



Universidad Nacional del Nordeste
Facultad de Ciencias Exactas y Naturales y Agrimensura

**Proyecto PI455 – ESTUDIO Y CARACTERIZACION DE UN
COLECTOR SOLAR PLANO CONSTRUIDO CON MATERIALES
PLASTICOS DE DESCARTE**

INFORME FINAL

Responsable del Proyecto:

MSc. Arturo Busso

Personal Investigador:

Ing. Qco. Arturo Aeberhard

Alumnos Pasantes:

Esteban Vicente Forastier

Esteban Palasczuk

Juán Carlos Scaramellini Burgos.

<i>AGRADECIMIENTO</i>

Se desea agradecer a la Secretaria de Ciencia y Técnica de la Universidad por el apoyo brindado mediante los subsidios otorgados los cuales, hicieron posible el cumplimiento de los objetivos generales propuestos.

- INDICE -

ANTECEDENTES y FUNDAMENTOS	Pág. 2
OBJETIVOS	4
CRONOGRAMA ORIGINAL	4
DESARROLLO	
1. Metodología utilizada	5
2. Experiencias realizadas	
2.1. Relativas al calefón solar	5
2.2. Relativas al colector	9
2.3. Modelización	18
ENSAYOS PENDIENTES	23
CONCLUSIONES	24
PRODUCCIÓN	
1. Difusión	25
2. Transferencia	25
3. Formación de RRHH	26
REFERENCIAS	27
ANEXO I – Evaluación Tecno-Económica del sistema propuesto	29
ANEXO II – Detalles constructivos del colector plástico	33
ANEXO III - Diagrama de Flujo y archivo de simulación TRNSYS	36

ANTECEDENTES y FUNDAMENTOS

El uso de la energía solar en sus diferentes modalidades; secado, calefacción, calentamiento, etc.; reúne la mayoría de las condiciones buscadas en una fuente de energía; es ecológica, gratuita, inagotable y simple de utilizar; pero presenta la desventaja de ser dispersa y no siempre barata de implementar.

Actualmente los calefones solares ya son tecnologías bien desarrolladas y probadas al punto que, en algunos países su uso es promovido por medio de legislación adecuada pensada en el ahorro energético y preservación del medio ambiente. Existen además, tanto en el ámbito nacional como internacional, equipos comerciales para el calentamiento de agua para uso domestico de calidad técnica variada.

En estos equipos los costos de mantenimiento son muy bajos y con durabilidad típica superior a los 10 años, sin embargo, el costo de inversión de capital inicial es alto; USD1000-USD3000 para sistemas típicos de tipo familiar; con retornos de entre cuatro a siete años dependiendo del tipo de energía reemplazada (electricidad o gas).

Dados estos números y teniendo en cuenta las características socioeconómicas de nuestro país, si se quiere promover el uso de este tipo de sistemas en el ámbito local, haciéndolos también accesibles a niveles poblacionales de recursos medios y bajos, se hace necesario un abaratamiento de los costos de inversión de capital.

A pesar del grado de desarrollo de esta tecnología, nuevas ideas se ponen en práctica constantemente tendientes a la reducción de costos mediante la utilización de nuevos diseños y el uso de nuevos materiales.

En este contexto, el GIDER – Grupo de Investigación de Energías Renovables del Departamento de Termodinámica y Máquinas Térmicas de la Facultad de Ingeniería, comenzó a incursionar durante el año 1998 en el calentamiento de agua utilizando materiales plásticos de descarte para la construcción del módulo colector, idea tomada por el director del grupo durante su visita a la Plataforma Solar de Almería, España.

Así, durante los primeros meses del año 1998, se realizaron ensayos experimentales preliminares con un sistema compuesto por un colector plástico de un solo ramal y tanque de acumulación de 10 lts. Posteriormente, basados en los datos relevados, se realizó un análisis de viabilidad técnico-económica demostrándose la potencialidad de tal configuración para funcionar como calefón solar de bajo costo (ver Anexo I).

También durante el año 1998, el grupo de investigación se encontraba involucrado en la búsqueda e implementación de soluciones que posibiliten el mejoramiento de la calidad de vida en áreas rurales dispersas haciendo uso de fuentes energéticas no convencionales presentes en el lugar; biomasa, solar, eólica, hidráulica, actividades estas, enmarcadas en el cronograma correspondiente al último año del PI 323-Sub-proyecto 3 “Desarrollo Rural Sustentable Mediante Energización con Energías Renovables no Convencionales”, sub-proyecto bajo la responsabilidad ejecutiva del GIDER.

Debido a las características del núcleo poblacional objeto del proyecto, cualquier solución propuesta tendiente al aprovechamiento de fuentes renovables de energía, hacia necesario un abaratamiento de costos para promover el uso de este tipo de tecnologías en grupos poblacionales de recursos medios, bajos y en especial de áreas rurales.

Los resultados alentadores obtenidos con el calefón plástico ensayado, la búsqueda de alternativas para adaptar tecnologías no convencionales al medio rural haciéndola simple y de bajo costo y, la inminente finalización del PI323, promovieron la decisión de encarar un estudio más exhaustivo acerca de las bondades y defectos del sistema propuesto.

De esta forma, a fines del mismo año se formaliza, ante la Secretaría de Ciencia y Técnica de la UNNE, la presentación de la propuesta de proyecto “Estudio y Caracterización de un Colector Solar Plano construido con Materiales de Descarte” con una duración de dos años a partir del 1/3/1999, propuesta que, luego de haber sido sometida a evaluación interna y externa, es homologada por dicha Secretaría recibiendo el código interno PI455.

Por todo lo anteriormente expuesto, el presente documento representa el informe final correspondiente al citado proyecto.

En lo que sigue se transcriben, a modo de referencia, los objetivos planteados al momento de la formulación del proyecto y el cronograma original acerca de las metas propuestas. Luego, se exponen los diferentes ensayos llevados a cabo y los ensayos aún pendientes de realización respecto a lo planteado en el cronograma original. Por último se presentan las conclusiones obtenidas a partir de todo lo realizado, la producción alcanzada en sus diferentes formas, difusión, transferencia y formación de recursos humanos

OBJETIVOS

Los objetivos del proyecto fueron los siguientes:

GENERAL:

Estudiar y caracterizar un colector solar de geometría plana construido con materiales plásticos de descarte para ser utilizado en un sistema de calentamiento de agua de bajo costo.

PARTICULARES:

1. Profundización del conocimiento sobre propiedades de los materiales plásticos.
2. Tipificación y cuantificación de las pérdidas térmicas del sistema.
3. Modelización numérica del sistema.
4. Evaluación técnico-económica de un prototipo de calefón solar.
5. Conclusiones.

CRONOGRAMA ORIGINAL

Tareas	Año primero		Año segundo	
	1er. sem.	2do. sem.	1er. sem.	2do. Sem.
Revisión y actualización de bibliografía especializada	xxx			
Ensayo y evaluación del modelo experimental	xxxxx	xxx		
Corridas de simulación		xxxxx		
Ensayos de cubierta transparente (envejecimiento y suciedad)	xxxxx	xxxxx		
Ensayos de influencia del viento		xxx		
Ensayos con colector optimizado y tanque de almacenamiento colector			xxxxx	
Evaluación de resultados y estudio de costos				xxx
Informe final				xx
Publicación de resultados				xx

DESARROLLO

1. Metodología utilizada

El trabajo tuvo como marco teórico el proceso hipotético-deductivo, realizándose trabajos de campo, en laboratorio y en gabinete.

El trabajo se inició con una investigación bibliográfica, la cual se centró en la búsqueda y recopilación de información sobre tipos y datos técnicos acerca de colectores para el calentamiento solar de agua, propiedades de materiales plásticos utilizados como cubiertas transparentes, tipos de tanque de almacenamiento y modelización de sistemas por termosifón.

Esta información permitió realizar un mejor diseño del colector además de, delinear con mayor detalle las experiencias a realizar tendientes a la caracterización del colector propuesto.

2. Experiencias realizadas

2.1. Relativas al calefón solar

Objetivos específicos:

- Diseñar y construir un calefón solar de bajo costo para el calentamiento de agua de uso doméstico.
- Realizar los ensayos necesarios para determinar la performance del sistema.

Con estos objetivos en mente, se comenzaron las tareas realizándose determinaciones experimentales suplementarias con el sistema de un solo ramal mostrado en la fig.1., determinaciones estas, necesarias para encarar el diseño del prototipo de calefón solar a evaluar.

En el diseño del prototipo a evaluar se tomaron en cuenta las leyes físicas fundamentales que rigen los procesos de transferencia de calor en sus diferentes formas (radiación, convección, conducción), las propiedades térmicas de los materiales a emplear y modelos básicos de sistemas para el aprovechamiento de la energía solar.

Se efectuaron los cálculos correspondientes siguiendo la metodología tradicional para tal fin^{2,3} y orientada hacia un sistema constituido por 5 ramales colectores y 50 lts de capacidad de tanque de acumulación. El Anexo II expone detalles de la construcción de los diferentes componentes del prototipo de calefón.

La fig.2.- muestra el prototipo resultante. El colector estaba formado por cinco ramales en paralelo, compuestos cada uno de ellos por un tubo de PVC negro de $\frac{3}{4}$ " de 2m de longitud como material absorbente de la radiación y botellas de gaseosa de 2 lts. de PET liso como cubierta transparente. El tanque de acumulación se construyó sobre la base de un tanque de fibrocemento comercial de 100 lts. La entrada de agua caliente proveniente del colector se ubicó a mitad de la altura del tanque y la salida de agua fría (retorno al colector) en su base, según se aprecia en la misma figura. La circulación del fluido era natural, por termosifón,

habiéndose prestado particular atención al aislamiento térmico del tanque, cañerías de retorno y ramales principales de alimentación de los tubos colectores a fin de minimizar transferencias de calor hacia o desde el medio ambiente. Respecto a este ultimo punto, el tanque fue revestido con una capa de poliuretano expandido de 2" de espesor, las cañerías de retorno se enfundaron en tubos aislantes de espuma de goma y recubiertas luego con una capa de papel aluminizado.



Fig.1. Sistema de un solo ramal y tanque



Fig.2. Prototipo de 5 ramales

Todo el dispositivo fue montado en la terraza del Departamento de Termodinámica de la Facultad de Ingeniería, sobre una estructura metálica desarmable, como soporte para el tanque y colector, que permitía la regulación del ángulo de inclinación de este ultimo elemento. El colector se posicionó formando un ángulo de 37° , orientado hacia el norte y con solo 60 lts. de agua en el tanque, lo que determinó una distribución de la masa de agua en el sistema de 12 lts./ramal.

Al sistema se le adosaron sensores de temperatura a la entrada y salida del colector y dentro del tanque en tres puntos distintos a diferentes alturas. Además, se montaron dos sensores de radiación solar, uno, de tipo fotovoltaico, en el plano paralelo al colector y otro en el plano horizontal de tipo EPPLY SPS. Originalmente, la idea era conectar todos estos sensores a un sistema de adquisición automático de datos acoplado a una PC y realizar un monitoreo continuo de los parámetros antes mencionados, a fin de cuantificar pérdidas y ganancias de energía a lo largo del día, determinar el rendimiento actual del sistema y de sus distintos componentes y detectar posibles mejoras a introducir en el diseño.

Desafortunadamente, al momento de tener todo el montaje listo y por cuestiones técnicas, los módulos de adquisición de datos no estaban operacionales por tanto se optó por

realizar mediciones diurnas en forma manual instalando dentro del tanque termocúplas de tipo K, ubicadas una, en la zona superior, y la otra en el fondo del mismo.

Las lecturas de temperatura ambiente se realizan con un termómetro de mercurio de $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $100\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$. Debido a que la toma de datos se realizó de manera manual, la frecuencia de la misma fue bastante irregular. No obstante ello, se trato en todo momento de mantenerla en aproximadamente cada 30 min., excepto en ocasiones especiales tal como la ilustrada en la fig.3. (intervalo entre las 14:00 y 17:00 hs).

Las determinaciones de velocidad de viento se realizaron solo en forma cualitativa ya que no se pudo montar el anemómetro durante el periodo medido. De todas formas, dichas observaciones sirven como referencia para relacionar la posible influencia del viento en las pérdidas térmicas del sistema.

La fig.3 presenta curvas de evolución de temperatura e intensidad de radiación solar obtenidas durante uno de los días medidos. La temperatura del agua se tomó en dos puntos del tanque acumulador, a 10 cm por debajo de la entrada del agua caliente al tanque, *Tsup*, y a 10 cm por encima del fondo del tanque, *Tinf*. El registro de intensidad de radiación solar se realizó en forma automática tanto en plano horizontal, *Hor*, como inclinado del colector, *Incl*.

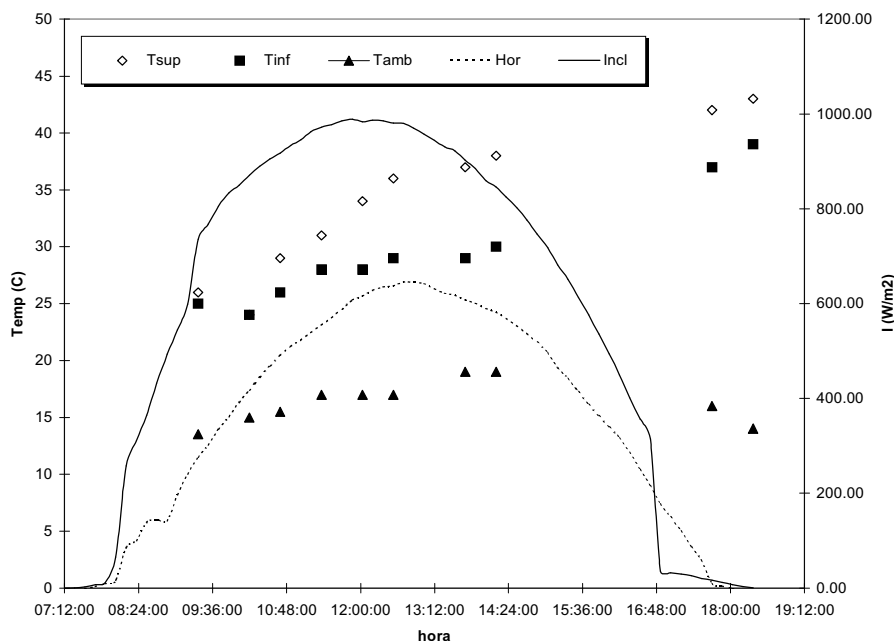


Fig.3. Evolución de las temperaturas del agua y ambiente y de Intensidad de radiación solar incidente.

La Tabla 1. transcribe las condiciones ambientales representativas reinantes durante los días de registro así como los datos obtenidos que se presentan gráficamente en la Fig.4. Las temperaturas de agua y ambiente son temperaturas medias y la intensidad de radiación solar es la máxima registrada durante el día del ensayo.

Fecha	I_max (W/m ²)	T_agua	T_amb	Día	Viento
14/05/99	962	45	22	Claro	Calmo
21/05/99	986	41.5	19.5	Claro	Ventoso
31/05/99	989	42	16.3	Claro	Moderado

Tabla 1.- Condiciones ambientales reinantes y datos registrados

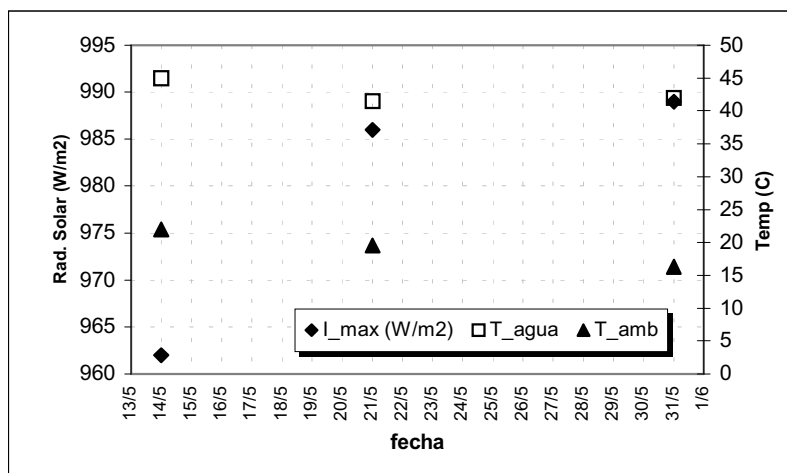


Fig.4.- Valores máximos de Intensidad de radiación solar y temperaturas medias registradas.

No obstante los pocos datos registrados en ese momento, la tendencia de estos (Fig.4) permitió inferir algunas conclusiones interesantes. Se observa en la fig.4 que a pesar de que la radiación solar, I , aumentó, la temperatura media del agua en el interior del tanque disminuyó. Este efecto pudo haber sido debido a mayores pérdidas térmicas por acción combinada de temperatura ambiente y viento. Al ser los datos de viento cualitativos, la evaluación de su influencia se torna difícil no siendo así el caso de la temperatura ambiente. Se nota que la temperatura media ambiente disminuyó progresivamente, siendo el día 31/05 el mas frío pero con mayor radiación solar incidente.

Se debe recalcar también, que la masa de agua por ramal de colector aumentó de 10 lt/ramal (prototipo de una sola rama) a 12 lt/ramal en el modelo actual. Por tanto, a igualdad de condiciones de operación, esta diferencia provocaría que el sistema con menor cantidad de agua alcance una temperatura ~ 2.5 °C mayor que la que alcanzaría el otro sistema.

Este hecho, junto con una temperatura ambiente media ~ 5 °C más baja durante los ensayos, podrían ser algunas de las causas para que la temperatura media del agua alcanzada en el tanque fuera 7 °C menor que la alcanzada con el prototipo de una sola rama.

La temperatura media de agua de ~ 43 °C, indicaría que para poder satisfacer el requerimiento normal de agua caliente de 50°C, haría falta una fuente de energía suplementaria. Para solucionar esto se plantearon dos alternativas a fin de lograr una mayor ganancia de colección y aumentar así la eficiencia del calefón:

1. Dada la modularidad del colector se podría en forma sencilla y barata aumentar la cantidad de ramales.
2. Incorporar un tanque colector-acumulador⁴.

Respecto del costo total de los materiales empleados en la construcción del prototipo de calefón solar descrito, este fue de ~\$150.- Ya que se trata de una solución de tipo “hágalo Ud. mismo”, en el computo de costos no se tiene en cuenta la componente de mano de obra.

2.2. Relativas al colector

Objetivo específico:

- Caracterización del colector.

Para llevar a cabo el objetivo se realizaron una serie de experiencias tendientes a:

1. Determinar el coeficiente global de pérdidas térmicas.
2. Determinar el efecto del viento en las pérdidas térmicas.
3. Determinar la eficiencia del colector.
4. Comparación del PVC frente a otro material como absorbedor térmico
5. Ensayos sobre transmitancia de la cubierta transparente.

Evaluación de las pérdidas térmicas y rendimiento

Las tres primeras determinaciones tienen un fundamento teórico común basado en una técnica calorimétrica simple que se describe, en forma breve, a continuación.

El calor que un cuerpo entrega al ambiente o absorbe de él en determinadas condiciones, queda definido cuantitativamente por la ley de Newton^{2,5,6,7}. Según esta ley, la pérdida de calor en la unidad de tiempo es proporcional a la diferencia de temperaturas entre el cuerpo y el ambiente. Una de las condiciones que debe satisfacerse para poder aplicar esta ley, es que la diferencia de temperaturas sea pequeña, ~20°C. La otra es que el ambiente mantenga una temperatura constante.

En general toda pérdida de calor es la suma de tres procesos, convectivo, radiativo y conductivo. Si los dos últimos son despreciables, entonces la pérdida de calor se produce casi con exclusividad por el movimiento de aire alrededor del cuerpo.

En forma matemática la ley de Newton dice que:

$$\frac{dQ}{dt} = -K(T - T_{amb}) \quad (1)$$

La constante **K** depende de las propiedades de la superficie del cuerpo (grado de pulimento, extensión de la superficie expuesta, grado de limpieza, etc.).

Si ahora, por algún método se procede a suministrar energía al cuerpo, un balance energético determina que:

$$Pot = \frac{dQ}{dt} + K(T - T_{amb}) \quad (2)$$

Llamando W al equivalente en agua del cuerpo, la ec.(2) se puede describir como:

$$Pot = W \frac{d(T - T_{amb})}{dt} + K(T - T_{amb}) \quad (3)$$

Ecuación que tiene una solución de la forma:

$$T = T_{amb} + \frac{Pot}{K} (1 - e^{-\frac{Kt}{W}}) \quad (4)$$

Si al tiempo t_1 , cuando el valor de $T = T_1$ se interrumpe el suministro de energía, la ec.(3) se transforma en:

$$W \frac{d(T - T_{amb})}{dt} = -K(T - T_{amb}) \quad (5)$$

Cuya solución es:

$$T = T_{amb} + (T_1 - T_{amb}) \cdot e^{-\frac{K(t-t_1)}{W}} \quad (6)$$

Las ecuaciones (4) y (6) constituyen las bases para los cálculos que exige el método empleado.

Por todo lo expuesto, sometiendo al cuerpo a ciclos de calentamiento-enfriamiento con potencia de inyección constante y conocida y, ajustando luego los datos experimentales al modelo teórico, es posible determinar el valor de K y W .

Ahora bien, conocidos estos parámetros, se podría cuantificar la potencia de la fuente de energía (solar en este caso) y la eficiencia del proceso de transferencia de calor, con solo realizar ciclos de calentamiento y posterior ajuste de los datos experimentales.

La aplicación de este método experimental simple a un sistema dinámico como el nuestro (colector solar plástico) implica primero poder asegurar el calentamiento y enfriamiento uniforme del mismo.

Para lograr este objetivo se trabajó con el efecto combinado de dos variables; una la conductividad térmica de los materiales plásticos y la otra el caudal. Las pobres características térmicas de los materiales plásticos haría que, para un caudal lo suficientemente alto, la temperatura de salida del colector no varíe apreciablemente de la de entrada, asumiéndose el proceso de pérdida o ganancia como uniforme a lo largo de colector.

La fig.5 muestra el dispositivo experimental utilizado en los ensayos tanto de laboratorio como de campo. El circuito hidráulico estaba compuesto por un ramal colector de 2 mts. de longitud similar al descrito anteriormente. Este se colocó en todos los casos formando un ángulo de trabajo de 37° con la horizontal. De esta forma, el pequeño tanque abierto quedaba conectado a su extremo superior, cumpliendo el doble propósito de reponer cualquier pérdida de agua que pudiera producirse durante la operación del sistema y de

ventear el aire atrapado en el circuito hidráulico. La bomba de agua era del tipo de las utilizadas en equipos lavarropa, alimentada por 220V AC, de una potencia de 75 Watt a circuito cerrado y caudal de 900 Kg/h medido a circuito abierto. El calefactor consistía en una resistencia inmersa en la corriente de agua, conectada a un regulador de potencia y con una disipación máxima de 750 Watt a 220V AC. La potencia inyectada al circuito era controlada mediante el monitoreo continuo de la tensión aplicada y corriente circulante a través del elemento calefactor.

Para la medición de la temperatura, se emplearon termocúplpas de tipo K en contacto con el fluido en diferentes puntos del circuito. Se monitoreo la evolución de la temperatura del fluido en tres puntos diferentes, antes del calefactor, T_{e_cal} , a la entrada del colector, T_{ec} , y salida del mismo, T_{sc} .

Para reducir pérdidas hidráulicas y térmicas se minimizó la longitud de las cañerías de retorno y se las enfundó en tubos aislantes de espuma de goma. De esta forma, el colector quedó como único elemento para el intercambio térmico con el medio.

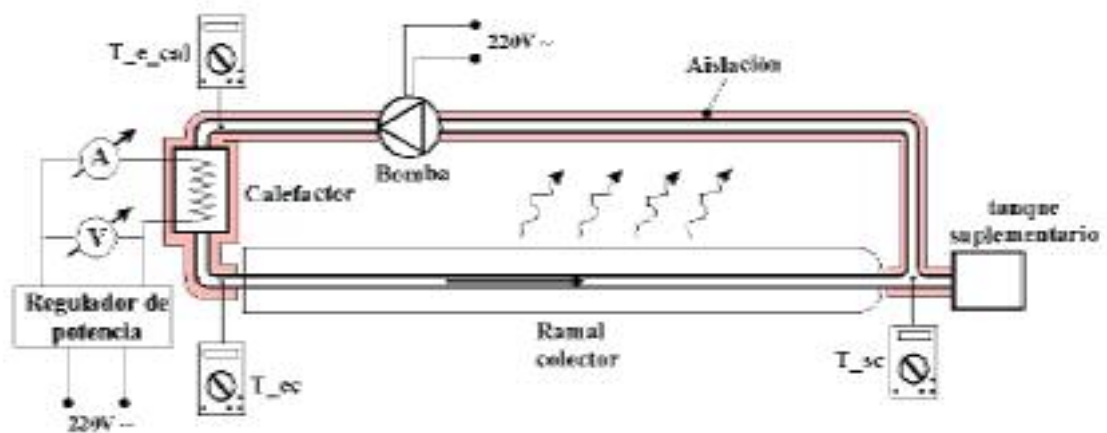


Fig.5. Dispositivo experimental utilizado en la caracterización del colector.

Las mediciones de intensidad de radiación solar se realizaron con un solarímetro fotovoltaico de tipo clase 3 (~10% error) y las de velocidad de viento con un anemómetro de hilo caliente con 0.1 m/s de apreciación.

Basados en el modelo teórico expuesto y suponiendo al colector como el único elemento del sistema a través del cual se producen las pérdidas de calor, se realizaron ensayos de laboratorio sometiendo al sistema a:

- Calentamiento sin calefactor – para cuantificar cualquier contribución adicional de energía (bomba, fricción, otros).
- Ciclos de calentamiento-enfriamiento bajo condiciones de convección natural (ambiente estanco).
- Ciclos de calentamiento-enfriamiento bajo condiciones de convección forzada (simulación de viento – ambiente con movimiento de aire). Para este caso la velocidad media a la que se realizaron las determinaciones fue de ~1m/s quedando pendientes determinación a velocidades mayores.
- Ciclos de calentamiento con energía solar como fuente térmica – ensayos para determinar el rendimiento.

Durante el tiempo de cada ensayo se registraban a cada minuto las temperaturas del fluido, temperatura ambiente y, cuando el ensayo lo requería, tensión y corriente sobre el calefactor, velocidad del aire ambiente e intensidad de la radiación solar.

Mediante el programa ORIGIN5.0, se ajustaron los datos correspondientes a la porción del calentamiento. Como función de ajuste se utilizó la ec.(4) con $P_1 = \text{Pot} / K$ y $P_2 = K / W$ como parámetros de ajuste.

Se debe destacar que todos los ciclos de calentamiento se realizaron cuidando que la temperatura que alcanzaba el sistema este siempre dentro del límite de aplicabilidad de la ley de Newton, esto es $\sim 20^\circ\text{C} > T_{\text{amb}}$.

La fig.6 presenta un ciclo típico de calentamiento-enfriamiento. En la misma se observa que la T_{sc} se mantiene en todo momento $\sim 1^\circ\text{C}$ por encima de las otras temperaturas. Se comprobó que esto se debía a un error sistemático producido por diferencias entre los instrumentos de medición ya que al intercambiar estos se revertía esta tendencia. Por otro lado, esta diferencia se encuentra dentro del intervalo de error indicado en las especificaciones del instrumento. Corrigiendo esta diferencia aparente se concluye que, dentro de los errores de medición involucrados, la masa de agua en el circuito se encuentra a la misma temperatura en todo punto del circuito hidráulico. La magnitud del caudal circulante por el circuito y la inercia térmica debida a las pobres características térmicas de los materiales plásticos que constituyen el colector, explicarían serían la causa de este fenómeno. Es posible entonces suponer al sistema como un cuerpo que absorbe/pierde calor en forma uniforme solo a través de la superficie libre del colector, haciendo aplicable la ec (4).

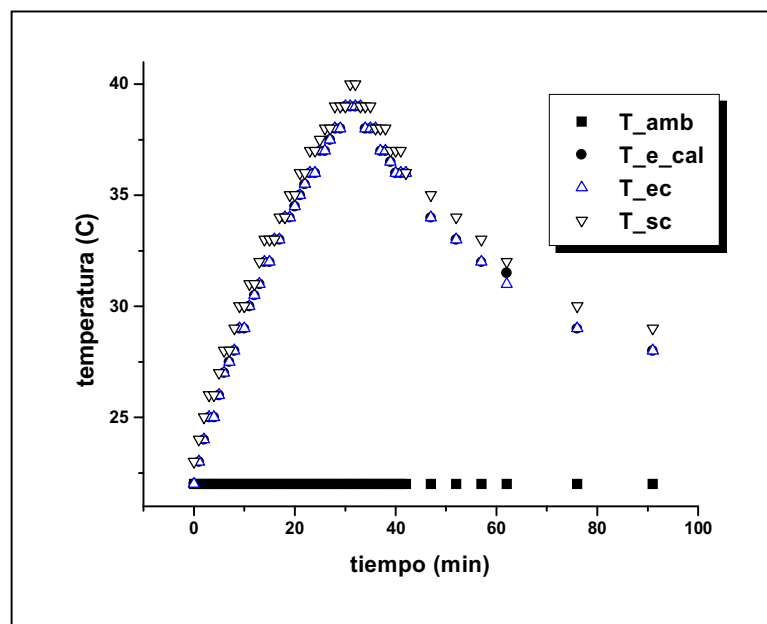


Fig.6. Ciclo típico de calentamiento-enfriamiento.

La fig.7. presenta los datos experimentales correspondientes a un proceso de calentamiento con la curva de ajuste superpuesta. Se observa una buena correlación entre ambas lo que sustenta la validez del modelo.

De modo similar se procedió durante los ciclos con movimiento forzado de aire y durante los ensayos de campo, donde el calentamiento era ahora producido por la energía solar incidente en el ramal colector.

En la fig.8. se observan los resultados típicos obtenidos para el caso de calentamiento mediante energía solar, graficándose en el eje de las abscisas la diferencia $T-T_{amb}$. En esta serie de mediciones se verificaba una diferencia entre la temperatura a la entrada y salida del colector por tanto, en el análisis y ajuste de datos se trabajó con la temperatura media del fluido. La dispersión de los puntos experimentales se debe a la variación de la temperatura ambiente durante la experiencia.

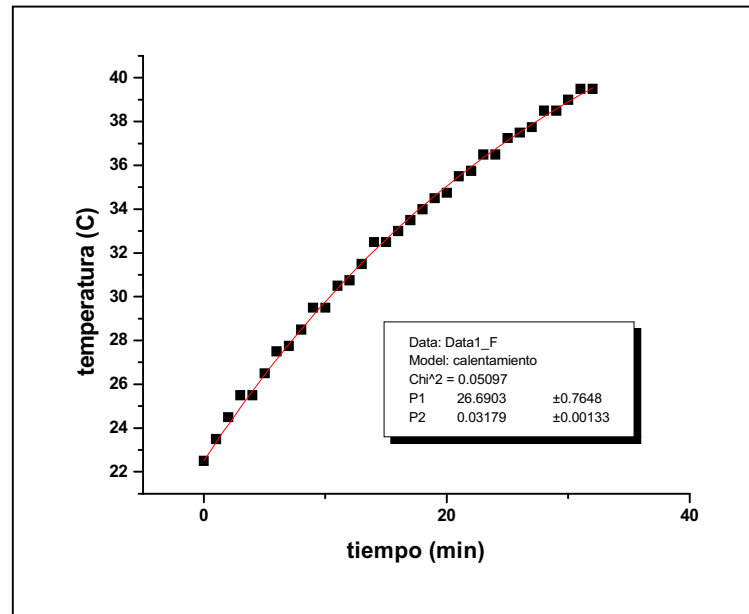


Fig.7. Ajuste de los datos experimentales aplicando la ec.(4)

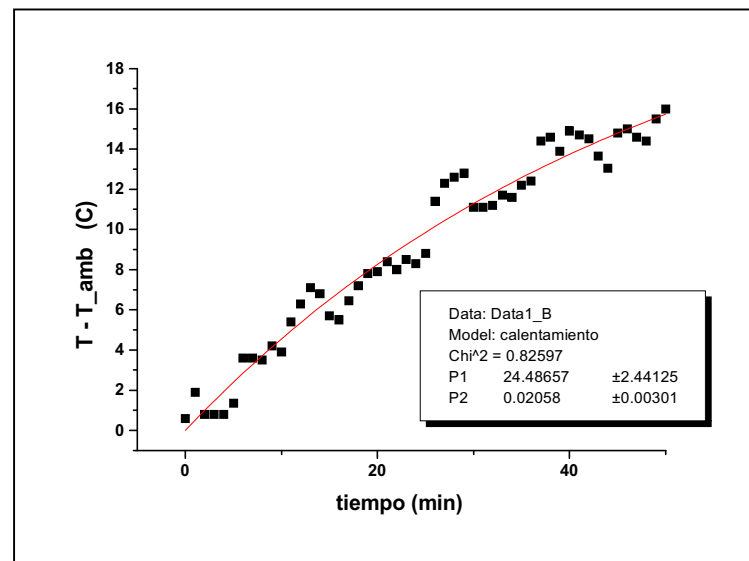


Fig.8. Ajuste de datos experimentales con radiación solar como fuente de calor.

La tabla 2 resume los resultados obtenidos a partir de la serie de experiencias llevadas a cabo.

Tabla 2.- Resumen de resultados obtenidos.

P' = potencia adicional inyectada
(bomba, fricción, etc.)

K = coeficiente global de pérdida.

η = rendimiento del colector.

	Unidades	Condición	Valor	+/-
P'	Watt	Sin calefactor	6.35	2
K	$W/m^2 \cdot ^\circ C$	Aire estanco	2	0.44
K	$W/m^2 \cdot ^\circ C$	Convección Forzada ($v \approx 1$ m/s)	3.1	0.62
η	- -	Con radiación solar como fuente de calor	25	3

Es de destacar, que el valor de 25% obtenido para la eficiencia convalida el valor asumido como hipótesis de cálculo para el diseño que se utilizó al momento de realizar la evaluación económica del sistema y que se detalla en el Anexo I.

Comparación del PVC frente a otro material como absorbedor térmico

La Fig.9 muestra la variación de temperatura para dos calefones de un solo ramal. Ambos sistemas operaban simultáneamente y eran idénticos en su construcción a excepción del elemento colector, tubo de PVC negro en uno, y tubo de hierro galvanizado tratado con pintura negro mate en el otro.

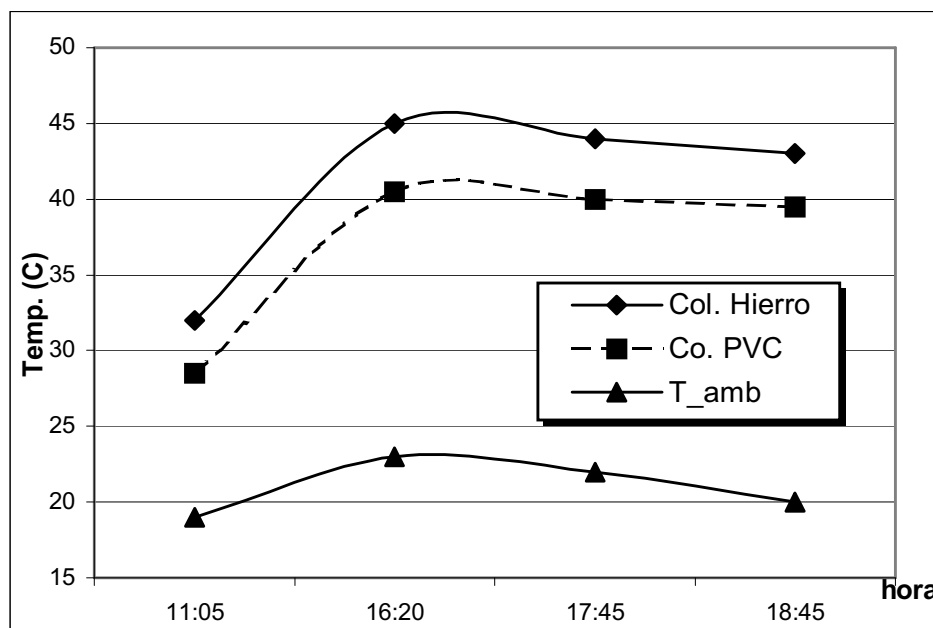


Fig.9. Evolución de temperatura para tubo colector de distinto material, PVC y hierro galvanizado.

Se observa una completa concordancia en la evolución de dichas curvas manteniéndose una diferencia casi constante de 4 °C entre ellas.

Las experiencias realizadas empleando PVC y hierro galvanizado como material colector indican, al menos en principio, una mejora de un 10%, en promedio, en la temperatura media final del agua en el tanque acumulador. A pesar de este aumento en la temperatura, el análisis de costo-beneficio no favorece tal opción ya que incrementa el tiempo de amortización en un 50%.

Ensayos sobre transmitancia de la cubierta transparente.

Para determinar el efecto de la suciedad sobre la transmitancia de la cubierta transparente se llevaron a cabo dos ensayos diferentes; uno de campo y otro de laboratorio bajo condiciones controladas.

En el ensayo de campo, se emplearon seis muestras del material usado como cubierta transparente. Estas se cortaron de forma cuadrada de 10x10 cm de lado, fueron limpiadas cuidadosamente, montadas en un soporte formando 37° con la horizontal y expuestas a condiciones ambientales en la terraza del edificio de la Facultad de Ciencias Exactas. Bajo estas condiciones, la transmitancia de las mismas se monitoreó durante casi dos meses tomándose una lectura por semana. La fig.10. muestra la variación de la transmitancia experimentada durante el período ensayado.

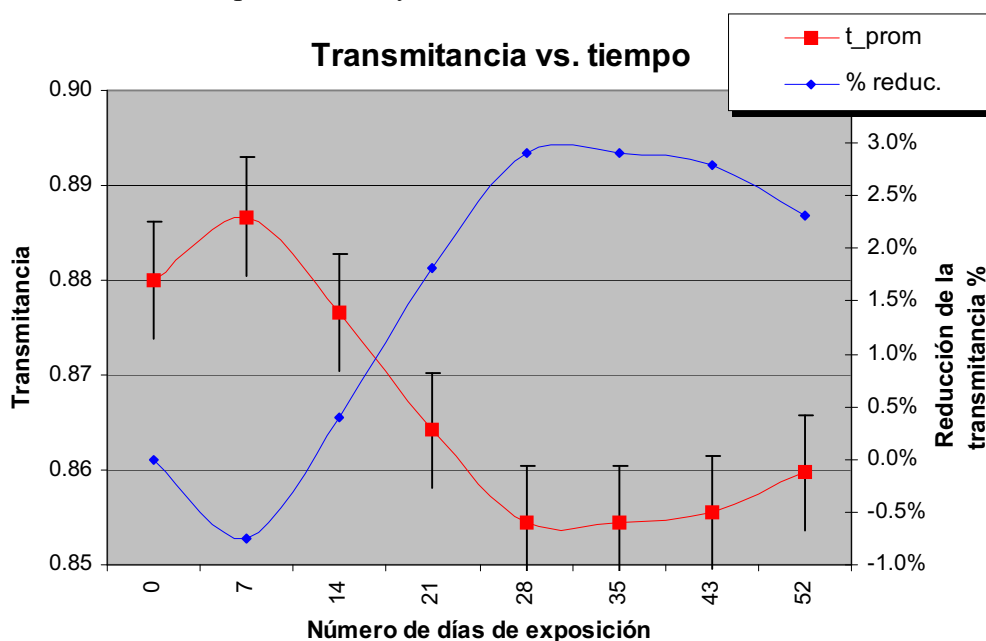


Fig.10. Variación de la transmitancia en función del tiempo de exposición de la muestra a condiciones ambientales.

Las determinaciones correspondientes al día 7 y 52 fueron realizadas luego de tiempo lluvioso, situación que, podría haber contribuido a la limpieza parcial de las muestras lo que explicaría el aumento en la transmitancia medida.

Los ensayos de laboratorio consistieron en someter a las muestras a sucesivas deposiciones controladas de polvo, midiendo el peso y la transmitancia luego de cada deposición. De esta manera se correlacionó la pérdida de transmitancia con la densidad de polvo. La fig.11. presenta los resultados obtenidos además de la curva de ajuste resultante.

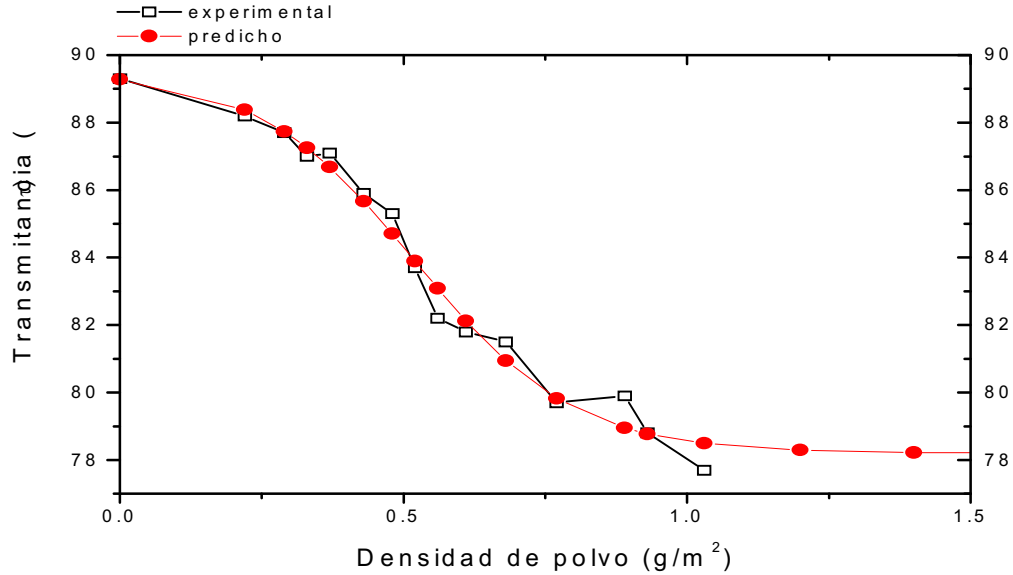


Fig.11. Variación de τ con la densidad de suciedad depositado sobre la muestra y curva de ajuste.

En la fig.12. se representa la relación experimental y predicha entre la reducción de la transmitancia, $\Delta\tau$, y la densidad, ρ_d (g/m²), de polvo depositado sobre la muestra.

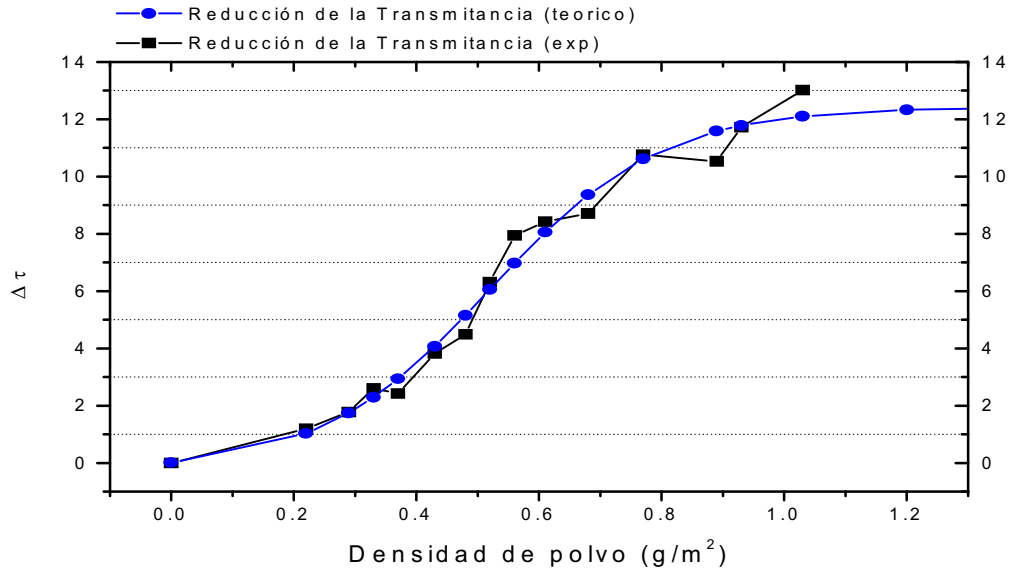


Fig.12. Reducción de la transmitancia, $\Delta\tau$, como función de la densidad de polvo depositado

Como resultado de estos ensayos se obtiene una reducción máxima porcentual de 13%.

Los resultados obtenidos concuerdan cualitativamente con lo encontrado en estudios similares^{9,10} realizados en climas desérticos y tropicales.

De igual modo, la fig.13. muestra el factor de corrección por suciedad, definido como el cociente entre la transmitancia de la cubierta sucia a la transmitancia de la cubierta limpia.

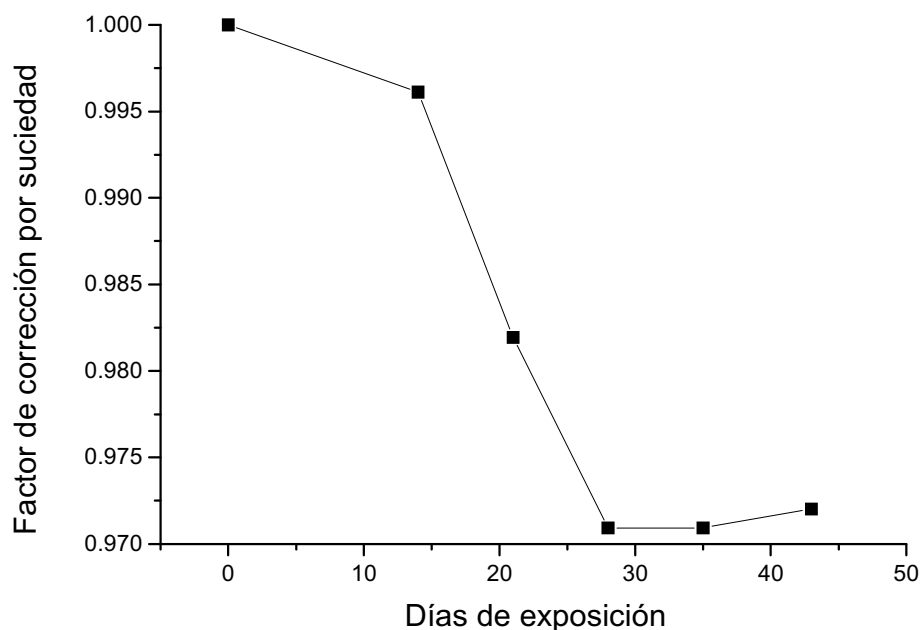


Fig.13. Factor de corrección por suciedad como función de los días de exposición

En dicho gráfico no se consideran los puntos correspondientes al día 7 y 52 por no contribuir a la acumulación de polvo sobre la muestra.

Se aprecia además, que entre los días 15 a 27 el ritmo de decrecimiento del factor de corrección es casi constante, a diferencia de lo que sucede entre el día 0 y el 15. Se presume que la alteración del ritmo de deposición natural fue provocada por la lluvia producida el día 7.

De acuerdo a las observaciones, el factor de corrección, para este caso particular de laminas inclinadas a 37° norte, disminuyó a 0.97 después de 30 días. Este valor se encuentra en el rango reportado por otros autores^{2,9,11}.

Combinando estas estimaciones se concluye que la cantidad de polvo acumulado al cabo de 30 días es de aproximadamente 0.35 g/m^2 .

2.3. Modelización

Objetivo específico:

- Modelización matemática del calefón y convalidación del modelo frente a resultados experimentales.
- Determinación de los parámetros característicos de un colector plano teórico equivalente al colector ensayado.

Consideraciones generales:

Los sistemas termo-energéticos se caracterizan por exhibir una dependencia no lineal con las características meteorológicas. El uso de técnicas de dinámica de fluidos computacional (CFD) y de simulaciones transitorias constituye el complemento ideal a la siempre necesaria experimentación. El análisis de sistemas altamente complejos como pueda ser una instalación solar térmica completa para un edificio de viviendas, puede realizarse de manera rápida con un software de simulación dinámica como TRNSYS⁸. La simulación dinámica es ordenes de magnitud más rápida y económica que la experimentación, en la que pequeños cambios en el sistema pueden significar costos de tiempo y dinero.

Con la potencia de cálculo de las computadoras actuales, el estudio de sistemas complejos con simulación detallada vía técnicas de discretización finitas, es altamente costoso en tiempo y requiere el uso de computadoras de última generación. Por otro lado, una simulación dinámica al nivel de TRNSYS puede realizarse en computadoras personales. El análisis al detalle que permiten las técnicas CFD, aunque útil y necesario para ciertos problemas, no tiene mucho sentido cuando se pretende el análisis de sistemas completos donde hay un número grande de parámetros.

TRNSYS es un programa que soluciona ecuaciones algebraicas y diferenciales incorporando una librería con los sistemas termo-energéticos más comunes y diseñado especialmente para simulaciones transitorias.

TRNSYS adopta una estructura modular para la resolución de sistemas de componentes, donde cada uno de los componentes se describe mediante una subrutina que, en la nomenclatura que utiliza TRNSYS, recibe el nombre de TYPE. Esta técnica modular permite analizar un sistema entero como la suma de componentes o sistemas individuales y la interconexión entre éstos.

TRNSYS también dispone de subrutinas que permiten el tratamiento y dar formato de salida a los resultados de las simulaciones. Para simular un sistema, el usuario debe crear un archivo de entrada para el ejecutable de TRNSYS que consiste en una descripción de los componentes que constituyen el sistema y sus interconexiones. El ejecutable de TRNSYS resuelve los componentes del sistema e itera para cada instante de tiempo hasta que el sistema de ecuaciones converge.

Las simulaciones son de carácter transitorio y pueden realizarse en los rangos de espacios de tiempo especificados por el usuario: desde varias horas hasta varios segundos, dependiendo del tipo de proceso que requiera ser estudiado. El carácter modular del programa

permite al usuario tener tantos elementos, (bombas, refrigeradores, colectores solares, etc.), como sea necesario, en cualquier configuración.

Ya que los modelos de los componentes están escritos en FORTRAN, el usuario puede fácilmente modificarlos y generar nuevos componentes para tecnologías no incluidas en la librería estándar.

Proceso de simulación:

Los siguientes son los pasos a seguir para formular el archivo con el código de simulación mediante el programa TRNSYS:

1. Estudio del dispositivo real.
2. Confección del modelo físico.
3. Elección de las subrutinas (TYPES) a utilizar.
4. Trazado de un diagrama de flujo.

Cada componente puede ser representado por una caja, la cual requiere un número de parámetros constantes y entradas dependientes del tiempo, y produce un conjunto de salidas dependientes del tiempo. En general, cada entrada a un componente debe ser unida a la salida de otro, una constante o una variable definida por una ecuación.

Un diagrama de flujo muestra la manera en la cual están interconectados todos los componentes del sistema. Una salida dada de un componente puede ser usada como entrada de cualquier número de componentes, inclusive como entrada de sí mismo.

5. Identificación lógica de cada componente.
6. Identificación e iniciación de las variables dependientes del tiempo.
7. Adaptación de los datos mediante ecuaciones y constantes.
8. Codificación de simulación.

El Anexo III presenta el detalle de los puntos 4 al 8.

Estudio de dispositivo real y confección del modelo físico:

La fig.14. muestra los componentes del sistema los que se describen a continuación:

- El dispositivo consta de un único colector solar cilíndrico, construido con un tubo de PVC negro de 18 mm de diámetro, el cual hace las veces de placa colectora, recubierto mediante botellas de PET transparentes (cubierta). Todo el sistema colector mide 2 metros.
- El tanque está construido de material plástico, recubierto por una capa aislante de fibra de vidrio y poliestireno. Tiene un volumen de 10 litros.
- Las cañerías de conexión entre el colector y el tanque están constituidas por mangueras de 18 mm de diámetro, recubiertas por poliestireno expandido.
- El sistema es por termosifón a circuito cerrado (se trabaja sin carga). Para una mejor comprensión del sistema descrito se adjunta la siguiente figura:

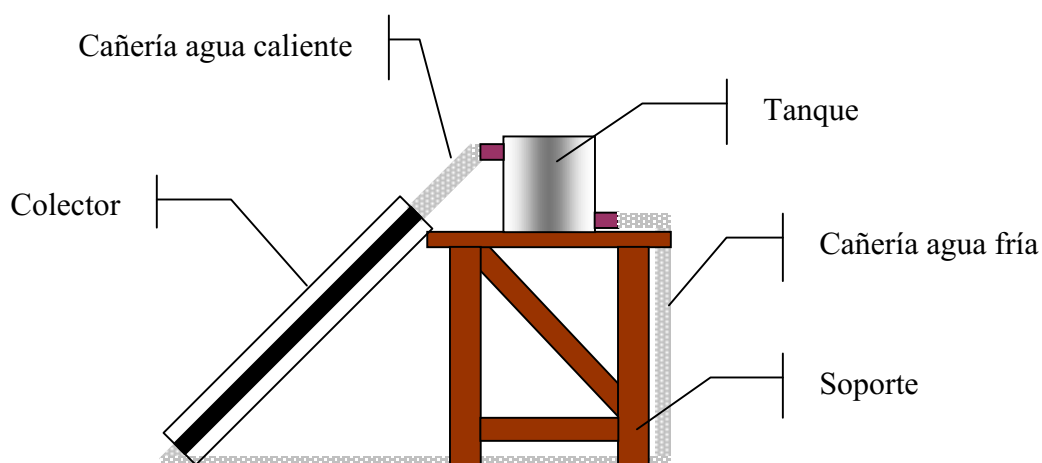


Fig.14. Sistema colector a ser simulado, disposición física.

Elección de las subrutinas (TYPES) a utilizar:

TYPE 1: SOLAR COLLECTOR	Colector solar.
TYPE 9: DATA READER	Lector de datos.
TYPE 16: SOLAR RADIATION PROCESSOR	Procesador de radiación solar.
TYPE 24: QUANTITY INTEGRATOR	Integrador.
TYPE 25: PRINTER	Impresora.
TYPE 38: ALGEBRAIC TANK	Tanque algebraico.
TYPE 65: ONLINE PRINTER	Impresora on line.

Resultados obtenidos:

Para la modelización del ramal colector se utilizó el formalismo de un colector plano teórico incluido en TRNSYS ya que este no cuenta con un componente matemático que describa al colector físico empleado. De los parámetros requeridos por el modelo, algunos tomaron el valor válido para el sistema físico a partir de determinaciones experimentales o de tablas y otros se utilizaron como variable de ajuste.

La tabla 3 indica las características obtenidas para el colector plano teórico que reproduce los resultados experimentales.

Parámetro	Valor	Tipo de variable
Area	1 m ²	de ajuste
F' - Factor de eficiencia de aleta	0.7	de ajuste
U _L - Coef. global de pérdida	11.16 kJ/hr-m ² - °C	Experimental
ε _p - Emitancia del ramal colector	0.6	De tabla
α - Absorbancia del ramal colector	0.8	De tabla
(σ α) - Coef. de extinción	0.6	Calculada con valores de tabla

Tabla 3. Parámetros para el módulo colector utilizado en la simulación

En la fig.15. pueden muestra la presentación de datos experimentales obtenidos, radiación solar incidente, temperaturas del sistema, caudal del fluido circulante, energía ganada y velocidad del viento para una semana de mediciones realizadas.

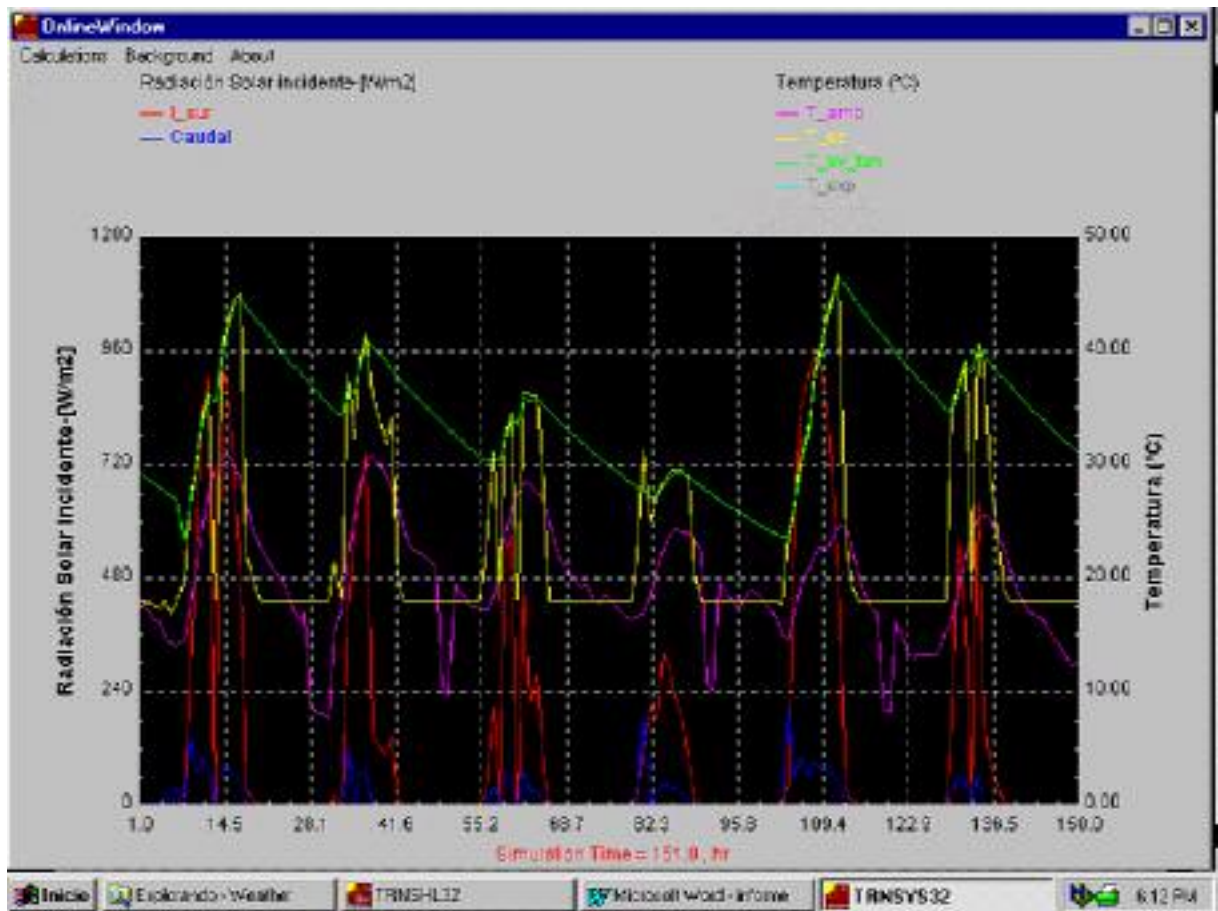


Fig.15. Presentación gráfica de los datos experimentales mediante TRNSYS

En la fig.16. se muestra la comparación entre las temperaturas experimentales y simuladas para un día determinado cualquiera.

La línea en verde indica la temperatura media calculada en el interior del tanque y la línea turquesa la temperatura registrada experimentalmente. El registro de esta temperatura solo se realizó durante las horas de sol, es por eso que se mantiene constante, evoluciona y cae bruscamente para luego nuevamente hacerse constante.

Las diferencias entre ambas curvas son debidas a procesos físicos en el sistema real que no son tenidos en cuenta en el modelo de simulación.

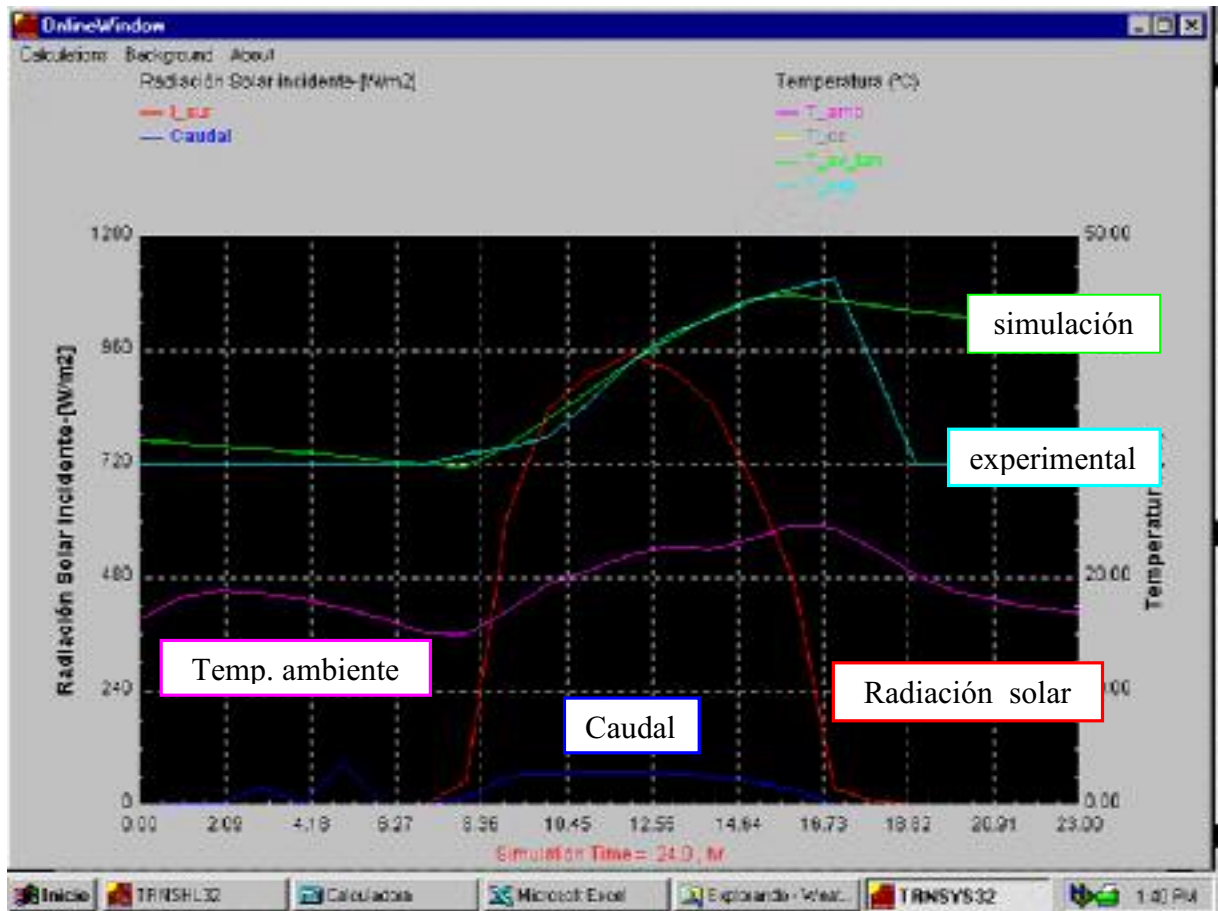


Fig.16. Comparación de las temperaturas experimentales y de simulación

ENSAYOS PENDIENTES

Una comparación de los objetivos propuestos y el cronograma original con los ensayos realizados indica que, en términos generales y dentro de las limitaciones con que se trabajó, se han cumplido las metas impuestas.

A pesar de que los resultados obtenidos posibilitan una caracterización medianamente buena del colector propuesto, debido a diversas circunstancias, quedan pendientes de realización ensayos que ayudarían aún más a predecir problemas futuros sobre todo respecto a la durabilidad de los materiales.

Entre estos puntos se puede mencionar:

- Monitoreo continuo de las temperaturas del sistema.
- Determinación de las pérdidas térmicas nocturnas.
- Estudio de la degradación espectral a largo plazo de la transmitancia del material transparente de la cubierta por efecto de la radiación solar y de suciedad.
- Incorporación de un tanque colector-acumulador.
- Optimizar la técnica de construcción.

CONCLUSIONES

Sobre la base de los resultados obtenidos y presentados en forma resumida en los párrafos anteriores se puede afirmar lo siguiente:

- El colector solar plástico propuesto puede ser usado como sistema de bajo costo para el calentamiento de agua de uso doméstico.
- Se establece como parámetro de diseño 10 litros por cada ramal de 2m, para asegurar una temperatura media de 50 °C. Este parámetro permite dimensionar, en función de las necesidades del usuario, el tamaño del colector y volumen del tanque.
- Se determinó experimentalmente una eficiencia de 25%, lo que valida el análisis técnico-económico y las proyecciones realizadas en el (Anexo I).
- Se estima un costo aproximado de \$300.- para un sistema para calentar 100 lts. de agua, suficiente para uso higiénico en zonas rurales y aisladas.
- El diseño y construcción del sistema es fácil y económico pudiendo ser realizado por el mismo usuario aprovechando botellas de gaseosa de descarte como cubierta transparente (Anexo II).
- Por la forma de construcción, el colector es modular y puede, fácil y rápidamente, ser reparado y ampliado para satisfacer necesidades crecientes.
- La degradación de la transmitancia de la cubierta transparente por efecto de acumulación de suciedad, está dentro del rango de lo reportado en la literatura. No se puede afirmar nada respecto del efecto de la radiación solar sobre dicho parámetro.
- Mediante simulación matemática, se determinaron los parámetros que caracterizan un colector solar plano equivalente. Esto permitiría realizar predicciones, mediante corridas de simulación, mas realistas de comportamiento frente a diferentes escenarios de consumo, mejorando así, el dimensionamiento del sistema.

PRODUCCIÓN

1.- Difusión

Publicaciones:

1. **Determinación del Rendimiento y del Coeficiente global de Pérdida de un Ramal Colector Plástico Mediante un Método Calorimétrico Simple**., Busso A., Forastier E., Palaszczuk E., Scaramellini J.C., Aeberhard A.F., Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, Vol.4 Tomo I, pag.03.01, ASADES, 2000.
2. **Calefón Solar de Bajo Costo con Colector Plástico Plano Construido en parte con Elementos de Descarte: Perspectiva Económica**. Busso A., Aeberhard A., Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, Vol.3 Tomo I, pag.02.49, ASADES, 1999.
3. **Calefón Solar de Bajo Costo con Colector Plástico Plano Construido en parte con Elementos de Descarte: Primeros Resultados Experimentales**. Busso A., Aeberhard A., Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, Vol.3 Tomo I, pag.02.53 ASADES, 1999.
4. **Un Colector Plano Construido con Elementos de Descarte: Viabilidad Técnica y Construcción**. Busso A., Aeberhard A., Figueredo G., Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, Vol.2 Tomo I, pag.02.9, ASADES, 1998.

Presentación en Reuniones y Congresos:

1. **Método Calorimétrico Aplicado a la Determinación del Rendimiento y del Coeficiente Global de Pérdida de un Ramal Colector Plástico**. Busso, A.J. - Forastier, E. - Palaszczuk, E. - Scaramellini, J. C. - Aeberhard, A. F., Reunión de Comunicaciones Científicas y Tecnológicas. SCyT - UNNE, 2000.
2. **Perspectiva Económica de un Calefón Solar de Bajo Costo con Colector Plástico Plano**. Busso A., Aeberhard. ACTAS TOMO IV, pag.7-121. Reunión de Comunicaciones Científicas y Tecnológicas. SCyT - UNNE, 1999.
3. **Primeros Resultados Experimentales de un Calefón Solar de Bajo Costo con Colector Plástico Plano**. Busso A., Aeberhard A., ACTAS TOMO IV, pag.7-121. Reunión de Comunicaciones Científicas y Tecnológicas. SCyT - UNNE, 1999.
4. **Colector Solar Plano Plástico Construido en parte con Elementos de Descarte: Viabilidad Técnica y Construcción**, Busso A., Aeberhard A., Figueredo G., Actas de la Conferencia Científica Internacional “Medio Ambiente Siglo 21” - Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, Cuba, junio 1999.

2.- Transferencia

Sistema para 100 lts montado en el predio del establecimiento “Granja Orgánica Che-Rovía”. Enero 2001.

3.- Formación de RRHH

- Alumno: Scaramellini Burgos, Juan Carlos
Pasantía para realizar trabajos en el proyecto PI455. Res. N°. 747/00. Tema: Estudio de la transmitancia de la cubierta transparente del colector.
- Alumno: Palaszcuk, Roberto Esteban
Pasantía para realizar trabajos en el proyecto PI455. Res. N°. 746/00. Tema: Modelización del sistema colector utilizando TRANYS.
- Alumno: Forastier, Esteban
Pasantía para realizar trabajos en el proyecto PI455. Res. N°. 730/00. Tema: Determinación de la eficiencia del colector.

REFERENCIAS

1. Solar Hot Water, Heating and Cooling Systems,
<http://www.greenbuilder.com/sourcebook/heatcool.html>
2. Duffie J., Beckman W., Solar Engineering of Thermal Processes, 2da. Edición, Wiley, New York, 1991.
3. Instalaciones de Energía Solar, Tomo III, CENSOLAR, Centro de Estudios de la Energía Solar, 2da. Edición, 1991.
4. Fasulo A., Perello D., Follari J. (1997). Un Colector Solar Acumulador, Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, Vol.1 N.1.
5. Worsnop B. L., Flint H. T., (1965). Curso Superior de Física Practica Tomo I, Editorial EUDEBA.
6. Welty James, (1978), Transferencia de Calor Aplicada a la Ingeniería, Ed. Limusa.
7. Termodinámica Técnica, Carlos Garcia, Librería y Editorial Alsina, 1987.
8. TRNSYS Manual del Usuario, versión 1.81, Solar Energy Laboratory, Universidad de Wisconsin, 1997.
9. Mastekbayeva G.A., Kumar S., Effect of Dust on the Transmittance of Low Density Polyethylene Glazing in a Tropical Climate, Solar Energy, Vol.68, No.2, pp135-141, 2000.
10. Ahmad Y. Al-Hasan, A new Correlation for Direct Beam Solar Radiation Received by Photovoltaic Panel with Sand Dust Accumulated on its Surface, Solar Energy Vol. 63, No.5, pp.323-333, 1998.
11. Garg H.P., Effect of Dirt on Transparent Covers in Flat-plate Solar Energy Collectors, Solar Energy Vol.51, pp.299, 1974.
12. Bistoni S., Iriarte A., Colector Solar Plástico: Características y aplicaciones, Proceedings of the Millenium Solar Forum 2000, p.387, Mexico, 2000.
13. Fraidenraich N., Second Law Characterization of Stratified Thermal Storage Tanks, Proceedings of the Millenium Solar Forum 2000, p.393, Mexico, 2000.
14. Enrique Barrera C., Arias J.E., Lugo L., Cano F.J., Influencia del flujo termosifónico con la altura del termotanque, Proceedings of the Millenium Solar Forum 2000, p.179, Mexico, 2000.
15. Iriarte A., Rodriguez C., Luque V., Calentadores de Agua con Residuos Forestales para uso Combinado con energía Solar, Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, Vol.2 N.1. pp.02.5, 1998.
16. Cortes A., Jozami A., Lucci F., Estudio Técnico-económico de Factibilidad de Empleo masivo de Termotanques Solares Domésticos, Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, Vol.2 N.1. pp.02.89, 1998.
17. Sharples S., Charlesworth P.S., Full-Scale Measurements of Wind-Induced Convective Heat Transfer from a Roof-Mounted Flat Plate Solar Collector, Solar Energy Vol.62, No2, pp.69-77, 1998.
18. Tsilingiris P.T., Solar Water-Heating Design – A New Simplified Dynamic Approach, Solar Energy Vol.57, No.1, pp.19-28, 1996.]
19. Tsilingiris P.T., design, Analysis and Performance of Low-Cost Plastic Film Large Solar Water Heating Systems, Solar Energy Vol.60, No.5, pp.245-256, 1997.
20. Fraser K.F., Hollands K.G.T., Brunger A.P., An Empirical Model for Natural convection Heat Exchangers in SDHW Systems, Solar Energy Vol.55, No.2, pp.75-84, 1995.
21. Mohamad A.A., Integrated Solar Collector-Storage Tank system with Thermal Diode, Solar Energy Vol.61, No.3, pp.211-218, 1997.

22. Bistoni S., Iriarte A., Calentador Solar de Agua de Bajo Costo, Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, Vol.1 N.1. pp.89, 1997.
23. Kaptan I.N., Kilic A., A Theoretical and Experimental Investigation of a Novel Built-In-Storage Solar Water Heater, Solar Energy Vol.57, No.5, pp.393-400, 1996.
24. Amer E.H., Nayak J.K. Sharma G.K., Transient Methods for Flat-Plate Collectors: Review and Experimental Evaluation, Solar Energy Vol.60, No.5, pp.229-243, 1997.
25. Spirl W., Muschaweck J., Kronthaler P., Scholkopf W., Spehr J., In Situ characterization of solar Flat-Plate Collectors Under Intermittent Operation, Solar Energy Vol.61, No.3, pp.147-152, 1997.

ANEXO I – Evaluación Tecno-Económica del sistema propuesto

Basados en 40°C como requerimiento normal de agua caliente^{2,4}, la temperatura promedio de 50°C alcanzada por el agua del tanque en los ensayos realizados con el sistema de un solo ramal, nos indica que el colector tiene buenas perspectivas como calentador de agua para uso en aplicaciones donde las exigencias de extracción no son grandes (ej.: doméstico).

Dadas las pobres características térmicas de los materiales empleados en la construcción del colector, se propone la incorporación de un tanque de agua de 100 lts. que actúe también como colector y acumulador⁴, aumentando así la superficie de colección y mejorando el rendimiento del sistema.

En lo que respecta al aspecto económico, podemos mencionar que la construcción de un colector con 10 ramales, más conductos de retorno y acoples rondaría los USD100. Si a esto sumamos el costo del tanque acumulador, acondicionado para actuar como colector, el costo total ascendería, según nuestras estimaciones, a los USD300.

Si bien hasta este momento no contamos con datos suficientes sobre la respuesta del equipo en las distintas épocas del año, rendimiento del colector, régimen óptimo de extracción diaria, etc., entre otros, consideramos que el sistema contribuirá a un ahorro de energía a lo largo del año, quedando pendiente para la fase siguiente de este estudio, la determinación experimental de todos estos parámetros relevantes para el funcionamiento óptimo del equipo.

A pesar de lo anterior y basados en la respuesta obtenida del sistema, se estimó el rendimiento del mismo, y con este parámetro, se cuantificó el aporte energético solar y la energía suplementaria para diferentes escenarios de consumo propuestos.

A los efectos de este análisis se realizaron ciertas suposiciones:

- El sistema se utilizará para calentar agua de uso doméstico.
- Capacidad del tanque de agua 100 lts.
- Como requerimiento normal de temperatura del agua caliente se toma 50°C.
- Irradiancia diaria de 11.7 MJ/m² (valor medido sobre plano horizontal durante uno de los días ensayados).
- USD0.15 valor del Kw-h.
- Temperatura del agua de entrada al termotanque luego de cada extracción de 20°C.
- Rendimiento del sistema $\eta = 25 \%$.
- Se considera al sistema como ideal (sin pérdidas térmicas).
- Se extrapolaron los resultados obtenidos para 10 lts. de agua a fin de ser aplicables a los 100 lts. considerados.
- Se corrigió la energía solar medida sobre plano horizontal para tener en cuenta el ángulo de inclinación del colector.
- Se determinaron la radiación acumulada hasta medio día y desde medio día hasta la tarde integrando los valores experimentales de esta dentro de los intervalos considerados.
- Se consideran distintos escenarios de modalidad de extracción de agua (tabla 1).
- En cada caso se comparan los resultados obtenidos respecto del que se esperaría para el

mismo caso 1 (Tabla 1) pero con fuente puramente eléctrica.

A modo de ejemplo se expone el caso de dos extracciones diarias (caso 3 de la tabla de resultados).

Condiciones de trabajo: dos extracciones, 50 lts. por la mañana y 50 lts. por la noche.

Al extraer 50 lts. ingresan al tanque 50 lts. a una temperatura de 20°C. Estos se mezclan con los 50 lts. restantes (a 50°C) alcanzando la mezcla una temperatura de 35°C.

Aporte eléctrico:

La energía eléctrica necesaria para elevar la temperatura de esta masa de agua al nivel de requerimiento normal (50°C) es como mínimo:

$$Q = m.C_p.\Delta T = 6.3 \text{ MJ}$$

Igual cantidad de energía se necesitara luego de la extracción de la noche, por tanto el consumo diario total de energía es de 12.6 MJ. que equivalen a un costo mensual de aproximadamente \$15.

Aporte solar:

La energía solar diaria incidente sobre el plano del colector es de $H = 12.6 \text{ MJ/m}^2$. La energía solar útil transferida al fluido viene dada por:

$$Q_u = H.A_c.\eta = 12.6 \times 1.2 \times .25 [\text{MJ/m}^2.\text{m}^2] = 3.78 \text{ MJ}$$

La energía eléctrica complementaria para lograr el calentamiento hasta los 50°C es:

$$Q_E = 6.3 \text{ MJ} - 3.78 \text{ MJ} = 2.52 \text{ MJ}$$

Luego de la extracción nocturna el aporte de energía necesaria para disponer de agua caliente a la mañana siguiente será puramente eléctrico (6.3 MJ).

Por tanto los aportes diarios son:

Solar	3.78 MJ	→	USD 5 /mes	33%
Elect.	8.82 MJ	→	USD10 /mes	67%
Total	12.6 MJ	→	USD15 /mes	100%

Se procedió en forma similar para los otros casos analizados obteniéndose los siguientes resultados:

Tabla 1.

	Modalidad	Mañana	Medio día	noche	Aporte (%)		Aporte (USD/mes)	
					Solar	Eltco	Solar	Eltco
1	3 extracciones	50 lts.	50 lts.	50lts	21	79	5	18
2	3 extracciones	20 lts.	50 lts.	50 lts.	26	74	5	14
3	2 extracciones	50 lts.	0	50 tls.	33	67	5	10
4	1 extracción	0	0	100 lts.	33	67	5	10

La fig.1 presenta en forma gráfica las curvas de amortización para cada caso. En ella, los costos acumulativos para los distintos escenarios de extracción propuestos se comparan con los costos esperados para el caso 1 de la Tabla 1. Este se toma como referencia por ser considerado como el más desfavorable de todos los escenarios planteados. Se asume además, fuente energética puramente eléctrica.

Asumiendo entonces que el gasto de inversión inicial está solamente dado por el costo del colector solar plástico (~US\$100), y tomando en cuenta el ahorro de costo energético debido al aporte solar (USD5 /mes), se espera un periodo máximo de amortización de aproximadamente dos años (F. 1).

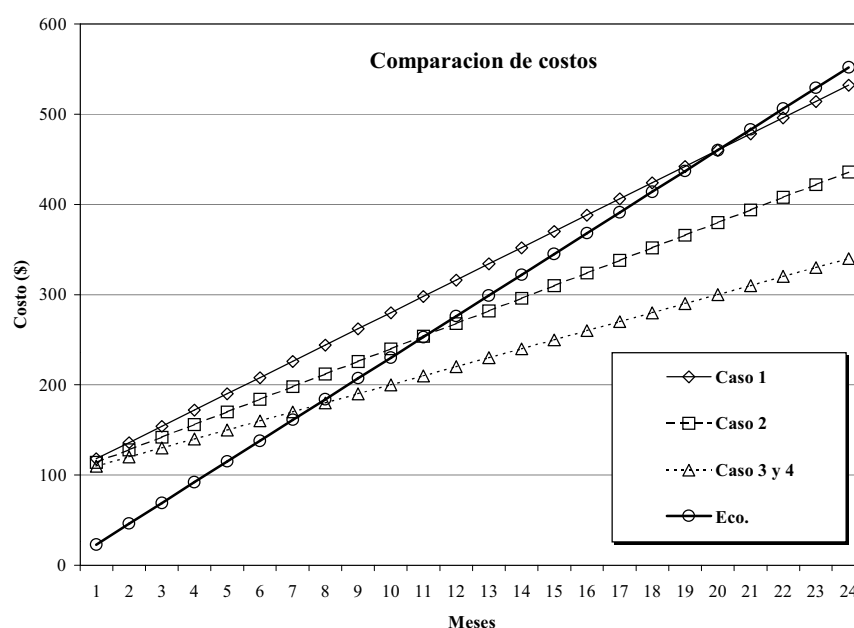


Fig.1.- Gráfico de amortización

No debe perderse de vista que para el análisis se partió de un rendimiento calculado en función de datos experimentales obtenidos con un prototipo sin aislación térmica y durante un periodo de tiempo, en días, muy corto. Tampoco se han tenido en cuenta gastos extras que puedan surgir durante la instalación.

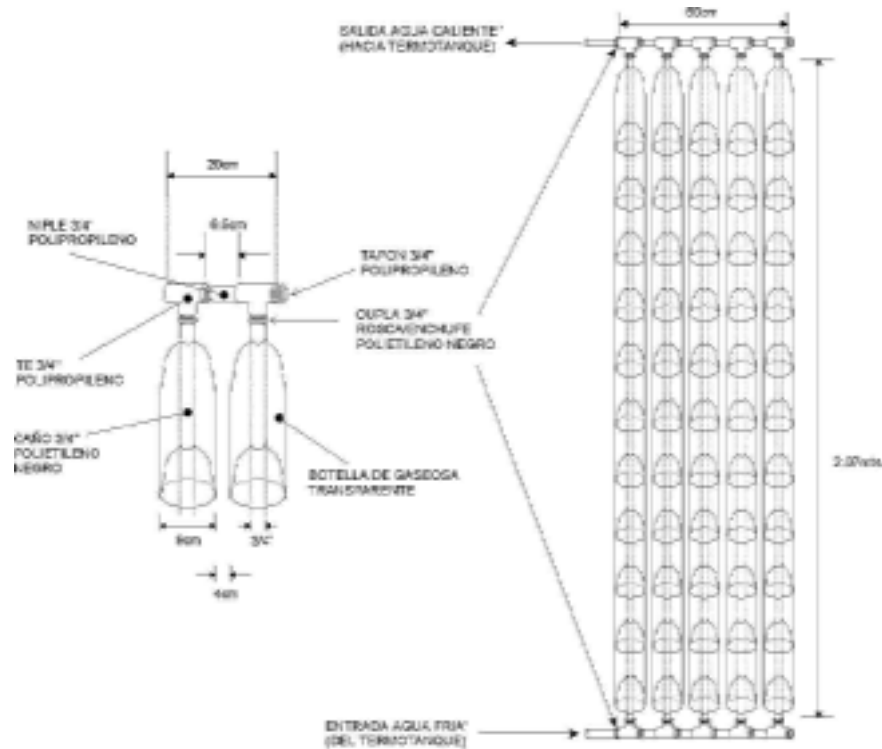
No obstante ello, los resultados obtenidos tanto experimentalmente como del análisis anterior muestran que técnicamente es posible utilizar este colector solar plástico para el calentamiento de agua en instalaciones donde ni las temperaturas ni los requerimientos de extracción son altos (ej.: uso domestico).

Desde el punto de vista económico, se logra una reducción en los costos de más de un tercio con respecto a las opciones comerciales para igual propósito que se pueden encontrar en el mercado.

Desde el punto de vista ecológico, el método propuesto plantea también una alternativa de uso para un residuo tan común en nuestros días como son las botellas plásticas de gaseosas.

ANEXO II - Detalles constructivos del colector plásticos

Se presentan a continuación los detalles del proceso de construcción del colector, tanque de almacenamiento y estructura de soporte.



Detalle de materiales, empalmes y dimensiones del prototipo de 5 ramales.



Tratamiento previos de enderezado de los caños. Estos se prensan y se mantienen al sol por unos

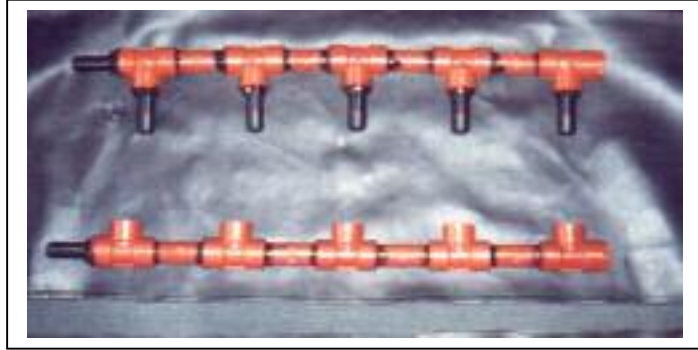


Acondicionamiento de las botellas a emplear como cubierta transparente. A las mismas se les secciona la base y parte del cuello.

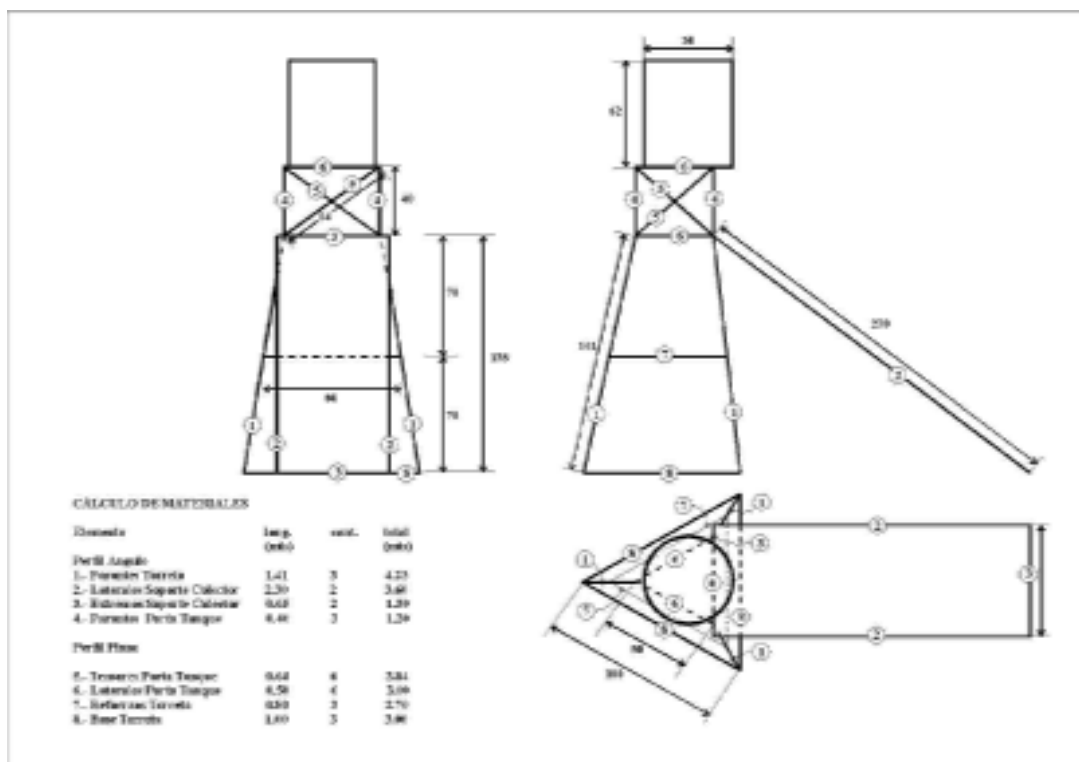
días hasta adoptar una postura recta.
Detalle de los colectores principales.



Ramal colector completo.



Tanque de almacenamiento con el recubrimiento aislante de poliuretano expandido de 1".



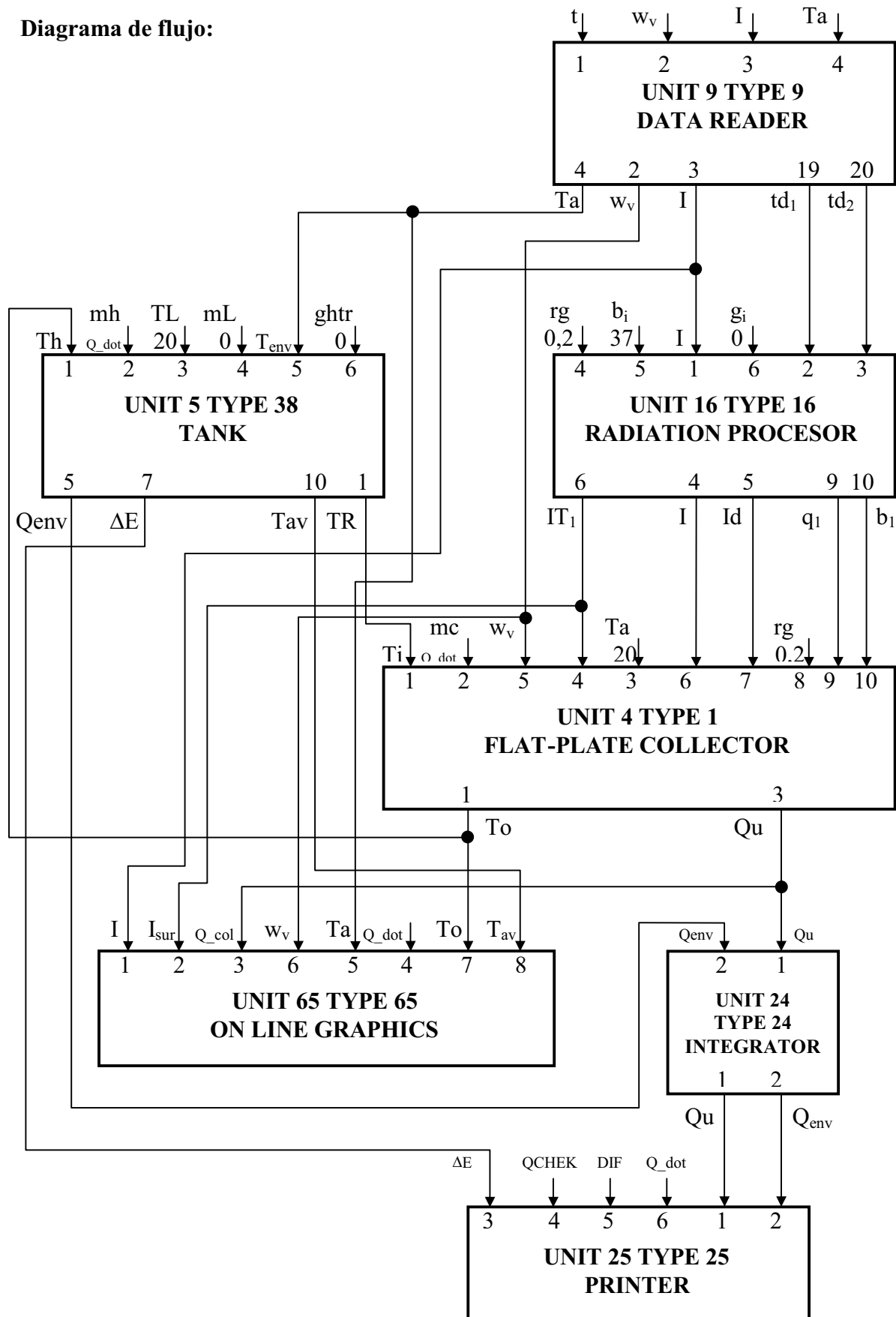
Diseño de la estructura de soporte con dimensiones y materiales.



Vista del modelo terminado y en funcionamiento

ANEXO III – Diagrama de Flujo y archivo de simulación TRNSYS

Diagrama de flujo:



Archivo generado con el código de simulación:

*Asignación de las ubicaciones de los archivos de datos y de salida.

ASSIGN \TRNWIN\MYWORK\CALEFON_UN_DIA.LST 6

ASSIGN \TRNWIN\WEATHER\14MAYO.PRN 20

ASSIGN \TRNWIN\MYWORK\CALEFON_UN_DIA.OUT 21

ASSIGN \TRNWIN\MYWORK\CALEFON_UN_DIA.PLT 22

* JULY 27 - 2000 *

* *

* CALEFON SOLAR POR CONVECCION NATURAL *

* *

* SIMULA EL FUNCIONAMIENTO DE UN CALEFON SOLAR CON *

* COLECTOR PLASTICO DE 5 RAMALES Y UN TANQUE DE 60lts *

* EL FUNCIONAMIENTO ES PURAMENTE POR CONVECCION NATU- *

* RAL. EL CAUDAL SE CALCULA A PARTIR DE LAS DIFEREN- *

* CIAS DE DENSIDAD DEL FLUIDO A LO LARGO DEL CIRCUITO *

* (REF. Renewable Energy Resources - p.101) *

* *

*

*

SIM 0 23 1

WIDTH 72

LIMITS 20 50

*

*

CONSTANTS 6

* COEF. DE EXPANSION

BETA=3.5E-04

* VIZCOCIDAD CINEMATICA

NU=0.66E-06

* DIAMETRO DEL TUBO

D=0.018

* LONGITUD DEL TUBO

L=2

* SECCION DEL TUBO

S=2.5E-04

* CONST. GRAVITATORIA

G=9.8

*

*

* PARAMETROS DEL TANQUE

CONSTANTS 3

* VOLUMEN (LTS)

VOL=0.06

* ALTURA

```
ALT=0.4
* COEF DE PERDIDA TOTAL (KJ/hr-M2-C)
U_L=3.34
*
*
* PARAMETROS DE NIVEL
CONSTANTS 3
ALT_VERT=1.38
ALT_C_T=0.4
D_ENT_SAL=0.32
*
*
*TEMP AMBIENTE
CONSTANTS 1
T_AMB=30
*
*
UNIT 9 TYPE 9 DATA READER
PAR 8
2 4 1 -1 1 0 20 1
(30X,F9.2,1X,F9.3,1X,F9.2,1X,F9.2)
*
*
EQUATIONS 1
RAD=[9,1]*3600/1000
*
*
UNIT 16 TYPE 16 RADIATION PROCESSOR
PAR 9
3 1 1 134 -27.44 4871 0 0 -1
INP 6
RAD 9,19 9,20 0,0 0,0 0,0
0. 0. 0. 0.2 37. 0.
*
*
EQUATIONS 5
* AREA BAJO LA CURVA DE EVOLUCION DE TEMP. DEL SISTEMA
I_T=([4,1]-[5,1])*(ALT_VERT/2+ALT_C_T+D_ENT_SAL/2)
* ALTURA DE TERMOSIFON
H=BETA*I_T
* VELOCIDAD DEL FLUJO (m/s)
V=(G*D**2*H)/(32*L*NU)
* CAUDAL MASICO (Kg/hr)
CAUDAL=V*S*3600*1000
* TOMA SOLO VALORES POSITIVOS DEL CAUDAL
Q_DOT=CAUDAL*GT(CAUDAL,0)
*
*
```

UNIT 4 TYPE 1 FLAT-PLATE COLLECTOR

PARAMETERS 11

3 1 1 4.19 0.7 11.16 0.6 0.8 1 1.5 0.6

INPUTS 10

5,1 Q_DOT 0,0 RAD 9,3 16,4 16,5 0,0 16,9 0,0
T_AMB 0.0 T_AMB 0.0 0.0 0.0 0.0 0.2 0.0 37.

*

*

UNIT 5 TYPE 38 TANK

PARAMETERS 17

1 VOL ALT 0.32 4.19 1000 0.088 1 U_L 1 T_AMB
0 0.1 0.1 33 2 0

INPUTS 6

4,1 Q_DOT 0,0 0,0 0,0 0,0
T_AMB 0.0 T_AMB 0 9,2 0.0

*

*

EQUATIONS 2

I=RAD*1353/4871

I_SUR=[16,6]*1353/4871

*

*

UNIT 65 TYPE 65 ONLINE

PARAMETERS 14

2 4 0 1200 0 50 1 1 3
1 11 2 2 0

INPUTS 6

I Q_DOT 9,2 4,1 5,10 9,4
I_sur Caudal T_amb T_oc T_av_tank T_exp

LABELS 4

W/m2 C-m/s

Radiación Solar incidente-[W/m2]

Temperatura (°C)

UNIT 25 TYPE 25

PARAMETERS 15

1 1 150 21 2
-11 -4 -12 -4 -13 -4 -14 -4 -15 -4

INPUT 2

I 5,10

I_sur T_av_tank

END