

## **DISEÑO, ENSAYO Y SIMULACIÓN DE UN SISTEMA<sup>1</sup> INTEGRADO TANQUE-COLECTOR SOLAR**

R. Echazú, M. Quiroga, C. Cadena, L. Saravia

INENCO - Instituto UNSa - CONICET  
Universidad Nacional de Salta  
Av. Bolivia 5150 - A4408FVY Salta, República Argentina  
FAX 54 387 4255489 - e-mail: echazur@inenco.net

**Palabras clave:** Energía solar, colector, agua caliente, colector integrado, simulación, sceptre.

**RESUMEN:** Se presenta el diseño y detalles constructivos conjuntamente con medidas en banco de pruebas y simulación numérica de un colector solar integrado al tanque, para calentamiento de agua de uso doméstico.

El equipo construido, de bajo costo, se ensayó con un sistema digital de toma de datos y se realizaron dos simulaciones, una simplificada en hoja de cálculo y otra mas detallada con simusol-sceptre. El trabajo muestra resultados y conclusiones preliminares.

### **INTRODUCCIÓN**

En los sistemas convencionales de calentamiento de agua con energía solar, se emplean colectores planos conectados a un tanque acumulador aislado térmicamente, formando un circuito cerrado por el que circula agua por termosifón.

Una alternativa interesante, la constituyen los sistemas integrados o “breadboxes” en los cuales el tanque de acumulación se encuentra en el interior del colector en un mismo gabinete. Por su sencillez el costo de estos equipos es considerablemente menor, pero tienen el inconveniente de que el agua se enfría durante la noche y se dispone de un número limitado de extracciones diarias.

Se han empleado y se siguen empleando variantes de este sistema, algunos comerciales y también artesanales. Se pueden mencionar los colectores tipo almohadón de PVC de Japón, el australiano con carcasa de tanque de 200 lts, ( Hobbs D. 2003) y algunos argentinos como los presentados en ASADES por Esteves, (2005), Tacchi (2004), Fasulo, (2003), Lema, (1999), etc.

En trabajos recientes se ha estudiado la estratificación en equipos integrados de 2 tanques, (Madhlopa A. 2006) también el efecto del ingreso de agua fría sobre la estratificación (Jordan et. al. 2006) y se ha modelado mediante trnsys la distribución de temperatura en tanques. Johannes K et. al. ( 2005)

### **DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL EQUIPO**

Para el equipo que aquí se presenta, se aplicó el concepto de bread box, combinado con el de concentrador cónico. Esto es: los tanques se encuentran en el interior del gabinete-colector, cuyas paredes internas reflectivas forman un ángulo de aproximadamente 30 grados con el eje del equipo. Se planteó un diseño que combine bajo costo con una vida útil prevista de por lo menos 5 años, la posibilidad de aplicar técnicas de autoconstrucción y dentro de lo posible, materiales reciclados.

Como tanques se emplearon baldes de aproximadamente 25 litros de capacidad, de polietileno de alta densidad de color negro, con tapa negra, reciclados de aceite lubricante. Las conexiones se realizaron en cañerías de polipropileno roscado, con bridas del mismo material y para las cañerías de entrada y salida se emplearon caños de polietileno negro, a pesar de no estar recomendados para agua caliente, ya que se trataba de conexiones provisorias, solo para los ensayos.

En la tabla 1 se muestran medidas de absorbancia de muestras del material de los baldes, junto a las de otros materiales aplicables para este tipo de equipo. Estas determinaciones se realizaron en el laboratorio de INENCO con esfera integradora LI-Cor y sensor de radiación LI-250, como se describe en Echazú et. al. (2000).

Material	Absorbancia
Balde negro (polietileno de alta densidad)	0,953
Bidón azul ( Polietileno de baja densidad )	0,829
Lona de PVC negra	0,955
Goma negra (cámara)	0,937
PET verde (botella 7Up)	0,911
Polietileno bicapa lado negro	0,950
Polietileno bicapa lado blanco	0,331

*Tabla 1: Absorbancia del plástico de los tanques y de otros materiales similares.*

<sup>1</sup>Parcialmente financiado por el Consejo de Investigación de la Universidad Nacional de Salta

Con el mismo instrumental se midió la reflectividad del foil de aluminio y la transmitancia de la cubierta de policarbonato.

El gabinete es de chapa galvanizada cal. 28 y la cubierta de policarbonato alveolar de 4 mm. La aislación térmica es de dos capas, la exterior es poliestireno expandido de 12 Kg/m<sup>3</sup> de densidad y 30 mm de espesor y la interna es espuma de polietileno de 5 mm recubierta con papel de aluminio que forma la superficie reflectiva.

Las dimensiones del gabinete de 1,5 m de superficie colectora, permiten colocar en el interior dos, tres o cuatro tanques de 25 litros de modo que las relaciones vol/area que pueden ensayarse son: 33, 50 y 66 Lts/m<sup>2</sup>. Asimismo, es posible cambiar la cara interna reflectiva del gabinete, para comparar experimentalmente diferentes materiales.

La figura 1 muestra un corte transversal, mientras que en las fotografías 2, 3 y 4 se ve el equipo ensayado y el sistema de medidas.

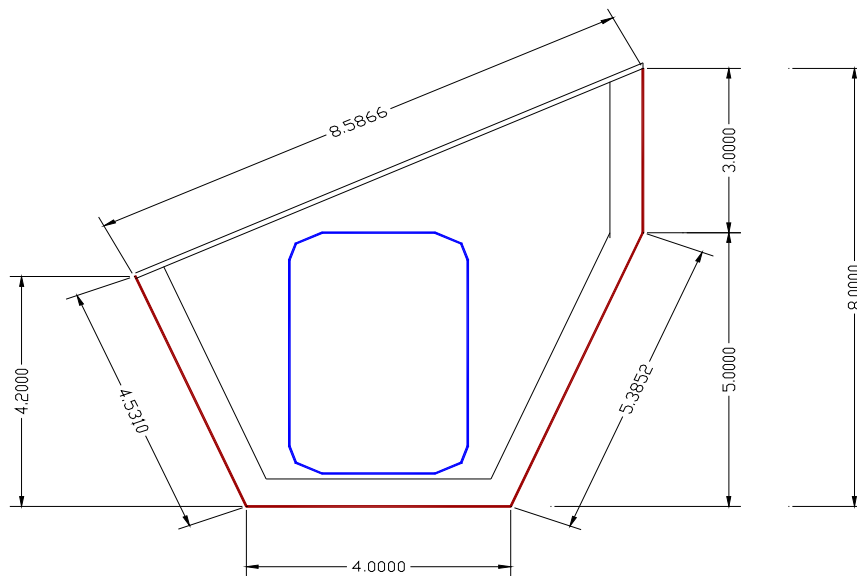


Figura 1: Vista en corte del equipo ensayado



Figura 2: Fotografía mostrando el interior del equipo



Figura 3: Datalogger y conexiones



*Figura 4: Fotografía del colector - acumulador*

## **INSTRUMENTACIÓN**

Para las medidas de temperatura se emplearon termocuplas tipo T conectadas a un datalogger Adam 6018M y la radiación solar global en el plano del colector se registró con un solarímetro LI - 250 contrastado con un patrón Eppley PSP. La toma de datos se programó en un dato por minuto para las medidas diurnas y en un dato cada 5 minutos para las nocturnas.

Se conectaron dos termocuplas para la temperatura ambiente, dos para la del aire del gabinete y tres en un tanque. Las termocuplas del tanque se ubicaron a tres alturas distintas: a 500 mm del fondo, en el centro y a 500 mm de la parte superior en uno de los tanques.

Para medir el volumen de las extracciones, se empleó un balde de plástico igual a los del equipo, contrastado con una probeta graduada.

## **RESULTADOS EXPERIMENTALES**

Se presentan resultados de mediciones de invierno en Salta. La figura 5, correspondiente a un día con el cielo despejado desde la mañana hasta el mediodía, muestra para un período de 4 horas, la evolución de las temperaturas y de la radiación solar.

Al iniciarse las medidas, la cubierta del colector estuvo tapada para evitar el ingreso de radiación solar y se destapó a las 11:30 hs. Se observa el aumento brusco de la curva correspondiente a la radiación solar. Inicialmente todas las termocuplas indican valores de temperatura cercanos a la del ambiente. Como es predecible, la temperatura del aire en el gabinete sube rápidamente, mientras que la del agua lo hace en forma mas lenta y la ambiente sube unos pocos grados.

Desde las 14:03 hasta las 14:34 se extrae agua a régimen constante, completando 40 litros, esto es algo menos que la capacidad total del equipo. Nótese el descenso mas pronunciado de la temperatura en la parte superior del tanque, donde está conectada la llave de extracción.

A partir de las 14:30 las temperaturas vuelven a elevarse, pero con una pendiente menor, debido a la disminución de la radiación por nubes.

No obstante, a las 15 hs en que se detuvo la experiencia, la temperatura promedio del agua superaba los 40 C

En la figura 6 se muestran el descenso nocturno de las temperaturas. Como el período es de 12 horas, desde las 6 de la tarde a las 6 de la mañana, se tomaron datos cada 5 minutos.

La curva inferior que representa la temperatura ambiente, muestra un descenso de 15 C, típico de la amplitud térmica de Salta.

La temperatura media del tanque descendió desde algo mas de 60 C hasta 30 C en las 12 horas y la del aire del gabinete se mantuvo cercana al promedio entre la del tanque y la ambiente.

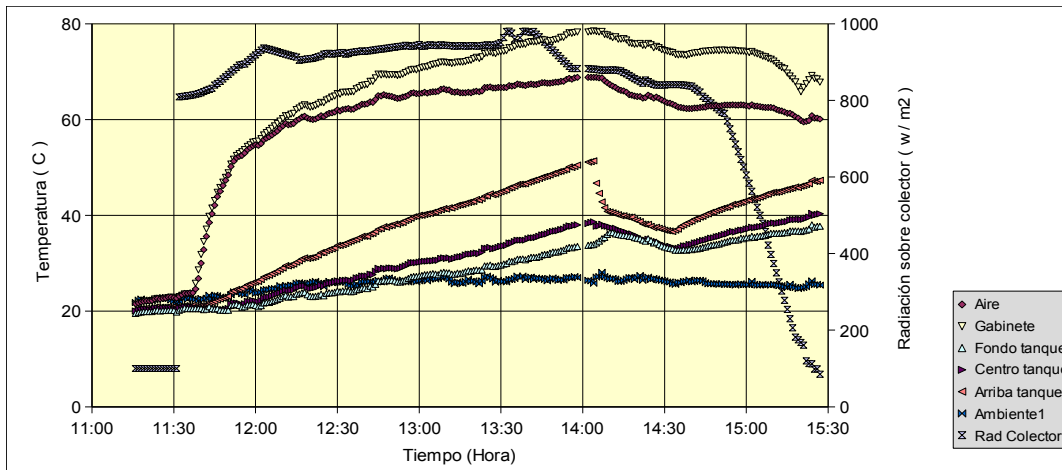


Figura 5: Evolución de temperaturas y radiación solar alrededor de mediodía

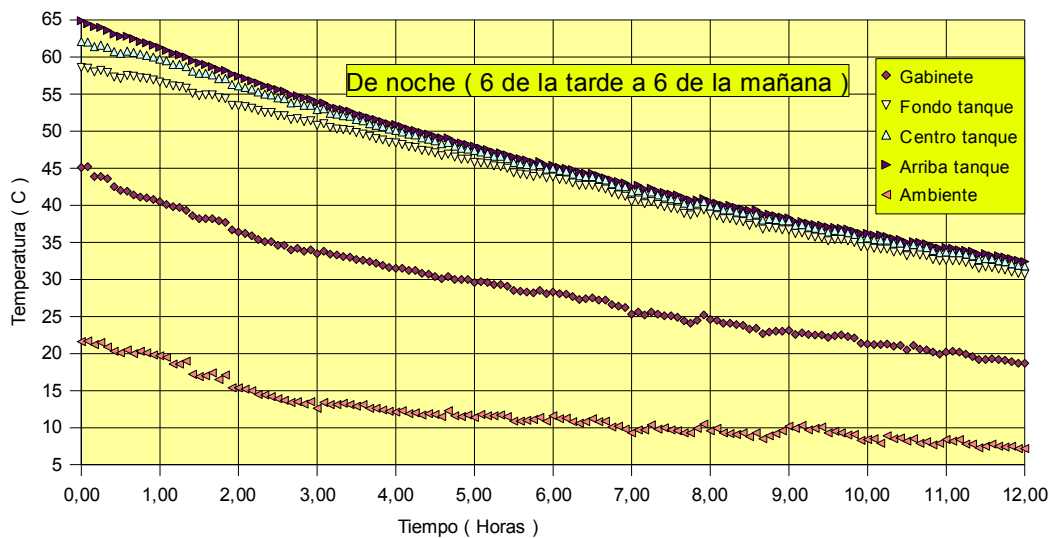


Figura 6: descenso nocturno de temperaturas

### SIMULACIÓN CON PLANILLA DE CÁLCULO

Se planteó un balance térmico simplificado, que volcado en una planilla de cálculo junto a los datos experimentales permitió calcular los parámetros del sistema, en forma bastante sencilla y con una aceptable precisión. En la planilla se ingresaron como variables con un nombre definido, las dimensiones del equipo, las propiedades conocidas de los materiales, las temperaturas iniciales y un paso de tiempo para el cálculo.

En una primera etapa se calculan los factores de forma, las áreas características, las masas, las relaciones volumen superficie, etc. Luego, en la planilla, la primera columna corresponde al tiempo y en las restantes se copiaron los datos experimentales: radiación solar, temperatura ambiente, temperaturas del aire y del agua.

En la columnas siguientes, las etapas de cálculo para el balance que puede plantearse con distintos niveles de complejidad. Por ejemplo, para las pérdidas puede usarse un coeficiente global para todo el equipo o uno para el gabinete y otro para la cubierta. Para simplificar el cálculo se englobaron los intercambios radiativos y convectivos. Se consideraron los valores de todos los parámetros, como independientes de la temperatura.

En cada paso de tiempo se calcula a partir de la energía ingresada, la temperatura final del agua (promedio) y con este valor se calcula la energía ingresada para el paso siguiente. Las conocidas herramientas incorporadas en la planilla de cálculo para expandir las fórmulas, facilitan la integración en el tiempo. (Shoichiro-Nakamura, 1992) La planilla de cálculo empleada es Open Office Calc Ver 2.0

En la figura 7 se muestra la pantalla de ingreso de datos y en la 8 una salida de la temperatura del agua, junto a la curva experimental correspondiente. El conjunto de datos es el mismo de la figura 5 y los valores de los parámetros se muestran en las primeras filas.



depan - OpenOffice.org Calc

Archivo Editar Ver Insertar Formato Herramientas Datos Ventana Ayuda

Albany

03-108

F23 f(x) Σ = =Abst\*Fcon\*RFI\*Trub\*D23\*(#C\$18-#E\$18)

DIMENSIONES DEL EQUIPO															
Ancho caja	Profundidad caja	Altura media caja	Factor de forma caja	Factor interno caja	Ancho tanque	Profundidad tanque	Altura tanque	Factor de forma tanque	Ángulo cubierta	Área interna caja	Espesor aislante	Espesor cubierta	Espesor tanque	Número de tanques	
Xcaja	Ycaja	Zcaja	Fcaja	Foon	Xtanque	Ytanque	Ztanque	Ftanque	Angcub	Acaja	Daisi	Dcubi	Dtanq	Ntanq	
2,000	0,900	0,500	0,875		14	0,280	0,280	0,370	0,7854	0,349	2,869	0,040	0,004	0,003	2
m	m	m	adim	adim	m	m	m	adim	rad	m2	m	m	m	adim	
PARÁMETROS															
Cepe agua	Densidad agua	Transmitancia cubierta	Absr tanque	Reflectancia interior	Cond aislante	Cond cubierta	Cond tanque	Coef tanque	Coef caja	Extrac.	Coef global tanque	Coef global caja	Coef global cubierta	Coef global tanque	
Cpag	Deagua	Trcub	Abst	Rfl	Kaist	Kcubi	Ktanq	htanq	hcax	Xtrc	Utanq	Ucax	Ucubi	Utanq	
4182	1000	0,800	0,900	0,900	0,036	0,010	0,170	15,00	12,00	40,000	10,00	10,00	0,000	1860	
J/Kg C	Kg/m3	adim	adim	adim	w/mC	w/mC	w/mC	w/m2 C	w/m2 C	Kg	w/m2 C	w/m2 C	w/m2 C	S	
TEMPERATURAS INICIALES															
agua	aire	caja	placa	Paso de tiempo											
Teini	Taire	Tcaja	Ttanque	Dete											
20	20	20	20	37,1 37,93 0,84											
C	C	C	C												
CÁLCULOS INICIALES															
Volumen tanque	Masa de agua	Área de colección cubierta	Área de caja	Área de tapas	Área de colección tanques	Relación Mas/area	Relación cub/tanque	Q extraido por paso	Eficiencia promedio						
0,023	45,566	1,574	4,113	0,123	0,651	2,419	28,942	434,69	18,36						
m3	Kg	m2	m2	m2	m2	adim	Kg/m2	W							
TABLA															
hora	Tiempo (seg)	Rad (W/m2)	Tamb (C)	Q entrada tapas (W)	Q entrada lados (W)	Q entrada total (W)	E entrada (J)	Q salida caja (W)	Q cubierta (W)	Q extrac. (W)	Q salida total (W)	E salida (J)	E entr - E salida (J)	T tanque simulada (C)	T tanque medida (C)
22	11:15	0	20	0,89	302,31	303,7	18222	0	0	0	0	0	18221,91	20,10	19,8
23	11:16	0	20	0,96	302,31	303,79	18227	-10,75	-11,43	0	-22,18	-1331	18558,12	20,20	20,15
24	11:17	80	20	1,06	294,91	295,98	17759	-10,37	-11,03	0	-21,4	-1284	19042,44	20,30	20,2

Figura 7: Pantalla inicial de la planilla de cálculo

En la última columna se calcula la eficiencia promedio para cada paso de tiempo. Para el conjunto de datos que se presentan, las eficiencias calculadas estuvieron entre 0,20 y 0,24.

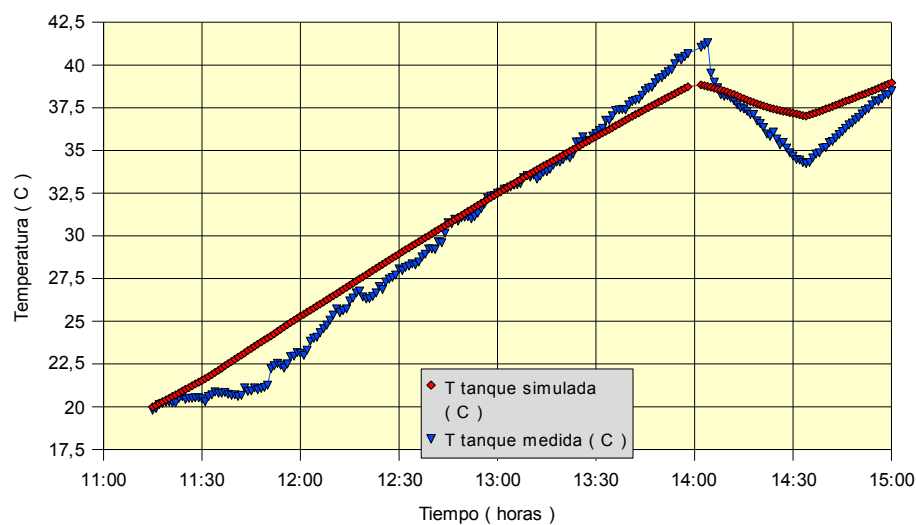


Figura 8: Temperatura promedio del agua, medida y simulada con planilla de cálculo

### SIMULACIÓN CON SIMUSOL

Paralelamente se procuró representar el comportamiento del sistema mediante una simulación con Simusol. Para ello, siguiendo los procedimientos habituales, se diseñó el circuito térmico con el programa DIA que se presenta en la figura 9.

En la simulación se consideraron 9 nodos ubicados en el aire exterior e interior del gabinete del colector, en el agua dentro de los tanques, en la tapa y paredes de los mismos y en las paredes interna y externa del gabinete.

Para simplificar el circuito se considera un solo tanque con el volumen total de agua, manteniendo la relación entre el área de intercambio (área del tanque) y el volumen contenido. Paredes laterales y fondo del tanque se integran en un solo nodo (Nº 7)

identificado como tanque y se desprecian las conducciones a través de los mismos. La única acumulación considerada es la del agua.

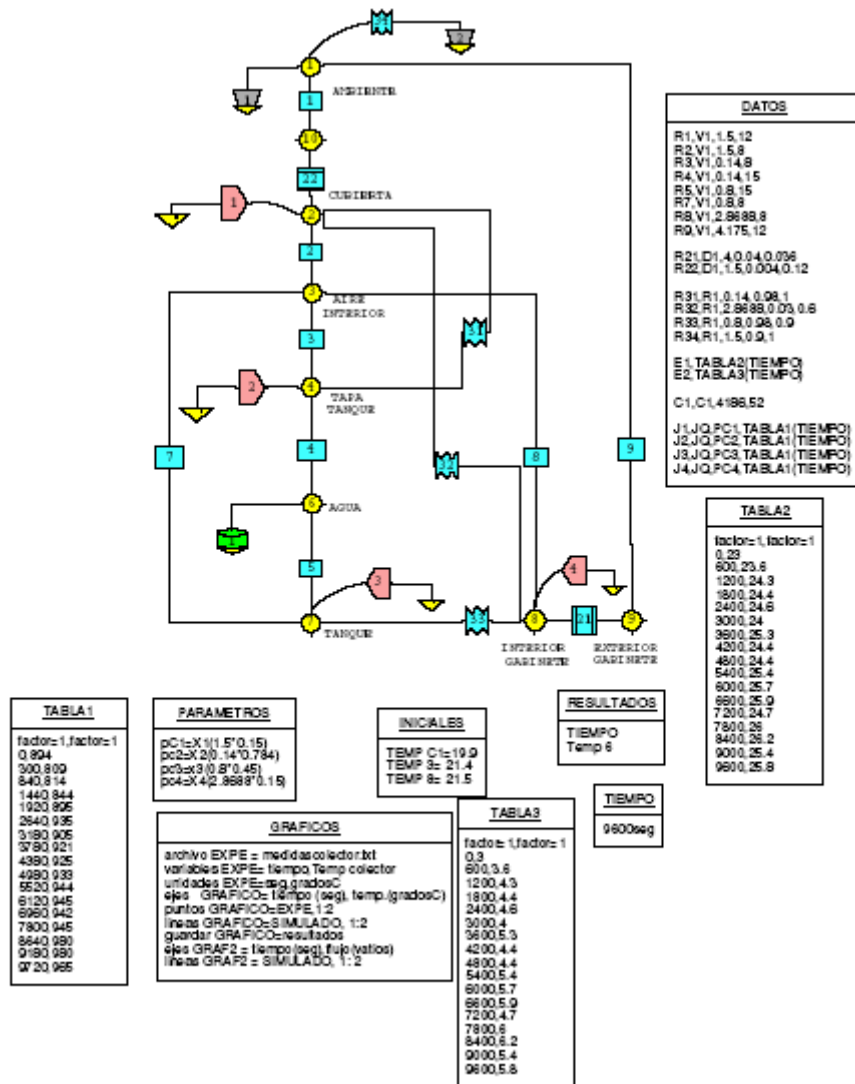


Figura 9: Diagrama para la simulación con simusol - sceptra

El gabinete y la cubierta estuvieron totalmente sellados por lo cual se considera que el sistema es totalmente hermético, sin filtraciones ni intercambios de aire.

En la tabla DATOS se ingresan los parámetros de cálculo del circuito. Para el cálculo de los intercambios convectivos (resistencias) se ingresan las áreas y los coeficientes convectivos a los que se les asignaron valores de 12 en intercambios con el ambiente, 8 en el interior del gabinete. Para los intercambios entre el agua y el recipiente (R5V1) el área es la total de paredes y fondo con un coeficiente convectivo de 15. Todos estos valores se tomaron de experiencias anteriores (Quiroga 2004) realizadas con cocinas solares, dada la similitud de los sistemas. Se considera que el valor de todos los parámetros es independiente de la temperatura.

La temperatura ambiente medida durante la experiencia se ingresa en Tabla 2 (E1 en DATOS) y E2 representa la temperatura de cielo. Los intercambios radiativos (R,R1) incluyen los de las paredes del tanque con las paredes del gabinete englobadas en el nodo 8

y al efecto se considera sólo el área de paredes laterales (sin el fondo). También se incluyen los intercambios radiativos entre la tapa del tanque y los del gabinete con la cubierta del mismo. Para cada caso en la tabla datos se incluyeron el área, la emisividad de los materiales correspondientes (tomada de bibliografía) y un factor de forma.

Las conducciones (R,D1) de calor se consideran las que se producen a través de las paredes del gabinete y de la cubierta.

Los ingresos de energía al sistemas (J,JQ) están representados por la radiación solar incidente sobre la cubierta (J1 medida), sobre la tapa del tanque (J2), paredes del tanque (J3) e interior del gabinete (J4). Al carecer el programa de herramientas para el cálculo de la fracción de la radiación solar total que incide en cada área según la geometría solar y la de los cuerpos, se efectúa una aproximación de la misma que se incluye a través del empleo de coeficientes incluidos en la tabla PARAMETROS.

Puesto que la simulación se corrió para un período alrededor del mediodía, estos parámetros se consideraron constantes. Los parámetros en todos los casos incluyen el área total del cuerpo considerado, la transparencia de la cubierta (medida) y la absorbancia de radiación de la superficie considerada; en las paredes del tanque se incluye un porcentaje de la radiación total incidente que recibe por reflexión desde las paredes del gabinete. Estos parámetros se relacionan con la radiación total incidente sobre la cubierta medida incluida en Tabla 1.

En iníciales se ingresaron las temperaturas medidas del sistema al inicio de la experiencia.

El tiempo total de la simulación, en la corrida que se muestra, fue de 2 horas 40 minutos incluyendo solamente el ascenso de temperatura del sistema en un período de calentamiento sin considerar extracciones ni enfriamiento nocturno.

La figura 10 muestra los resultados obtenidos en el gráfico de salida del programa, en él se incluyen en puntos las temperaturas medidas y en línea llena las obtenidas en la simulación.

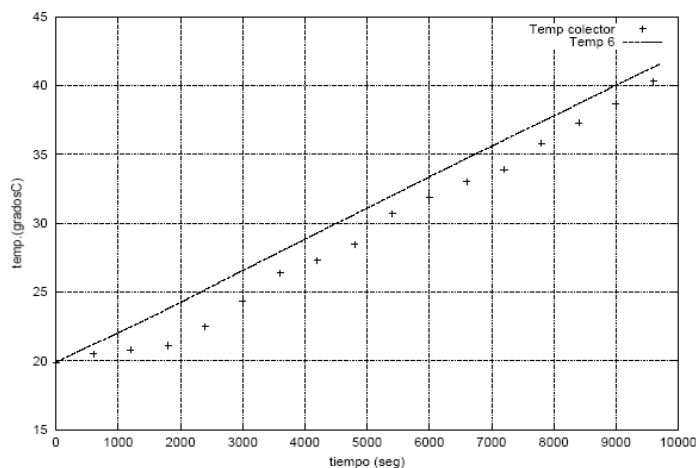


Figura 10: Temperatura promedio del agua, medida y simulada con simusol - sceptre

## CONCLUSIONES

Se ha diseñado y estudiado tanto en forma experimental como mediante simulaciones, un colector solar integrado de bajo costo y técnica constructiva sencilla. El equipo alcanza temperaturas superiores a los 60 C a mediodía con la radiación solar que recibe un día despejado de invierno en Salta.

Las dos simulaciones arrojan resultados cercanos a los datos experimentales, lo que permite predecir el comportamiento del sistema, con el objeto de perfeccionarlo o de estudiar otros similares que podrían proponerse.

Resta ensayar el equipo en diferentes condiciones climáticas, para una mayor generalidad de los resultados y asimismo, mediante ensayos prolongados, estudiar la vida útil de los materiales.

## REFERENCIAS

Echazú R., Cadena C. Saravia L.(2000), Estudio de Materiales Reflectivos para Concentradores Solares, AVERMA, Vol 4 No 1 ISSN 0329-5184

Esteves A, Buenanueva F. (2005 “ Calefón Colector Acumulador Unificado de Bajo Costo” AVERMA, Vol 9 No 1 ISSN 0329-5184

Fanney A. H. and Klein S. A.(1987) “ Comparison of Experimental and Calculated Perfomance of Integral Collector-Storage Water Heaters “, Solar Energy Vol 38, No 5

Fasulo A., Follari J. Et. al. (2001), “ Mejoras Introducidas a un Colector Solar Acumulador Integrado “ AVERMA, Vol 5 No 1 ISSN 0329-5184

Garg H. P.and Usha Rani, S. E. (1982) “ Theoretical and Experimental Studies on Collector/Storage Type Solar Water Heater “, Solar Energy Vol 29, No 6

Hobbs,D. (2003) , “Solar Drum Oven”, www.barefootengineering.com

Johannes K., Fraisse G. Et al, (2005), “Comparison of Solar Water Tank Storage Modelling Solutions” Solar Energy 79 (2005) 216–218

Jordan U., Furbo S. (2006) "Thermal Stratification in Small Solar Domestic Storage Tanks Caused by Draw-Offs" Solar Energy 78 (2005) 291–300

Lema A., Barral J. Et. al. (1999) "Análisis Teórico del Comportamiento de un Colector Acumulador Integrado Tubular" AVERMA, Vol 3 No 1 ISSN 0329-5184

Madhlopa A., Mgawi R. Taulo J (2006), " Experimental Study of Temperature Stratification in an Integrated Collector–Storage Solar Water Heater With Two Horizontal Tanks ", Solar Energy 80 (2006) 989–1002

Quiroga M., Saravia L. (2004) "Simulación del Comportamiento de Cocinas Solares. La Variación con el Tamaño. Cd.Rom de Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente. Vol. 8, nº 55. ISSN 0329-5184

Shoichiro-Nakamura (1992): " Métodos numéricas aplicados con software ". Ed Prentice Hall Hispanoamerica, S.A.

Saravia, Et. al. (2005) " Diseño y Ensayo en Banco de Pruebas de un Colector para Agua con CPC ", AVERMA, Vol 9 No 1 ISSN 0329-5184

Tacchi V. (2004) "Dispositivos Solares para Calentar Agua: Nuevo Prototipo Experimental " AVERMA, Vol 8 No 1 ISSN 0329-5184

Tripanagnostopoulos Yand. Yianoulis P (1992). " Integrated Collector-Storage Systems With Suppressed Thermal Losses ", Solar Energy Vol 48, No 1

Welford W. T. ,Winston R. (1989), High Collection Nonimaging Optics, Academic Press, San Diego, CA.

**ABSTRACT:** This paper deals with the design, experimental measurements and numeric simulation of a low cost integral collector-storage solar water heater. The equipment was tested with a data logger. Two simulations were carried out, one on a spreadsheet and the other with simusol-sceptre. Preliminary results and conclusions are presented.

**Keywords:** solar energy, hot water, integral solar collector, breadbox