

VIII Congreso Argentino de Ingeniería Industrial

“Validación Experimental de un Modelo de Optimización del Diseño de Colectores Solares Planos”

*Fauroux, Luis Enrique**, *Díaz, Daniel*, *Blanco, Gabriel E.*, *Castillo, Domingo A.*,
Degaetani, Omar J., *Jara, David E.*, *Martín Campo, Fernando L.*

*Departamento de Ingeniería e Investigaciones Tecnológicas, Universidad Nacional de La Matanza.
Florencio Varela 1903 (B1754JEC). San Justo, Buenos Aires, Argentina.
lfauroux@ing.unlam.edu.ar*

RESUMEN

La búsqueda de fuentes de energía alternativas como la energía solar térmica, está motivada por el impacto ambiental provocado, entre otros, por el uso de combustibles fósiles. En este sentido se desarrolló en una investigación anterior un modelo matemático con el objeto de analizar y optimizar el diseño y análisis de colectores solares planos. La aplicación teórica a colectores preexistentes en teoría mejoraría el rendimiento. El objetivo del presente trabajo es validar experimentalmente dicho modelo mediante la comparación del rendimiento de un colector estándar de mercado respecto de otro igual al que sólo se aplicó la modificación de una variable. Se dispuso, entonces, estudiar y seleccionar las variables posibles de optimizar, ejecutar el modelo con las restricciones y limitaciones correspondientes, y luego modificar el segundo colector aplicando la variable a optimizar. Se montaron ambos colectores y se instalaron sensores de temperatura que permitieran conocer la temperatura ambiente y las alcanzadas por el fluido caloportador de cada uno de ellos. El rendimiento se calculó mediante la relación entre el calor útil y la energía solar absorbida por unidad de área. Los resultados obtenidos indican que el modelo permite predecir y optimizar el rendimiento de colectores solares planos. Los beneficios obtenidos a través de un sistema solar térmico consisten en el ahorro de los gastos del combustible equivalente y, fundamentalmente, el cuidado del medio ambiente.

Palabras Claves: Colectores, solares, validación, experimental, diseño.

ABSTRACT

The search for alternative sources of energy such as solar thermal energy is motivated by the environmental impact caused, among others, by the use of fossil fuels. In this sense a mathematical model in order to analyze and optimize the design and analysis of flat solar collectors developed in earlier research. The theoretical application to existing collectors in theory improves performance. The aim of this study is experimentally validate the model by comparing the performance of a standard collector market regarding only one matching the modification of a variable is applied. He prepared, then, to study and select the possible variables to optimize, run the model with the restrictions and limitations relevant, and then modify the second collector using the variable to be optimized. Both collectors were mounted and temperature sensors allow knowing the ambient temperature and achieved by the heat transfer fluid of each were installed. The yield was calculated by the relationship between the useful heat and solar energy absorbed per unit area. The results indicate that the model can predict and optimize the performance of flat solar collectors. On the other hand, this kind of system also has its benefits: by using it, you will be saving the equivalent fuel costs and, more importantly, taking care of the environment.

1. Introducción

1.1. Antecedentes

En la Argentina el uso de la energía solar térmica no está muy difundido, siendo el ahorro energético y los costos de implementación los aspectos muy importantes. En un primer trabajo se desarrolló un modelo de optimización del diseño de colectores solares planos, utilizando algoritmos no lineales de la plataforma GAMS (General Algebraic Modelling System). Los resultados de esa investigación han sido expuestos en el COINI 2013 (San Rafael, Mendoza) [1]. Los mismos indicaban que el modelo respondía al aplicarlo a paneles preexistentes y que se podría optimizar su rendimiento. Respecto a los costos de instalación el grupo de investigación presentó un segundo trabajo en el COINI 2014 (Puerto Madryn) [2]. El balance entre ambos proyectos indica que es necesario optimizar el rendimiento de los colectores, sin dejar de considerar la ubicación geográfica. Es en este sentido que este proyecto prevé la validación experimental de las predicciones del modelo desarrollado. Para ello se contrastará el rendimiento en forma experimental de un panel estándar respecto de un panel modificado de acuerdo a la optimización de diseño propuesta por el modelo, con el objeto de lograr un ahorro energético. El planteo debe ser realizado considerando la ubicación geográfica, el destino que se le dará al agua, ya sea para calefacción, agua caliente sanitaria o climatización de piletas, y la escala de implementación como puede ser domiciliaria, MiPyME etc. La investigación se realizó en la Universidad Nacional de La Matanza y se plantearon los arreglos correspondientes en el modelo teórico para que se ajuste a esta ubicación. En base al estudio se fijaron las posibles variables a medir para obtener el rendimiento de la placa colectora solar. Asimismo se estudiaron las leyes existentes en la Argentina con relación a las energías renovables con especial atención en la energía solar, con miras a realizar en un futuro una propuesta para incentivar el uso de este tipo de energías en el país y particularmente en la zona de influencia de la Universidad. Se analizaron en consecuencia los datos en cuanto a la ubicación geográfica. Los datos encontrados durante 12 días en las estaciones más cercanas Palermo, Bernal y Berazategui presentan una gran dispersión en los distintos días para los distintos lugares, con lo cual no se tiene un valor confiable en base a estos datos. Si bien se han encontrado mapas de radiación solar de la Argentina y de Buenos Aires [3, 4], los mismos solo presentan valores promedios para algunos meses en particular, por lo general enero y junio, con lo cual no se conoce el valor correspondiente a otros meses, además el resultado para la zona cercana a la Universidad siempre es con referencia a mediciones en lugares alejados. Dado que no se disponen de datos exactos respecto a las condiciones ambientales, ni a las estadísticas de radiación solar, el equipo comenzó a analizar factibilidad, viabilidad y posibilidad de adquirir una estación meteorológica, la que bien puede tener utilidad y aplicación en otros proyectos de investigación. Se proseguirá con la búsqueda de mapas para los distintos meses del año, en caso de que no se pueda adquirir el equipo

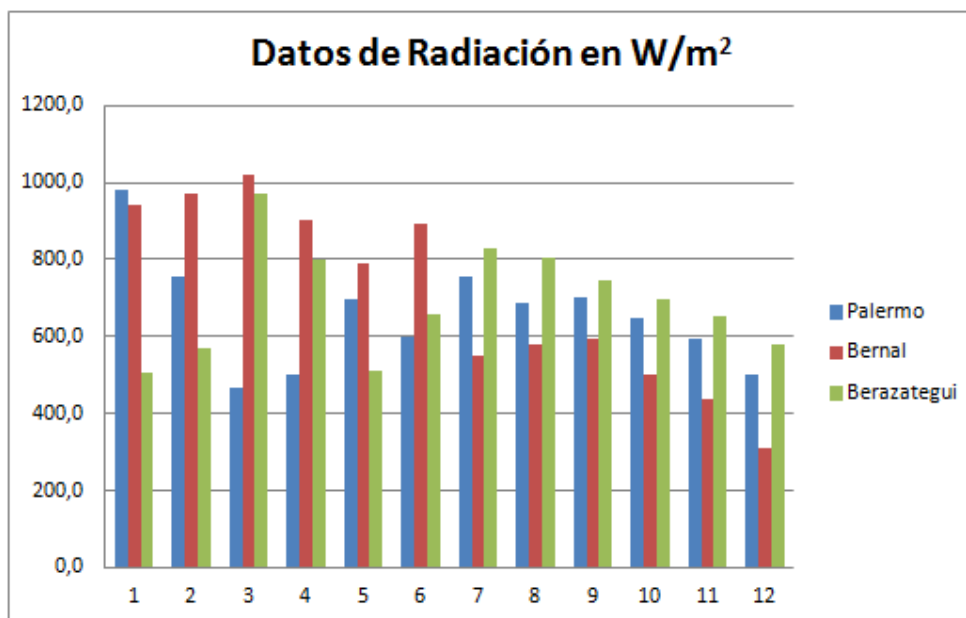


Figura 1. Radiación solar obtenida durante 12 días en zonas cercanas a la Universidad

1.2. Disponibilidad y técnicas de captación de energía solar

La cantidad de energía solar que es recibida en el territorio de la República Argentina, promediando la zona comprendida al norte del río Colorado que cubre un total de 2 millones de km², es de 16,5 MJ/(m².dia) equivalente a 4,6 kWh/(m².dia) anualmente [3].

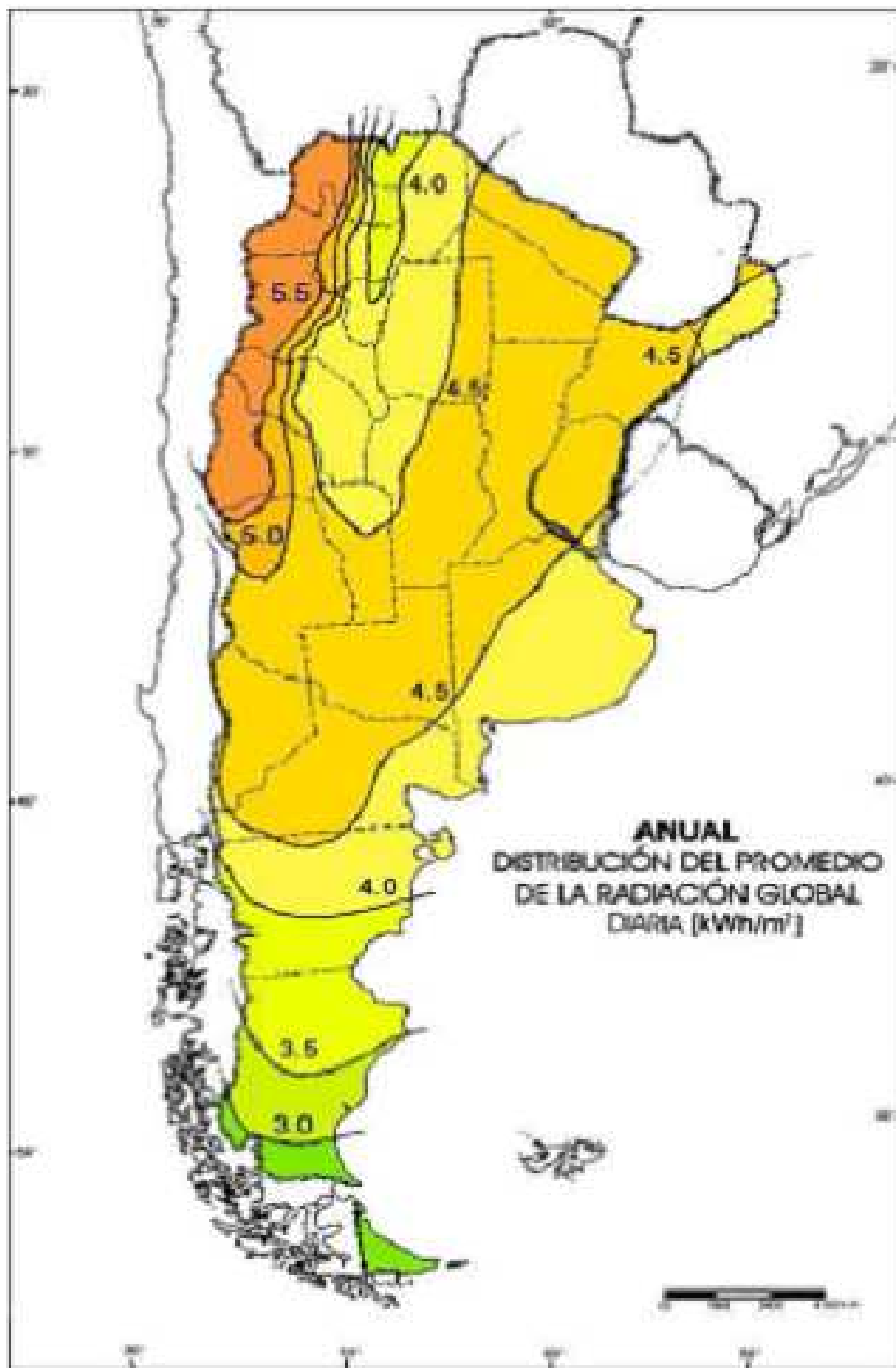


Figura 2. Mapa de radiación solar.

Las técnicas para capturar directamente una parte de esta energía radiante están disponibles y están siendo mejoradas permanentemente.

1.3. Rendimiento de un colector solar plano

Para analizar el rendimiento y si su comportamiento es predecible mediante el modelo desarrollado se decidió que, una vez montados los colectores, se cerrará el circuito del fluido caloportador sin pasar por el tanque de almacenamiento. El motivo de esta decisión está fundamentado en la influencia de la masa del agua a calentar sobre las temperaturas que se pretende medir y de las que resultará la curva de rendimiento. El rendimiento de los colectores solares comerciales se basa en la siguiente expresión [1, 5, 6]:

$$\eta = F_r \cdot (\tau\alpha) - F_r \cdot U_L \cdot \frac{T_{f1} - T_a}{H_T} \tag{1}$$

En ella U_L es el coeficiente global que representa las pérdidas de calor, La cantidad de energía solar incidente es H_T , y debido a las condiciones externas se tienen las siguientes variables, la temperatura ambiente T_a , y las características del material (transmitancia de la cubierta τ y absorbancia de la placa α). La resolución de esta expresión comercialmente se hace por medio de gráficos, como el de la figura 3

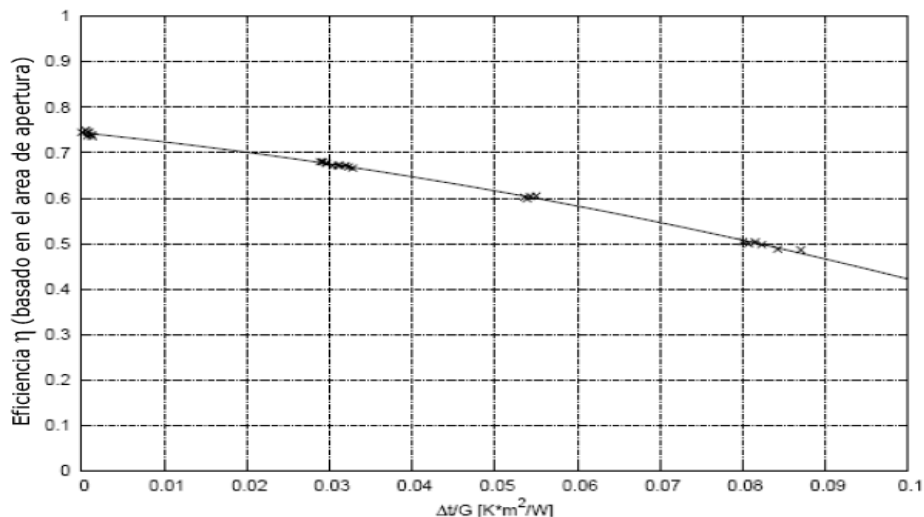


Figura 3. Curva de rendimiento de un colector solar plano

Para obtener el rendimiento del gráfico es necesario entrar por las abscisas del mismo con los siguientes datos: la variación entre la temperatura media de la placa T_m y la temperatura ambiente T_a y la radiación solar incidente G (H_T), por ejemplo:

$$\frac{T_m - T_a}{G} = \frac{333.15^\circ\text{K} - 293.15^\circ\text{K}}{800 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}} = 0.05 \frac{\text{m}^2 \cdot \text{K}}{\text{W}} \tag{2}$$

1.4. Descripción de captadores térmicos planos

Cada vez es más común ver casas y chalets que utilizan paneles solares térmicos, estas viviendas los incorporan en sus paredes o techos. Los captadores son de gran utilidad ya que pueden ahorrarnos dinero a largo plazo, su principal utilidad es la de calentar el agua de uso sanitario para el consumo doméstico, calefacción por radiadores o suelo radiante. En algunos casos también son utilizados para calentar el agua de piscinas, obtener aire acondicionado, desalinizar agua de mar y otros muchos usos; hasta son capaces de entregar energía durante la noche. En muchos países esta tecnología resulta de máxima utilidad pero es de un alto costo de inversión inicial. El ingenio humano es el que entra en juego en estas ocasiones, y muchos inventores caseros se atreven a hacer sus propios colectores solares, con muy buenos resultados. Si bien es cierto que los materiales utilizados en los paneles térmicos caseros no poseen aún la durabilidad de los utilizados en paneles comerciales, en muchos casos es la única posibilidad que tienen algunas familias de obtener agua caliente de forma económica. Los paneles solares térmicos son fáciles de instalar e integrar en una vivienda, aportan un gran ahorro en suministros y emisiones de CO_2 a la atmósfera. Para realizar una instalación de producción de agua caliente sanitaria son necesarios varios elementos: los captadores solares, un depósito acumulador de agua, opcionalmente un calentador complementario de apoyo (eléctrico o térmico), un circuito de agua que incluye las

conducciones, bomba de circulación (si el sistema es forzado), válvulas y depósito de expansión. La superficie de la instalación y el volumen del calentador deberán calcularse de acuerdo con el consumo medio, y del número de personas que habiten en la unidad habitacional.



Figura 4 Colector solar térmico plano

2. Metodología

Se dispuso, entonces, estudiar y seleccionar las variables posibles de optimizar, ejecutar el modelo con las restricciones y limitaciones correspondientes, y luego modificar el segundo colector aplicando la variable a optimizar. Se decidió optimizar un colector cuya cubierta transparente fuera de acrílico. Se colocaron los datos correspondientes en el modelo, se restringió los valores de transmitancia y emisividad a los materiales conocidos. Se ejecutó el modelo para los distintos materiales potencialmente disponibles y se obtuvo como mejor opción el cristal selectivo con transmitancia igual a 0,95 y emisividad de 0,01. Así se colocaron dos colectores de igual construcción en paralelo, uno con la cubierta de acrílico y otro con la cubierta de cristal, ambos colectores se montaron sobre la caja de ascensores del comedor universitario de la UNLaM (Figura 5). La cubierta transparente del segundo colector fue reemplazada entonces por cristal selectivo (Figura 6), mientras que se mantuvo la cubierta de acrílico cristal del colector (standard) a optimizar.

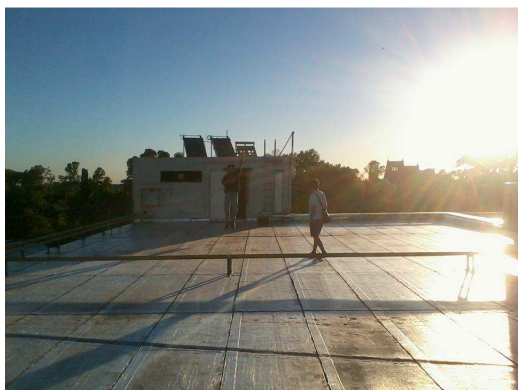


Figura 5



Figura 6

Debajo de uno de los colectores se colocó, al abrigo de las lluvias, una caja hermética conteniendo los sistemas de almacenamiento de datos (Figura 7), con sus correspondientes sensores. Los mismos se ubicaron, dentro de vainas de cobre en la parte superior del circuito de cada colector (Figura 8).



Figura 7

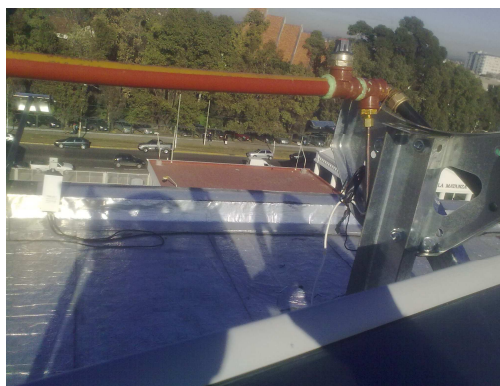


Figura 8

Se realizaron varias campañas de toma de datos, cada una con duración de hasta cuatro días adquiriendo los registros de temperaturas. En primera instancia los datos recolectados fueron utilizados como parámetros a fin de ajustar el montaje realizado, su llenado, colocación de las sondas, fijaciones auxiliares, etc., a fin de que ambos colectores funcionen en régimen estacionario comparable, quedando así establecidos los parámetros que corresponden a las instalaciones, e indicados en la Tabla 1

Tabla 1 - Resumen de parámetros y características de la instalación.

Fluido refrigerante	Volumen	Densidad	Masa	Calor Específico
Agua / Propilenglicol	684,1 cm ³	1,046 g/cm ³	715,57 g	1,26 cal / (g.°C)
Placa Absorvedora	Cobre	Absorvancia	Emisividad	Area efectiva
		0,95	0,05	1,73 m ²
Tubos	Diámetro interno	Espesor	Separación	Separación
	8 mm	0,9 mm	96,5 mm	96,5 mm
Cubierta Transparente		Transmitancia	Transmitancia en el infrarojo	
Acrílico Cristal		0,92	0,1	
Cristal Selectivo		0,95	0,01	

3. Validación Experimental del modelo de optimización

Para la verificación del modelo se analizó el rendimiento del colector standard y el del mejorado, por ello se decidió que una vez montados los colectores, se cerrara el circuito del fluido caloportador sin pasar por el tanque de almacenamiento. El motivo de esta decisión está fundamentado en la influencia de la masa del agua a calentar sobre las temperaturas que se pretende medir y de las que resultará la curva de rendimiento. El calor útil es el calor absorbido por la masa de agua (m_{fluido}) y que se calcula mediante la ecuación 3 [1, 5, 6]

$$Q_u = m_{\text{fluido}} \cdot C_{p\text{fluido}} \cdot (dT/dt) \quad (3)$$

Siendo $C_{p\text{fluido}}$ la capacidad específica del fluido y dT/dt la variación de temperatura del fluido a través del tiempo.

El calor absorbido por el colector está dado por la incidencia de la radiación global sobre el área del colector, y se verá afectado por las características de la cubierta, como se observa en la ecuación 2 [1, 5, 6]

$$Q_{\text{abs}} = H_T \cdot A_c \cdot (\tau\alpha) \quad (4)$$

La radiación global es un parámetro extraído de los informes del servicio meteorológico nacional y varía cada día, mientras que $(\tau\alpha)$ corresponde a las características de transmitancia y absorvancia de la cubierta transparente. A modo de ejemplo, se presentan en la Tabla 2, los resultados obtenidos durante la campaña que incluye a los días 23 y 25 de diciembre 2014, junto con el cálculo correspondiente de los calores útil y absorbido.

Tabla 2. Relevamiento de temperaturas y cálculos de calor.

Fecha	Hora	Temperatura (°C)		Calor Util (joules)		Calor Absorbido (joules)
		Ta	Standard	Optimizado	Standard	

23/12/2014	12:49 pm	26,20	91,61	96,01	245610,44	262132,16	419520,00
23/12/2014	12:54 pm	26,27	91,42	96,12	244634,16	262282,36	419520,00
25/12/2014	12:18 pm	32,21	94,09	99,27	232355,51	251806,09	379733,89
25/12/2014	12:22 pm	32,27	94,44	98,91	233444,44	250229,01	379733,89
25/12/2014	13:27 pm	34,25	98,34	103,32	240653,92	259353,51	379733,89

Con estos datos se calculó el rendimiento obtenido en la práctica, que resulta del cociente entre el calor útil y el absorbido [1, 5, 6],

$$\eta = \frac{Q_u}{H_T \cdot A_C} \quad (5)$$

y se calculó aquél que predice el modelo que se pretende validar. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 3.

Tabla 2. Rendimientos calculados.

Rendimiento (Standard)	Rendimiento (Optimizado)		
	Medido	Medido	Modelado
58,55%	60,51%	61,60%	1,09%
58,31%	60,55%	61,61%	1,06%
61,19%	64,22%	65,22%	1,00%
63,37%	66,14%	66,68%	0,54%

Paralelamente los becarios el proyecto concluyeron sus planes de trabajo, que consistieron en el desarrollo de colectores solares económicos utilizando materiales de bajo costo el reciclado de otros. Para esta tarea montaron un colector de fabricación propia en el mismo sitio que se instalaron los colectores adquiridos por el proyecto.

4. Conclusiones

La diferencia obtenida puede atribuirse a variables que el fabricante del colector tomado como base no haya estipulado, y que por ende no pueden ser volcadas correctamente en el modelo, por ejemplo la conductividad del aislante factor cuya importancia está en el orden del error obtenido. De este modo queda cumplido el objetivo de validar experimentalmente el modelo de optimización de colectores solares planos en cuestión. Sin embargo, teniendo en cuenta que el principal objetivo es el cuidado del medio ambiente, el desafío de la ingeniería industrial es estudiar diseños alternativos y/o híbridos, de manera tal que la suma de distintas alternativas puedan hacer posible la obtención de energía en forma suficiente, económica, sostenible y sustentable. Asimismo se observa que el principal costo radica en el colector solar, el que podría disminuir desarrollando materiales sustitutos. De igual modo se recomienda el análisis de instalaciones en escalas un tanto mayores, lo que permitiría una menor inversión inicial por la compra de colectores en cantidad. Por estos motivos es que se propone analizar la posibilidad de que el modelo minimice los costos, además de maximizar el rendimiento, de un colector.

Asimismo, se realizó y se expuso el análisis económico de la implementación de colectores solares planos a baja escala en el VII° Congreso de Ingeniería Industrial. De los resultados surge que dicha implementación no es económicamente rentable sin subsidios ni reconocimientos económicos para los usuarios domiciliarios que decidan invertir en esta clase de reconversión. Esto sucede porque a esta escala no hay todavía una internalización de los beneficios ambientales aportados. No cabe duda que el costo inicial es el de mayor relevancia, por lo que es prioritario un correcto dimensionamiento de la instalación a realizar sin dejar de lado el cuidado del medio ambiente. Este aspecto es incumbencia de la ingeniería industrial que analizará configuraciones alternativas y/o híbridas, así como materiales que puedan hacer posible la construcción de colectores solares planos tan eficientes como los actuales en el mercado pero más económicos, ya que es donde radica el principal costo de la implementación. Un análisis de de la posibilidad de instalaciones a mayor escala, acompañado por un modelo de minimización de costos, podría concluir que la inversión inicial por unidad habitacional sería menor por la compra de colectores en cantidad, lo que disminuiría los tiempos de amortización.

5. Referencias

- [1] Fauroux, Luis Enrique; Jäger, Mariano Daniel. (2013). "Diseño y Análisis de Colectores Solares Planos". Memorias del COINI 2013 UTN FRSR. ISBN 978-987-1896-26-4.
- [2] Fauroux, Luis Enrique; Díaz, Daniel O., Degaetani, Omar J. (et al.) (2014). "Evaluación económica de la instalación a baja escala de colectores solares planos". Memorias del COINI 2014 UTN FRCh. ISBN 978-987-1896-39-4.
- [3] Righini, Raúl; Grossi Gallegos, Hugo. (2011) "Mapa De Energía Solar Colectada Anualmente Por Un Plano Inclinado. Un Ángulo Óptimo En La República Argentina". Cuarto Congreso Nacional. Tercer Congreso Iberoamericano. Hidrógeno y Fuentes Sustentables de Energía. HYFUSEN 2011
- [4] Raichijk, C. (2013). "Cartas De Radiación Solar Directa Normal Para La Pampa Húmeda Argentina". Acta de la XXXVI Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Medio Ambiente Vol. 1, pp. 11.47-11.53.
- [5] Cabello, J.M.; Cejudo, J.M.; Luque, M.; Ruiz, F.; Deb, K.; Tewari, R. (2011). "Optimization Of The Size Of A Solar Thermal Electricity Plant By Means Of Genetic Algorithms". Renewable Energy Vol 36 Pag 3146 a 3153. ScienceDirect (Elsevier).
- [6] "Curso de Energía Solar" – J. J. H. Villalobos; D. G. Ayala; M. M. Ramírez - Notas sobre el Curso de Energía Solar - del Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Occidente - Tlaquepaque, Jalisco, Febrero de 1995