrollo productivo de las diferentes regiones del país por medio de los mecanismos que establece la ley, fomentando la asociatividad y apoyando las estrategias regionales de los ministerios rectores.
- Implementar mecanismos de financiamiento para fomentar el microcrédito para desarrollar proyectos productivos.
- Promover y facilitar la creación de empresas por medio de instrumentos financieros, avales, capital semilla y capital de riesgo.
- Promover y facilitar mecanismos para encadenamientos productivos.

Por último, el artículo 6, establece que los beneficiarios de SBD para el financiamiento, avales, capital semilla y capital de riesgo u otros productos que se contemplen en la ley, son: emprendedores, microempresas, pymes, micro, pequeño y mediano productor agropecuario, modelos asociativos empresariales, beneficiarios de microcrédito. El artículo 7 indica que el Consejo Rector diseñará las políticas para brindar tratamiento prioritario a los proyectos impulsados por mujeres, adultos mayores, minorías étnicas, personas con discapacidad, jóvenes emprendedores, asociaciones de desarrollo, cooperativas, los consorcios pyme, así como a proyectos que incorporen o promuevan el concepto de producción más limpia, entendiéndose como una estrategia preventiva e integrada que se aplica a los procesos, productos y servicios, a fin de aumentar la eficiencia y la reducción de los riesgos para los seres humanos y el ambiente. El Consejo Rector diseñará las políticas y los instrumentos financieros adecuados y necesarios para el financiamiento y la asistencia técnica de este tipo de proyectos y procurará la obtención de líneas de crédito internacionales, así como recursos de cooperación internacional para estos fines. Por último, el artículo 8, garantiza el acceso equitativo para las mujeres.

De esta manera se puede resumir que las funciones de SBD es otorgar financiamiento por medio de Operadores Financieros, brindar servicios no financieros y de desarrollo empresarial y otorgar avales o garantías a personas físicas y jurídicas que sean sujetos beneficiarios de la Ley 9274. El SBD también cuenta con fondos bajo el modelo de capital semilla y capital de riesgo para financiar proyectos de investigación y desarrollo, gastos operativos iniciales para la puesta en marcha del proyecto. Se otorga capital no reembolsable y se conceden créditos que se pagan en la medida que el negocio genere flujo de caja. El acceso a estos recursos de capital semilla se dan por medio de las incubadoras de proyectos, inscritas en el SBD.

FUNDACIÓN CRUSA

La Fundación Costa Rica Estados Unidos para la Cooperación (CRUSA) es una fundación privada costarricense, independiente y sin fines de lucro, orientada al apoyo a proyectos enmarcados en su enfoque estratégico. CRUSA ha consolidado su papel como una organización que contribuye activamente a la mejora en la calidad de vida de los costarricenses y al desarrollo sostenible de Costa Rica. Además, ha estrechado las relaciones de colaboración entre los pueblos y gobiernos de Costa Rica y Estados Unidos, honrando sus orígenes y su espíritu filantrópico. En el periodo 2018-2019, CRUSA ha entregado \$277.000 a 30 organizaciones a lo largo del país para aumentar sus capacidades de impacto y transformación de sus comunidades (CRUSA, s.f.).

Entes de Financiamiento Internacionales

Algunas Fundaciones Internacionales, Organizaciones no Gubernamentales (ONG's) y algunos países a través de sus embajadas destinan fondos de financiamiento no reembolsables para impulsar y fortalecer los sectores productivos de países en vías de desarrollo. Algunos ejemplos de Entes de Financiamiento Internacional que han impulsado al sector productivo

de forma puntual son: Asociación Campesina e Indígena de Agroforestería (ACICAFOG) o la Agencia Turca de Cooperación y Coordinación, (por sus siglas en inglés Turkish Cooperation and Coordination Agency, TIKKA). Estas ayudas nos son constantes, el productor debe hacer las consultas respectivas a las instituciones para verificar la disponibilidad de recursos.

Acciones de vinculación entre los diferentes elementos del Modelo Estratégico propuesto

El modelo estratégico propuesto requiere de vinculaciones estrechas entre los actores principales del modelo. El Gobierno mediante sus Políticas Públicas e Instituciones, debe trabajar estrechamente con el Sector Productivo, mejorando sus condiciones, abriendo nuevos mercados y atrayendo entes de financiamiento o inversionistas interesados en apoyar la investigación, la innovación y el desarrollo de proyectos que potencien la producción y la incorporación de valor agregado.

Por otro lado, el Sector Productivo debe aliarse con la Academia para buscar soluciones innovadoras a sus necesidades. La Academia como semillero de conocimiento debe trabajar de la mano con los productores, por medio de sus programas de extensión y acción social.

Bibliografía

Asamblea Legislativa. (27 de 11 de 2014). Ley No. 9274. *La Gaceta*.

CATIE. (s.f.). www.catie.ac.cr. Recuperado el 28 de 10 de 2019, de <https://www.catie.ac.cr/productos-y-servicios/consultorias-y-servicios-de-alto-nivel/mejoramiento-genetico/programa-mejoramiento-genetico-del-cacao.html>

Comisión Interinstitucional de Cacao. (2018). *Plan Nacional de Cacao 2018-2028*. San José: MAG.

CRUSA. (s.f.). www.crusa.cr. Recuperado el 30 de 10 de 2019, de <https://crusa.cr/quienes-somos/>

INDER. (01 de 09 de 2018). *Plan Operativo Institucional*. Instituto de Desarrollo Rural, San José. Obtenido de https://www.inder.go.cr/transparencia/planes_institucionales/poi/POI-Presupuesto-2019.pdf

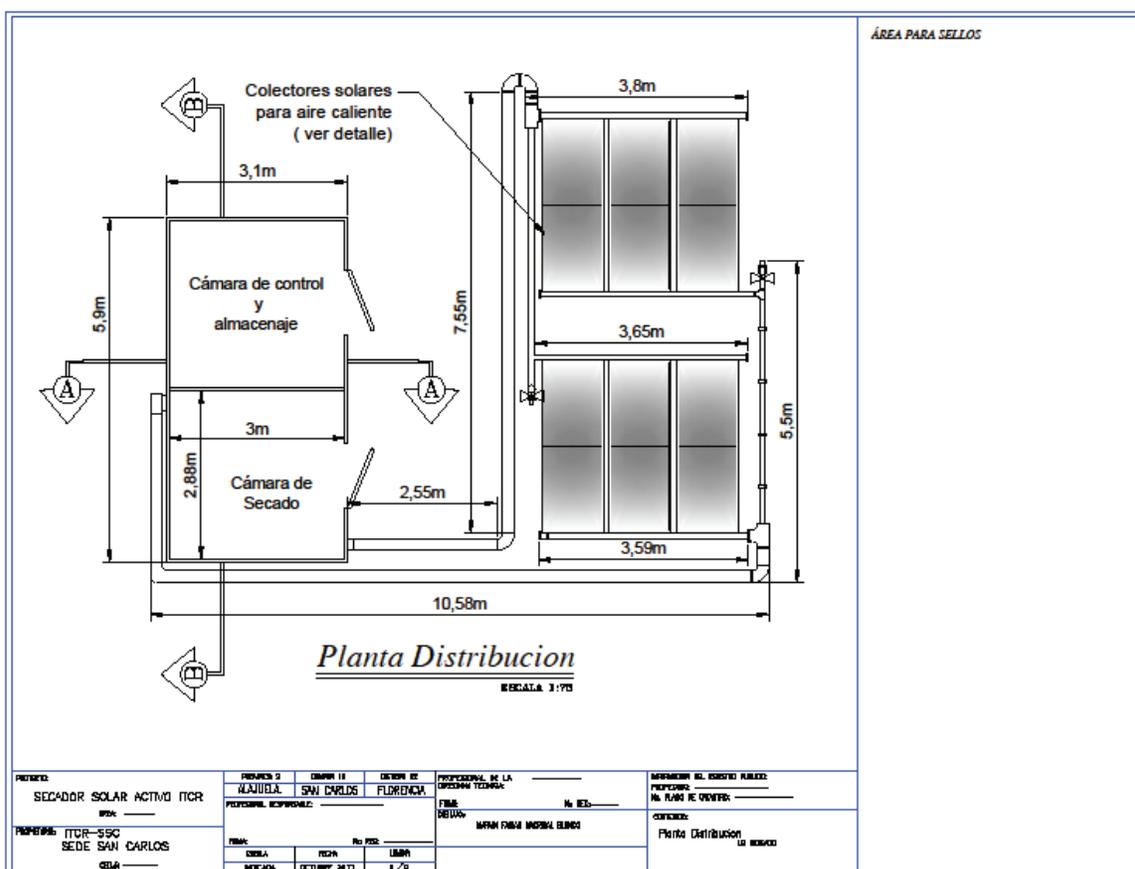
La Región. (08 de 02 de 2019). *La Región.cr*. Obtenido de <https://laregion.cr/costa-rica/8-premios-internacionales-obtuvieron-2-productoras-de-chocolate-de-la-region/>

MAG. (17 de 07 de 2019). *Ministerio de Agricultura y Ganadería*. Obtenido de http://www.mag.go.cr/acerca_del_mag/

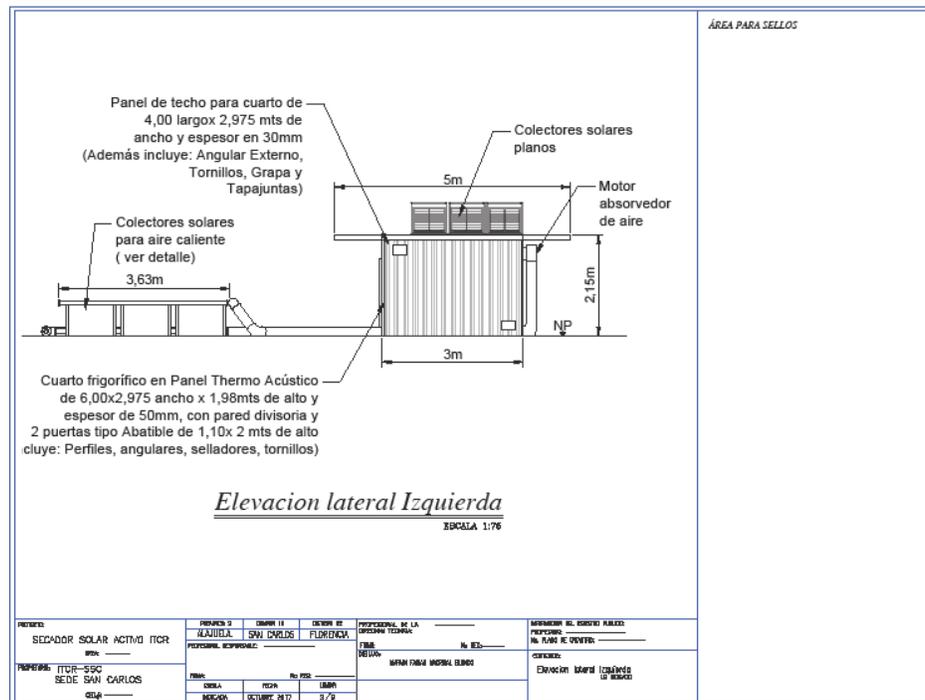
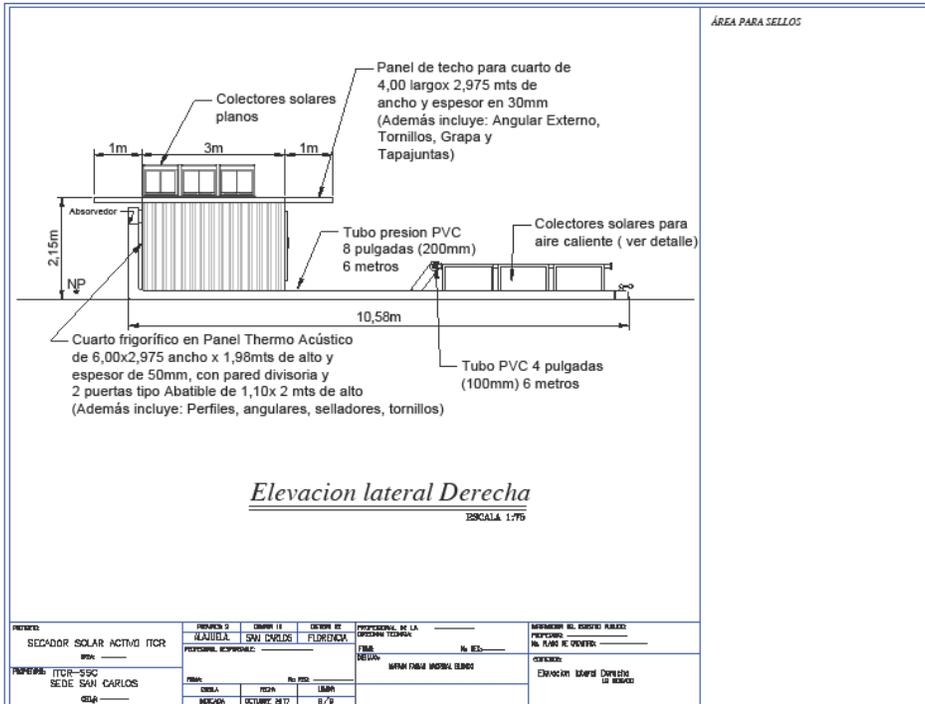
Ministerio de Hacienda. (2019). *hacienda.go.cr*. Obtenido de https://www.hacienda.go.cr/docs/5b887f9d39904_207_MAG.pdf

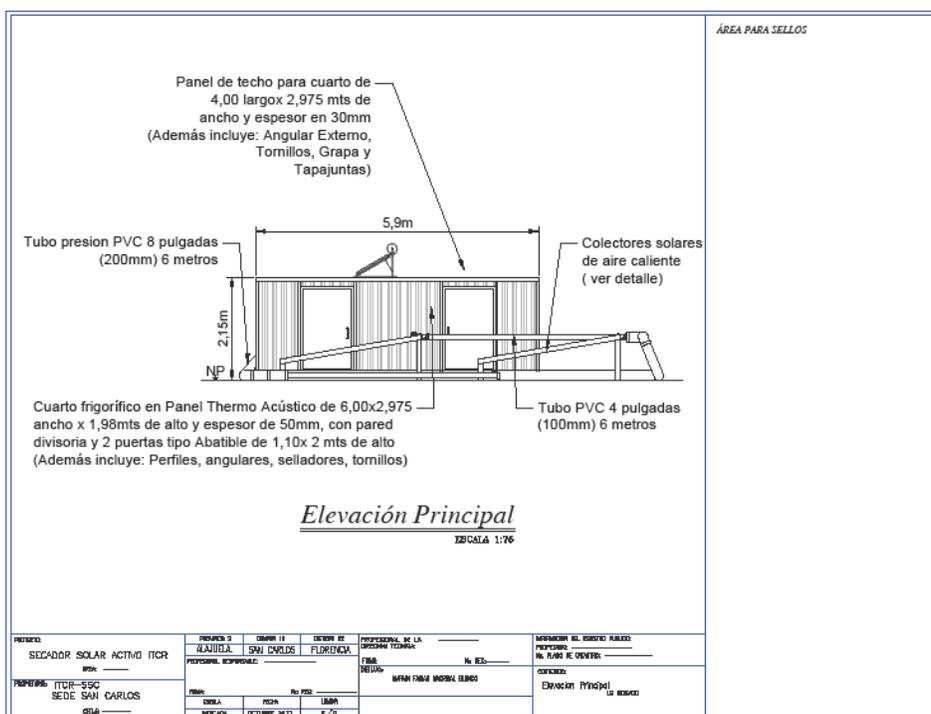
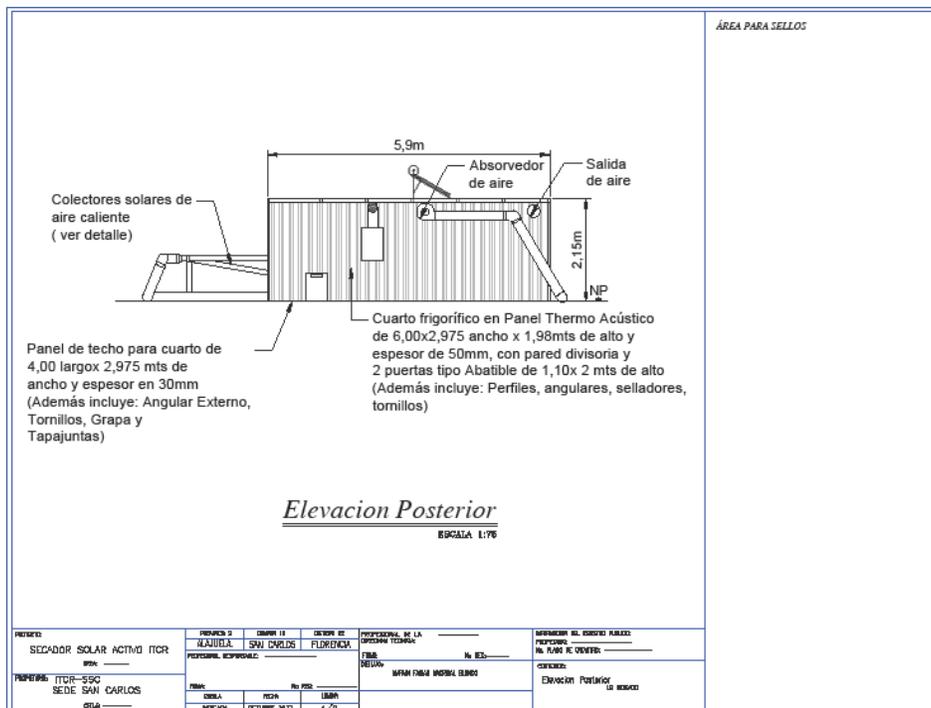
PROCOMER. (s.f.). *procomer.com*. Recuperado el 22 de 10 de 2019, de <https://www.esencialcostarica.com/marca-pais/que-es-la-marca-pais/>

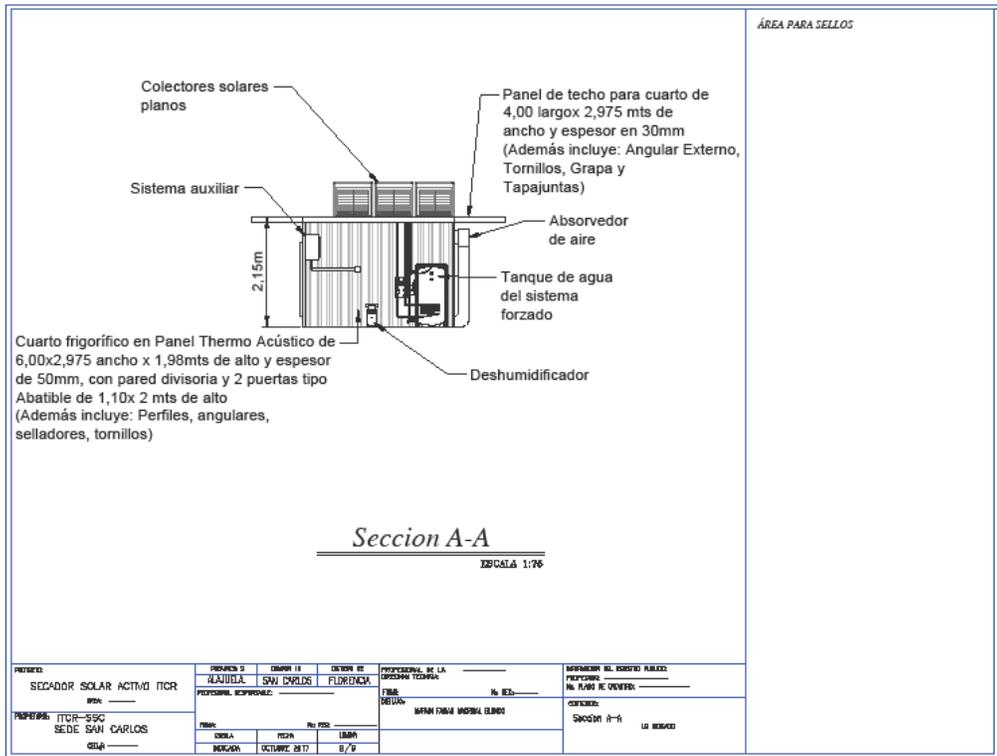
Planos del sistema térmico solar híbrido forzado diseñado e implementado en el Campus Tecnológico Local San Carlos (Instituto Tecnológico de Costa Rica)



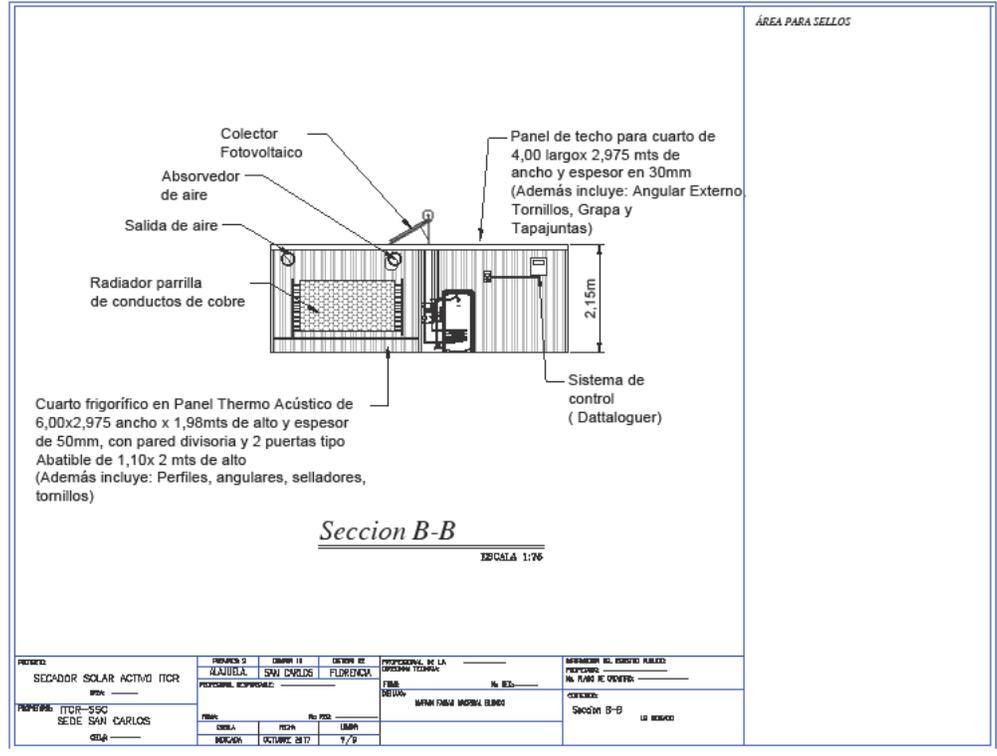
PROYECTO: SECADOR SOLAR ACTIVO ITCR ITCR _____	DISEÑO D: RAJIBELA	DISEÑO II: SAN CARLOS	DISEÑO III: FLORENCIA	PROFESIONAL DE LA ORDENADA TÉCNICA: _____ FIRM: _____ No. ES: _____ DE LUJÁN: _____	MEMBRO DEL INSTITUTO COSTARRICENSE PROFESIONAL: _____ No. PLANI PE. OCNTER: _____ CONDICIÓN: _____ Planta Distribucion LA BARRERA
	PROYECTO: ITCR-SSC SEDE SAN CARLOS CEAR _____	FECHA: _____ REVISOR: _____ DISEÑO: _____ FECHA: _____ REVISOR: _____ DISEÑO: _____	No. PSE: _____ FECHA: _____ REVISOR: _____ DISEÑO: _____	INGENIERO EN INGENIERIA ELÉCTRICA INGENIERO EN INGENIERIA ELÉCTRICA	INGENIERO EN INGENIERIA ELÉCTRICA INGENIERO EN INGENIERIA ELÉCTRICA



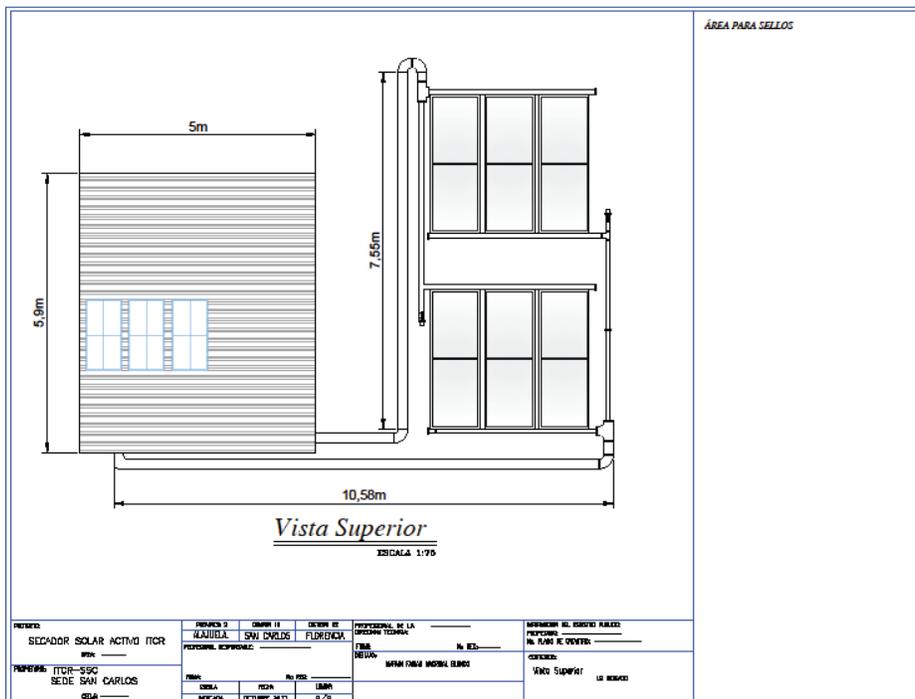




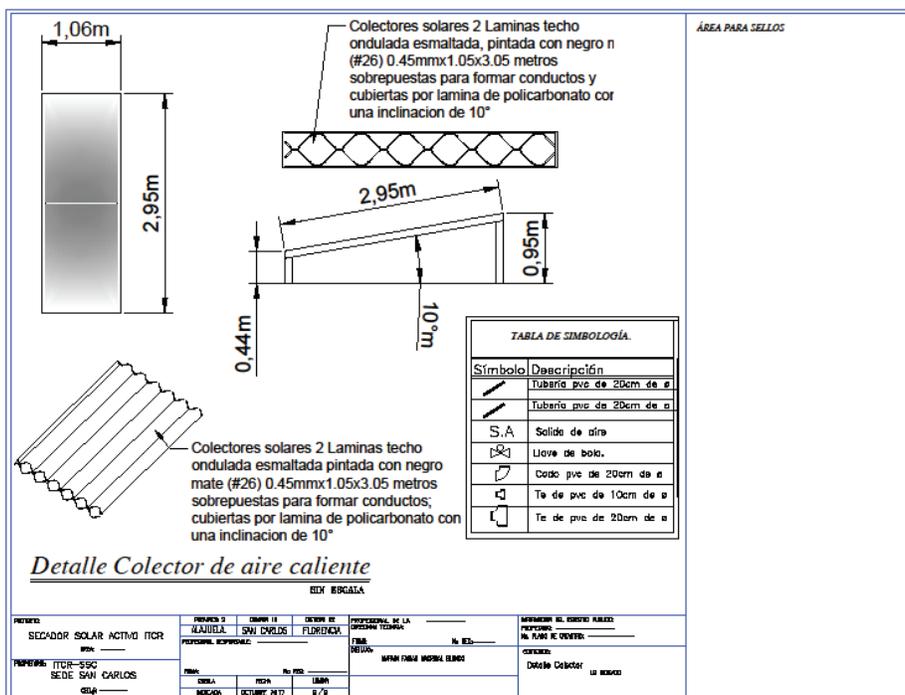
ÁREA PARA SELLOS



ÁREA PARA SELLOS

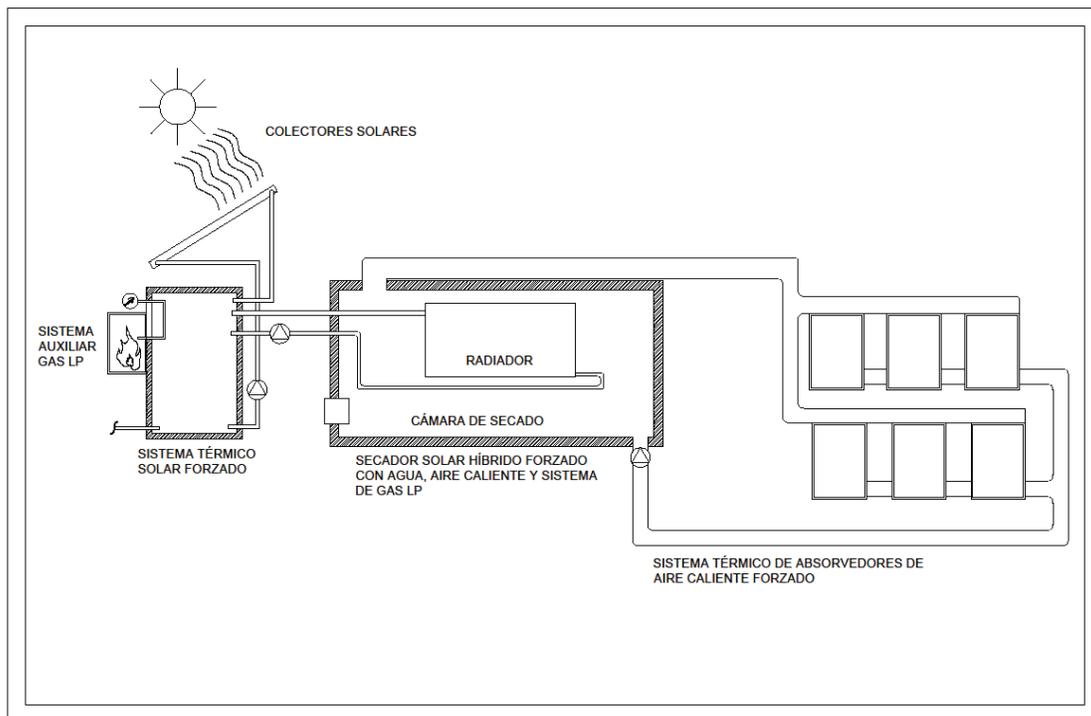


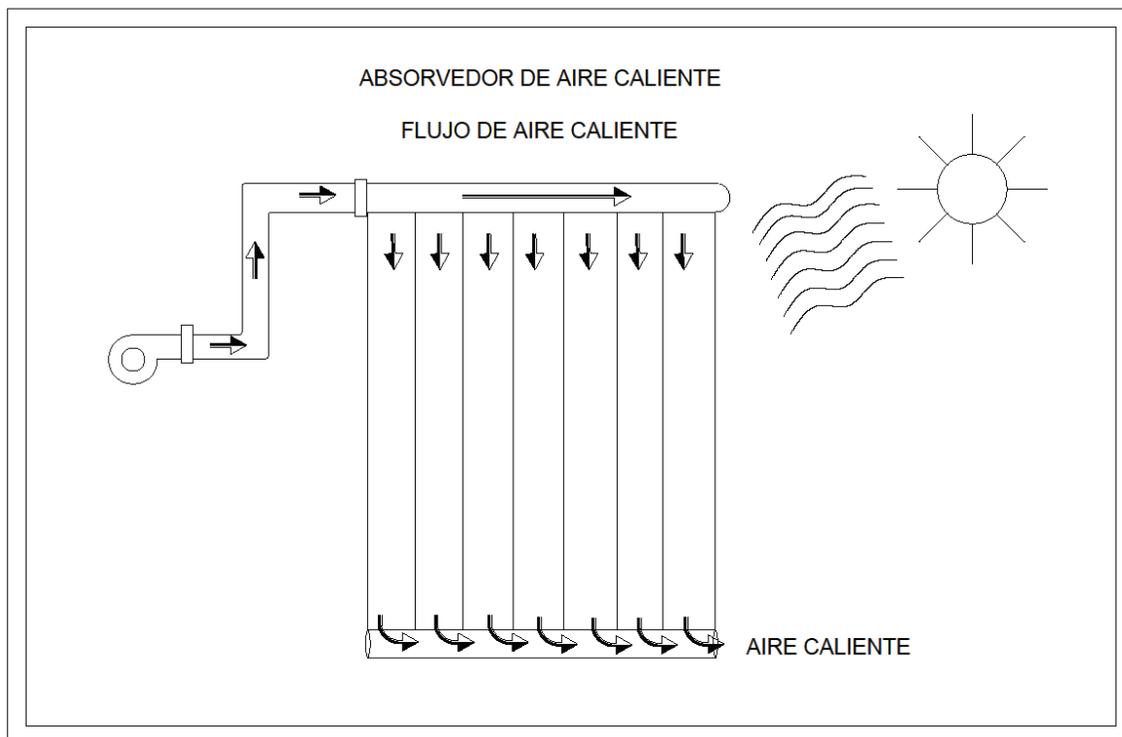
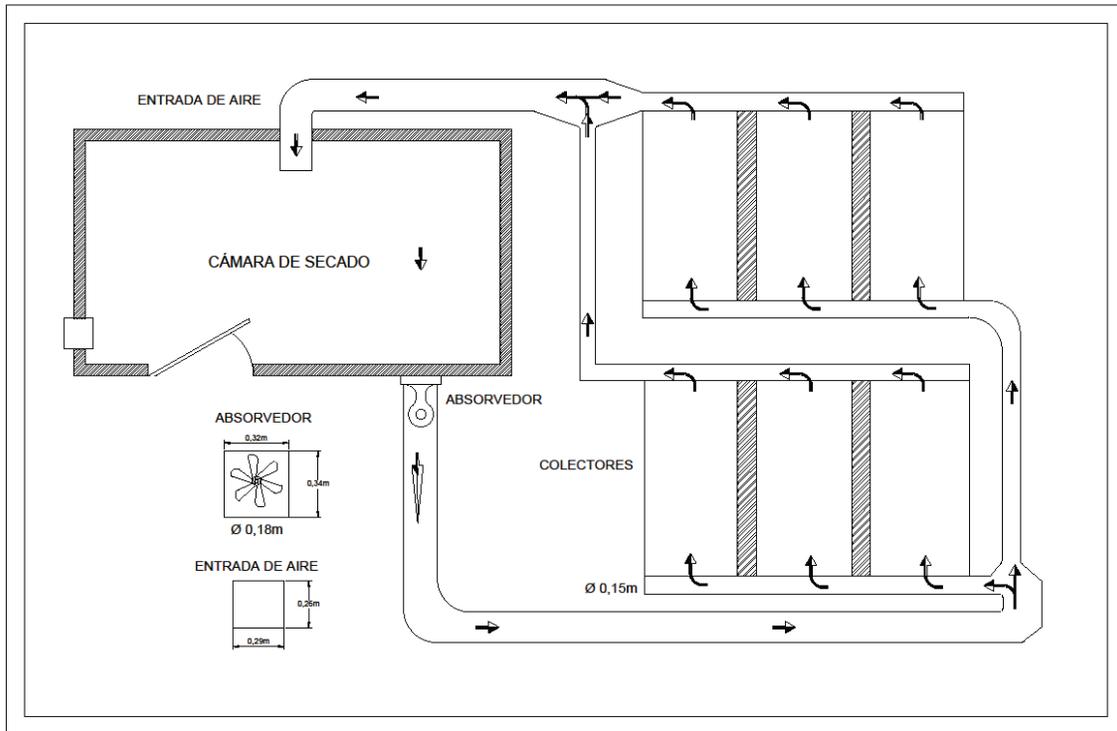
ÁREA PARA SELLOS

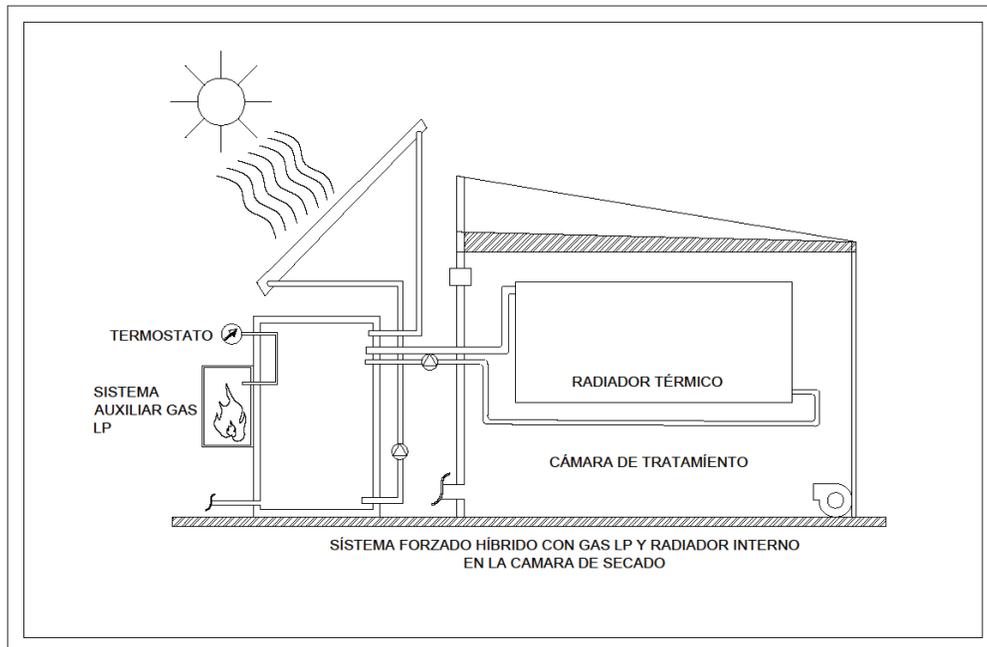
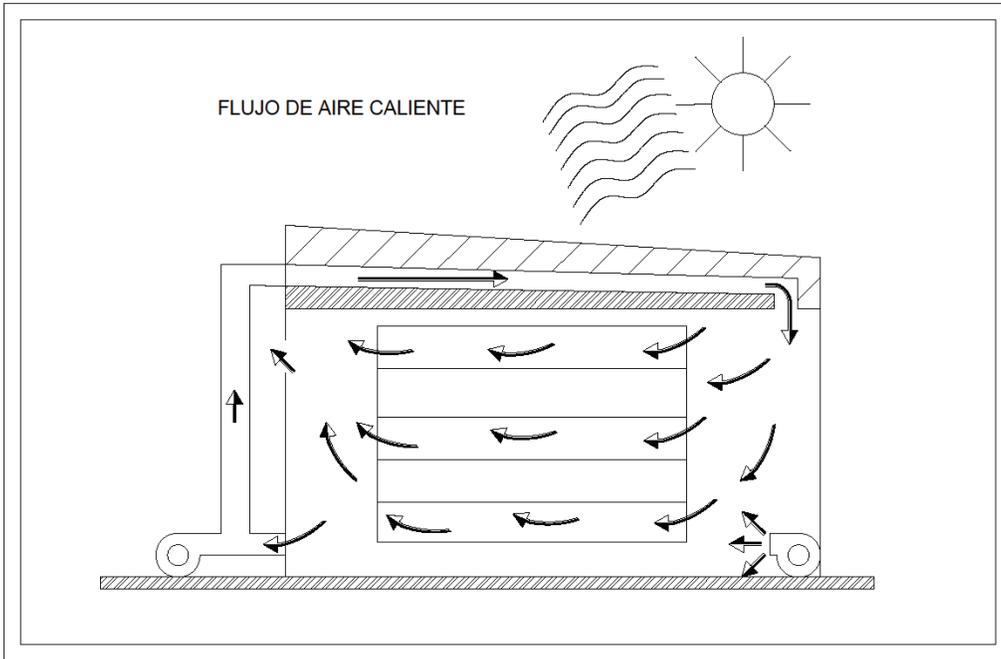


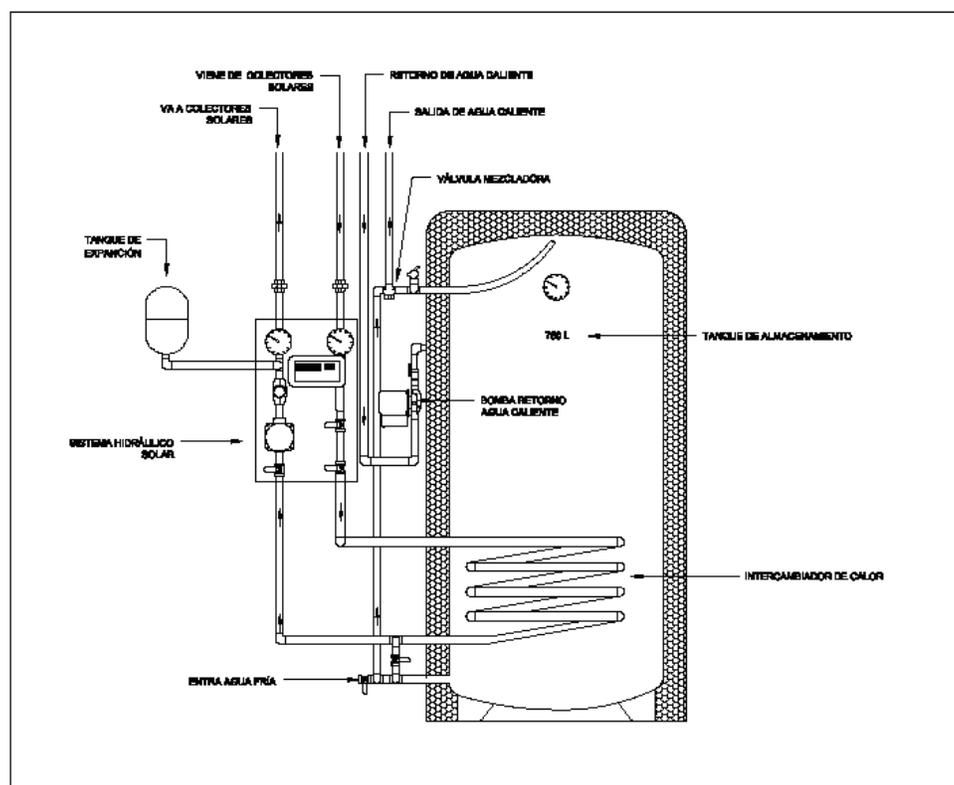
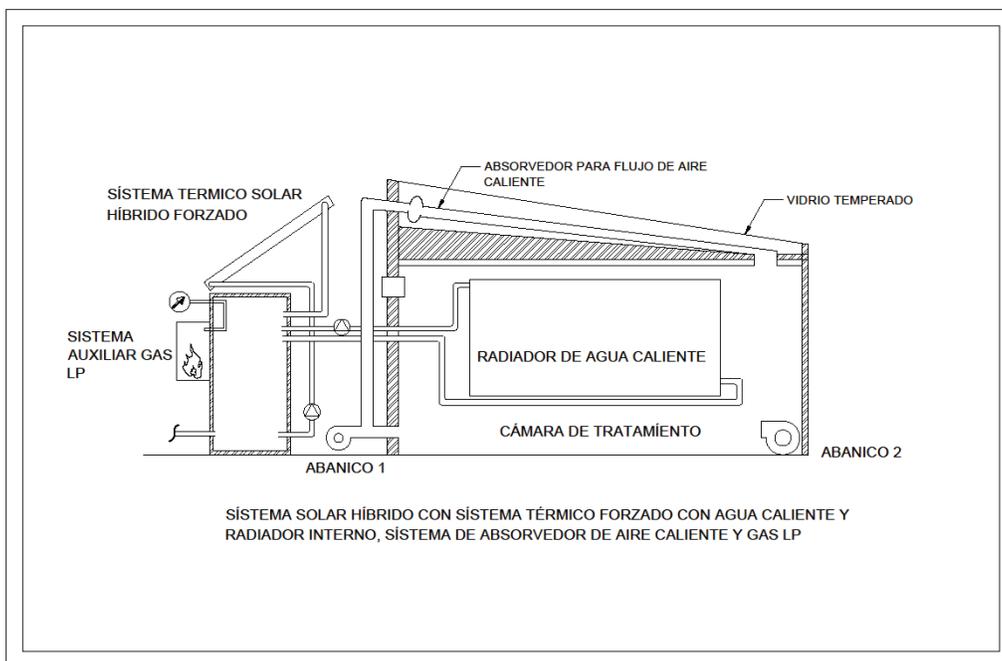
ÁREA PARA SELLOS

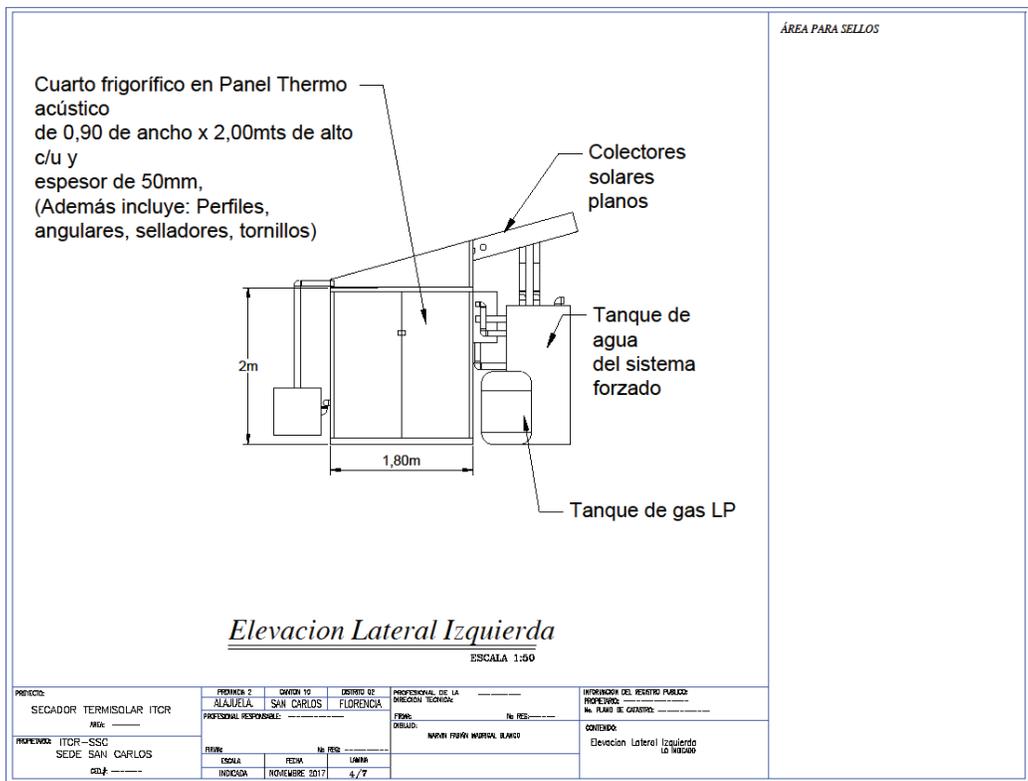
Planos del sistema térmico solar híbrido forzado diseñado e implementado para la asociación de productores agroambientalistas de cacao (Guatuso)



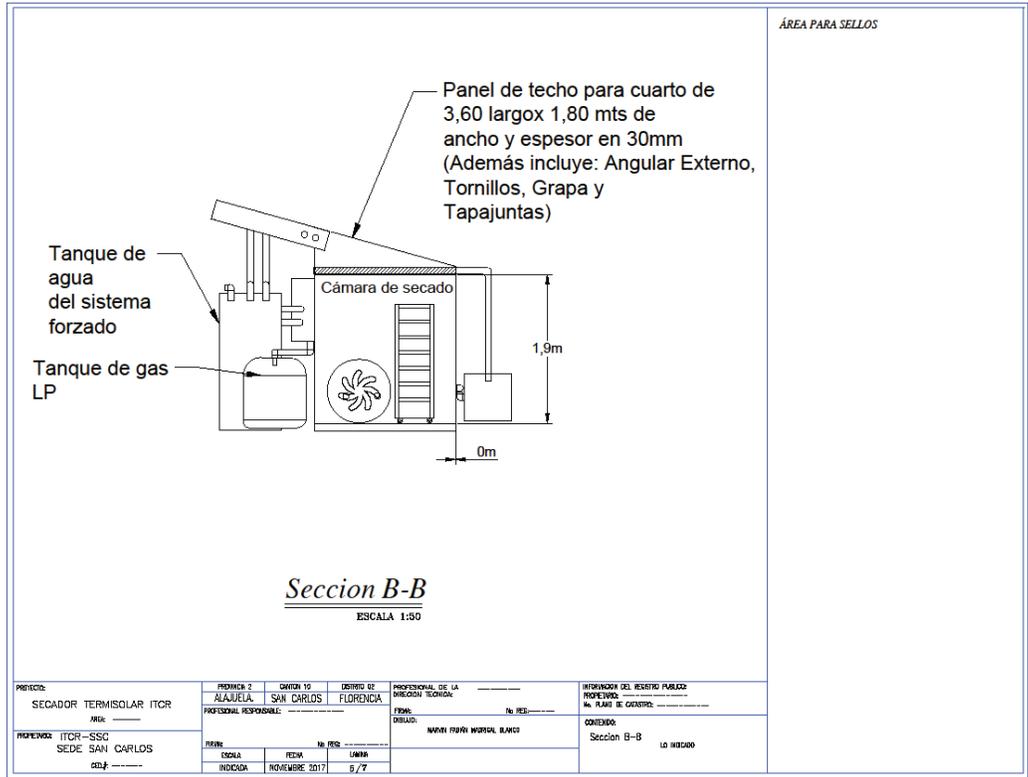




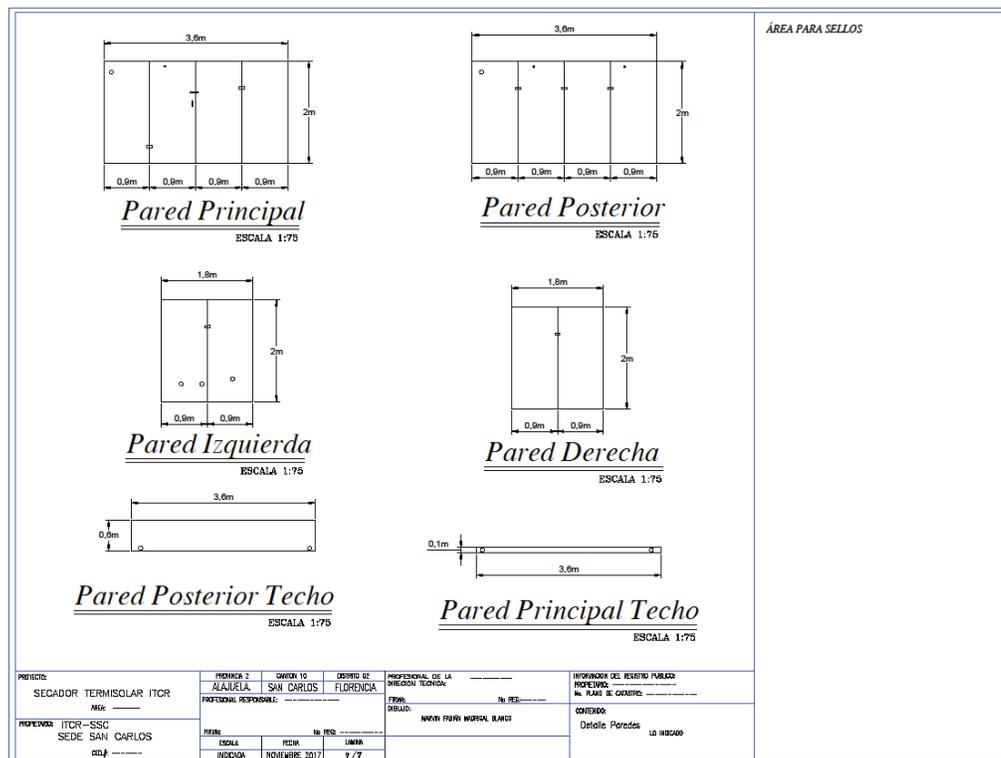
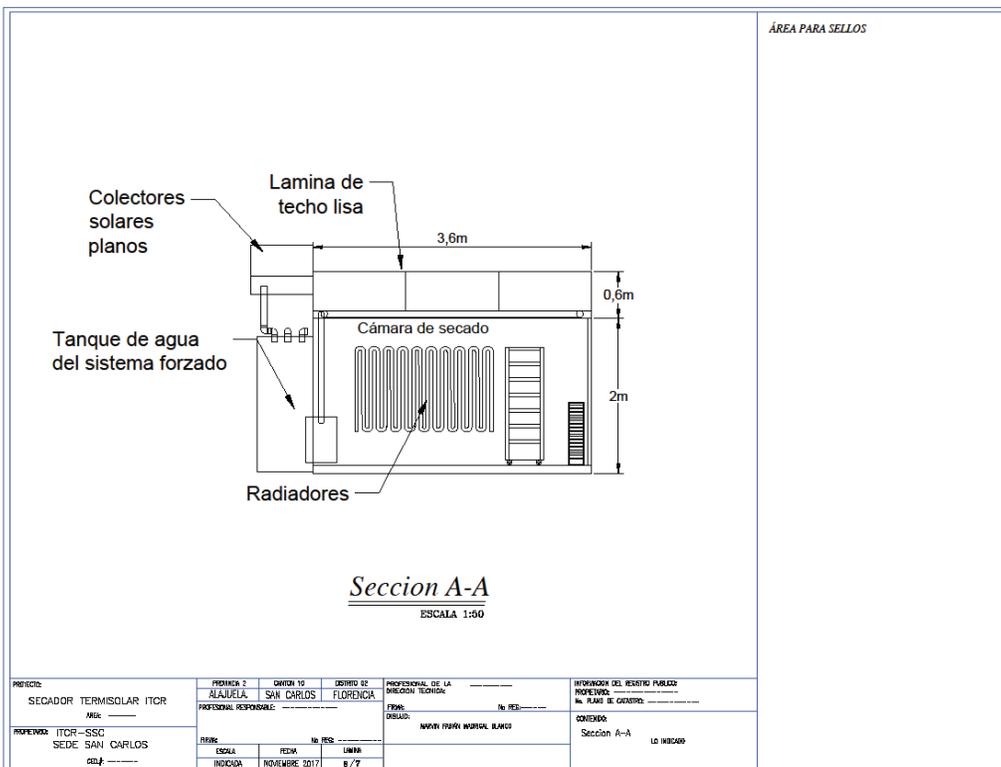


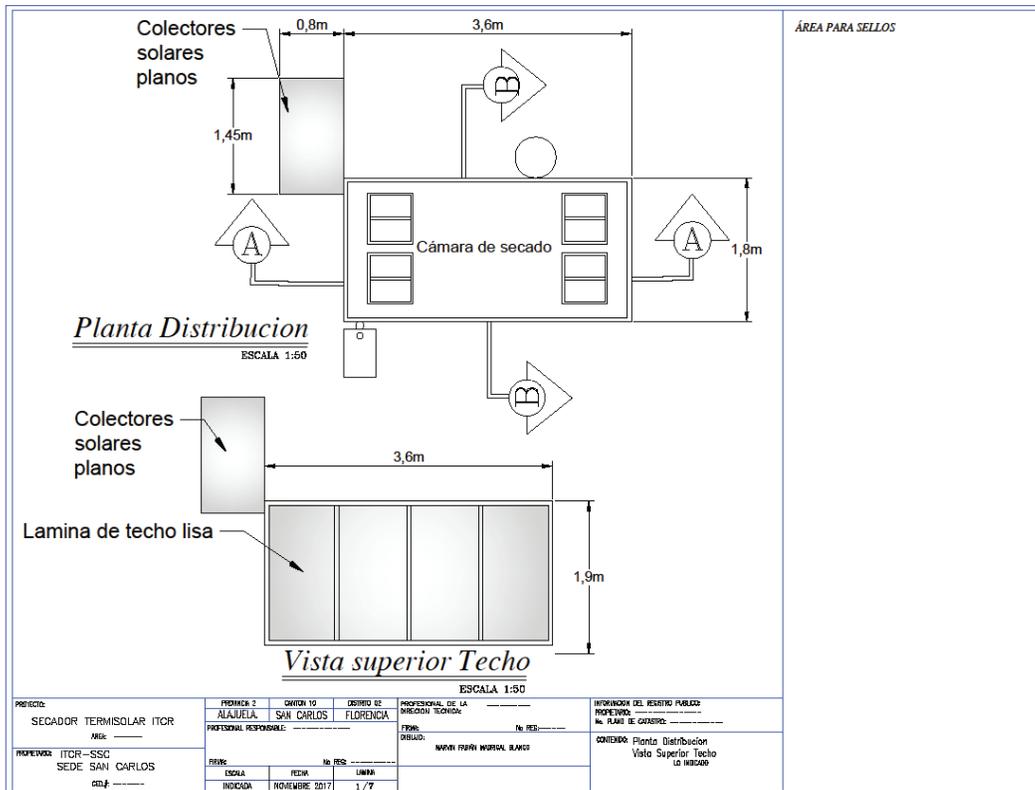


ÁREA PARA SELLOS

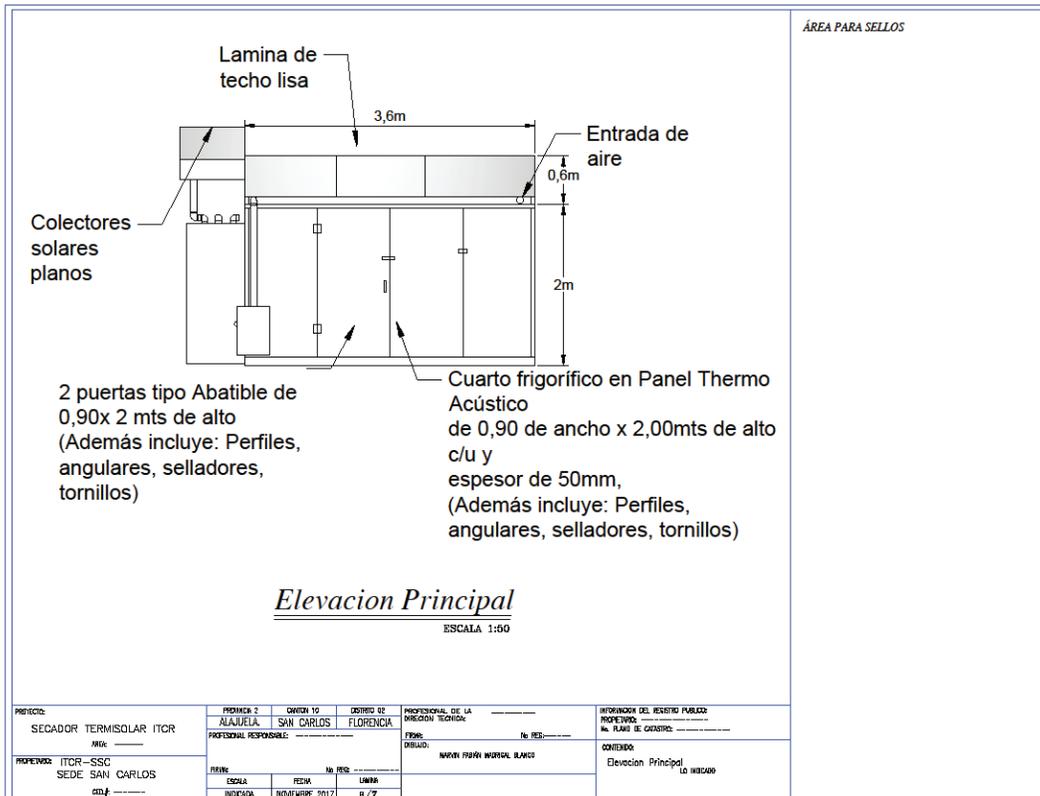


ÁREA PARA SELLOS

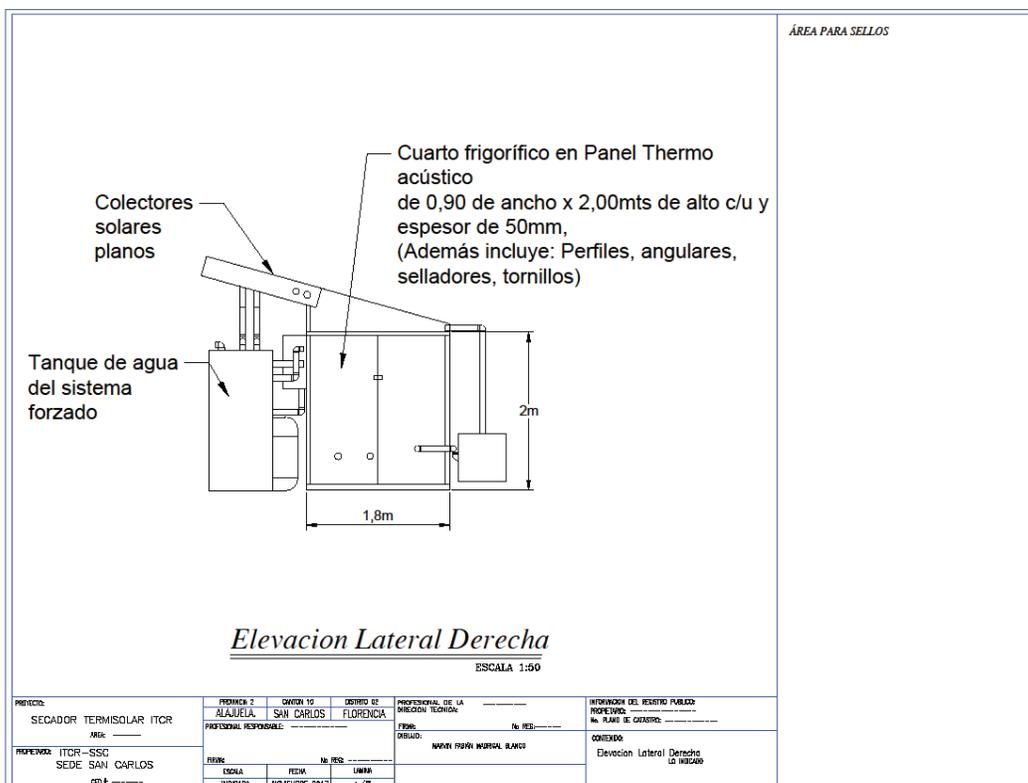




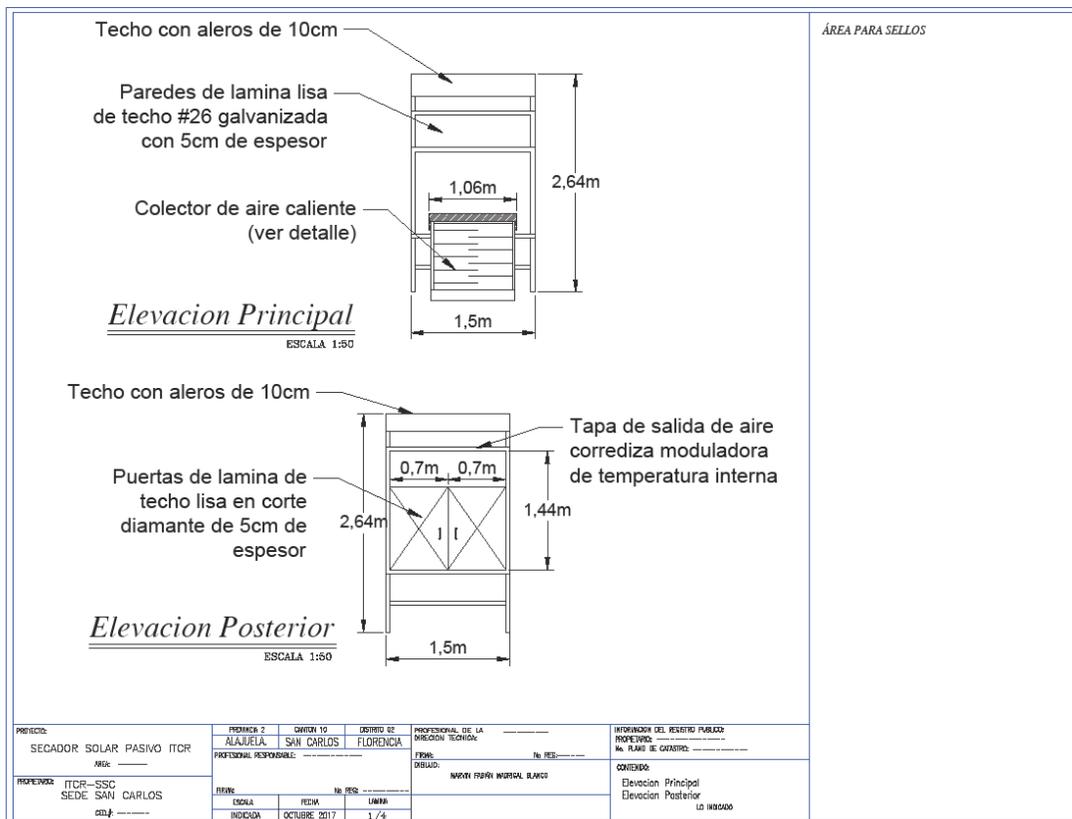
ÁREA PARA SELLOS

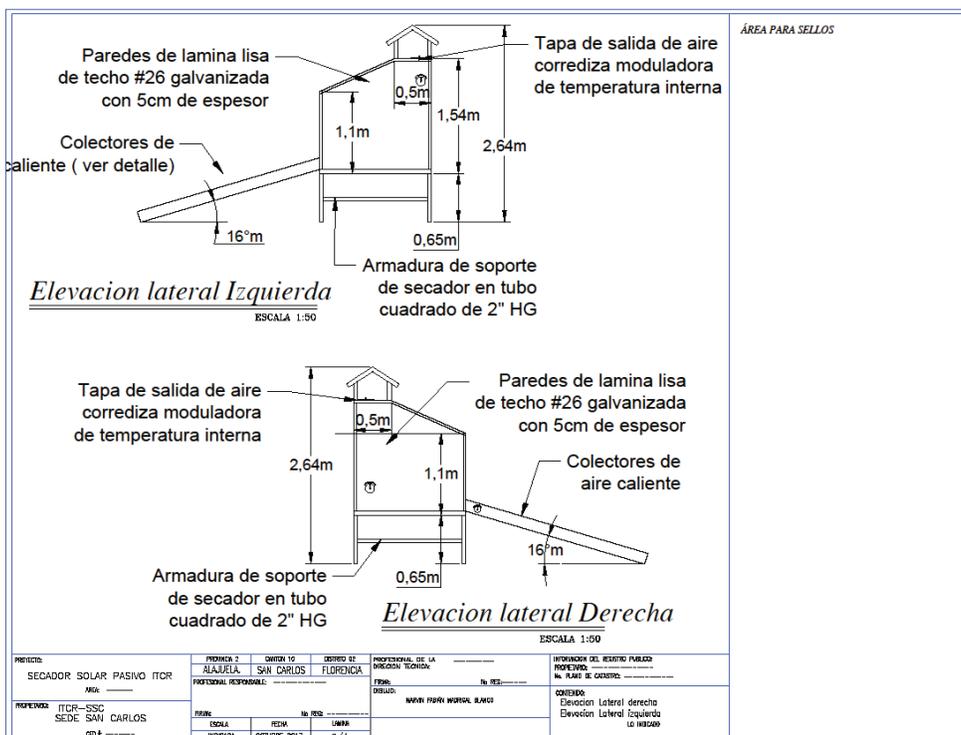


ÁREA PARA SELLOS

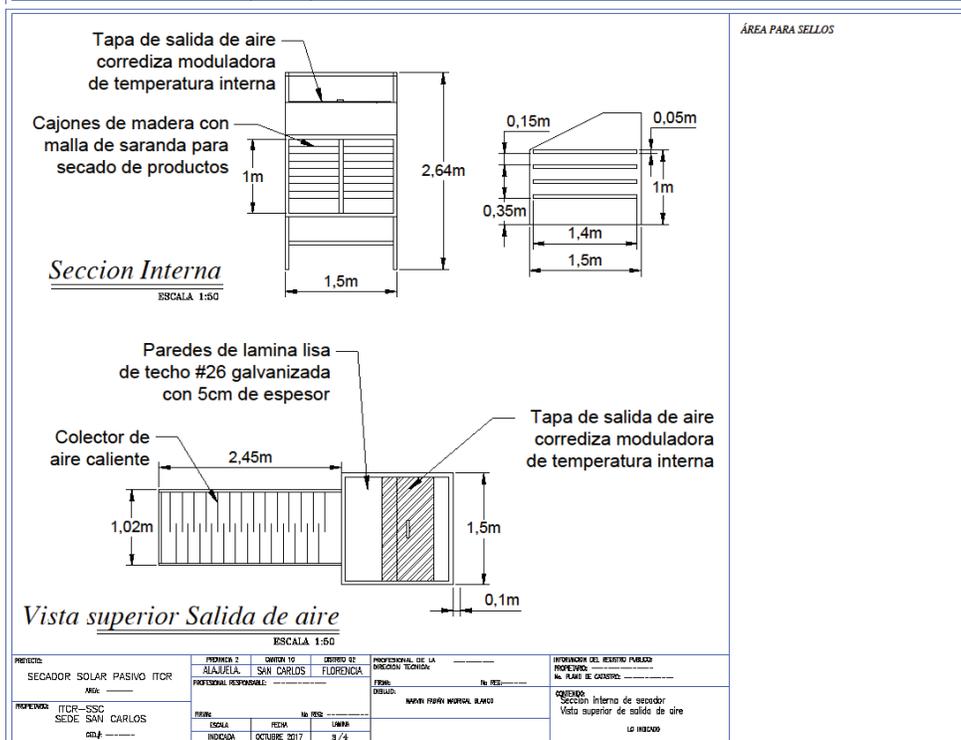


Sistema Térmico Solar Pasivo implementado en el Campus Tecnológico Local San Carlos (Instituto Tecnológico de Costa Rica)

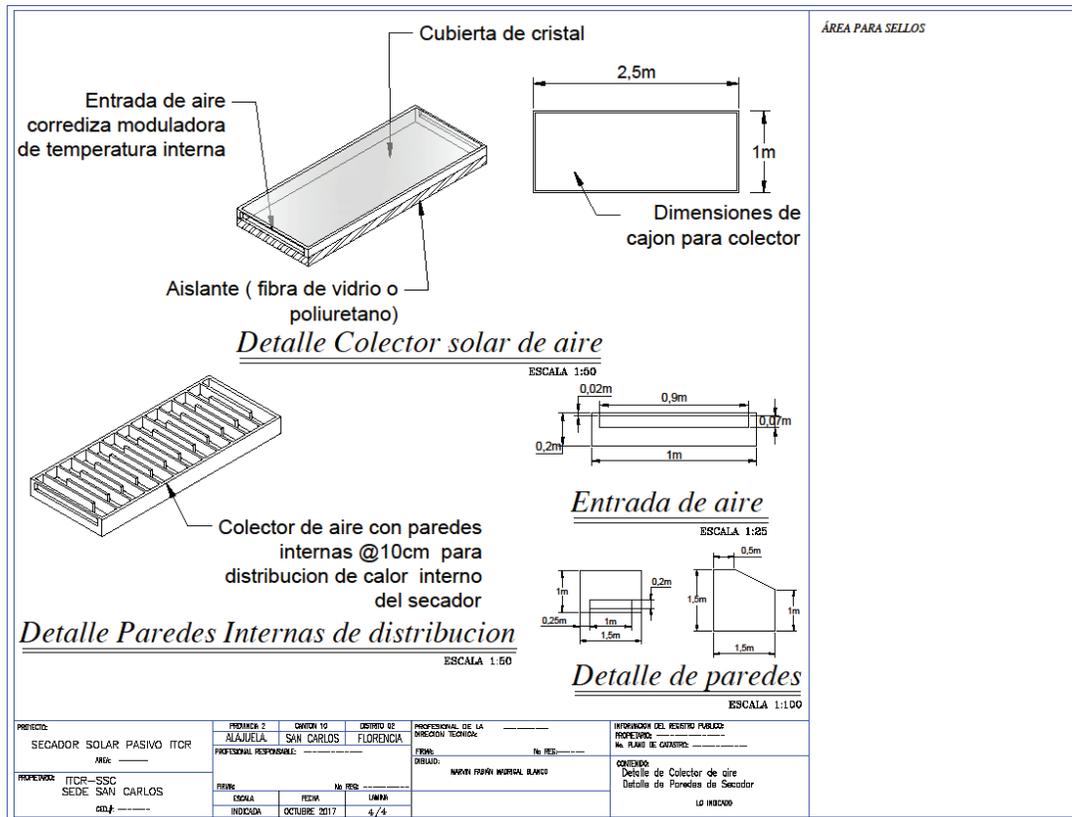




ÁREA PARA SELLOS

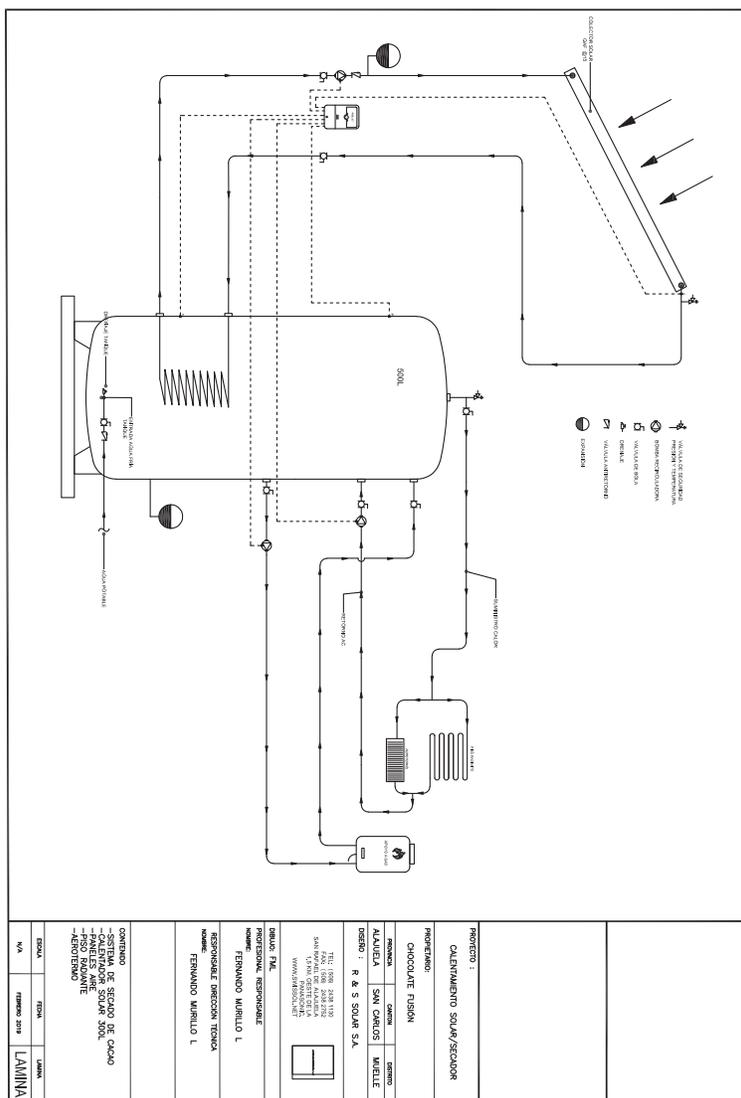


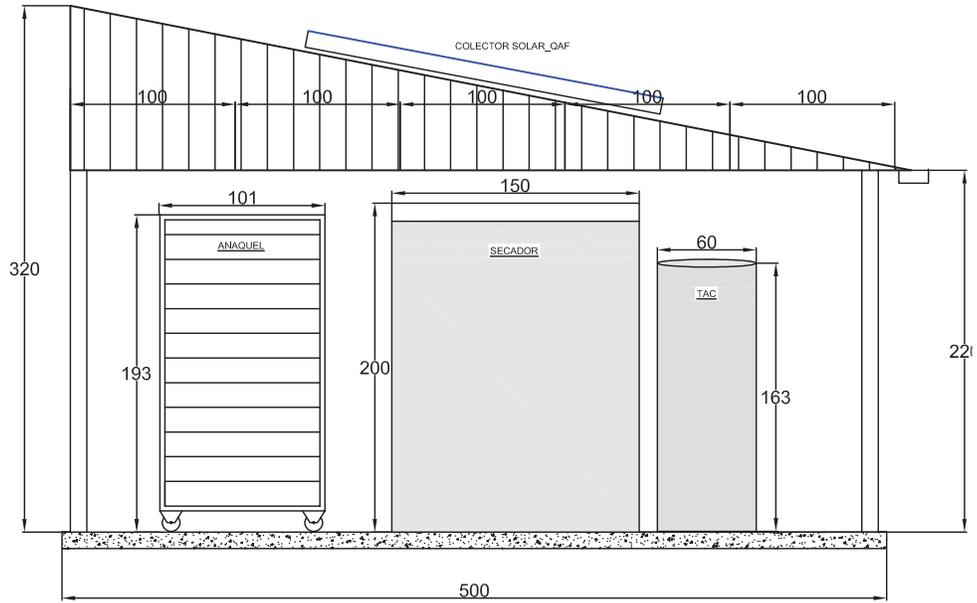
ÁREA PARA SELLOS



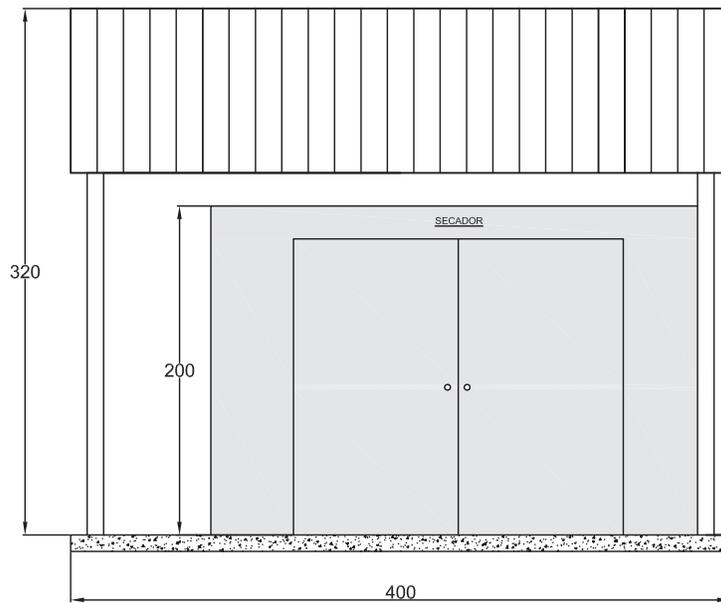
PROYECTO: SECADOR SOLAR PASIVO ITCR Mód: _____	PRIMERA 2	CANTÓN 10	DEPARTO DE	PROFESIONAL DE LA	INFORMACIÓN DEL REGISTRO PÚBLICO:
	ALAJUELA	SAN CARLOS	FLORENCIA	DISCIPLINA TÉCNICA:	PROFESOR:
	PROFESIONAL RESPONSABLE: _____			FIRM:	Nº. FOLIO DE CONTROL: _____
PROFESOR: ITCR—SSC SEDE SAN CARLOS Cód: _____	FIRM: _____			CONTENIDO: Detalle de Colector de aire Detalle de Paredes de Secador	
	ESCALA	FECHA	LÍNEA	LO INICIAL	
	INDICADA	OCTUBRE 2017	4/4		

Sistema térmico solar con piso radiante implementado en la fábrica artesanal de chocolates fusión (El Tanque, Florencia, Alajuela)

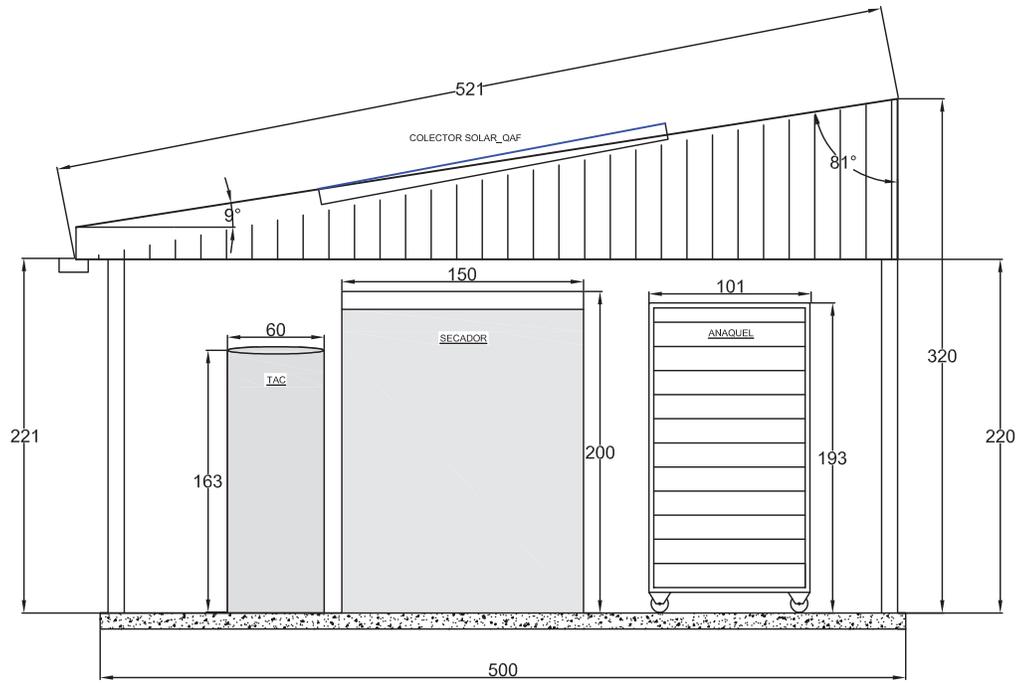




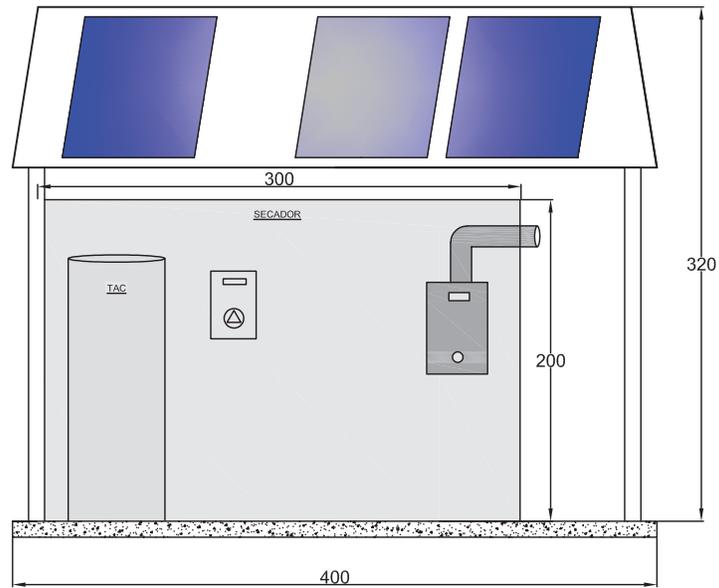
VISTA LATERAL IZQUIERDA



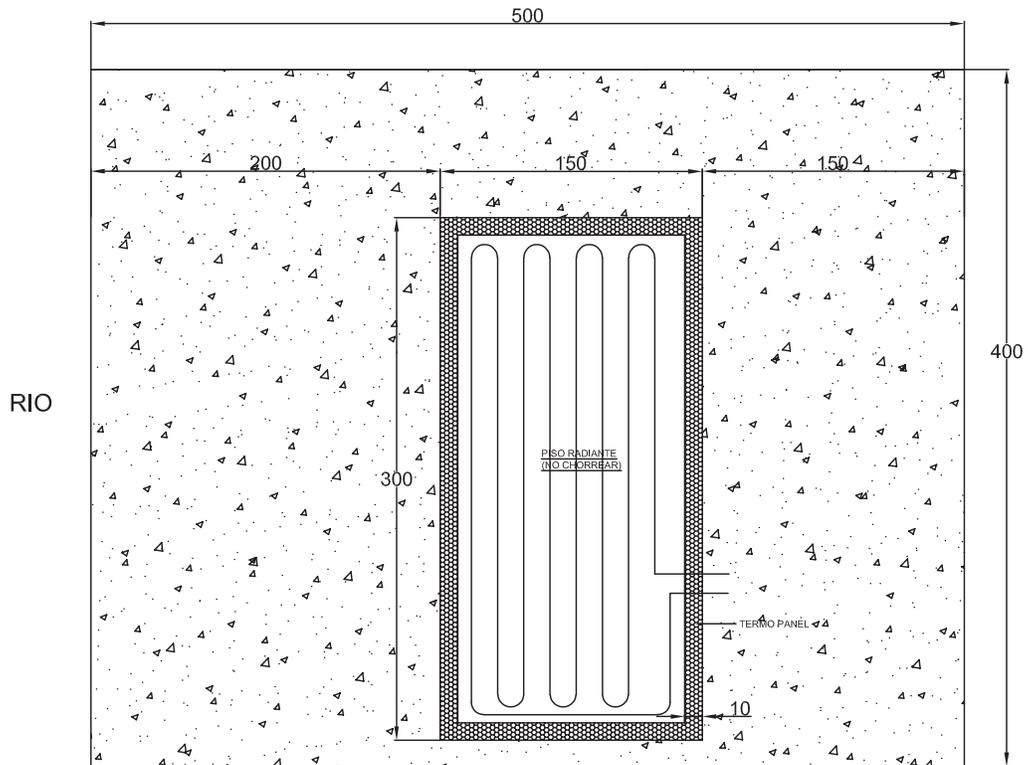
VISTA POSTERIOR



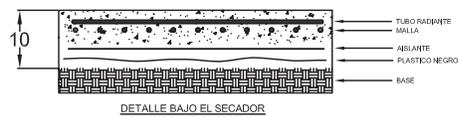
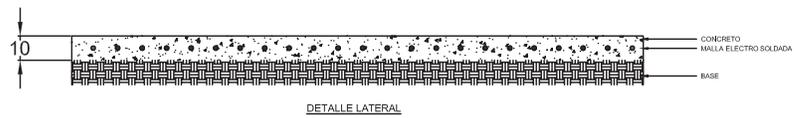
VISTA LATERAL DERECHA



VISTA FRONTAL



LOZA DE CONCRETO



Premios obtenidos



Certificate

ENERGY GLOBE NATIONAL AWARD 2019

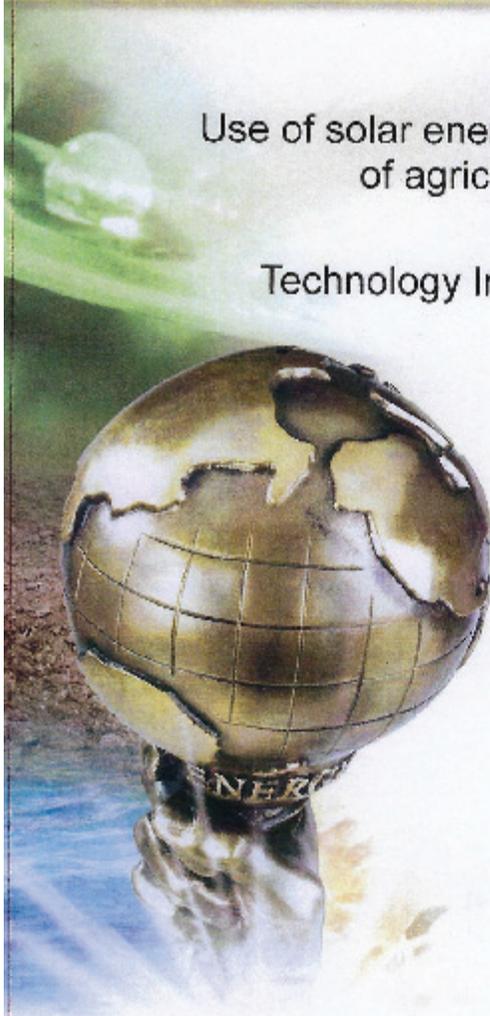
WINNER · COSTA RICA

PROJECT

Use of solar energy in the drying process
of agricultural products

APPLICANT

Technology Institute of Costa Rica



Maneka Gandhi

Maneka Gandhi
ENERGY GLOBE Jury
Chairwoman

Wolfgang Neumann
ENERGY GLOBE Foundation
Founder

ENERGY GLOBE
The world award for sustainability

 ADVANTAGE
AUSTRIA ORG