

## **ENSAYO TÉRMICO NORMALIZADO DE UN COLECTOR SOLAR CON ACUMULACIÓN INTEGRADA PARCIALMENTE AISLADO, HECHO CON MATERIALES ACCESIBLES Y DE FABRICACIÓN SIMPLE**

**Javier H. Garnica, Juan M. Lucchini, Jorge R. Barral, Matías E. Buosi, Pablo D. Galimberti**

Grupo de Energía Solar – Facultad de Ingeniería – Universidad Nacional de Río Cuarto

Ruta Nac. 36 Km. 601, 5800 Río Cuarto

Tel./Fax: (0358) 4676246 - e-mail: [jhgarnica@yahoo.com](mailto:jhgarnica@yahoo.com)

*Recibido 12/08/19, aceptado 17/10/19*

**RESUMEN:** Este trabajo muestra el desarrollo de un colector con acumulación integrada con un particular diseño para prevenir enfriamiento nocturno, el cual fue evaluado térmicamente mediante la Norma IRAM 210004. El objetivo central fue obtener un equipo de bajo costo que ofreciera mejores prestaciones que otros modelos pensando en una aplicación domiciliaria unifamiliar. Se detallan las características esenciales de un primer prototipo explicándose las razones que justifican la disposición geométrica de las partes componentes y su correlación con los materiales utilizados. Para la evaluación térmica se utiliza una máquina también diseñada y construida por el equipo de investigación, y se recurre a la aplicación rigurosa de la norma mencionada anteriormente. Los resultados obtenidos se muestran mediante gráficos y tablas, determinándose los coeficientes de la ecuación fundamental que da cuenta de la energía que puede proveer el equipo. Al informe convencional de la norma se adiciona un cálculo mensual para ver claramente la evolución de la Fracción Solar, y se provee una información gráfica que muestra la cobertura solar total o parcial de la demanda diaria mediante energía solar. Se compara este equipo con modelos previos ensayados con una norma equivalente, pudiéndose constatar una mejora en el comportamiento térmico del nuevo prototipo.

**Palabras clave:** colector acumulador, aislación parcial, norma, ensayo térmico.

### **INTRODUCCIÓN**

Los colectores solares con acumulación integrada (CAI) para calentamiento de agua residencial presentan las ventajas de que no necesitan elementos adicionales para su funcionamiento (como bombas o controladores), ni tanque de almacenamiento por separado, siendo a la vez resistentes al congelamiento en la época invernal. Existen muchas variantes de este tipo de colectores-acumuladores (Singh et al., 2016), como también se han usado distintos materiales para la superficie absorbadora-almacenadora, cubierta transparente, carcasa y accesorios (Alghoul et al., 2005) (Zauner et al., 2011). Así, su disposición física compacta y posibilidad uso de materiales de bajo costo, hacen factible su uso en regiones de buena radiación solar y para familias de bajos recursos. Asimismo, al igual que otros sistemas de calentamiento de agua solar de baja temperatura, el análisis de ciclo de vida da cuenta de la amortización, sustentabilidad, y bajísimo impacto ambiental de estos equipos (Koroneos y Nanaki, 2012).

A pesar de todas estas ventajas, este tipo de equipos no se dispone en el mercado de la República Argentina, mientras que en otros países, incluso aquellos de sociedades con alto poder adquisitivo, estos equipos ya se comercializan (SRCC, 2019). Los relevamientos realizados en los últimos años en nuestro país dan cuenta de la fabricación de equipos basados en la tecnología tradicional de placa plana y una penetración importante en el mercado de equipos importados muy baratos de tubos evacuados (Nienborg, 2010) (Cordi et al., 2016). Surge así, como una necesidad imperante, el desarrollo de equipos que sean competitivos frente a las otras tecnologías, para lo cual sería importante poder ampliar el rango climático de aplicación de los CAI, como así también apuntar a equipos no sólo de bajo costo de materia prima, sino también que impliquen eficientes procesos de fabricación y facilidad de instalación.

El Grupo de Energía Solar de la UNRC (GES) ha trabajado experimentalmente y analíticamente con distintos modelos de CAIs: tubulares (Barral et al., 2002), monotanques con varias cubiertas de policarbonato (Fasulo et al., 2001), bitanques con superficies reflectantes (Stoll et al., 2007), de sección oval (Garnica et al., 2017). Si bien estos dispositivos han demostrado ser eficientes energéticamente y con una recuperación de inversión razonable en el mediano plazo, requieren de un manejo algo complejo de tecnología y persiste en ellos el problema típico de estos equipos, que son las altas pérdidas nocturnas ocasionadas por la exposición del absorbedor-almacenador a la baja temperatura de cielo.

Para minimizar las altas pérdidas nocturnas mencionadas en el párrafo anterior, siguiendo una idea propuesta por Kumar y Rosen (2011), se ha decidido diseñar un nuevo tipo de CAI que prevé que parte de su almacenamiento esté aislado. Adicionalmente, pensando en hacer un equipo competitivo comercialmente, se propone para la construcción del mismo el uso de materiales de bajo costo y fácil obtención en el mercado local, con un proceso de fabricación que minimice la mano de obra. Bajo estos lineamientos, se ha construido un primer prototipo experimental que se describe en este artículo.

Existen norma a nivel internacional para garantizar la calidad de los equipos, confiabilidad y condiciones de seguridad de mantenimiento. Normas para analizar el comportamiento térmico de equipos compactos, entre los cuales se encuentran los termosifónicos y también los de acumulación integrada (ISO, 1995) han sido adaptadas para crear normas nacionales (IRAM, 2016). Como el equipo que se estudiará en este trabajo podría tener eventualmente un desarrollo comercial, más allá de todos los aspectos de un minucioso estudio de investigación, se deben cumplir con las normas y reglamentos que se establezcan para su uso en nuestro país (Barral, 2018), lo cual le permitiría en un futuro calificar mejor para un posicionamiento en el mercado y su comercialización (Timilsina et al., 2012).

Los equipos se pueden someter a varios ensayos, algunos de ellos determinantes (presión interna, choque térmico, materiales defectuosos, daño por granizo, etc.), pero los ensayos de comportamiento térmico son los que primero se ven como necesarios, ante la duda central que asalta tanto a un fabricante, a un vendedor, a un instalador y a un potencial usuario: ¿cuán bien calienta el agua este equipo? Por esta razón, uno de los objetivos principales de este trabajo ha sido la realización del ensayo previsto en la norma IRAM 210004 (IRAM, 2016), que permite obtener una ecuación para caracterizar la ganancia de energía diaria de los equipos y propone un método de simulación con balances energéticos para predecir el comportamiento anual de los mismos, y así determinar qué porcentaje de la energía demandada por el usuario puede ser provista por el CAI. Es de esperar que la IRAM 210004 sea de plena aplicación en poco tiempo. La Resolución 520/18 (Ministerio de Producción, 2018) la ha postergado para instancias futuras, realizándose hoy ensayos a equipamientos solares térmicos en cuestiones secundarias frente a la importancia de saber si los equipos cumplen con su función principal que es calentar agua.

Este trabajo describe los pasos seguidos para diseñar y construir el prototipo, se explica el procedimiento de ensayo seguido, con la correspondiente instrumentación y mediciones realizadas. Se presentan luego los resultados en forma de ecuaciones y gráficos de acuerdo a lo previsto en la norma, y se analizan dichos resultados en vistas a proponer mejoras al prototipo inicial.

## **DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO**

Se muestra en la Fig. 1 un esquema de la parte interna del CAI construido, de la superficie absorbidora y la porción de almacenamiento superior. El diseño se inició con un estudio analítico aproximado de las posibilidades de obtención de energía solar de una superficie plana en la ciudad de Río Cuarto para una familia tipo. Así, siguiendo la regla para mejor aprovechamiento invernal de una inclinación respecto a la horizontal de la latitud del lugar más aproximadamente 10 grados (se adoptó  $\beta = 45^\circ$ ), mirando hacia el Norte, se estudió la radiación que podía absorberse en un año. Para ello se estimaron ganancias y pérdidas, considerándose también que parte de la energía absorbida podía almacenarse con menores pérdidas que las experimentadas en un CAI convencional, donde toda la superficie absorbidora está expuesta a la atmósfera. Pensando en una familia de cuatro integrantes, con un consumo promedio de 50 litros por persona por día, se propuso un diseño original de 180 litros,

considerando que las superficies planas de los paralelepípedos que forman el conjunto, deformarían, aumentando la capacidad (Lucchini et al., 2015). La superficie absorbidora es de aproximadamente 2 m<sup>2</sup>.

Todo lo que se muestra en la Fig. 1 está realizado con una estructura de caño cuadrado de 30x30 mm, con espesor de pared de 1,6 mm, sobre la cual se soldó chapa negra calibre 18 (1,25 mm), quedando así una superficie para absorber radiación solar (sector rosa en la figura) que asemeja a un colector de placa plana, pero que en realidad funciona como una caja muy chata, que en diseño original (sin dilatación) tiene una capacidad de 63 litros. Este sector absorbidor está en comunicación directa por la parte superior con el sector que va a ser completamente aislado. Se esquematizan allí los movimientos de agua caliente hacia arriba y agua fría hacia abajo que se dan por convección natural (Fan y Furbo, 2012). Este movimiento se corta a la noche cuando se enfría la sección absorbidora. Del sector superior que trabaja puramente como almacenador, se extrae por la parte de arriba agua caliente para los usuarios.

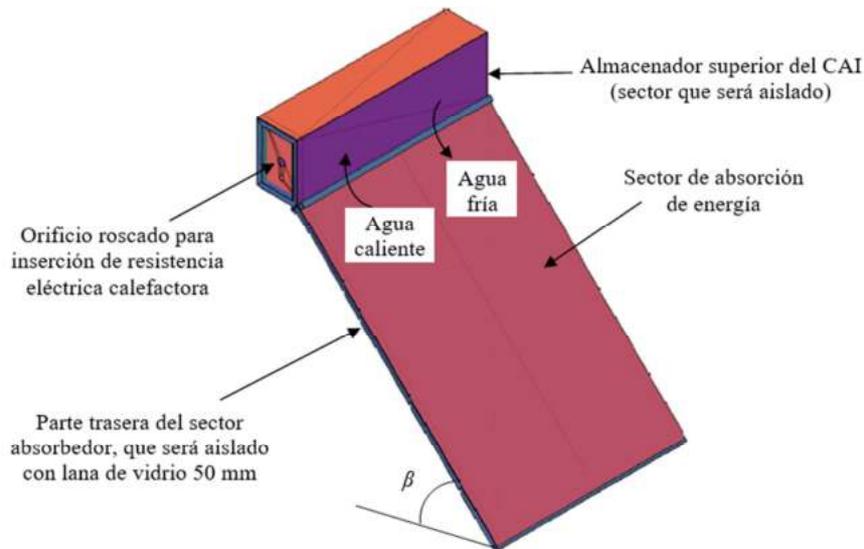


Figura 1: Esquema de conjunto absorbedor-almacenador del CAI.

En la Fig. 2 se muestra el sistema de la Fig. 1 abierto. Se ve allí la concepción simplificada del armado del absorbedor-almacenador, que consta de dos chapas en su medida original de fábrica (1,22 m por 2,44 m), que no son cortadas en absoluto y solo demandan 2 plegados cada una. La soldadura de las mismas se cierra sobre los caños cuadrados. Se ve allí, en la Fig. 2 (a) como la entrada de agua al equipo es dirigida a la parte inferior de la superficie absorbidora (caño verde más largo), para favorecer de entrada la estratificación del agua en forma mecánica. La salida del agua hacia el usuario se da mediante un caño pescador ubicado en la parte superior del equipo (caño verde más corto). En la Fig. 2 (b) se ven ambos caños ingresando al equipo por la parte posterior.

El conjunto mostrado en la Fig. 1 fue pintado por fuera y por dentro con pintura antióxido al agua, para evitar efectos de contaminación, y luego todo con pintura negro mate para favorecer la absorción de la radiación solar. Se le colocaron dos ánodos de magnesio de 50 cm cada uno para evitar la corrosión galvánica. Previendo un futuro uso tipo domiciliario, para garantizar la energía los días nublados, se previeron en el equipo dos agujeros roscados en los laterales para la eventual colocación de resistencias calefactoras. Todo fue luego aislado con lana de vidrio de 50 mm y encapsulado en una carcasa de chapa galvanizada, mientras que la parte que enfrenta al sol para captar la energía fue cubierta con un policarbonato alveolar de 6 mm.

En la Fig. 3 (a) se ve una foto de la parte frontal del prototipo ya montado sobre la plataforma de medición. El sistema cuenta con un venteo en la parte superior, que asegura el funcionamiento de la parte interior a una presión algunos centímetros de agua por encima de la atmosférica; se supone un montaje en la cercanía del tanque de almacenamiento de agua de la casa, que alimentaría al CAI. Se observan allí también una de las dos patas posteriores que dan sustento a gran parte del peso del equipo sobre la superficie horizontal. El empotramiento a la plataforma se completa con dos grampas

en forma de “L” en la parte delantera del equipo (una a cada lado). El tapón roscado inferior a la derecha solo cumple la función de drenaje del equipo.

En la Fig. 3 (b) se muestra la parte posterior externa del equipo, donde se pueden observar la entrada de agua fría por la parte baja del tanque almacenador y la salida de agua caliente por la parte superior. En esta instancia de ensayo se encuentra aislada la entrada de agua fría, ya que por requisitos de la norma de ensayo se debe garantizar una cierta temperatura constante de entrada al equipo ( $t_{main}$ ), la cual proviene de una fuente de agua a temperatura regulada. Arriba a la izquierda se observa la salida para el venteo, en esta ocasión se encuentra tapado, regulándose la presión mediante la máquina de ensayo que se describirá a posteriori. También se ve el termómetro de dos entradas que se utiliza para medir mediante termocuplas tipo K la entrada y la salida del equipo.

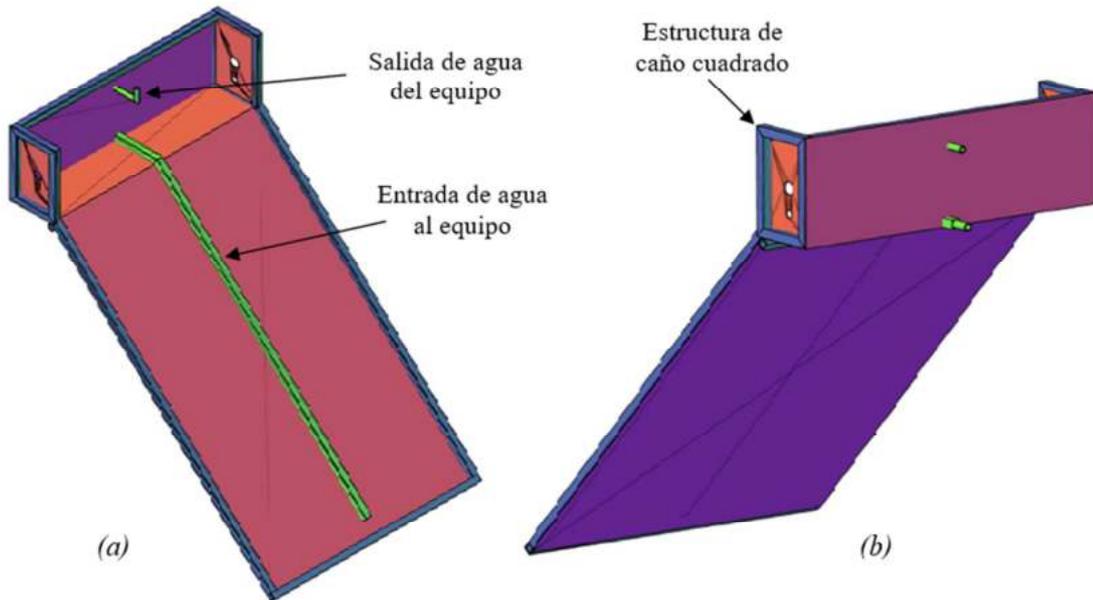


Figura 2: (a) Parte posterior del absorbedor-accumulador sin la chapa superior, vista de frente, incluyendo caños de entrada y salida; (b) parte posterior del absorbedor-accumulador sin la chapa superior vista de atrás.



(a)



(b)

Figura 3: (a) CAI montado sobre la plataforma de medición, vista frontal; (b) CAI montado sobre la plataforma de medición, vista posterior.

## EVALUACIÓN TÉRMICA DEL PROTOTIPO MEDIANTE IRAM LA NORMA IRAM 210004

Dado que no se puede analizar térmicamente este tipo de equipos solares mediante un ensayo de corto tiempo, se debe recurrir a una metodología particular. No es posible dividir los componentes (tanque y colector) y analizarlos por separado, porque no funcionan estacionariamente y su caudal va variando durante el día dependiendo mucho de la radiación solar que reciba el sistema y en menor medida de otros parámetros. Sumado a esto, por la gran masa que estos tienen (inercia térmica), funcionan permanentemente en estado transitorio, incluso con influencia de lo sucedido en días anteriores. Luego de años de estudio, la ISO ha desarrollado un método, cristalizado en su Standard ISO 9459-2, que ha sido recientemente adaptado por IRAM. Para llevar adelante el ensayo es necesario realizar una serie de mediciones durante varios días y con distintas condiciones de radiación para obtener ecuaciones que representen el funcionamiento del sistema para cualquier tipo de clima y nivel de demanda.

Para determinar las ecuaciones, que tengan validez general, se necesitan al menos 6 series de mediciones (1 por día). Para cada medición diaria, 6 horas antes del mediodía solar, se pone el equipo a una temperatura uniforme igual a la temperatura de entrada, y se deja calentar y enfriar libremente el sistema hasta 6 horas después del mediodía solar. Durante ese período se mide toda la energía de radiación por metro cuadrado sobre la superficie del absorbedor,  $H$ , y la temperatura ambiente. Después de 6 horas del mediodía solar se realiza una descarga de al menos 3 volúmenes de la capacidad del tanque, con un caudal fijo, y a una temperatura de entrada igual a la inicial, mientras se mide la temperatura de salida. De esta manera, el almacenador queda casi a la temperatura de entrada y con un cálculo calorimétrico integrado durante la descarga, se evalúa toda la energía que absorbió el equipo durante esas 12 horas.

Se establecen para los días a utilizar, distintos niveles de radiación y de temperatura de entrada a fin de que la nube de puntos obtenida tenga validez estadística. Luego, vinculando a todas las mediciones con regresiones lineales es posible representar la posibilidad de provisión de energía calórica útil del sistema mediante una única ecuación (ecuación 1), y también mediante una única ecuación el incremento de temperatura que puede experimentar el agua almacenada (ecuación 2).  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$ ,  $b_1$ ,  $b_2$ , y  $b_3$  son los coeficientes obtenidos por las regresiones lineales.

$$Q = a_1 H + a_2 (t_{a(day)} - t_{main}) + a_3 \quad (1)$$

$$t_{d(max)} - t_{main} = b_1 H + b_2 (t_{a(day)} - t_{main}) + b_3 \quad (2)$$

Donde:

$Q$ = Calor útil diario provisto por el colector [MJ]

$H$  = irradiación media diaria por metro cuadrado [MJ/m<sup>2</sup>]

$t_{main}$ = temperatura entrada de agua fría [°C] (debe ser la misma en la carga y en la descarga)

$t_{a(day)}$ = temperatura promedio durante el proceso de 12 horas de calentamiento [°C]

$t_{d(max)}$ = temperatura de extracción de agua del equipo [°C]

A estas mediciones de calentamiento, se le deben agregar dos grupos de mediciones más, denominadas “mixing” (mezclado) y pérdidas nocturnas, para determinar un coeficiente de pérdida de calor del tanque de almacenamiento,  $U_s$ . Esto último es necesario para predecir el comportamiento del sistema a largo plazo (un año). La medición del mezclado verifica cuán bien se mantiene la estratificación en el tanque de almacenamiento cuando se le extrae agua y el ensayo de pérdidas nocturnas da una idea de cuán aislado se encuentra el dispositivo que realiza el almacenamiento de energía. Con estos resultados disponibles, más los datos típicos meteorológicos horarios del lugar de emplazamiento del CAI y un perfil de demanda dado, debe programarse un algoritmo de balances energéticos diarios, para poder predecir la entrega de calor útil del equipo. La secuencia de balances para el algoritmo está descrita en el texto de la norma. La energía anual será entonces la suma de los valores de energía diarios.

Debe remarcarse, además, que estos ensayos no dan como resultado un “rendimiento térmico”, expresión muy utilizada en distintos ámbitos de la tecnología. Para un colector plano solo, que se puede hacer funcionar en estado estacionario, es posible obtener una curva de rendimiento instantáneo que relaciona el calor útil con la radiación solar incidente sobre la superficie absorbente del colector. Pero, para equipos integrados, como el presentado en este trabajo, donde la influencia de los transitorios puede prolongarse hasta por varios días, se debe utilizar el concepto de “Fracción Solar” para su evaluación. La Fracción Solar es el porcentaje de energía provista mediante la energía del sol respecto a la demanda total de agua caliente de la casa. Dicha fracción solar tiene sentido en un análisis mensual o mejor aún, anual. En todo caso, si se quisiera encontrar un rendimiento promedio, debería integrarse todo el calor dado por la ecuación (3) para cada día durante todo un mes o un año, y dividirse por la energía radiante que llegó al plano de la superficie absorbente del equipo durante el mismo período de tiempo.

Para efectuar los ensayos se utilizó una máquina móvil de ensayos múltiples desarrollada y construida en el Laboratorio de Energía Solar de la UNRC, la que cuenta con 3 tanques de 100 litros, dos bombas de circulación, 6 resistencias calefactoras de 1500 W cada una, dos caudalímetros de distinto rango de medición y una serie entradas y salidas, válvulas y conexiones. Esta máquina permite realizar tanto ensayos de colectores solares para calentamiento de agua mediante Standard ISO 9806-1 y equivalentes como ensayos de sistemas completos mediante Standard ISO 9459-2 y equivalentes. En la Fig. 4 se muestra el panel frontal dicha máquina (panel de maniobras), donde se visualizan parte de los componentes mencionados. Las entradas y salidas se ubican en la parte posterior en dirección a los colectores y sistemas a ensayar.



*Figura 4: Máquina móvil para ensayos múltiples de colectores solares y sistemas compactos para calentamiento de agua.*

## **RESULTADOS**

Tal lo previsto en el llenado del equipo con agua para las pruebas iniciales, si bien dicho llenado se realizó a una presión moderada, cercana a la atmosférica, el incremento de volumen por deformación de los paralelepípedos fue superior a lo estimado, lo cual ocasionó que la relación volumen/área de captación fuera relativamente elevada. Dicho incremento debido a la elasticidad del material es beneficioso desde el punto de vista de resistir el congelamiento, pero es perjudicial en cuanto a los valores finales de temperatura a obtener. Si bien el equipo continuará funcionando como un buen elemento para ahorrar energía, no siempre podrá proveer el nivel de temperatura demandada por usuario. El equipo fue diseñado con un volumen original de 180 litros sin agua; luego, midiéndose la cantidad de agua que entró en el primer llenado, arrojó un volumen neto contenido de agua de 276 litros.

Se muestran a continuación, Tabla 1, los días en que se realizaron mediciones, que cumplen con los requerimientos de la norma en lo que respecta a nivel de radiación y valores de diferencia de temperaturas media del día y de entrada. Las mediciones realizadas en dichos días se utilizaron para la realización de las regresiones lineales para obtener los coeficientes de las ecuaciones (1) y (2).

Día	$T_{day}$ [°C]	$T_{main}$ [°C]	$T_{day}-T_{main}$ [°C]	Radiación [MJ]
27 de Junio	11,60	15,00	-3,40	22,67
10 de Julio	15,00	17,00	-2,00	21,30
15 de Julio	12,20	17,00	-4,80	22,90
16 de Julio	14,30	17,10	-2,80	22,10
17 de Julio	15,80	17,00	-1,20	15,50
20 de Julio	14,70	17,00	-2,30	11,20
5 de Agosto	17,12	7,30	9,82	24,97
12 de Agosto	12,35	7,00	5,35	23,64

Tabla 1: Resumen de los días en que se realizaron los ensayos y los datos climáticos y de temperatura de entrada que se registraron.

Se observa en la tabla que hay varios días en que  $T_{main}$  es del orden de 17 °C. Esto es así, porque se usó agua de una perforación a 35 m de profundidad, que mantiene constante la temperatura del agua durante todo el año y facilita la obtención de dicha  $T_{main}$  constante. Por otro lado, como la norma requiere que se cumpla con diferencias de  $T_{day}-T_{main}$  alejados en un cierto valor, fue necesario generar días de trabajo en los cuales la temperatura  $T_{main}$  fuera de un valor muy bajo (5 y 12 de agosto). Dada la baja temperatura media de los días, no era posible lograr dicho corrimiento con calentamiento, por lo cual fue necesario mezclar agua con mezclar agua y hielo para bajar la temperatura (entre 5 y 6 °C) en un tanque auxiliar de gran volumen, e ir regulando la temperatura de entrada mediante la apertura de parcial de válvulas conectadas a los tanques de la máquina de ensayo, a fin de lograr la constancia de  $T_{main}$  en el orden de los 7 °C. En la Fig. 5 (a) se muestra el caudalímetro de la máquina de ensayo mantenido en 10 litros por minuto mediante el ajuste de la canilla de bronce en la parte superior y en la Fig. 5 (b) se muestra el termómetro con sensores de termocupla tomando los datos a la entrada y la salida el CAI.



(a)



(b)

Figura 5:(a) Caudalímetro de la máquina de ensayo; regulación: 10 l/min; (b) Termómetro digital; lectura de temperatura de agua de entrada y salida del CAI.

En esta ocasión, el termómetro está midiendo la aproximación de la temperatura de salida (8,3 °C) a la temperatura de entrada ( $T_{main}= 7,0$  °C) que ocurre cuando ya se le han hecho pasar más de dos volúmenes al CAI y es como si no quedara en él casi nada de energía remanente. La “cola” de la curva de descarga que se muestra en la Fig. 6 (b).

En la Fig. 6 se muestran dos de las curvas de descarga del CAI realizadas con distinta temperatura de entrada. Se esquematiza sombreada en la Fig. 6 (a) el remanente de energía absorbida que no es extraída cuando se saca un volumen entero del equipo. Eso indica que para un consumo normal previsto para esa casa, esa energía no sería utilizada, pero para el cálculo de la energía total provista en el mes o año, esa energía no se pierde. Luego de computadas las pérdidas nocturnas y considerando un proceso de mezclado de fluido frío y caliente, lo que aún haya quedado de energía por sobre  $T_{main}$ , contribuye a que en el día siguiente el sistema inicie su calentamiento a una temperatura superior.

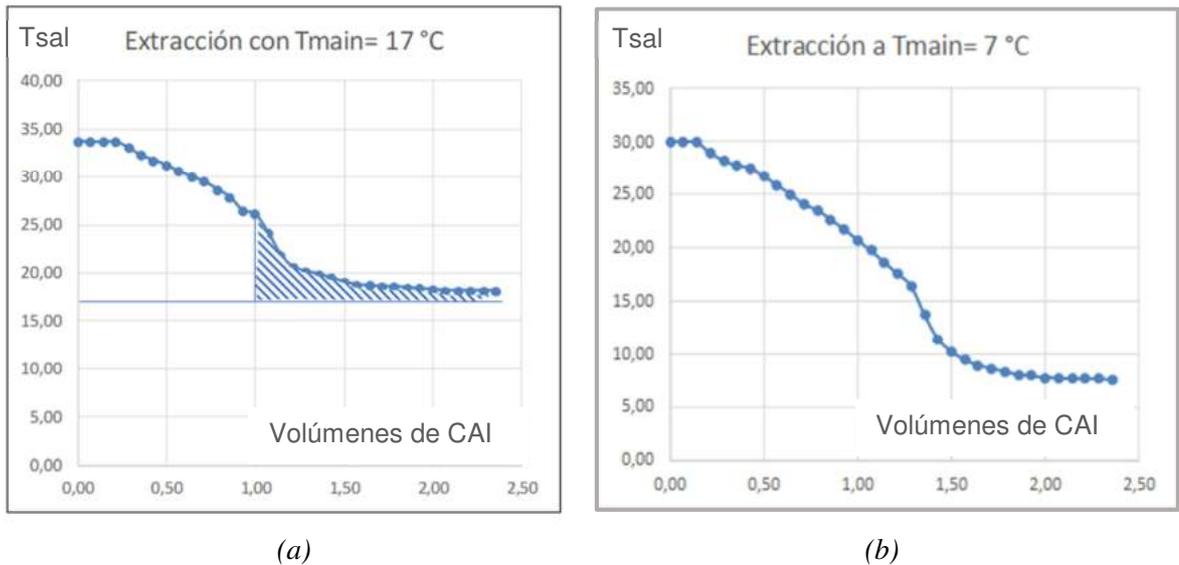


Figura 6. (a) Curva de descarga a  $T_{main}= 17$  °C, indicación de energía remanente en el CAI; (b) Curva de descarga a  $T_{main}= 7$  °C.

Con estas curvas de descarga se ha realizado la determinación de los coeficientes de la ecuación (1) mediante el método de los cuadrados mínimos, resultando los siguientes valores.

$$a_1 = 0,6169 \text{ m}^2 \quad ; \quad a_2 = 0,36885 \text{ MJ/}^\circ\text{C} \quad ; \quad a_3 = 10,54 \text{ MJ}$$

El coeficiente de pérdidas térmicas del CAI se calcula de acuerdo a la siguiente ecuación prevista en la IRAM 210004

$$U_s = \frac{\rho_w c_f V_s}{\Delta t} \ln \left[ \frac{t_i - t_{as(av)}}{t_f - t_{as(av)}} \right] \quad (3)$$

Donde:

$U_s$ = Coeficiente global de pérdidas térmicas del CAI [w/K]

$\rho_w$  = Densidad del agua [kg/m<sup>3</sup>]

$c_f$ = Calor específico del fluido caloportador [J/K.kg]

$V_s$ = Capacidad del fluido en el depósito [litros]

$\Delta t$ = Intervalo de tiempo [s]

$t_i$  = Temperatura inicial del agua homogeneizada dentro del equipo [°C]

$t_f$  = Temperatura final del agua [°C]

$t_{as(av)}$  = Temperatura ambiente adyacente al CAI, promedio [°C]

Para el caso en estudio, los valores con los cuales se realizó el cálculo del coeficiente de pérdidas térmicas se muestran en la Tabla 2. Como se dijo antes, para computar las pérdidas nocturnas se ha de tener en cuenta el mezclado del líquido frío y caliente. Para ello se recurre a la realización de un experimento adicional denominado “mixing” (mezclado), mediante el cual se homogeneiza todo el equipo a una temperatura alta (mayor a 60 °C) y se le realiza un proceso similar al de descarga diaria, a una temperatura de entrada no superior a 30 °C.

Con todos estos elementos, siguiendo los lineamientos previstos en la norma se programó un algoritmo en Matlab para computar los 365 días del año, considerando el consumo de un volumen de tanque de agua diario. Para ello se tomaron los datos climáticos de la ciudad de Río Cuarto, y utilizando el generador de clima de TRNSYS, se confeccionó una base de datos de 8760 horas, que el programa codificado en Matlab interpola para estimar la energía total anual que puede proveer el equipo.

Temperatura de inicio	60,30	°C
Temperatura final	39,20	°C
Hora de inicio	18,45	Horas,minutos
Hora final	8,36	Horas,minutos
Fecha	22 y 23 de Julio	
Densidad del agua	1000,00	kg/m <sup>3</sup>
Capacidad calorífica	4186,00	J/kgK
Capacidad del fluido en el depósito	300,00	Litros
Intervalo de tiempo	50076,00	Segundos
Temperatura inicial del agua	60,30	°C
Temperatura final del agua	39,20	°C
Temperatura ambiente media	6,80	°C
<b>Coeficiente de pérdidas térmicas</b>	<b>12576,83</b>	<b>W/K</b>

Tabla 2: Datos medidos y utilizados para el cálculo del coeficiente de pérdidas térmicas.

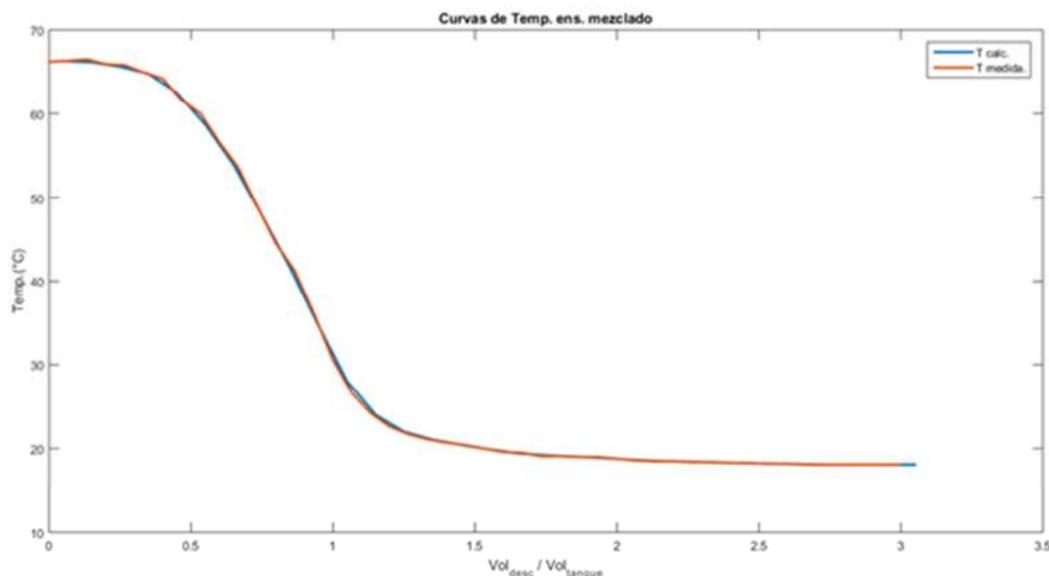


Figura 7. Curva de mezclado del CAI ensayado.

Finalmente, se puede estimar también mes a mes la provisión de energía de los equipos, teniendo en cuenta la ecuación de energía colectada y la evolución del equipo con sus pérdidas nocturnas. Esto se realiza en el mismo programa desarrollado. Así se pueden observar las fracciones solares mes a mes, y sumando los totales de energía demandada y energía provista por el sol, estimar también la Fracción Solar Anual. Se muestran los resultados en la Tabla 3, para un año típico de la ciudad de Río Cuarto. En la última fila se presentan los valores globales. Esta tabla no está prevista en la norma, como tampoco lo está el gráfico que sigue (Fig. 8), donde se representan con circulitos verdes aquellos días en que la provisión de energía para el agua caliente provino toda del sol y mediante circulitos azules

aquellos días en los cuales la energía solar fue insuficiente y debió incorporarse energía convencional para cubrir la demanda total de agua caliente.

mes	HT [MJ/m <sup>2</sup> ]	ta(day) [°C]	tmain [°C]	Q por mes [MJ]	demanda mensual	fracción solar mensual
Enero	20,26	24,03	18,03	782,9	839,7	0,93
Febrero	19,99	22,39	16,39	702,3	810,5	0,87
Marzo	18,46	21,32	15,32	748,3	934,6	0,80
Abril	17,15	17,33	11,33	700,0	1040,1	0,67
Mayo	15,07	12,43	6,43	683,5	1246,1	0,55
Junio	14,32	12,02	6,02	647,7	1219,9	0,53
Julio	13,91	10,41	4,41	661,3	1317,0	0,50
Agosto	16,38	11,51	5,51	708,7	1278,3	0,55
Septiembre	17,56	15,86	9,86	707,5	1089,9	0,65
Octubre	18,51	19,86	13,86	749,3	986,0	0,76
Noviembre	19,22	22,01	16,01	738,3	881,1	0,84
Diciembre	18,97	23,21	17,21	758,1	868,7	0,87
<b>Energías y fracción solar anuales --&gt;</b>				<b>8587,9</b>	<b>12511,9</b>	<b>0,69</b>

Tabla 3: Predicción de provisión de energía mensual y anual del CAI, de acuerdo al método de balances energéticos propuesto por la IRAM 210004.

La Tabla 3 y el gráfico de la Fig. 8 son complementarios en cierta forma. Si se observan las fracciones solares mensuales, se verá que son muy bajas en los meses invernales y solo en los meses más próximos al verano supera el 80 %, siendo el promedio anual de un poco menos del 70 %. Para un CAI es un valor bastante bueno, si se compara con el 80 % previsto para esta región para los equipos convencionales termosifónicos, de fabricación nacional o de tubos evacuados, importados que tienen almacenamiento aislado por separado.

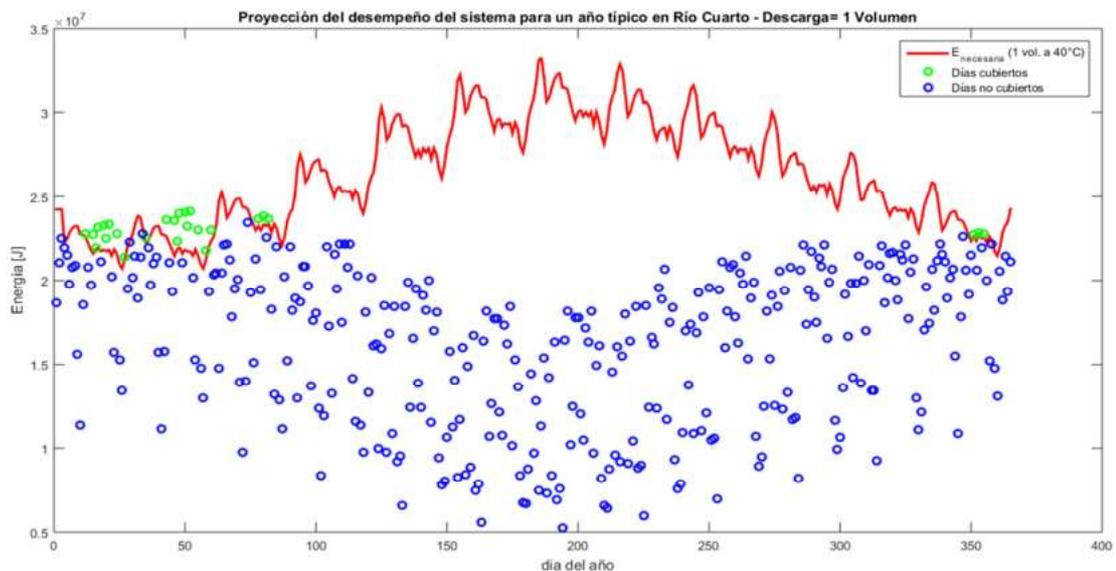


Figura 8. Representación gráfica de los días total y parcialmente cubiertos con energía solar.

Para analizar objetivamente el comportamiento del equipo, se le compara con otros CAIs monotanques, uno de sección oval y otro de perfil rectangular, ensayados bajo una norma equivalente por Lucchini et al. (2015). Tomando los datos constructivos de los tres equipos y con los mismos datos numéricos con que se confeccionan las gráficas como la de la Fig. 8 se les compara en términos de la energía promedio anual por metro cuadrado de captador (epa) y relación volumen/área (rva)s, dando los siguientes valores:

- Sección oval	epa= 8,11 MJ/m <sup>2</sup>	rva= 85,88 litros/m <sup>2</sup>
- Sección rectangular:	epa= 7,61 MJ/m <sup>2</sup>	rva= 104,6 litros/m <sup>2</sup>
- Parcialmente aislado	epa= 9,43 MJ/m <sup>2</sup>	rva= 137,5 litros/m <sup>2</sup>

Se ve entonces que el equipo desarrollado, aunque tiene una relación volumen/área mucho más grande que los anteriores, es capaz de captar más energía por metro cuadrado que los modelos anteriores, lo cual lo acerca a una prestación similar a la brindada por un equipo termosifónico tradicional.

## CONCLUSIONES

Las conclusiones de este trabajo atañen a dos aspectos: el desarrollo de un colector con acumulación integrada que es más efectivo que otros modelos para prevenir las pérdidas nocturnas y el análisis de las bondades que provee la aplicación de una norma para evaluar un equipo y permitir sacar conclusiones respecto a las posibilidades de mejora del mismo. Podemos por lo tanto decir:

- Se ha diseñado de un prototipo de colector con acumulación integrada con aislación parcial de su almacenamiento, que tiene mejores prestaciones frente a otros modelos de la misma familia.
- El proceso de fabricación es sencillo y se utilizan materiales de bajo costo, fácilmente obtenibles en el mercado local, lo cual hace pensar en una probable veta comercial del producto.
- Se han producido problemas de dilatación superiores a los previstos, que se podrían controlar fácilmente con adecuados refuerzos estructurales. Así, disminuyendo la relación Volumen-Área, sería posible mejorar los niveles de temperatura que alcanza el sistema (ecuación 2).
- Lo hecho remarca la importancia la utilización de Normas para poder realizar comparaciones objetivas de distintos equipos bajo las mismas condiciones de demanda.
- Las ecuaciones (1) y (2) son características propias del equipo que se ensaya, independientemente de las condiciones climáticas del lugar donde se les determinen.
- Esta norma no es una prueba del tipo pasa-no pasa, sino que brinda la posibilidad de estimar la cantidad de energía que puede proveer uno u otro equipo, lo cual es sumamente útil al momento de tomar una decisión de adquisición de un equipo, ya que los ahorros de energía son los que contabilizan para el cálculo de amortización del mismo.

Se plantea como investigación a futuro realizar un trabajo a campo con el equipo plenamente en uso, operando con las resistencias eléctricas como elementos de provisión de energía auxiliar, y durante un número prolongado de días seguidos, simulando el consumo de una familia. Adicionalmente, pensando en una aplicación concreta de uso residencial, también sería necesario el desarrollo de un sistema de control que permita la operación manual o automática del elemento que provee la energía auxiliar.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se desarrolló en la Universidad Nacional de Río Cuarto (UNRC). Ha sido subsidiado por la Secretaría de Ciencia y Técnica y la Facultad de Ingeniería de la UNRC. La Secretaría de Ciencia y Técnica de la UNRC también financia el trabajo de un becario de investigación, afectado a este proyecto.

## REFERENCIAS

- Alghoul M.A., Sulaiman M.Y., Azmi B.Z. y Abd. Wahab M. (2005) Review of materials for solar thermal collectors. *Anti-Corrosion Methods and Materials*, Vol. 52, Nro 4, pp. 199–206.
- Barral J., Galimberti P., Lema A., Adaro J. y Fasulo A. (2002) Design, construction and simulation Analysis of a low-cost Tubular Integral Collector Storage System. *Proceedings de Euro Sun 2002 - The 4th ISES - Europe Solar Congress*. Bologna, Italia.
- Barral, J. R. Agua caliente sanitaria solar: avances legislativos, normativos y reglamentarios en la República Argentina. Seminario en la XLI Reunión de trabajo ASADES, Asociación Argentina de Energías Renovables y Ambiente, Córdoba, Argentina, 2018.
- Cordi M., Sabre M., Bornancin M. (2016) Censo de energía solar térmica 2016. Mapa del sector en Argentina. Instituto Nacional de Tecnología Industrial - INTI.
- Fan J. y Furbo S. (2012) Buoyancy driven flow in a hot water tank due to standby heat loss. *Solar Energy*, Vol. 86, Nro 11, pp. 3438–3449.

- Fasulo A., Follari J., Barral J. Comparison between a simple solar collector accumulator and a conventional accumulator. *Solar Energy*, Vol. 71/6, pp 389-401, 2001.
- Garnica J.H, Lucchini J.M., Barral J.R. Colector solar con acumulación integrada de perfil oval, análisis teórico-experimental de su performance y estudio comparativo". *Actas del COCIM 2017, XVII Congreso Chileno de Ingeniería Mecánica*, Santiago de Chile, 2017, pp. 166-170.
- IRAM (2016) Métodos de ensayos exteriores para la caracterización y predicción del rendimiento anual de los sistemas solares, IRAM 210004. Instituto Argentino de Normalización y Certificación <<http://www.iram.org.ar/>>
- ISO (1995) Solar heating – Domestic water heating systems – Part 2: Outdoor test methods for system performance characterization and yearly performance prediction of solar-only systems, International Standard ISO 9459-2. International Organization for Standardization, Suiza.
- Kumar R y Rosen M. A. (2011) Integrated collector-storage solar water heater with extended storage unit. *Applied Thermal Engineering*, Vol. 31, pp. 348-354.
- Koroneos C. J., Nanaki E. A. (2012) Life cycle environmental impact assessment of a solar water heater. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 37, pp. 154 - 161.
- Lucchini J. M., Garnica J. H., y Barral J. R. (2015) Comparación del comportamiento de dos colectores con acumulación integrada a partir de ensayos normalizados. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, Vol. 19, pp. 03.67 – 03.78.
- Ministerio de Producción (2018) Resolución 520/18 Secretaría de Comercio, Reglamento Técnico para colectores solares y sistemas solares compactos para comercializar en Argentina.
- Nienborg B. (2010) El Mercado para Calentadores Solares en la Argentina – Estado actual, Rentabilidad, Potencial, Barreras y Posibles Soluciones. Tesis Master of Science Renewable Energy Management. Albert-Ludwigs-Universität Freiburg.
- Singh R., Lazarus I. J. y Souliotis M. (2016) Recent developments in integrated collector storage (ICS) solar water heaters: A review Article. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54, pp. 270-298.
- Stoll R. G., Garnica J. H., Barral J. R., Fasulo A. J. (2007) Estudio del comportamiento de colectores con acumulación integrada de dos tanques con y sin descarga de agua caliente. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, Vol. 11, pp. 3-53:3-60.
- SRCC [en línea] Solar Rating & Certification Corporation, SRCC Certification, Rating & Listing Directory. Washington, DC. Dirección URL: < <http://www.solar-rating.org/> > [consulta: 6 de febrero de 2019]
- Timilsina G. R., Kurdgelashvili L. y Narbel P. A. (2012) Solar Energy: Markets, Economics and Policies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 16, pp. 449-465.
- Zauner C., Lager D. y Hohenauer W. (2011) Thermophysical and spectroscopical characterization of new materials for solar thermal applications. *Actas de ISES Solar World Congress 2011*, Kassel, Alemania.

## **NORMALIZED THERMAL TEST OF AN INTEGRAL COLLECTOR STORAGE SYSTEM WITH PARTIAL INSULATION, MADE OF ACCESIBLE RAW MATERIALS AND SIMPLE MANUFACTURE**

**ABSTRACT:** This work shows the development of an integral collector storage system with a particular design for preventing nocturnal heat losses. This unit is thermally evaluated by using the IRAM 210004 standard. The main goal of the project was to obtain a low-cost solar equipment that offered better performance than similar models, thinking on covering the necessities of a domestic application. The essential characteristics of a first prototype are explained as well as the reasons that justify the geometry of its parts to match with the raw materials used. The thermal evaluation of the unit is made by a machine built by the same research team and a rigorous application of the mentioned standard is performed. The obtained results are shown by means of plots and tables, and the coefficients of the main equation are determined. This equation allows the estimation of the energy provided by the sun. An extra monthly calculation is added to the report to understand the Solar Fraction evolution, and a plot is provided to show the total or partial daily solar coverage of the demand. The prototype was compared with previous models tested by an equivalent standard, and an improvement is verified for this new unit.

**Keywords:** solar collector, integral storage, partial insulation, standard, thermal test.