

## **DISEÑO OPTIMIZADO DE UN COLECTOR ACUMULADOR DE RECIPIENTE NO CILÍNDRICO USANDO MÉTODOS DE ELEMENTOS FINITOS**

**Javier H. Garnica, Jorge R. Barral, Juan M. Lucchini, Rodolfo G. Stoll**  
Universidad Nacional de Río Cuarto - Facultad de Ingeniería - Departamento de Mecánica  
Ruta Nac. 36 Km. 601, 5800 Río Cuarto  
Tel./Fax: (0358) 4676246 - e-mail: jgarnica@ing.unrc.edu.ar

**RESUMEN:** Se presenta en ese trabajo el estudio de un colector-acumulador integrado para agua caliente sanitaria con absorbedor-almacenador de sección oval. El objetivo de la investigación fue hallar la optimización de una geometría que mantenga el buen comportamiento térmico con una disminución de costos de fabricación. Se utilizó para ello un programa de cálculo estructural por el método de los elementos finitos, que permite usar formas no tradicionales para diseñar el absorbedor-almacenador del equipo. Con condiciones de borde adecuadas para estas aplicaciones se procedió probando materiales y espesores bajo ciertos criterios tecnológicos de fabricación y proponiendo algunas soluciones innovadoras. El estudio de tensiones mostró que es posible construir un absorbedor de sección oval que ocupe toda la ventana de la caja aislada contenedora, provisto de un refuerzo interno que cumple funciones tanto estructurales como fluidotérmicas. Se muestran resultados teóricos y experimentales tanto mecánicos como térmicos mediante figuras, tablas y gráficos.

**Palabras clave:** Colector con acumulación integrada, agua caliente, perfil oval, elementos finitos, diseño.

### **INTRODUCCIÓN**

Los colectores solares con acumulación integrada (CAI) son una opción interesante para proveer agua caliente sanitaria domiciliar por su menor costo frente a otro tipo de colectores y por su simplicidad de instalación (Kalogirou, 1997), ya que funcionan sin sistemas de control y la conexión a la instalación domiciliar es muy sencilla. Se conocen varios tipos de CAIs, construidos con diversos materiales y variadas tecnologías (Smyth et al., 2007), siendo posible distinguir de modo general tres clases de sistemas que combinan almacenador y colector en una misma unidad, sistemas de tanque simple, sistemas integrados de tubos progresivo y sistemas con concentradores estacionarios (Morrison, 2001).

En el Grupo de Energía Solar (GES) de la UNRC se han estudiado varios de estos sistemas, como ser CAIs de un solo tanque con cubiertas múltiples de policarbonato (Fasulo et al., 2001), CAIs tubulares (Barral et al., 2002), CAIs de dos tanques con superficies reflectantes (Garnica et al., 2006; Stoll et al., 2007), obteniéndose buenos resultados desde el punto de vista energético. De todas maneras, los equipos desarrollados presentan cierta complejidad constructiva que conlleva a una difícil situación para su comercialización debido a los costos que implican, máxime en un contexto en el que la energía convencional es muy barata.

Todos los sistemas con acumulación integrada tienen dificultades para mantener la temperatura lograda durante las horas de sol a lo largo de las horas en las que no hay radiación, ya que el recipiente acumulador queda expuesto a cielo abierto a través de la cubierta transparente (Faiman et al., 2001), lo que hace que la principal aplicación de estos sistemas sea la de precalentador, y en general deban ser conectados en serie con un calentador convencional si se requiere agua caliente durante las 24 horas (Morrison, 2001).

Debido a la dependencia de las condiciones climáticas, los sistemas de calentamiento solar de agua nunca pueden instalarse como único generador de agua caliente, aún los sistemas más complejos y mejor aislados, y siempre deben complementarse con sistemas convencionales de calentamiento de agua (Duffie y Beckman, 2006), lo que centra la discusión acerca de que sistema adoptar en una relación entre el costo del equipo y la fracción solar de energía que aporta, considerada esta última como ahorro de dinero durante la vida útil del sistema solar.

Si bien existen en el mundo tecnologías muy avanzadas disponibles para el desarrollo y manufactura de sistemas de calentamiento de agua, como tecnologías de superficies selectivas, tecnologías de acero inoxidable o cobre, en nuestro país no están disponibles o su costo es muy elevado, lo que las hace imprácticas para su aplicación en la construcción de estos sistemas. También es demasiado costoso para producciones a baja escala el uso de sistemas automatizados de fabricación, por lo que los diseños de nuevos sistemas de calentamiento de agua mediante energía solar deben contener la menor cantidad de partes posible y es necesario minimizar la cantidad de operaciones de manufactura. Asimismo, se debe asegurar el uso de tecnologías y materiales locales, si lo que se pretende es lograr equipos económicamente competitivos para tender a la masificación del uso de energía solar en la región.

Este trabajo presenta las consideraciones de diseño, los pasos seguidos y las tecnologías empleadas en el desarrollo y construcción de un CAI cuyo recipiente no es cilíndrico y carece de superficies reflectantes. Se presenta también una evaluación de su comportamiento térmico, y se agrega una comparación de parámetros geométricos con otros tipos de CAIs.

## CONSIDERACIONES DE DISEÑO

Para comenzar el diseño se establecieron en principio dos cuestiones a atender: formas y materiales a emplear. En lo que respecta al diseño de las formas se tuvo en cuenta principalmente que el tanque absorbedor-almacenador debe soportar una cierta presión, que si bien es baja, el recipiente debe ser capaz de resistirla. Las dimensiones del recipiente debían ser tales que produzcan una superficie irradiada lo suficientemente grande para lograr el calentamiento del volumen de agua que contiene sin necesidad del uso de superficies reflectantes. Se atendió además a las dimensiones de materiales estándar del mercado local para disminuir las operaciones de manufactura y evitar la generación de rezagos. Por último, las formas planteadas debían ser tales que permitieran la construcción sin el uso de grandes máquinas como prensas de estampado o plegadoras pesadas.

Se adoptó el criterio de que los materiales a emplear como materia prima fueran aquellos que se puedan conseguir en el mercado local a costos competitivos y cuya elaboración y procesos de manufactura fueran conocidos y estén disponibles en la región. También debía lograrse resistencia a la corrosión, fundamentalmente en las partes del CAI que estén en contacto con el agua. Por otro lado, la cubierta transparente debía ser capaz de resistir granizo, habitual en la región. Finalmente, el conjunto de materiales y procesos de manufactura empleados debían garantizar durabilidad del equipo construido.

## EL DISEÑO DE LAS FORMAS

Asumiendo que no hay grandes modificaciones en lo que hace a la caja aislada, y a partir de las condiciones de diseño establecidas anteriormente, la parte fundamental del CAI era el recipiente que integrará las funciones de colector y acumulador. Así, para iniciar el diseño, se partió de lo dicho anteriormente para la presión, considerando que un equipo de este tipo sería utilizado en viviendas unifamiliares en las que existe un tanque de reserva de agua ubicado en el techo de la casa, la presión a la que estaría sometido el equipo sería como máximo la correspondiente a 2,5 m de columna de agua.

Para determinar la relación entre superficie expuesta a la radiación solar y el volumen de agua contenido se usaron datos de radiación media mensual para Río Cuarto (Grossi Gallegos y Righini, 2007), a partir de la cual se determinó que en Julio sobre una superficie inclinada a 45° hacia el norte se dispone de una media de aproximadamente 14MJ de energía por metro cuadrado. La experiencia del GES en el estudio de colectores acumuladores permitió inferir que alrededor el 60% de esa energía se lograría transmitir efectivamente al agua. Se estableció la relación entre el volumen contenido de fluido y el área expuesta a la radiación solar en 100 dm<sup>3</sup> por metro cuadrado, con lo que se lograría un salto térmico medio de 20° C en Julio.

Los tanques cilíndricos no permiten variar la relación volumen/superficie, por lo que el recipiente no podía ser de forma cilíndrica, y por otro lado, atendiendo al requisito de presión a soportar, las paredes no podían ser planas. Considerando la necesidad de simplicidad de construcción se decidió que la forma del recipiente debía ser de una superficie reglada de base no circular, mas específicamente la generatriz de la superficie del tanque debía ser un óvalo, ya que dicho perfil se conforma empalmando arcos de círculo de diferentes radios. El radio menor del perfil del tanque se definió de 25 mm, ya que es una medida comercial habitual de tubos y hierros macizos, lo que facilitó la construcción. La separación entre los centros de los arcos de radio menor se fijó de manera que el perfil de la caja que contendría al tanque se podría construir a partir del ancho estándar de chapa galvanizada común que es de 1220 mm. Lograr esto último disminuyó notablemente las operaciones de construcción de la caja, ya que se evitaron operaciones de corte, perforado y remachado para fabricarla, y se eliminó también el uso de perfil ángulo.

Determinados el radio menor del perfil y la separación entre los centros de éstos, el radio de los arcos circulares mayores se ajustó para obtener la relación volumen/superficie ya mencionada. El perfil resultante se muestra en la figura 1. La longitud del recipiente se definió de 1,20 m, por lo que resultó un tanque de 72 dm<sup>3</sup> de capacidad, y una superficie expuesta a la radiación de 0,72 m<sup>2</sup>.

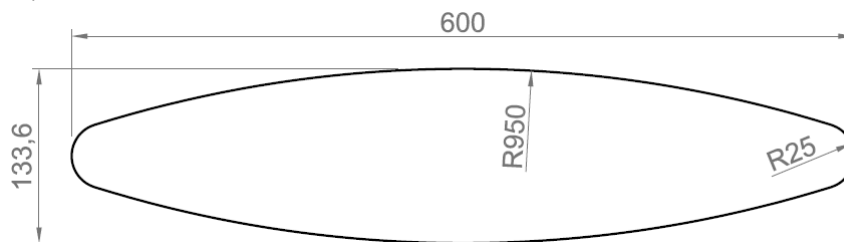


Figura 1. Perfil del tanque colector acumulador – Medidas en mm.

## SELECCIÓN DE MATERIALES

El material ideal para la construcción del recipiente del CAI hubiera sido acero inoxidable, que se consigue en el mercado en varias calidades. Sin embargo, no resulta económico el uso de este material, ya que no solo es costoso el material en sí, sino también la tecnología necesaria para su manufactura, además de no disponer de accesorios de manera rápida y económica (niples roscados, codos, etc.). Es así que investigando los calentadores acumuladores que usan energías convencionales (termotanques a gas o eléctricos) se encontró que los más económicos están construidos con chapa de hierro 1008 ó 1010, recubiertos en su interior con esmalte antióxido y protección catódica con ánodo de sacrificio para eliminar la corrosión del tanque. Esta solución es muy adecuada para el recipiente del CAI en cuestión, ya que el proceso de calentamiento es lento y además no se presentan puntos calientes, lo que disminuye la probabilidad de rotura del esmalte antióxido y la posterior

corrosión del tanque. En vista de lo mencionado se decidió que el recipiente se construya con chapa de acero 1010 estándar (conocida vulgarmente como “chapa negra”). El material seleccionado es barato, dúctil, posee buena resistencia mecánica y se puede soldar de manera simple con proceso de soldadura eléctrica por arco voltaico. También es posible conseguir sin dificultades accesorios para soldar como nipples, codos, etc. Lógicamente se debe recubrir interiormente con esmalte convertidor antióxido y además agregar un ánodo de sacrificio de magnesio. Este último elemento se consigue fácilmente de diferentes medidas ya que es un repuesto de los termostanques comunes, siendo además muy barato.

La caja exterior del CAI se construyó con chapa de acero galvanizado calibre 24 (0,56 mm de espesor). La aislación se planteó con una manta de lana de vidrio en la parte mas interna, contra el tanque, y luego una capa de poliestireno expandido, ambos materiales muy económicos y manejables sin herramientas especiales.

En lo que respecta a la cubierta transparente, y con el afán de minimizar las pérdidas nocturnas, se decidió usar doble cubierta, colocando una lámina de vidrio de 4mm de espesor como cubierta interna y una placa de policarbonato alveolar de 6 mm en la parte externa. De esta manera, el vidrio disminuye las pérdidas por radiación, ya que es opaco a la radiación infrarroja que emite la placa absorbidora y el policarbonato hace lo propio con las pérdidas por convección, proporcionando además resistencia al granizo.

## CÁLCULO ESTRUCTURAL

Una vez determinada la forma del perfil que debe tener el tanque del CAI y seleccionado el material a usar se calculó el espesor necesario de las paredes del recipiente para cumplir con el requisito de presión a soportar. En el diseño de recipientes sometidos a alguna presión las herramientas disponibles según la teoría clásica del análisis estructural solo permiten calcular recipientes esféricos o cilíndricos, y en este último caso no es posible conocer realmente el estado de tensiones cerca de los extremos o tapas de los cilindros. Cuando la forma del recipiente no es alguna de las mencionadas las pocas herramientas existentes son aproximaciones con márgenes de error grandes, y es más difícil aún conocer lo que ocurre punto por punto dentro del material que constituye el recipiente, con lo cual se tiende a sobredimensionar las paredes de los recipientes para lograr seguridad, hecho que trae aparejado mayor peso y costo de materiales y construcción del recipiente diseñado. Conviene mencionar que el fluido que contendrá el recipiente en cuestión no es compresible, por lo que no hay peligro de estallido, hecho que permite usar coeficientes de seguridad bajos redundando esto último en menor peso y por ende menor costo de materiales y mayor facilidad de construcción.

Por lo antes mencionado es que se usó un software de cálculo estructural por medio de métodos de elementos finitos para dimensionar el espesor necesario de la chapa que debía usarse para construir al tanque. Este proceso es en general iterativo, es decir, se propone un espesor de pared del recipiente, se analiza el estado de tensiones, se ajusta el espesor y se vuelve a analizar el estado de tensiones, hasta lograr un estado tensional que sea satisfactorio. La propuesta inicial de espesor de la pared del recipiente no fue al azar, se propuso construirlo con chapa de acero 1010 de calibre 18, cuyo espesor es de 1,27 mm. Se eligió este espesor porque es el mínimo que puede ser soldado de manera fuerte y económica, siendo además muy simple de curvar para lograr la forma del perfil diseñado. Al tratarse de un prototipo, la parte del perfil que corresponde a los radios menores del óvalo se decidió construirla usando una sección de caño estructural de 50 mm de diámetro y espesor 1,60 mm. De esta manera se aumentó la cantidad de soldadura necesaria para la construcción del tanque prototipo, pero se evitó el desarrollo y construcción de utilajes necesarios para curvar la chapa.

Es necesario mencionar que se agregó a la forma oval establecida una pared que dividió a la sección en dos partes iguales con el objeto de proporcionar un tabique para evitar el mezclado del agua fría que ingresa al colector con el agua caliente contenida en él (ver Figura 2). Dicho tabique oficia también de refuerzo estructural ya que une las dos paredes de radio mayor del óvalo que tienden a abrirse bajo los efectos de la presión.

Las tapas del perfil se plantearon directamente planas, cortadas de la misma chapa que constituye el tanque. Si bien las tapas planas no son lo recomendado para recipientes de presión, no es posible construir tapas cóncavas para un prototipo. Se debe evaluar su desempeño bajo la presión de trabajo, y si es necesario cambiar el espesor de la chapa.

Como es conocido en el uso de métodos de elementos finitos se debe tratar de minimizar la cantidad de operaciones que necesita realizar la computadora, por lo que es recomendable aprovechar los planos de simetría que presente el elemento a analizar. En este caso el modelo que se usó para el cálculo estructural es sólo un cuarto del recipiente completo, dicho modelo se muestra en la Figura 2.

Las condiciones de contorno del modelo para cálculo estructural son muy simples, ya que son condiciones de simetría. La carga con que se realiza el análisis de tensiones es una presión interior de 39,2 kPa, que corresponde a la presión manométrica de 4 m de columna de agua. La hipótesis que llevó a utilizar esta presión es que el CAI será colocado en el techo de una vivienda unifamiliar, alimentado desde el tanque de agua de reserva domiciliario, con lo que la máxima diferencia de altura del nivel del tanque de reserva hasta el nivel de colocación del colector sería de alrededor de 2,5 m. Al colocar como presión de cálculo la correspondiente a 4 m de desnivel se asegura un coeficiente de seguridad (CS) de 1,6. Se fija CS en carga y no en tensiones, ya que existe la posibilidad de que haya efectos no lineales que afecten el estado de tensiones.

Establecida la geometría, el espesor de las diversas partes, las cargas y las condiciones de contorno se cargó el software de análisis estructural y se calculó el estado de tensiones a lo largo del modelo de cálculo. Esto se muestra en la figura 3. En ella se observa la distribución de tensiones a través del código de colores explicitado en la leyenda. Se aprecia que existen zonas del modelo planteado que se encuentran por encima del valor de la tensión de falla. Debe aclararse que se considera falla

cuando el material entra en fluencia, es decir, comienza a sufrir deformaciones permanentes, esto no significa que se haya llegado al colapso del acero.

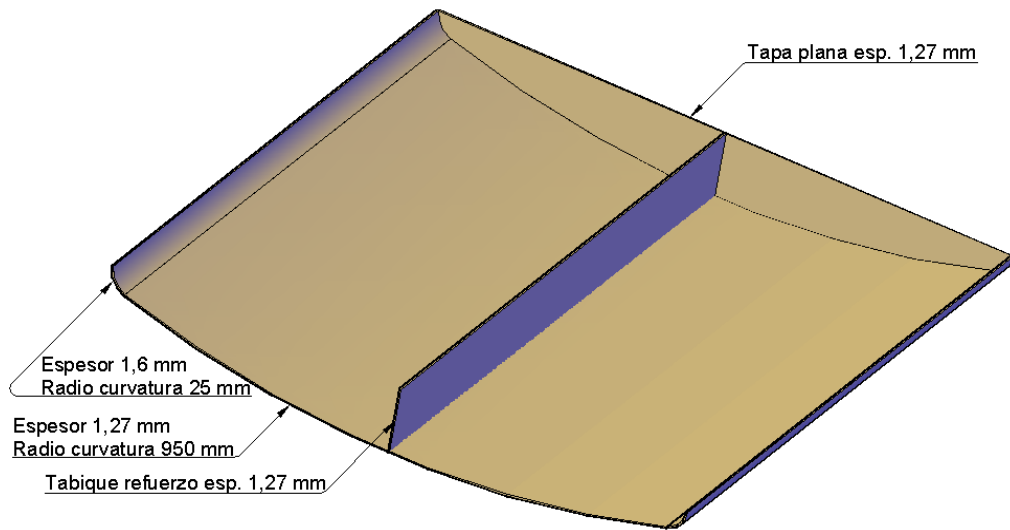


Figura 2. Modelo utilizado para el análisis estructural por elementos finitos.

Como ya se estableció un CS en la carga, es suficiente con que el coeficiente de seguridad mínimo sea 1. Las partes que aparecen en color rojo en la figura 3 se encuentran por debajo del coeficiente de seguridad mínimo. Al comprobar que es lo que ocurre en el interior de la sección más comprometida se encuentra que la distribución del coeficiente de seguridad es como se muestra en la figura 4. En ella se observa que la parte superficial de la chapa que conforma el recipiente se encuentra con CS menor que 1, pero en el centro del material el coeficiente es mayor que 1. Si bien existen zonas que resultarán con deformaciones permanentes, el conjunto del espesor del material soporta la carga sin problemas.

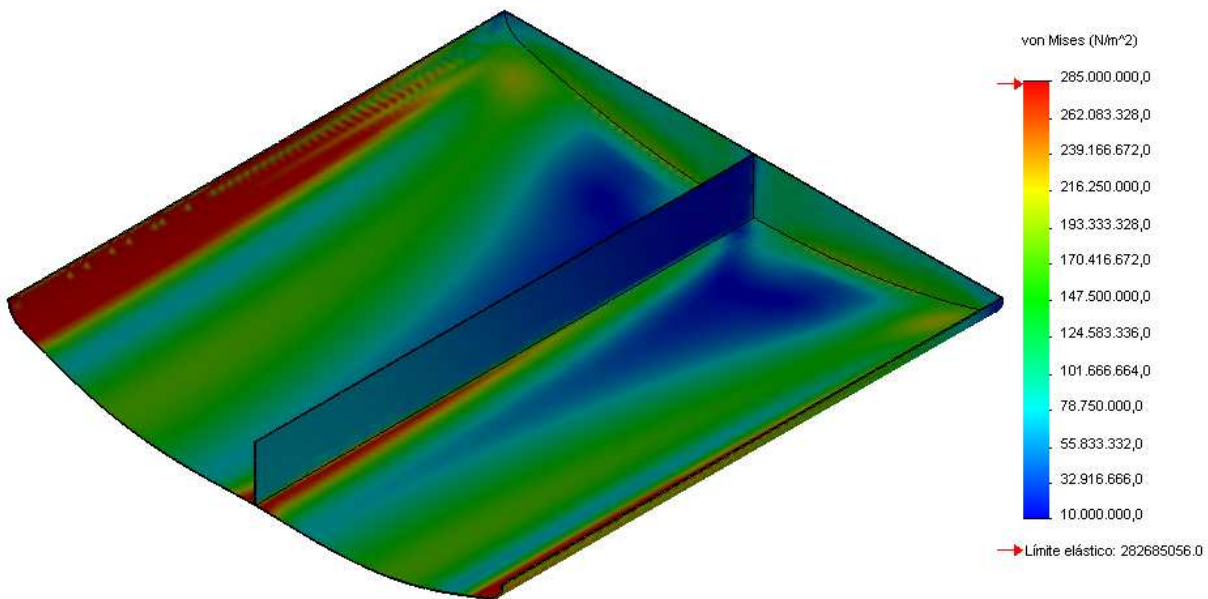


Figura 3. Resultado del análisis estructural por elementos finitos – Distribución de tensiones

## EL DISEÑO COMPLETO

Fijada la forma y materiales del recipiente colector almacenador se completó el diseño. Se plantearon la entrada y la salida en un extremo del tanque, sobre la cara plana que forma la tapa, y se construyeron éstas con niples roscados comerciales de diámetro nominal  $\frac{3}{4}$  de pulgada. Con la intención de conocer en detalle el comportamiento del prototipo, se colocaron 16 termocuplas en el interior del tanque, que representan a 16 partes iguales en volumen, para conocer la evolución de la temperatura del fluido, y también cómo se modifican los valores térmicos por efectos de mezclado. Para asegurar la ubicación correcta de las termocuplas dentro del tanque se introdujeron de a cuatro dentro de un tubo metálico de 10 mm de diámetro, dejando descubierta la punta de cada sensor, saliendo hacia un extremo del tubo el cable de las 4 termocuplas. Cada tubo contiene las termocuplas correspondientes a un nivel, y se montaron 4 tubos, lo que completan las 16 termocuplas. Se incluyó en el tanque el soporte roscado para el ánodo de magnesio para protección catódica anticorrosión, se muestra todo ello en la figura 5.

En la figura 6 se expone el diseño del colector acumulador completo, es decir, el tanque con aislantes, cubiertas transparentes, carcaza exterior, etc. La Tabla 1 muestra el detalle de materiales necesarios con el costo correspondiente a octubre de 2010. También se detalla el tiempo empleado en cada tarea. El costo estimado de mano de obra es el que corresponde a un operario metalúrgico de calificación media, es decir, que sepa soldar y armar a partir de planos.

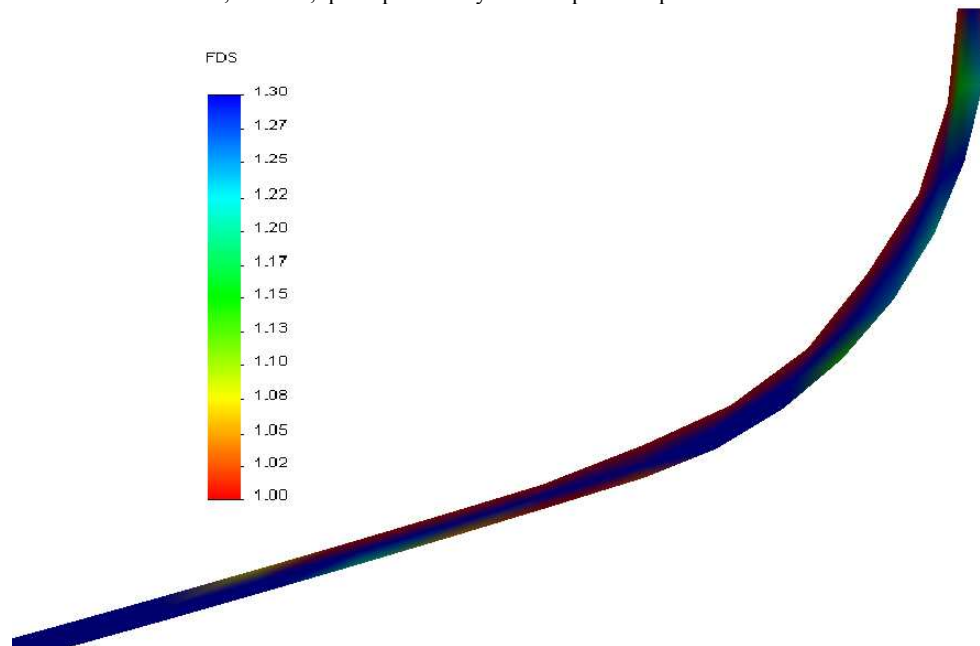


Figura 4. Distribución del coeficiente de seguridad en la sección más comprometida

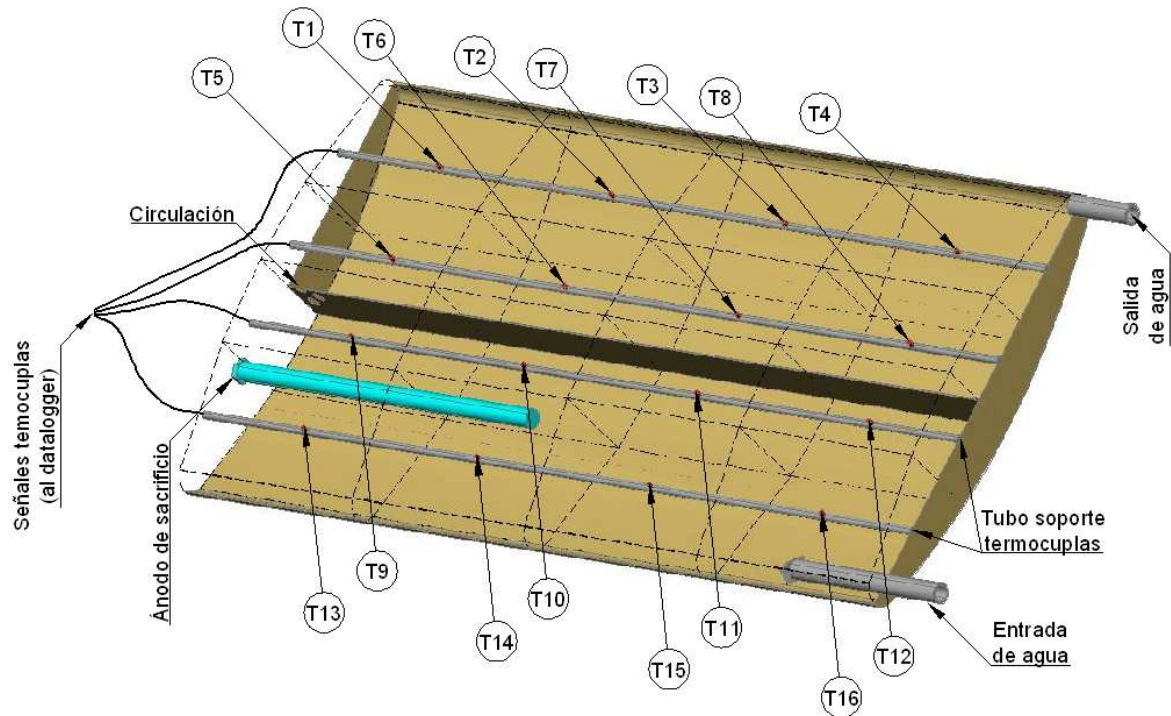


Figura 5. Ubicación de las partes incluidas en el recipiente del CAI.

Terminada la etapa de diseño se construyó el prototipo en el taller de desarrollo del GES, sin la necesidad de más herramientas que las existentes en cualquier pequeño taller de herrería. Solamente se tercerizó el corte de la chapa del tanque a un servicio de corte con pantógrafo de plasma con control numérico, aunque esto no es estrictamente necesario, bien podría haberse hecho de manera manual. La vinculación mecánica entre el tanque y la carcaza se logró armando dos marcos de madera al que se encuentra fijado el tanque (por la parte interna del marco) a través de flejes de chapa atornillados a la madera del marco, y atornillada por la parte externa del marco la caja de chapa galvanizada. De esta manera se refuerza la estructura, logrando rigidez mecánica del conjunto, y se evitan puentes térmicos. El prototipo construido se muestra en la figura 7, montado sobre una de las plataformas de medición del Laboratorio del GES. La botella de gaseosa sirve de referencia para el tamaño del colector. Las dimensiones generales del equipo armado resultan: ancho de 740 mm, largo igual a 1400 mm, profundidad de 260 mm.

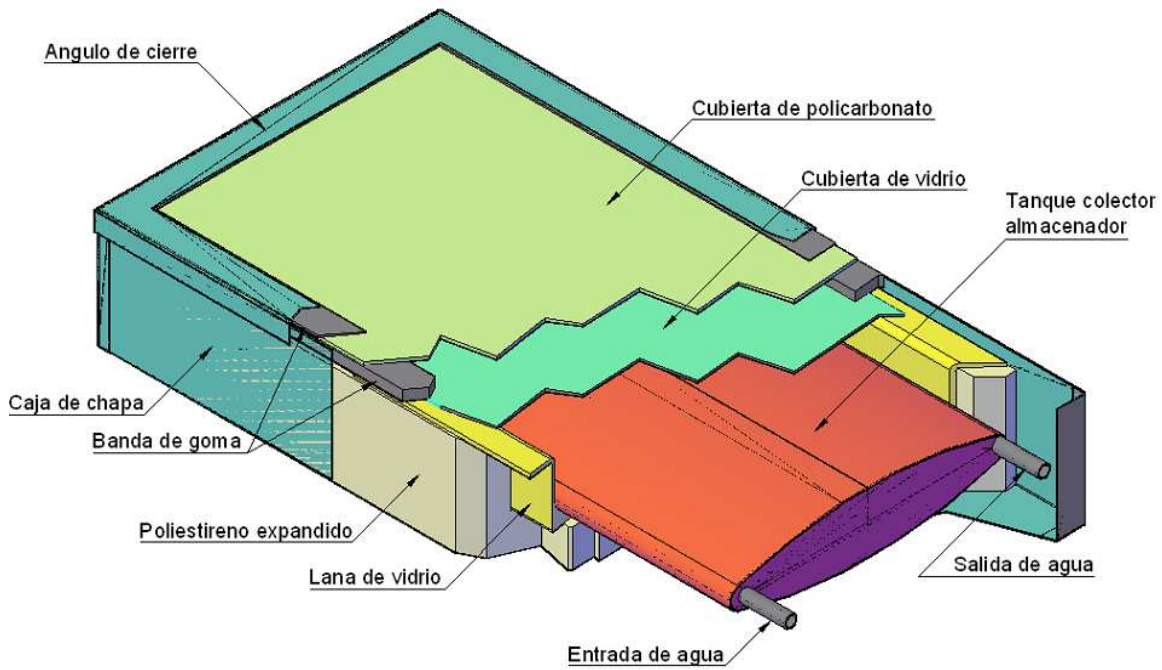


Figura 6. Ubicación de las partes incluidas en el recipiente del CAI

Costos de materiales del prototipo		Costos de mano de obra del prototipo	
Material	Costo	Actividad	Horas
Caño estructural 50 mm (1,5 m)	\$ 24,50	Partir caño 50mm, cortar niple, armar tapas con niple y caño	4
Chapa cal. 18 (1,27 mm)	\$ 110,00	Armar una chapa en la tapa, soldar	2
Corte de chapa (servicio pantógrafo cnc)	\$ 80,00	Poner refuerzo longitudinal, soldar perímetro, pintar	4
Niples, antioxiado, disco corte	\$ 31,60	Poner otra tapa, soldar todo, quitar fugas	4
Anodo de magnesio c/ cupla p/soldar	\$ 50,00	Armar maderas soporte	3
Hoja caladora	\$ 8,00	Cortar y plegar chapas carcasa	1
Tuercas, tornillos y remaches	\$ 17,00	Lavar con desengrasante, enjuagar, pasar fosfatizante	2,5
Madera p/armar	\$ 20,00	Pintar por dentro	1,5
Fosfatizante (1 litro)	\$ 15,00	Armado final	2
Desengrasante (medio litro)	\$ 16,00		
Chapa Galvanizada carcasa cal. 24	\$ 106,00	Cantidad de horas	24
Vidrio 4 mm (715*1380)	\$ 90,00	Costo de trabajos	\$ 490,91
Polocarbonato alveolar de 6 mm	\$ 126,00		
Burletes de goma	\$ 150,00		
<b>Total materiales</b>	<b>\$ 844,10</b>		
		<b>Costo total materiales y mano de obra: \$ 1335,01</b>	

Tabla 1. Evaluación de costos de construcción del prototipo del CAI



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 7. Imágenes del CAI armado. (a) Tabique con las perforaciones para circulación. (b) Salida de señales de termocuplas durante el armado. (c) Salida de señales terminada (d) Prototipo colocado en la plataforma del GES. (e) Se aprecian las conexiones para su evaluación térmica.

### EVALUACIÓN TÉRMICA

Una vez armado el equipo se colocó en una plataforma de medición del laboratorio del GES para su evaluación térmica. A las termocuplas interiores se le agregaron sendas termocuplas a la entrada y a la salida, y se colocó un piranómetro en el plano de la cubierta transparente. Todas las señales se relevaron con un adquisidor de datos Agilent 34970A. Además, se contó con los datos de temperatura ambiente y velocidad del viento tomados por la estación meteorológica del Laboratorio. Los datos se midieron cada cinco minutos.

Como se dispone de mediciones de temperatura cada 1/16 del volumen, y a fin de establecer una estimación del funcionamiento del equipo en lo referente a colección de energía y pérdidas nocturnas, se calculó la potencia transferida efectivamente al fluido considerando la variación de energía de cada porción del tanque representada por las termocuplas colocadas dentro de éste, teniendo en cuenta el tiempo que lleva dicha variación. Esto es:

$$P_i = \frac{\sum_{j=1}^{16} m \cdot c_p \cdot \Delta T_j}{\Delta t} \quad (1)$$

La potencia se calculó para cada intervalo de tiempo en el que se realizaron las mediciones, siendo cada uno de los términos de la ecuación (1) lo siguiente:

- $m$  = masa de cada porción de volumen.
- $c_p$  = calor específico del agua.
- $\Delta T_j$  = cambio de temperatura de cada porción del tanque.
- $\Delta t$  = intervalo de tiempo.

En la figura 8 se aprecian las mediciones de dos días corridos de funcionamiento, observándose que la evolución de las temperaturas internas presenta gran estratificación, no evidenciándose diferencias entre el semivolumen inferior y el superior, lo cual indica que el tabique no afecta a la estratificación. También se muestran en el gráfico la radiación global incidente sobre la cubierta, y la potencia absorbida (o pérdida) por el agua.

Las líneas de trazo verticales marcan el momento en el que el colector empieza a transferir energía al agua y el momento en el que deja de hacerlo, resultando que la admisión de energía comienza con radiación global sobre el plano de la cubierta de alrededor de 180 W/m<sup>2</sup>, finalizando la absorción de energía cuando la mencionada radiación es de aproximadamente 300 W/m<sup>2</sup>. Calculando la energía que llega al plano de la cubierta a lo largo del día y la que contiene el fluido al finalizar la absorción de energía se encuentra que en el primer día el 52,5% de esa energía resulta transferida al agua, mientras que en el segundo día 45,8%. Esto resulta coherente con el hecho de que en el segundo día las temperaturas son mayores, con lo cual aumentan las pérdidas.

Durante las horas de la noche el resultado de calcular la potencia expresada en la ecuación (1) es negativo, hecho coherente con la disminución de energía que se produce. La potencia perdida es cercana a los 90 W, y se observa en la figura que es mayor en las primeras horas de la noche, ya que al transcurrir las horas de oscuridad la temperatura del colector desciende. No está exento este CAI a las pérdidas nocturnas habituales en este tipo de artefacto, advirtiéndose buena ganancia de energía durante las horas de sol.

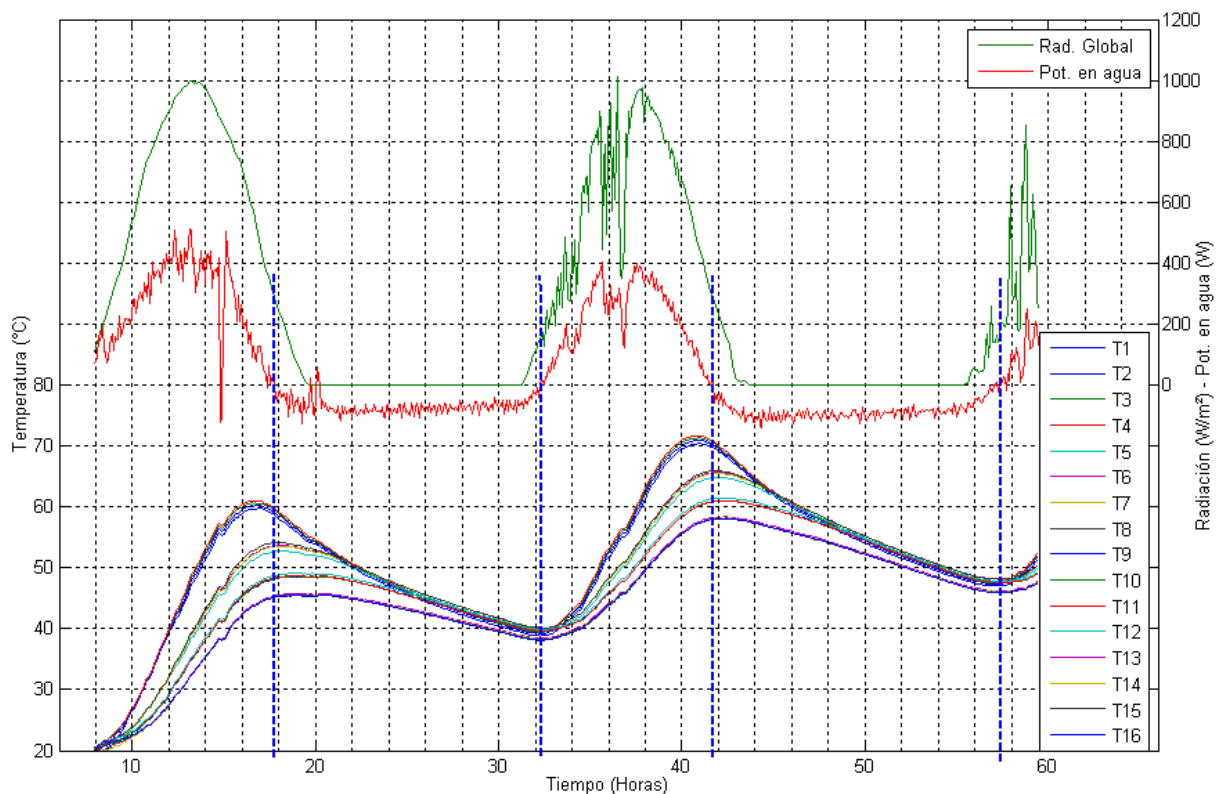


Fig. 8. Evolución de temperaturas dentro del CAI. Radiación global sobre plano del colector. Potencia transmitida al agua.

### COMPARACIÓN DE PARÁMETROS GEOMÉTRICOS CON OTROS CAIS

En la tabla 2 se muestra una comparación de propiedades geométricas de distintos tipos de colectores acumuladores, parámetros éstos que tienen fuerte influencia en el costo de materiales, la cantidad de operaciones necesarias para su construcción y por ende el costo de mano de obra. Los CAI progresivos de las columnas 3ra y 5ta corresponden a modelos de 20 y 40 galones respectivamente, publicados en internet (TCT Solar, 2011) y el de la columna 4ta es un modelo con superficies reflectantes ensayado en el Laboratorio del GES (Stoll et al, 2007).

Concepto	CAI ovalado	CAI progresivo 1	CAI c/reflectantes.	CAI progresivo 2
Cantidad de tanques	1	4	2	8
Volumen de agua contenida (dm <sup>3</sup> )	71,6	67,2	151	155,6
Volumen de agua/cantidad de tanques(dm <sup>3</sup> /tanque)	71,6	16,8	75,5	19,45
Relación vol. del equipo/vol. de agua (adimensional)	3,77	3,42	7,27	3,79
Relación vol. agua/chapa carcaza (dm <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> )	33,32	30,27	28,31	35,05
Relación vol. agua/área bruta expuesta (dm <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> )	69,11	57,58	62,60	52,18
Relación vol. de agua/chapa para tanque (dm <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> )	43,42	25,45	65,60	25,14
Relación sup. reflectante/vol. de agua (dm <sup>2</sup> /dm <sup>3</sup> )	0,00	0,00	1,63	0,00

Tabla 2. Comparación de propiedades geométricas

La comparación del volumen del equipo con el volumen de agua permite también el cotejo de los costos de instalación y el tamaño del lugar a instalarlo. Se muestran remarcados con verde los mejores valores en cada concepto, y en amarillo los que le siguen.

### CONCLUSIONES

Se ha demostrado que el cálculo estructural de recipientes para colectores por medio de métodos de elementos finitos permite usar de manera económica formas de recipientes no convencionales, siempre que se trate de bajas presiones, optimizando el uso de materiales y proporcionando mayor libertad en el diseño de las superficies, priorizando la geometría en base a las necesidades de perfeccionar la recepción de energía radiante. Esta herramienta de cálculo estructural es hoy en día muy simple de usar, existiendo numerosos softwares de código abierto, sumado además que la potencia de cálculo de cualquier computadora personal actual es suficiente.

Las reducidas dimensiones logradas con este diseño facilitan la colocación del equipo en lugares pequeños, disminuyendo también la probabilidad de que el equipo sea afectado por efecto de los vientos. Se remarca la facilidad de instalación del



artefacto (podría instalarlo directamente el usuario), como así también la simplicidad de construcción. Si bien el prototipo ensayado tiene capacidad para 72 litros, construir un equipo de mayor capacidad se logra de manera simple ya que solo se debe construir un colector más largo. Los costos de materiales aumentan de forma directamente proporcional con la longitud, mientras que los costos de mano de obra aumentarían en menor proporción. Con utilajes muy elementales se pueden disminuir los tiempos de fabricación prácticamente a la mitad del necesario para construir el prototipo, mientras que la economía de escala y el manejo de stock de materiales permitirían reducir los costos de estos últimos.

La comparación de parámetros geométricos con otros tipos de CAIs arroja valores similares a los que presentan los del tipo de tubos en serie progresivos, incluso en algunos casos valores mejores, usando tecnologías y materiales locales.

Los resultados de las experiencias prueban que el comportamiento térmico es muy bueno, ya que con solo 180 W/m<sup>2</sup> de radiación global incidente sobre la cubierta el equipo comienza a calentar efectivamente el agua, y lo hace mientras los valores de radiación se mantengan sobre los 300 W/m<sup>2</sup>. Las temperaturas alcanzadas son más que adecuadas, máxime considerando que el volumen calentado es de 72 litros con una superficie absorbadora de solo 0,72 m<sup>2</sup>. Si bien existen pérdidas nocturnas inherentes a este tipo de CAI, dichas pérdidas son acotadas, logrando que luego de un día soleado se pueda contar con agua a temperatura cercana a los 40 °C a la mañana siguiente, lo que evidencia una buena aislación.

## REFERENCIAS

- 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. Euro Sun 2002, The 4th ISES Europe Solar Congress. Bologna, Italia.
- Duffie J. A. y Beckman W. A [2006] Solar Engineering of Thermal Processes, Third Edition, John Wiley and Sons, Inc.
- Faiman D., Hazan H. y Laufer I. (2001) Reducing the heat loss at night from solar water heaters of the integrated collector-storage variety. *Solar Energy*, Vol. 71, No. 2, pp. 87-93.
- Fasulo A., Follari J. y Barral J. (2001) Comparison between a simple solar collector accumulator and a conventional accumulator. *Solar Energy*, Vol. 71/6, pp. 389-401.
- Garnica J. H., Barral J. R., González A. S. y Lucchini J. M. (2006) Estudio experimental de un colector con acumulación integrada de dos tanques con superficies reflectantes y cubierta de policarbonato. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, Vol. 10, pág. 03.53 – 03.59.
- Grossi Gallegos H. y Righini R. (2007) Atlas de Radiación Solar de la República Argentina.. Universidad Nacional de Luján, Buenos Aires, Argentina.
- Kalogirou S. (1997) Design, construction, performance evaluation and economic analysis of an integrated collector storage system. *Renewable Energy*, Vol. 12, pp. 179-192.
- Morrison G. L. (2001) Solar Water Heating, in *Solar Energy: the state of the art*, editado por Jeffrey M. Gordon. pp. 223-286 ISES position papers, Earthscan.
- Smyth M., Eames P.C., Norton B. (2006) Integrated collector storage solar water heaters. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 10, pp. 503-538
- Stoll R. G., Garnica J. H., Barral J. R. y 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.
- TCT Solar, Manufacturer of the ProgressivTube ® [en línea] Dirección URL: <<http://www.tctosolar.com/>> [Consulta: 4 de agosto de 2011]

## ABSTRACT

This work shows the study performed on an integral collector-storage system, which has an oval section the tank-absorber. The objective of the research was to find a geometrical optimization that allowed the maintaining of good thermal behavior and a decreasing of manufacturing costs. A finite element program for structural calculations was used, which facilitates the use of non-traditional shapes to design the tank-absorber of the system. By using adequate boundary conditions for this kind of applications, following certain technological criteria, and proposing innovative solutions, different materials and thicknesses were tried. The stress study showed that it was possible to build an absorber of oval section to occupy all the insulated box window. The tank-absorber was designed with an internal brace, which accomplishes structural functions and improves the thermofluid behavior as well. Theoretical and experimental results of the mechanical and thermal performance are shown by means of figures, tables and plots.

**Keywords:** Integral collector storage system, hot water, oval section, finite element method, design.