

# “Modelado, y análisis económico de colectores solares planos”

## “Modeling, and economic analysis of flat solar collectors”

*Luis E. FAUROUX<sup>(1)</sup>, Daniel O. DIAZ, Gabriel E. BLANCO, Omar J. DEGAETANI*

<sup>(1)</sup>Departamento de Ingeniería e Investigaciones Tecnológicas, Universidad Nacional de La Matanza, Argentina.  
lfauroux@unlam.edu.ar

### RESUMEN

El impacto ambiental provocado por el uso de combustibles fósiles, entre otros, es el motivo de la búsqueda de fuentes alternativas como la energía solar térmica. En este sentido se desarrolló un modelo matemático con el objeto de analizar y la evolución del rendimiento de colectores solares planos, conforme se modifiquen variables de diseño. Para ello los modelos se desarrollaron a partir del análisis de la fuente de energía, el mecanismo de transformación y transferencia de la misma, las resistencias que se oponen a este proceso, la configuración del colector y el cuerpo absorbente final de la energía transformada, Con el fin de validar el modelo se evaluó su respuesta ante el cambio de la cubierta transparente. Las instalaciones térmicas solares tienen, como dificultad, una inversión inicial más elevada que la de un sistema térmico tradicional. No obstante, una vez que el sistema solar está instalado, los gastos de funcionamiento son mínimos y consisten control del sistema, reparaciones ocasionales y manutención periódica. En este contexto se realizó un análisis de la viabilidad económica para la implementación de un sistema solar térmico a baja escala y una propuesta en este sentido que permita amortizar la inversión a nivel residencial.

### ABSTRACT

In this sense a mathematical model in order to analyze the evolution and performance of flat solar collectors developed, as design variables are changed. To this end, models were developed based on the analysis of the energy source, the mechanism of transformation and transfer of the same, the resistances that oppose this process, the configuration of the collector and the absorbent body end of the transformed energy, With in order to validate the model the response was assessed by the change in the transparent cover. Solar thermal systems have, such as difficulty, higher than that of a traditional thermal system initial investment. However, once the solar system is installed, the operating costs are minimal and consist of system control, occasional repairs and regular maintenance. In this context an analysis of the economic feasibility of implementing a solar thermal system on a small scale and a proposal in this regard to allow a return on investment for residential performed.

**Palabras Claves:** colectores, solar, modelado, evaluación, costos.



**Keys Words:** solar, collectors, modeling, evaluation, costs.

## I. Contexto

El motivo del viraje hacia fuentes de energías alternativas está fundamentado en el impacto ambiental provocado, entre otros, por el uso de combustibles fósiles. La producción de energía es un factor de crecimiento para los países y por lo tanto un tema sensible. La combustión es una de las formas de producir la energía necesaria para la industria. A nivel doméstico la combustión del gas natural se utiliza para la cocción de alimentos, calefacción y agua caliente sanitaria (ACS).

## II. Introducción

### a. Gases de efecto invernadero y calentamiento global

El proceso de la combustión genera dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ). El  $\text{CO}_2$  es uno de los gases causantes del efecto invernadero [1], el aumento de la concentración del mismo en la atmósfera ha transformado este efecto en “calentamiento global” [1],[2],[3]. La relación entre el “calentamiento global” y las concentraciones de los gases de efecto invernadero (GEI) puede observarse en los gráficos de las Figuras 1 y 2, cuyos datos fueron obtenidos midiendo la concentración de los gases ocultos en bloques de hielos antárticos y árticos, y la densidad de los mismos.

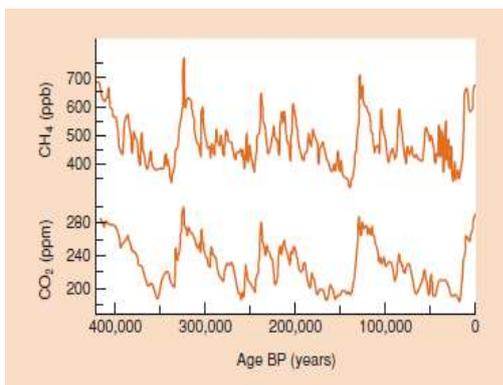


Fig. 1 Concentración de GEI en los hielos antárticos y

árticos

El análisis de estos gráficos sugiere entonces que una de las causas del calentamiento global es el aumento de la concentración de  $\text{CO}_2$ , producto del uso de combustibles fósiles [1]. A los efectos de disminuir las emisiones de este gas, la propuesta alternativa en este trabajo consiste en utilizar energía solar térmica para la producción de agua caliente sanitaria. La misma no provoca gases de efecto invernadero y es, además, un recurso natural renovable.

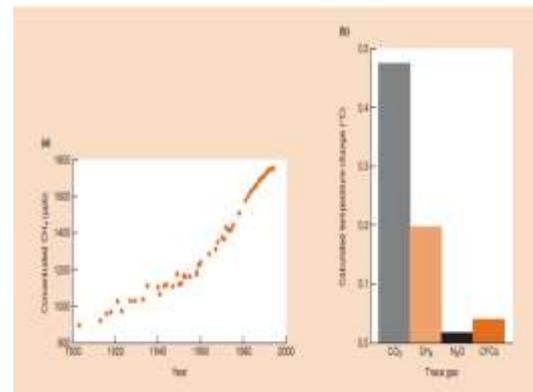


Fig. 2. Aumento e influencia de los distintos gases en el “calentamiento global”

### b. Descripción de captadores térmicos planos

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. Los paneles solares térmicos (Fig. 3) son fáciles de instalar e integrar en una vivienda, aportan un gran ahorro en suministros y emisiones de  $\text{CO}_2$  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.



Fig. 3. Colector solar térmico plano

### III. Modelo matemático

El desarrollo de un modelo matemático requiere analizar la fuente de energía, el mecanismo de transformación y transferencia de energía, las resistencias que se oponen a este proceso, la configuración del colector y el cuerpo absorbente final de la energía transformada. En un colector solar se presentan los tres mecanismos de transferencia de calor: conducción, convección y radiación. La radiación es el transporte de energía calorífica, puede tener lugar tanto en presencia como en ausencia de materia. Este proceso tiene carácter de onda electromagnética térmica que se halla en un determinado rango de frecuencias. La emisión tiene lugar en todas direcciones y un cuerpo puede reflejarla,

absorberla o transmitirla. Se denomina radiación térmica a la que resulta exclusivamente de la temperatura [4]. La radiación solar tanto directa como difusa, es la energía a absorber. Su magnitud es función de las características geográficas (latitud, altura sobre nivel del mar, sombras, cobertura nubosa), climatológicas, ángulo de instalación y época del año del lugar de implementación. 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  $\text{km}^2$ , es de  $16,5 \text{ MJ}/(\text{m}^2.\text{dia})$  equivalente a  $4,6 \text{ kWh}/(\text{m}^2.\text{dia})$  anualmente [5], [6]. El funcionamiento del sistema se basa en las leyes básicas de la radiación, cuando incide en una superficie transparente, parte de ella se absorbe, otra se refleja y la mayor proporción se transmite (Fig. 4).

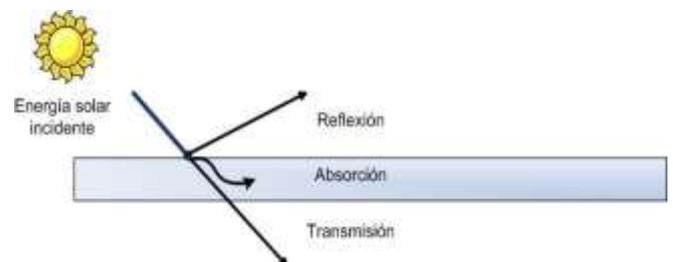


Fig. 4. Radiación incidente sobre una superficie transparente

Los fenómenos descriptos dependerán de las características de los materiales. La absorbancia representa en sí la fracción de radiación incidente que es absorbida. La emisividad es aquella proporción entre la energía radiada y la energía que radiaría un cuerpo negro ideal. En óptica y termodinámica, la reflectividad representa la fracción de la radiación incidente que es reflejada por una superficie. Se considera ésta una propiedad direccional. La transmitancia es un valor que expresa la cantidad de radiación solar que puede atravesar una superficie

transparente, comparada con la radiación solar que incide sobre esta. Una vez que la energía se transmite a través de la cubierta se dirige hacia la placa absorbidora y tubos, quienes absorben una parte y aumentan su temperatura. La porción de energía no absorbida es emitida como radiación térmica en el espectro infrarrojo y luego reflejada hacia la cubierta transparente. Dicha cubierta en estas condiciones de temperatura es opaca a la radiación infrarroja, por lo que es nuevamente reflejada. Este proceso se repite en varias oportunidades y es el denominado “efecto invernadero” dentro del colector (Fig. 5),

fluido caloportador en los tubos [7]. La radiación dentro de colectores ha sido analizada por otros autores que orientaron al cálculo de las necesidades, pérdidas de calor, etc...

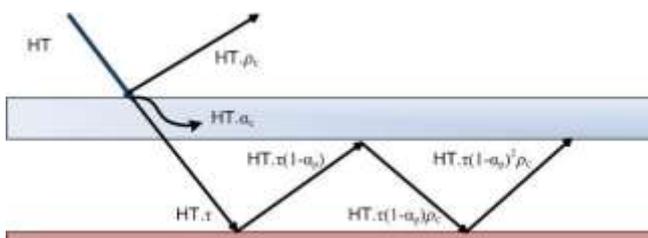


Fig. 5. Efecto invernadero dentro de un colector

donde  $\alpha_p$  es la absorbancia de la placa, de la cubierta transparente  $\alpha_c$ ,  $\tau$  y  $\rho_c$  son respectivamente, la absorbancia, transmitancia y reflectividad difusa. Mientras que  $H_T$  es la energía solar total incidente. Este efecto es acumulativo, pero tiene un límite, que es cuando las pérdidas de calor aumentan hasta que la energía recibida es igual a la desperdiciada. La temperatura máxima alcanzada es conocida como temperatura de estancamiento  $T_{est}$ .

Finalmente el colector tiene una o más cubiertas transparentes, que son la cara expuesta del sistema, y por lo tanto, la más sensible a las variaciones del medio externo. En la Fig. 7 se pueden analizar las resistencias a la transferencia de calor. La energía que atraviesa la cubierta. Se transforma en calor elevando la temperatura de la placa y tubos, y luego transmitida al

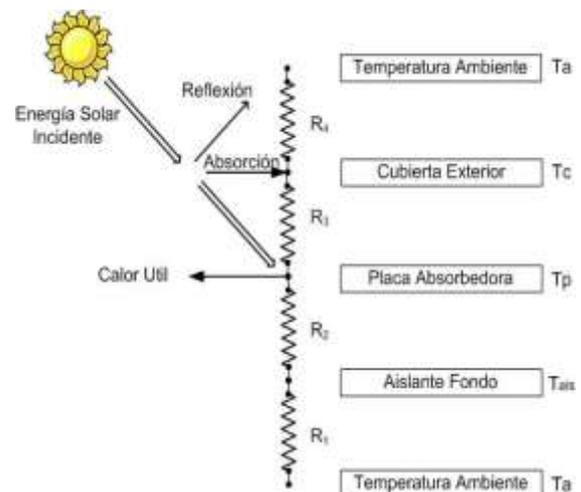


Fig. 6. Balance de Energía en un colector solar

El presente trabajo busca, en cambio, la optimización del diseño. Se requiere, entonces, plantear una función objetivo. Las alternativas son varias: minimizar pérdidas de calor, los costos, etc... En este caso el objetivo es el análisis del rendimiento,

$$\eta = \frac{Q_u}{H_T \cdot A_C} \quad (1)$$

La solución se encuentra dentro de un espacio delimitado por las variables de diseño y por las restricciones a las que el modelo sea sometido. Si se piensa físicamente en un colector, las restricciones se refieren a las temperaturas (del fluido, ambiente, placa y la máxima posible dentro del colector) y en consecuencia el calor útil, absorbido y perdido. A fin de evitar divergencias se limitan las dimensiones del colector, el espesor y diámetro externo de los tubos. Las limitaciones así expresadas permiten acotar entonces el caudal másico a circular por los tubos y el

volumen circulante del fluido en el colector. Definir una ecuación para acotar el número de tubos  $n_t$  no resultó práctico, sin embargo, de no establecer una limitación, la solución tiende a magnitudes poco realistas, por lo que se lo limitó basados en datos bibliográficos [8],[9]. Pueden agregarse otras limitaciones y restricciones, aunque es importante que las mismas sirvan para determinar un mejor espacio para la solución y no tornar el modelo en un sistema irresoluble o rígido.

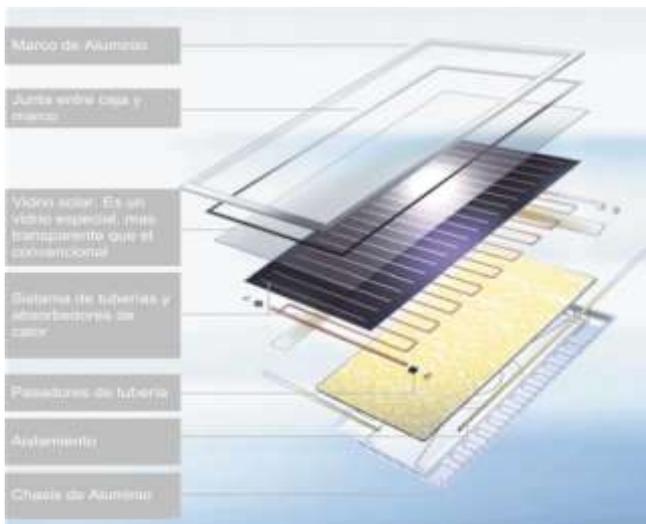


Fig. 7. Esquema de un Colector Solar Plano

Respecto a la elección de los materiales se recurrió a la bibliografía de referencia [10],[11]. Los valores de

aquellos parámetros que debieron ser estimados se extrajeron de tablas teniendo en cuenta las consideraciones pertinentes [12].

#### IV. Validación del modelo matemático desarrollado

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. Así se colocaron dos colectores de igual construcción en paralelo, uno con la cubierta de acrílico y otro con la cubierta de cristal, ambos se montaron sobre la caja de ascensores del comedor universitario de la UNLaM. La cubierta transparente del segundo colector fue reemplazada entonces por cristal selectivo, mientras que se mantuvo la cubierta de acrílico cristal del colector (standard) a optimizar (Tabla 1).

Tabla 1

RESUMEN DE PARÁMETROS Y CARACTERÍSTICAS DE LA INSTALACIÓN.

Fluido refrigerante	Volumen	Densidad	Masa	Calor Específico
Agua / Propilenglicol	684,1 cm <sup>3</sup>	1,046 g/cm <sup>3</sup>	715,57 g	1,26 cal/(g.°C)
Placa Absorvedora	Cobre	Absorvancia	Emisividad	Area efectiva
		0,95	0,05	1,73 m <sup>2</sup>
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	

La Tabla 2 presenta los resultados obtenidos para el rendimiento de ambos colectores

Tabla 2  
RENDIMIENTOS CALCULADOS.

Rendimiento (Standard)	Rendimiento (Optimizado)		
Medido	Medido	Modelado	Diferencia (%)
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%

## V. Evaluación económica de la instalación a baja escala de colectores solares planos

La evaluación económica se realiza a partir del análisis del valor actual neto (VAN), de la tasa interna de retorno (TIR) y del período de retorno de la inversión (PRI). Para poder efectuar el cálculo de estas variables es necesario establecer el escenario del proyecto. El primer paso a seguir la ubicación geográfica en la que se realizará el estudio es la elección del captador solar, y su dimensión. Se seleccionó Buenos Aires (CABA) y el Gran Buenos Aires (GBA) para la evaluación. A partir de la información del Ente Regulador del Gas (ENARGAS), se estableció el consumo de una familia para el abastecimiento de agua caliente sanitaria y con ello la dimensión de la instalación. En vista que una instalación de estas características posee un período de vida útil de 25 años se consideró además un ahorro extra por inflación. Dado que los insumos y otras variables de análisis se cotizan en moneda extranjera, se optó para el análisis el uso del euro. Se eligió esta moneda porque se dispone de bibliografía europea [7],[8],[9] que se ha utilizado para la comparación de

los resultados, además mantiene en el tiempo una relación de cambio estable con respecto a los insumos. Basados en los datos de los proveedores [13] se establecieron los valores de la inversión inicial, costos de instalación y mantenimiento. Las variables de análisis económicas como la conversión a euros de las tarifas, la tasa de interés y la de descuento se obtuvieron del Banco Central de la República Argentina (BCRA). Finalmente se analizaron las propuestas específicas sobre subsidios en el de financiamiento y se elaboró una propuesta que apunta a inducir la inversión y la innovación. Cabe destacar que se puede realizar el mismo análisis, pero en otra zona geográfica. Basta con obtener los datos correspondientes, tarifas, consumo, beneficios y/o facilidades de cada región en particular.

### a. Aspectos relacionados a la instalación y el costo

Las aplicaciones térmicas de la energía solar requieren una inversión inicial más elevada que la de un sistema térmico tradicional. No obstante, una vez que el sistema solar está instalado, los gastos de mantenimiento son mínimos. Estos constan únicamente en los costos de funcionamiento, control del sistema, eventuales reparaciones y manutención periódica. Generalmente la adquisición de los colectores se acompaña con el bastidor correspondiente, el tanque y los accesorios de conexión necesarios. En estas condiciones, las principales consideraciones a tener en cuenta para la instalación son la capacidad estructural del techo y las conexiones a los circuitos de agua. El mercado ofrece colectores solares a un precio que oscila entre u\$s 1200 y U\$s 1400. Sería suficiente uno de estos paneles solares térmicos para calentar el agua de un hogar de cuatro personas (entre 120 y 200 litros de ACS por día). Dado que no se requieren

estrictamente nuevos circuitos de agua, es que el aspecto más sensible y por lo tanto variable de decisión, es la conformación estructural del lugar físico de la colocación del sistema. Un equipo genérico con su tanque de almacenamiento (120 / 200 litros), sumaría en funcionamiento un total de 170 a 250 kg. Las distintas opciones que se brindan para la instalación (separando el tanque, por ejemplo) permiten estimar que por lo general los techos están en condiciones de soportar esta carga y potencialmente evitar la emisión anual de 1,5 t de CO<sub>2</sub> al año [12]. Como contrapartida es necesario considerar el impacto ambiental de los colectores solares térmicos una vez alcanzado su período de vida útil. Los materiales constructivos más adecuados por sus propiedades, capacidad de reciclado y por lo tanto con menor impacto ambiental, son el vidrio, el acero, el aluminio y el cobre.

La energía solar captada en superficies techadas no agrega impacto visual ni acústico, no perjudica ni fauna ni flora, no genera gases de combustión ni agrega calor de combustión. A pesar de ello su beneficio económico es una cuestión de estudio. La instalación de los sistemas colectores requiere una inversión inicial elevada, aunque se estima que los costos bajarán en función del aumento de la producción a causa de la demanda. La toma de conciencia respecto a la importancia de la conservación del medio ambiente y la valorización de los recursos naturales actualmente afectados, son pilares a la hora de balancear los costos de instalación y amortización frente a los beneficios ambientales, este será su costo de oportunidad. Para lograrlo, se ofrecen ayudas económicas, beneficios fiscales y programas de ayuda

a la formación laboral. El uso de la energía solar no se comporta de la misma manera que la utilización de aguas o suelo, su aprovechamiento individual no constituye una externalidad, por no tratarse de un recurso limitado. De esta manera, tomando un período de tiempo dado, la maximización del beneficio estará dada por la producción de energía y el ahorro en las emisiones de dióxido de carbono. En el Protocolo de Kyoto (PK) de la UNFCCC (United Nations Framework Convention on Climate Change) [14], que se adoptó en 1997 y entró en vigor en 2005, se establece y diseña el concepto del mercado del carbono que luego se transformara en ley internacional (2005). Las principales soluciones propuestas a los problemas de las externalidades se basan en la asignación de los derechos de propiedad, los impuestos y subvenciones, la regulación y mecanismos de compensación. En este sentido el PK establece mecanismos de flexibilidad para facilitar el cumplimiento de las metas de reducción de emisiones de los países [3]. El sistema de comercio de permisos de emisión (emissions trading – ET) es el que se encuentra más difundido y explicado en una gran variedad de bibliografía. En forma simplificada, un primer país a quién le convenga superar la cuota asignada, podrá comprarle a un segundo país los permisos que no utilice, ya que a este último le resulta relativamente “barato” llevar a cabo acciones domésticas de mitigación. Estos países emitirán entonces, la cantidad de toneladas de GEI que iguale en valor absoluto, su costo marginal de mitigación al AAU. El precio se fijará en una negociación bilateral, y dependerá, fundamentalmente, del poder de negociación de las partes.

Este puede ser un mecanismo que permita formular una propuesta en pos de incentivar la inversión económica e internalizar los beneficios ambientales al usuario. Es importante destacar que actualmente estos bonos se encuentran depreciados respecto al valor que tuvieran al momento de su implementación, aunque presentan actualmente una tendencia a mantener un valor estable. En consecuencia, no es posible plantear un proyecto basado únicamente en la recuperación de la inversión por medio de estos bonos, sino que es necesario desarrollar y aplicar otras herramientas.

#### **b. Amortización**

Actualmente los costos ambientales no se hallan internalizados en las economías domésticas. Sin embargo la instalación de colectores solares constituirá un valor añadido para la vivienda. Debido a las variaciones en los precios de los combustibles, se debe tener en cuenta que no es sencillo dar valores exactos para la amortización de una instalación. A medida que pasen los años aumentara progresivamente la escasez y especulación sobre los productos derivados del petróleo, por lo que la energía solar tiene grandes expectativas respecto de los beneficios económicos a futuro. La instalación de colectores solares planos térmicos que se realice y la calidad de los materiales, deberán contar con una vida útil de 25 años. La evaluación de la amortización debe tener varios factores en cuenta: la inversión inicial, el mantenimiento, las necesidades de consumo, la temperatura final del agua, la disposición de subvenciones vigentes, financiación, los ahorros por consumo y recategorización de los usuarios.

#### **c. Evaluación económica**

Por los motivos ya expresados se evaluó un proyecto de la instalación con una configuración de colectores solares planos que permita el ahorro de los costos de la producción de agua caliente sanitaria, en el ámbito de la ciudad de Buenos Aires (CABA) y el Gran Buenos Aires (GBA). Se comparó el precio en euros con el trabajo de Sergio Schmidt Pérez [8], situado en un edificio multivivienda de la calle Provenza en la ciudad de Barcelona, con el objeto de verificar que no existan distorsiones de mercado. A fin de evitar errores por la conversión de moneda, se mantuvieron los precios en euros. Los costos de mantenimiento se podrían considerar nulos, por tratarse de un colector en circuito cerrado y de tipo residencial. Sin embargo optaremos por otorgar un costo de 5 euros anuales que pueden destinarse ya sea para un seguro, o bien acumular el monto preventivamente, ya que una instalación de este tipo puede pasar años sin necesitar mantenimiento. Para la evaluación del costo de gas consumido y ahorrado citaremos como fuente de datos a las empresas distribuidoras de gas de las Tablas 3 y 4. Dado que se trata de una evaluación a nivel residencial se tomará como referencia a los clientes con un consumo entre 801 m<sup>3</sup> y 1000 m<sup>3</sup> anuales, clasificados por el ente regulador de la energía (ENRE) como categoría R2 3°. Las tarifas que se consideran son sin ahorro o con una disminución menor al 5% en el consumo respecto al año anterior, ya que no es posible asegurar la permanencia en el tiempo de los beneficios existentes, al día de hoy por ahorro de consumo, para el resto de los usuarios.

Tabla 3

TARIFAS FINALES A USUARIOS RESIDENCIALES R2 3°- SIN IMPUESTOS (AL 01/05/2015)

	Cargo Fijo (\$/factura)	Cargo Variable (\$/m <sup>3</sup> de consumo)	Factura mínima (\$/factura)
Metrogas (CABA)	15,489504	0,669478	27,458666
Metrogas (Buenos Aires)	15,569350	0,681364	27,734897
Gas Natural Fenosa	15,126 713	0,595801	23,571867
Camuzzi (Buenos Aires)	16,043730	0,234979	24,111119

Cabe destacar que a estos importes es necesario agregarles los impuestos correspondientes. A fin de evitar estimaciones incorrectas en el período de vida útil de la instalación, se contemplarán aquellos cargos que permanezcan en el tiempo y no los de aplicación temporaria. La forma en que se aplican los impuestos sobre las facturas no permite establecer una función única. Es por esto que se ha resuelto mantener un escenario un tanto pesimista pero cercano a la realidad. Por este motivo se tomó un promedio de las tarifas y sólo se le aplicó el IVA (21%) y el impuesto provincial (9%), en forma no acumulativa. Es necesario aclarar que ambos impuestos aplican a los inmuebles ubicados tanto en CABA como en GBA. Dicho análisis arroja en promedio de \$0.70903 / m<sup>3</sup> con impuestos. La

estimación de la cantidad ahorrada de gas (en m<sup>3</sup>) se realizó utilizando el criterio de consumo para una familia tipo y el simulador provisto por el Ente Nacional Regulador del Gas (ENARGAS) y la bibliografía existente [15]. A los efectos de evitar un escenario demasiado optimista, es que se asume el uso de calefones sin piloto. Esto significa que una vez implementado el sistema el usuario disminuirá sensiblemente su consumo y podrá ser recategorizado en una escala inferior, vale decir con un consumo de hasta a 800 m<sup>3</sup> anuales (R2 1°). Las tarifas, actuales, en ese caso son las que se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4

TARIFAS FINALES A USUARIOS RESIDENCIALES R2 1°- SIN IMPUESTOS (AL 01/05/2015)

	Cargo Fijo (\$/factura)	Cargo Variable (\$/m <sup>3</sup> de consumo)	Factura mínima (\$/factura)
Metrogas (CABA)	13,553316	0,480236	27,458666
Metrogas (Buenos Aires)	13,623181	0,489090	27,734897
Gas Natural Fenosa	13,10 9 818	0,464098	23,571867
Camuzzi (Buenos Aires)	14,038264	0,192452	24,111119

Del mismo modo en que se obtuvo la tarifa promedio de un usuario categorizado como R2 3°, se recalculó para el mismo usuario clasificado como R2 1°. Para completar el escenario es necesario contar con la cotización del euro, las tasas de interés y de descuento

en moneda extranjera respecto del euro, todos datos provistos por el Banco Central de la República Argentina (BCRA). A este respecto cabe resaltar que se consideraron los valores históricos de los últimos 4 años. Para la aplicación de subsidios tendremos en

cuenta como supuesto, la aprobación del proyecto de ley propuesto por Ibarra, Eduardo Marcelo, bajo N° de Expediente 2900-D-2011, y con trámite parlamentario 060 (01/06/2011). En dicho proyecto se proponen subsidios de hasta el 50% del costo de la instalación, valores que también serán convertidos a euros y que serán devengados en el transcurso de cuatro años.

Finalmente se valoró una propuesta alternativa, la obtención de un retorno de la inversión mediante la venta indirecta de bonos de carbono. El beneficio estará ligado a la cantidad de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) no emitido (equivalente a 1,4 / 1,5 toneladas anuales de CO<sub>2</sub>). Así, teniendo en cuenta que al usuario se le retorne sólo el equivalente a una tonelada (66,6%) del total estimado de ahorro y que la cotización de los bonos de carbono es de € 6.07 (29/01/2015), quedan resumidas las variables consideradas en la Tabla 5.

Tabla 5  
RESUMEN DE LOS DATOS UTILIZADOS

Inversión Inicial (un colector solar plano térmico de 2m <sup>2</sup> ) con instalación.	1200 €
Costos de mantenimiento (anual)	5 €
Subsidios Expediente 2900-D-2011 trámite parlamentario 060 - 01/06/2011)	50%
Tasa de descuento (anual)	1,00%
Tasa de Inflación (anual)	5,00%
Ahorro Anual (720 m <sup>3</sup> )	35,00 €
Ahorro Anual por recategorización (R2 3° a R2 1°)	3,50 €
Toneladas de CO <sub>2</sub> ahorradas (anual)	1 tn
Cotización Bono CO <sub>2</sub> (por tn)(29/01/2016)	6,07 €

A partir de los datos expuestos en la Tabla 5, se realizó el análisis de los escenarios adicionando progresivamente los ahorros que beneficiarán a los usuarios en forma incremental. Los resultados obtenidos son resumidos en la Tabla 6.

Tabla 6  
VALORES DE VAN, TIR Y PERÍODO DE RECUPERO

	Sólo con ahorro por inflación (1)	(1) + Ahorro por recategorización (2)	(2) + Ahorro por Bonos de CO <sub>2</sub>
VAN	€ 29,03	€ 228,35	€ 355,68
TIR	1%	3%	4,01%
PRI	21 años	17 años	15 años

Si bien, dada la diferencia de escala, no es posible hacer una comparación lineal con la bibliografía de referencia [8] respecto del valor actual neto, los resultados indican que tanto la tasa de retorno de la inversión (TIR) como el período de retorno de la inversión (PRI) son de orden similar (Tabla 7).

Tabla -7  
COMPARACIÓN DE VALORES DE TIR Y PRI

	Fuente de referencia [8]	Resultados obtenidos
TIR	6,9%	4,01%
PRI	16 años	15 años

La diferencia con los datos citados en la fuente radican en la escala (nueve veces mayor) y los beneficios y promociones de los que se disponen en España. En este sentido, la propuesta de la venta indirecta de bonos consiste en proponer a las comunas que se sumen al mercado de bonos de emisión. Lo municipios cuentan

con las herramientas tecnológicas y la información suficiente para establecer la superficie de colectores solares instalada y el ahorro de cada usuario en sus tarifas de consumo. Estos datos brindan la posibilidad de calcular la cantidad de la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> y por lo tanto su equivalente en dinero. Se propuso que dos terceras partes de este importe pueda entonces regresar al usuario como crédito en sus impuestos, para que la tercera parte restante se aplique a los gastos generados por la gestión y algún margen que podría quedar como beneficio para cada municipio. Esto implica que previamente cada comuna realice a su vez una evaluación de su propio proyecto, lo que significa un análisis similar al del presente trabajo pero a mayor escala.

## VI. Conclusiones

La diferencia de rendimiento obtenida entre el modelado y el empírico, 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. Considerando las posibilidades mencionadas en este estudio, los valores de las variables de decisión están en consonancia con aquellos que se manifiestan en la bibliografía de referencia. La diferencia entre los mismos está dada en que la instalación citada es nueve veces mayor que la propuesta. Asimismo, es necesario destacar que luego de haber analizado los métodos existentes y los costos, la implementación de colectores solares planos a baja escala, 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. En relación a la implementación en MiPyMEs, la aplicación es menos compleja, debido a que existe legislación, subsidios, compromiso político y social. A este respecto a nivel nacional, ya hay provincias que se están interiorizando en el tema. Sin embargo, de aprobarse el proyecto de ley mencionado en este trabajo, los resultados obtenidos por el análisis aplicado sobre la problemática planteada arroja valores que resultan en primera instancia viables. 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. El costo de la misma se acrecienta hacia el sur de la República Argentina. La ecuación económica mejora con las nuevas tecnologías y las mejoras en el rendimiento de los captadores, y sería mejor aún si se establecieran normas, que son de incumbencia local,

que por ejemplo deduzcan impuestos a aquellos titulares que ofrezcan viviendas en alquiler basadas en energías no contaminantes. La propuesta en este sentido consiste en aprovechar la capacidad que tienen las comunas para comercializar bonos de carbono. Relacionando estos datos con los del consumo de cada usuario, es posible conocer la cantidad de CO<sub>2</sub> evitada, y en consecuencia reembolsar al contribuyente una parte de los bonos comercializados a través de sus impuestos.

Al mismo tiempo se concluye que, con un período de recuperación de la inversión a un costo de instalación

acorde a las necesidades de los pequeños usuarios, el sólo uso de colectores solares no alcanza para el total autoabastecimiento energético. 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. 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, como barrios, lo que permitiría una menor inversión inicial por la compra de colectores en cantidad.

## VII. Referencias

- [1] M. Begon. "Ecology From Individuals to Ecosystems". Blackwell Publishing. Fourth Edition. 2006
- [2] A. García. "Consumo responsable y cambio climático". Gobierno de Aragón, Departamento de Salud y Consumo, Dirección General de Consumo. Junio 2010.
- [3] D. Álvarez et al. "Una externalidad relevante: el calentamiento global inducido por la actividad humana". XLIII Reunión Anual de la Asociación Argentina de Economía Política. Córdoba. Noviembre 2008.
- [4] M. González Redondo. "Radiación térmica". Universidad Politécnica de Madrid ~ Departamento de Física, María. E.T.S. de Arquitectura (Física e Instalaciones Aplicadas a la Edificación, al Medio Ambiente y al Urbanismo).
- [5] R. Righini, H. Grossi Gallegos. "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
- [6] C. Raichijk. "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, N° 11, 47-53. 2013.
- [7] S. Guevara Vásquez. "Teoría para el diseño de calentadores solares de agua", UNATSABAR – OPS/CEPIS. 2003.
- [8] S. Schmidt Pérez. "Diseño de una instalación solar térmica para la producción de ACS en un edificio multivivienda". Master thesis (pre-Bologna period). 2010.
- [9] T. Alcón Morlas. "Pasteurización de leche con energías renovables en una comunidad rural de Cusco (Perú)". Master thesis (pre-Bologna period). 2007.
- [10] J. J. Hermosillo Villalobos. "Notas sobre el Curso de Energía Solar". Instituto Tecnológico y de Estudios. 1995.

- [11] S. Guevara Vásquez. “Teoría para el diseño de calentadores solares de agua”, UNATSABAR – OPS/CEPIS. 2003.
- [12] Perry. “Manual del Ingeniero Químico”. Sexta edición. 1990.
- [13] CHROMAGEN ~ Solar Water Solutions. Sha'ar Ha'amakim 36588, Israel. Distribuidor en Argentina: SAPOLIN S.A. Angel Gallardo 174 Piso 5, C.P. 1405, Ciudad Autónoma Buenos Aires. 2014.
- [14] Kyoto Protocol Reference Manual. “On accounting of emissions and assigned amount”. UNFCCC (United Nations Framework Convention on Climate Change). 2008.
- [15] S. Gil. “Desafío energético del siglo XXI. Eficiencia energética en Argentina: ¿un nuevo paradigma?”. TANDAR – CNEA. San Martín, (Bs. As., Argentina). 2009.

**Recibido:** 2016-02-24

**Aprobado:** 2016-03-08

**Datos de edición:** Vol. 1-Nro. 1-Art. 5

**Fecha de edición:** 2016-05-15

**URL:** <http://www.reddi.unlam.edu.ar>