

ASPECTOS NO USUALES DE LA IMPLEMENTACION EN LA ARGENTINA DE UN

SISTEMA SOLAR DE CALENTAMIENTO DE AGUA

R.O. Nicolás, A. Rapallini[†] y W. Scheuer

División Energía Solar
Comisión Nacional de Energía Atómica
Avda. del Libertador 8250, 1429 Buenos Aires

RESUMEN

La instalación de un sistema solar para satisfacer una demanda no doméstica de agua caliente se usó para contribuir a orientar al mercado local de colectores a establecerse en un nivel general más elevado que el existente, requiriendo a los proveedores que a sus ofertas acompañaran la correspondiente curva de eficiencia, determinada según Norma ASHRAE - 93-77.

Por ser la demanda atípica y para adquirir experiencia - inexistente anteriormente en el país - con el programa TRNSYS, el análisis de las ofertas y el dimensionamiento del sistema se realizaron simulándolo mediante dicho programa. Asimismo, se lo utilizó para analizar diversas alternativas de operación. Los resultados obtenidos se compararon con los provistos por el método "f-chart".

1. INTRODUCCION

Ante un requerimiento del Proyecto "Fábrica de Aleaciones Especiales" de la Comisión Nacional de Energía Atómica, se diseñó y se llevó a la fase de instalación un sistema solar para proveer agua caliente sanitaria. La presente comunicación se centra en dos aspectos del procedimiento usado para concretar esa fase y sólo secundariamente describe el sistema en sí.

La demanda básica que el sistema debe satisfacer es la provisión del agua caliente que, al finalizar cada turno de trabajo, se consume en las duchas para personal instaladas en la Planta de Deformación de la fábrica mencionada, ubicada en el Centro Atómico Ezeiza. Inicialmente trabajará un sólo turno de operarios, con finalización a las 15 horas, lo cual implica el uso de las duchas por ~ 20 personas en días hábiles y por ~ 5 durante los fines de semana. Un segundo turno a incorporar en el futuro tendrá similar dotación de personal y finalizará a las 23 horas. En el diseño se supuso que la demanda al concluir cada turno pleno será de 1.000 litros a 50°C y no se consideró el consumo suplementario a lo largo del día (estimado en ~ 10 % de la demanda diaria total). Lo

precedente permitió definir a la instalación como relativamente pequeña y destinada a satisfacer una demanda no doméstica. Para su dimensionamiento, se realizó la simulación de su funcionamiento mediante el programa TRNSYS (1), tanto por lo atípico de la demanda (que no aseguraba la obtención de resultados adecuados mediante el método "f-chart" (2)) cuanto por la necesidad de adquirir, en nuestro grupo de trabajo, experiencia en la utilización de programas aplicables a la simulación de sistemas significativamente más complejos.

El conjunto de colectores fue calculado para las necesidades de un turno y el tanque de acumulación para las de los dos. Por razones de simplicidad, se decidió utilizar circulación termosifónica.

2. ADQUISICION DE LOS COLECTORES

Se consideró apropiado aprovechar la oportunidad para efectuar a los proveedores de los colectores planos necesarios el requerimiento, a nuestro saber por primera vez en el país, de suministrar junto con su oferta la correspondiente curva de eficiencia, determinada según una norma de amplia difusión internacional. En particular, se especificó la norma ASHRAE - 93-77 que, aparte de proveer los parámetros de la curva de eficiencia que requiere la operación del mencionado programa TRNSYS, es la que se ha tomado como base para la preparación de la Norma IRAM 210.002 sobre ensayo de colectores solares, actualmente en etapa de discusión. Se estima que este requerimiento ayudará a introducir en el mercado local de colectores solares planos una base unificada para la comparación del comportamiento de éstos ante diversos tipos de demanda a satisfacer y que, de este modo, contribuirá a que dicho mercado se oriente hacia un nivel general más elevado que el existente. Se exigió, además, que la curva presentada tuviese la aprobación escrita del Depto. de Energía Solar del Grupo de Energía No Convencional de la Comisión Nacional de Investigaciones Espaciales.

[†] Contratado como profesional independiente.

ciales (CNIE) o de una institución extranjera de reconocido nivel. Finalmente, el llamado a licitación indicaba: (i) para cada uno de los tipos de colectores que cumple se las especificaciones técnicas establecidas, se calcularía el área de colección requerida para la demanda a satisfacer aplicando el programa TRNSYS manteniendo fijos sus demás parámetros; (ii) las áreas así obtenidas serían multiplicadas por las correspondientes cotizaciones, expresadas en costo por unidad de área bruta de colector ($\$/m^2$); (iii) los resultados serían usados para determinar un orden de costos efectivos del sistema de colección, orden que constituiría uno de los elementos a tener en cuenta para la evaluación definitiva de las ofertas [†].

La medida en que se logró la finalidad perseguida está dada por el hecho de que, durante los 4 meses siguientes al llamado a licitación, el mencionado Depto. de Energía Solar de la CNIE recibió cinco solicitudes para la determinación de curvas de eficiencia según Norma ASHRAE - 93-77 en su banco de pruebas; en cambio, desde la puesta en operación de éste, unos dos años antes, hasta dicha fecha, se habían recibido en total solamente cuatro solicitudes.

De los 13 colectores distintos ofrecidos, 6 fueron descartados por no venir las ofertas acompañadas con la curva de eficiencia exigida; de entre ellos, varios tampoco satisfacían otras de las especificaciones técnicas estipuladas. Tres más fueron eliminados por no figurar sus proveedores en el correspondiente registro estatal. Para cada uno de los cuatro tipos restantes de colector se evaluó el área total de colección necesaria, según el procedimiento indicado previamente, e imponiendo la condición de diseño de que 85-90 % del requerimiento total de energía debía ser provisto mediante conversión de energía solar (ver punto 4). Para los parámetros intervinientes se adoptaron valores estimados previamente como cercanos a los que caracterizarían la instalación definitiva (ver punto 3). En particular, se despreciaron las pérdidas en las cañerías entre el conjunto de colectores y el tanque de acumulación.

Los resultados obtenidos fueron volcados al gráfico de la Fig. 1. En ordenadas figura el costo de la respectiva área total de colección, en pesos de Febrero de 1981. En abscisas, la "fracción auxiliar anual", calculada como el cociente entre la energía convencional entregada al sistema y la energía requerida para satisfacer la demanda. Para cada curva se consigna el área bruta del respectivo colector y, al lado de cada punto del gráfico, el correspondiente número de

colectores [†]. El intervalo de diseño preestablecido se indica explícitamente.

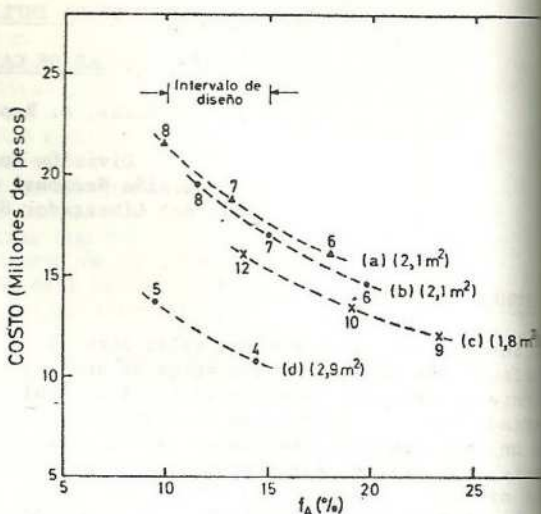


Fig. 1: Costo de las áreas totales de colección correspondientes a distintos tipos de colectores presentados a la licitación (en pesos de Febrero de 1981), en función de la fracción auxiliar anual necesaria para satisfacer la demanda. Para cada curva se consigna el área bruta del respectivo colector y, en cada punto, el correspondiente número de éstos.

Considerando que el sistema constituye, al menos en el ámbito de la CNEA, un proyecto de demostración a pequeña escala, se optó por asignar peso importante a la calidad de los colectores ofrecidos, teniendo en cuenta: materiales empleados en la placa de absorción de la radiación solar y en los caños conductores del agua, forma de contacto entre estos dos elementos, hermeticidad de la caja (diseño de materiales empleados), inclusión de segundo vidrio debajo de la cobertura frontal, términos de la garantía. También se consideró el diámetro de los caños del colector, dada la pérdida termosifónica adoptada, como así mismo la cantidad de colectores requeridos y el área ocupada por éstos, datos que inciden, a cierta medida, en los gastos de instalación. Las consideraciones precedentes llevaron a preseleccionar los conjuntos de 7 y 8 colectores de las dos curvas superiores mostradas en la Fig. 1. Al comparar el conjunto de 7 colectores del tipo (a) con los conjuntos de 7 y 8 colectores tipo (b) se tuvo en cuenta que: el primer tipo posee un vidrio adicional detrás de la cobertura frontal, por lo cual se

[†] Para el colector (d) se evaluaron los puntos suponiendo que la curva de eficiencia presentada corresponde a área bruta, lo cual no es totalmente seguro; de haberse utilizado el área neta, los puntos se desplazarían hacia la derecha en aproximadamente 10-20 %.

[†] Todas las salidas de computadora están a disposición de los oferentes para su consulta.

consideró que no se requería dispositivo automático de desagote para evitar el congelamiento del agua dentro de los colectores por baja temperatura ambiente y (ii) que las pequeñas diferencias de costo entre los tres sistemas son compensadas por las apuestas de ganancias en la fracción auxiliar anual. Consecuentemente, se adquirió el conjunto de 7 colectores del tipo (a).

3. APLICACION DEL PROGRAMA TRNSYS

TRNSYS es uno de los programas más poderosos

existentes en el mundo para la simulación de sistemas solares de baja temperatura, no usado hasta el presente en la Argentina. Cuenta de 35 tipos de subrutinas (ver Apéndice) que pueden vincularse a voluntad, lo cual le confiere gran versatilidad para la conformación de dichos sistemas. En la Fig. 2 se muestra el diagrama de flujo de información empleado en la simulación de la instalación para calentamiento de agua que se discute. Las subrutinas empleadas están identificadas por el mismo número que en el Apéndice.

DIAGRAMA DE FLUJO TRNSYS

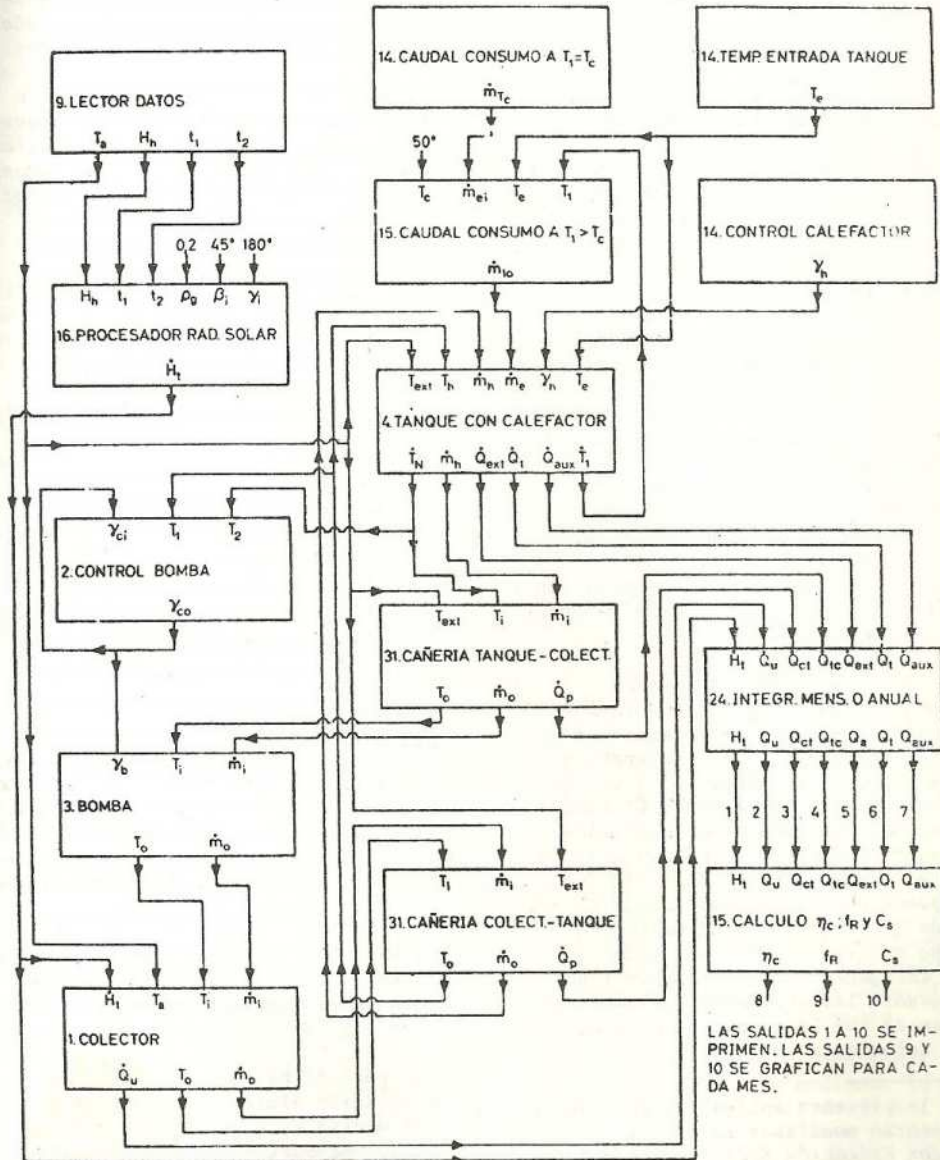


Fig. 2: Diagrama de flujo de información del programa TRNSYS para el sistema de calentamiento de agua para duchas de la Planta de Deformación de la Fábrica de Aleaciones Especiales de la CNEA.

Los datos horarios de temperatura ambiente y radiación solar total sobre un plano horizontal, introducidos al programa a través de 9-Lector Datos, corresponden a un año tipo completo. No existiendo datos usables de radiación solar de Ezeiza, se optó por utilizar los disponibles de San Miguel para el lapso 1970-1973, considerando que las diferencias climáticas entre ambas localidades no son significativas. Se partió de datos mensuales de heliofanía relativa de la misma localidad correspondientes a 30 años y, para cada mes del año, se calculó el correspondiente valor medio sobre ese período. Luego, del lapso 1970-73 se seleccionaron aquellos 12 meses cuyo valor de heliofanía relativa mensual fuese más cercano al correspondiente valor medio mencionado.

La simulación realizada por 1-Colector se efectuó en el modo de funcionamiento que, a parte de la radiación solar total sobre el plano de los colectores provista por 16-Procesador Radiación Solar[†], requiere los valores característicos de la curva de eficiencia según Norma ASHRAE - 93-77 del colector utilizado.

Dado que el programa no contempla la opción de circulación termosifónica, se debieron incluir las subrutinas 3-Bomba y 2-Control Bomba. A fin de optimizar esta parte de la simulación, se impuso que la bomba iniciara su funcionamiento toda vez que la diferencia de temperatura entre la salida y la entrada de los colectores superase $0,5^{\circ}\text{C}$ y se fijó el caudal de $0,5$ litro/(min - m^2 colector); este último valor es apropiado para circulación termosifónica y suficientemente cercano al valor utilizado en la Norma ASHRAE - 93-77 (1 litro/(min - m^2 colector)) como para considerar válida la curva de eficiencia obtenida mediante su aplicación.

El volumen de acumulación del sistema (3150 litros) se simuló mediante 4-Tanque con calefactor, a la cual se le suministraron los datos referentes a la temperatura del agua de alimentación (Fig. 3) a través de 14 Temperatura Entrada Tanque. El tanque se supuso estratificado en tres secciones, en la superior de las cuales está montado un calefactor eléctrico con potencia tal que en dos horas pueda elevar la temperatura de ese tercio desde la temperatura de entrada a 50°C . Dicho calefactor es controlado por 14-Control Calefactor que lo pone en funcionamiento durante las dos horas previas a la demanda siempre que la temperatura en dicho tercio sea inferior a 50°C .

[†] Durante la presente aplicación del programa fue necesario modificar la subrutina 16-Procesador Radiación Solar dado que se detectó un error que, en ciertas condiciones, llevaba a considerar el cuadrante erróneo para el azimut solar (3).

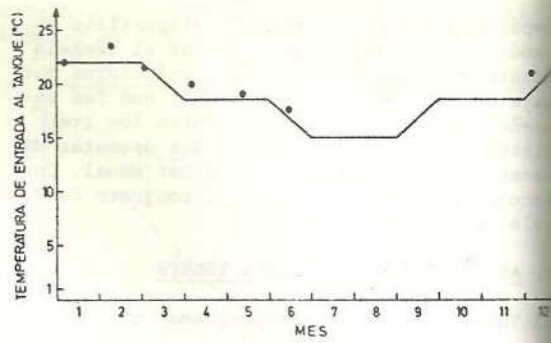


Fig. 3: Variación supuesta de la temperatura del agua a la entrada del tanque de acumulación en función de la época del año. Los puntos indican valores experimentales.

Las subrutinas 14-Caudal Consumo a $T_1 = T_c$ y 15-Caudal Consumo $T_1 > T_c$ establecen el perfil del consumo (Fig. 4) suministrado a 4-Tanque con Calefactor, ya sea la temperatura en el tercio superior de 50°C o mayor.

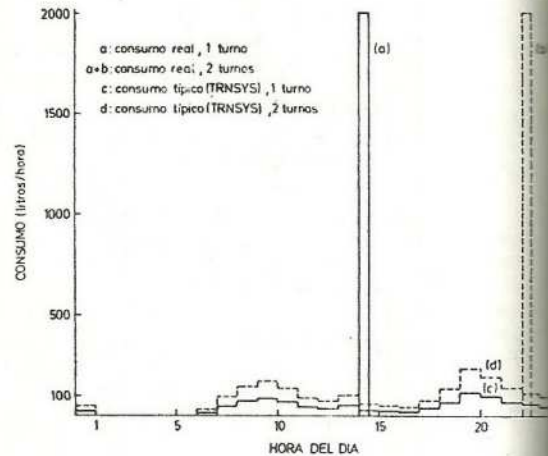


Fig. 4: Caudales de consumo (a 50°C) en función de la hora de días hábiles. (a) 1 turno; (b) 2 turnos; (c) consumo doméstico típico, equivalente 1 turno; (d) consumo doméstico típico, equivalente 2 turnos. Durante fines de semana y feriados las amplitudes se reducen a un cuarto de las mostradas en el gráfico.

Para simular el efecto de las cañerías entre el conjunto de colectores y el tanque de acumulación se incluyeron dos subrutinas tipo 3 (ver Fig. 2).

Los parámetros de interés resultantes de la simulación efectuada se obtienen como integrales mensuales o anuales a través de 24-Integrador Mensual o Anual y 15-Cálculo η_c ; f_{R_c} ; f_{R_s} . Son:

= energía solar incidente por unidad de área en el plano de los colectores,

= energía total extraída del conjunto de colectores,

Q_{tc} : pérdidas térmicas en las cañerías,

= pérdidas térmicas en el tanque,

= energía extraída del tanque para satisfacer la demanda,

= energía convencional adicional requerida para satisfacer la demanda,

= $Q_u/H_t A$: eficiencia del conjunto de colectores de área total A,

= $Q_u/(Q_t+Q_a+Q_{ct}+Q_{tc})$ = capacidad solar: cociente entre la energía entregada por los colectores y la energía total consumida en el sistema,

= Q_{aux}/Q_t = fracción auxiliar: cociente entre la energía convencional entregada al sistema y la energía requerida para satisfacer la demanda,

= $(Q_t - Q_{aux})/Q_t = 1 - f_A$ = factor de reemplazo: fracción de la energía requerida para satisfacer la demanda que es provista a partir de la energía solar (equivale al f del método "f-chart").

es atribuible principalmente a que en la versión definitiva, por una parte, se incorporaron las pérdidas en cañerías y, por otra, el volumen de acumulación a calentar con el cañefactor es 5 % mayor; (iii) en este sistema, reducir a la mitad la relación entre volumen de acumulación y área de colección (curvas (b) y (c)) modifica a f_A anual en sólo ~ 0,5 %.

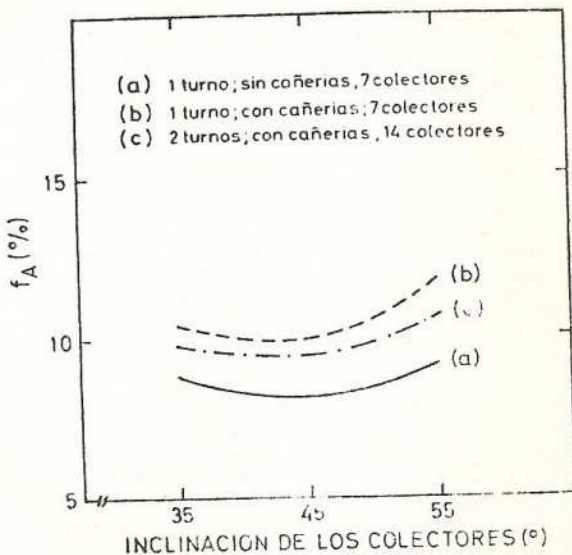


Fig. 5: Fracción auxiliar anual f_A en función de la inclinación de los colectores para el tipo seleccionado en la licitación. La curva (a) corresponde al conjunto de parámetros que se usaron para evaluar los colectores ofrecidos.

4. RESULTADOS COMPARATIVOS

El diagrama de flujo de la Fig. 2 es el utilizado para la simulación del sistema real en proceso de montaje. El previamente usado para el análisis de la ofertas presentadas al llamado a licitación no incluyó la simulación de las cañerías y empleaba valores aproximados, si bien cercanos a los definitivos, para: (i) volumen del tanque de acumulación, (ii) temperatura del agua de alimentación a éste, (iii) temperaturas iniciales de las tres zonas estratificadas del mismo, (iv) diferencia mínima requerida entre las temperaturas del agua a la salida y a la entrada de los colectores para que la bomba inicie su funcionamiento y (v) hora a la cual se produce la demanda correspondiente al primer turno. En la Fig. 5 (curvas (a) y (b)) se muestra la fracción auxiliar anual para ambas versiones del programa de simulación en función de la inclinación de los colectores. La curva (c) de la misma figura corresponde a área de colección doble y demanda establecida por el funcionamiento de los dos turnos de operarios (ver Fig. 4). Se observa que: (i) en los tres casos, la inclinación óptima está entre 43° y 45°, no siendo importante la variación de f_A anual entre 40° y 50° (se adoptó 45° como inclinación de montaje); (ii) las versiones preliminar y definitiva del programa dan resultados que difieren en sólo 2 % en f_A anual, lo cual convalida el análisis de las ofertas efectuado; la diferencia

Si en vez de la versión preliminar del programa se hubiese aplicado el método "f-chart" (2), el área de colección requerida para $f_A \approx 13$ % (ver Fig. 1) hubiese resultado ~ 19 % mayor (17,2 m²). Para el valor definitivo de $f_A \approx 15$ %, hubiese resultado ~ 11 % mayor (16,2 m²). Estas diferencias pueden resultar económicamente no significativas para instalaciones pequeñas, pero decididamente lo son para las de mayor tamaño.

Por otra parte, señalamos que las fracciones auxiliares anuales que, para este sistema, se obtienen por el método "f-chart" y por el programa TRNSYS ejecutado para el mismo perfil de consumo doméstico típico empleado en aquel método (ver Fig. 4) difieren sensiblemente: 18,5 % y 13,5 %, respectivamente.

En cuanto a la energía convencional que se espera ahorrar anualmente mediante la instalación definitiva (f_A anual de 15 %), se la calcula en 8860 kWh para el caso de un turno.

Finalmente, el límite superior del rango de diseño para f_A establecido en el proceso de selección de los colectores a adquirir fue

fijado arbitrariamente. En cuanto al inferior, está vinculado al hecho de que, al disminuir f_A anual por el agregado de colectores al sistema (manteniendo constantes sus demás parámetros) éste reduce su eficiencia, con el consecuente incremento en el costo unitario de los kWh ahorrados adicionalmente. Por ejemplo, para el tipo de colector seleccionado, disminuir f_A anual en 5 unidades mediante el pasaje de 6 a 7 colectores implica un ahorro adicional de energía convencional de 247 kWh-año por m^2 agregado; en cambio, al lograr la misma disminución mediante el pasaje de 7 a 9 colectores, dicho ahorro resulta 1,8 veces menor.

5. ESTADO ACTUAL

Los colectores están instalados. El tanque de acumulación y la totalidad de los demás elementos del sistema de calentamiento en sí se encuentran en el Centro Atómico Ezeiza. Se prevé concluir su montaje y la ulterior aislación de las cañerías durante Agosto de 1981.

A fin de evaluar la validez de la simulación efectuada y de realizar un análisis económico del funcionamiento del sistema, se registrarán los parámetros característicos de éste durante aproximadamente 3 años, para lo cual se instalarán los sensores y el equipo de adquisición de datos necesarios.

6. RECONOCIMIENTOS

El Ing. H. Corso, de la Fábrica de Aleaciones Especiales, provee eficientemente la infraestructura requerida y supervisa la instalación.

El programa TRNSYS y los datos meteorológicos fueron cedidos por el Dpto. de Energía Solar de la CNIE dentro del marco del convenio de colaboración en el campo de la energía solar establecido entre aquella institución y la CNEA.

Los autores agradecen el apoyo continuo de los demás miembros de la División Energía Solar, como también el brindado por la Sección Apoyo Técnico del Dpto. de Física, ambas de la CNEA.

7. REFERENCIAS

- 1.- S.A. Klein et al., "TRNSYS, A Transient System Simulation Program"; editado por el Solar Energy Laboratory, Universidad de Wisconsin-Madison, Madison, EE.UU. de N.A. (1979).
- 2.- W.A. Beckman, S.A. Klein y J.A. Duffie, "Solar Heating Design, by the f-chart Method"; John Wiley & Sons, New York, EE.UU. de N.A. (1977).
- 3.- TRNSYSNEWS, A Transient System Simulation Newsletter, 2, N° 1; Solar Energy

Laboratory, Universidad de Wisconsin-Madison, Madison, EE.UU. de N.A. (1981).

8. APENDICE

SUBROUTINAS TRNSYS

- TYPE 1 : Colectores planos.
- TYPE 2 : Control diferencial on/off.
- TYPE 3 : Bomba o ventilador.
- TYPE 4 : Tanque estratificado (opción: Calentador auxiliar interno).
- TYPE 5 : Intercambiador de calor.
- TYPE 6 : Calentador auxiliar externo.
- TYPE 7 : Aire acondicionado por absorción.
- TYPE 8 : Termostato de tres estados para habitaciones.
- TYPE 9 : Lector de datos.
- TYPE 10 : Acumulación térmica por lecho de piedras.
- TYPE 11 : Piezas T, desviadores y mezcladores de flujo.
- TYPE 12 : Calentamiento de ambientes. Grados día.
- TYPE 13 : Válvulas de alivio.
- TYPE 14 : Funciones externas dependientes de tiempo.
- TYPE 15 : Operaciones algebraicas.
- TYPE 16 : Procesador de radiación solar.
- TYPE 17 : Muros o techos planos.
- TYPE 18 : Techos inclinados y áticos.
- TYPE 19 : Habitaciones y basamentos.
- TYPE 20 : Bomba de calor.
- TYPE 21 : Subsistema colector plano con fluido líquido y tanque de almacenamiento (circuito cerrado con intercambiador).
- TYPE 22 : Similar al anterior pero con colectores a aire.
- TYPE 23 : Subsistema de calentamiento de agua de uso doméstico.
- TYPE 24 : Integrador numérico.
- TYPE 25 : Impresor.
- TYPE 26 : Graficador.
- TYPE 27 : Histograma con graficador.
- TYPE 28 : Resumen de la simulación.
- TYPE 29 : No asignada.
- TYPE 30 : Colector del tipo parabólico-compuerto.
- TYPE 31 : Tubos y conductos.
- TYPE 32 : Serpentina refrigerante.
- TYPE 33 : Humedad relativa y cálculos de bulbo húmedo.
- TYPE 34 : Aleros y parasoles.
- TYPE 35 : Ventanas.
- TYPE 36 : Muro acumulador de calor.