

## DIMENSIONAMIENTO DE UN SISTEMA DE ENERGÍA TERMOSOLAR MEDIANTE EL USO DE UN MODELO

**Arturo Daniel Alarcón Rodríguez**  
*Universidad Privada Boliviana*  
tutito@hotmail.com

(Recibido el 25 marzo 2003, aceptado para publicación el 13 de julio 2003)

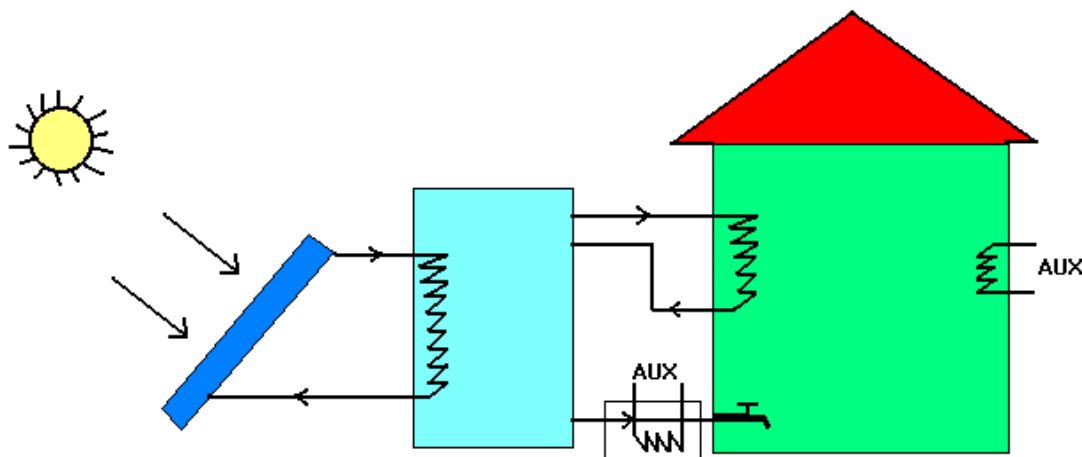
### RESUMEN

En el presente artículo se expone el método de dimensionamiento de sistemas termosolares mediante el uso de un modelo matemático. Este método es comúnmente usado debido que es simple, flexible pero a la vez muy potente. La simulación del sistema termosolar se realiza en base a un modelo matemático que describe los fenómenos térmicos que ocurren mediante un conjunto de ecuaciones diferenciales. Los parámetros que determinan el modelo son coeficientes de intercambio de calor entre los elementos del sistema, parámetros que representan las características de los componentes del sistema termosolar y parámetros que representan las condiciones en las que trabajará el sistema. Estos parámetros se determinan en base a recomendaciones de bibliografía, observaciones, mediciones de campo y correlaciones adecuadas. El uso de un modelo para el dimensionamiento de un sistema termosolar resulta una herramienta muy útil, ya que se adapta a distintas configuraciones de sistemas termosolares. Permite asimismo, tener una idea bastante aproximada del comportamiento del sistema termosolar en distintas condiciones de uso, la que sólo podría obtenerse a través de experimentos físicos complicados y por ende costosos.

**Palabras Clave:** Sistema Termosolar, Dimensionamiento, Modelo Matematico.

### 1. INTRODUCCIÓN

Los sistemas termosolares son aquellos que convierten la energía solar en energía térmica capaz de ser usada en diversos fines, desde calentar agua hasta fundir metales. Los sistemas termosolares más comunes son los usados en calentamiento de agua y calefacción de ambientes, éstos sistemas se conocen como “sistemas termosolares domésticos”. Un sistema termosolar doméstico está compuesto básicamente de elementos que captan la energía solar y la convierten en energía térmica (colectores solares), elementos donde se almacena la energía térmica (tanques de acumulación o acumuladores), y elementos de traslado de la energía térmica hasta su uso final, ya sea consumo de agua caliente, calefacción o ambos (ductos e intercambiadores de calor). En la figura se observa el esquema de un sistema termosolar doméstico para calefacción y calentamiento de agua. (En la figura, “AUX” se refiere a adición de energía mediante fuentes externas auxiliares).



**Figura 1** - Sistema termosolar doméstico.

El dimensionamiento de los sistemas termosolares consiste en determinar el tamaño óptimo de cada uno de sus componentes, obteniendo una configuración que cumpla con las necesidades del usuario, y generalmente con un costo que sea mínimo. Existen varios métodos para dimensionar un sistema termosolar. Para sistemas simples, como por ejemplo un pequeño sistema doméstico de calentamiento de agua, el dimensionamiento puede realizarse mediante el uso de tablas y gráficos, obteniendo resultados satisfactorios [2]. Sin embargo, para sistemas de mayor envergadura, es aconsejable realizar el dimensionamiento mediante la simulación del sistema termosolar. Este método es más flexible y

se adapta a cada una de las diferentes situaciones, brinda información detallada sobre el comportamiento del sistema en diversas condiciones y permite observar el efecto del cambio de los parámetros del sistema.

Para realizar la simulación es necesario plantear un modelo matemático que describa el comportamiento térmico del sistema. Dicho modelo es una abstracción de la realidad y debe incluir las características más relevantes del intercambio de calor entre los componentes del sistema, así como de las condiciones externas. Una vez planteado el modelo, se escribe el sistema de ecuaciones diferenciales que describe el comportamiento térmico del sistema termosolar. La resolución del sistema de ecuaciones permite realizar la simulación del funcionamiento del sistema termosolar, observar su comportamiento, y determinar el tamaño óptimo de sus componentes. A continuación se describe la metodología, usando como ejemplo el dimensionamiento de un sistema termosolar diseñado para proveer de agua y calefacción al campamento minero “Buena Esperanza – Suches” [1].

## 2. EL CAMPAMENTO MINERO “BUENA ESPERANZA – SUCHES”

El proyecto minero “Buena Esperanza – Suches” está situado en la provincia Franz Tamayo del departamento de La Paz. Se encuentra en el límite norte del Altiplano boliviano, donde las temperaturas son muy bajas (3° - 6° C promedio anual), y los niveles de radiación solar muy elevados. Para el alojamiento de los trabajadores, el proyecto cuenta con un campamento, construido con adobe, con capacidad para 20 personas. En dicho campamento se cuenta con electricidad, calefacción y agua caliente.

La calefacción se provee mediante estufas eléctricas, y el agua caliente mediante quemadores de GLP. El uso de la electricidad para generar calor es un proceso ineficiente, ya que involucra varias transformaciones de energía, cada una con un rendimiento individual, lo que hace el rendimiento global del proceso muy bajo.

Diesel → Calor → Movimiento → Electricidad → Calor  
E. Química → E. Térmica → E. Mecánica → E. Eléctrica → E. Térmica

Otro problema que se tiene en el campamento es el elevado costo de la energía eléctrica 0.327 \$us/kWh. Este elevado costo se debe al bajo rendimiento del generador 18.4%. Un bajo rendimiento determina un mayor consumo específico de combustible (se necesita más combustible para generar la misma cantidad de energía que se generaría con rendimiento nominal). Siendo que alrededor del 60% de la energía generada se usa para calentar el campamento se propuso un sistema termosolar para proveer de calefacción y adicionalmente de agua caliente al campamento [1]. Este sistema estaría compuesto de un campo de colectores, un tanque de acumulación de energía localizado en el baño del campamento, intercambiadores de calor, sistemas de control, ductos y accesorios.

## 3. PLANTEAMIENTO DEL MODELO

El primer paso para plantear el modelo del sistema termosolar es seleccionar nodos o volúmenes de control en él. Dichos nodos están caracterizados por su temperatura, su capacidad calorífica e intercambian energía con los demás nodos del sistema. Los nodos deben seleccionarse de tal manera de facilitar el planteamiento de las ecuaciones, y a la vez describir fielmente al sistema. Por ejemplo, en el sistema termosolar para calefacción y provisión de agua caliente al campamento pueden seleccionarse cinco nodos:

- El fluido colector. (Fluido que se encuentra en los colectores)
- El fluido de uso. (Fluido que se encuentra en el tanque de acumulación y se usa para consumo y para calentamiento de las habitaciones)
- El ambiente donde se encuentra el tanque
- El ambiente de las habitaciones
- El ambiente exterior

Debe distinguirse entre nodos flotantes y nodo fijos. La temperatura de los nodos flotantes (en este caso 1, 2, 3 y 4) varía en función a las demás temperaturas del sistema, mientras que la temperatura del nodo fijo (5), es independiente de las temperaturas del sistema, y varía en función de las condiciones meteorológicas. En la figura 2 pueden observarse los nodos seleccionados en el sistema.

Seleccionados los nodos debe identificarse las interacciones térmicas que existen entre ellos, observando el intercambio de calor entre los nodos y la adición o sustracción de energía en cada uno de ellos. En la figura 3 se tiene un diagrama de las interacciones entre los nodos.

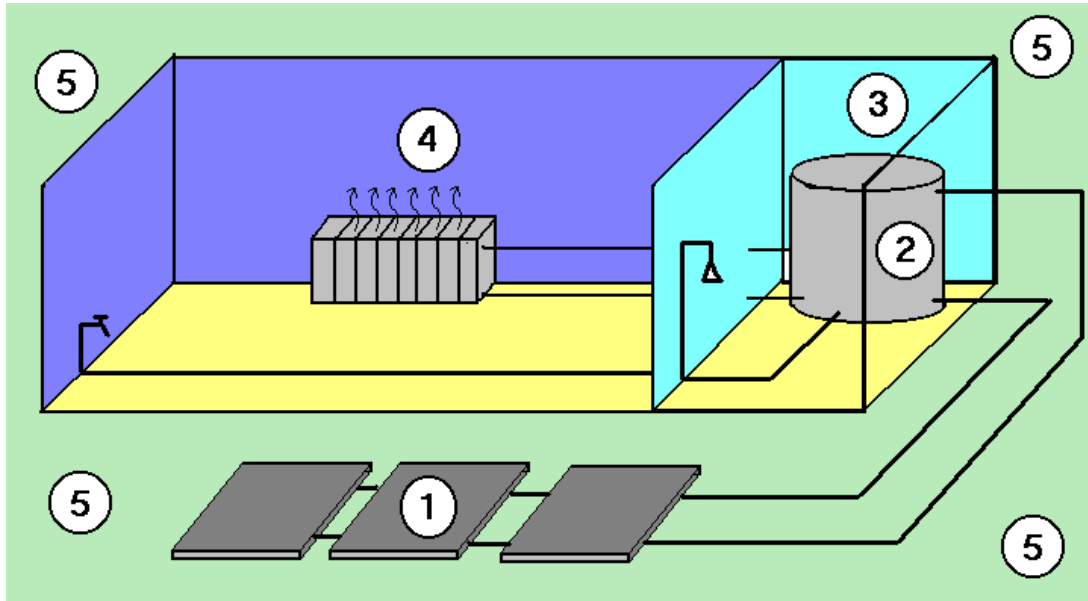


Figura 2. Identificación de los nodos del sistema.

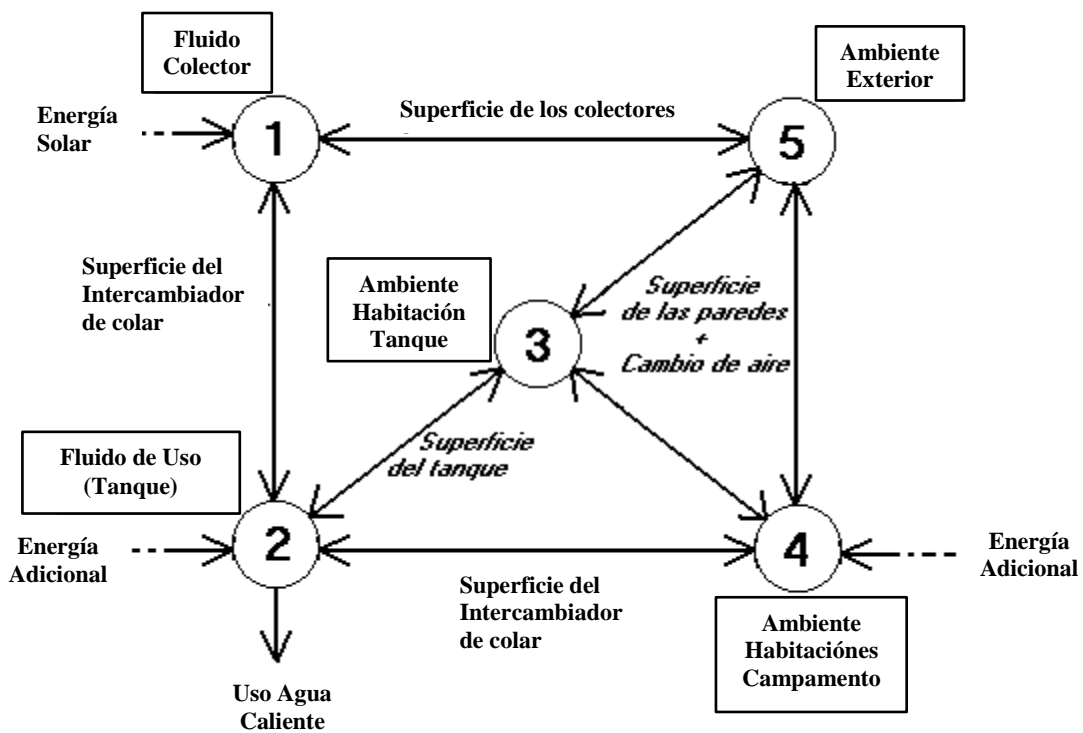


Figura 3 - Interacciones entre los nodos del sistema.

#### 4. SISTEMA DE ECUACIONES

La parte fundamental de la simulación es el sistema de ecuaciones, ya que es éste el que describe el comportamiento del sistema termosolar. Para poder plantear el sistema de ecuaciones es necesario realizar un balance de energía en cada nodo. El balance de energía consiste en aplicar la ley de la conservación de la energía. Esta ley postula que la energía no se crea ni se destruye, sólo se transforma. i.e. el cambio de la energía en un cuerpo es igual a la energía que absorbe menos la energía que emite.

El flujo de la energía térmica de un nodo es el producto de su capacidad calorífica por la derivada de la temperatura respecto al tiempo, siempre que la masa y el calor específico se mantengan constantes. La diferencia de la energía que

entra al nodo y la que sale de él es la sumatoria del intercambio de calor de este nodo con los demás nodos del sistema, más el calor generado (o consumido) dentro del nodo [2]:

$$(mC_p)_i \frac{dT_i}{dt} = \left( \sum_j K_{ji} (T_j - T_i) + q_i \right)$$

Como se indicó anteriormente, cada nodo (i) está caracterizado por su capacidad calorífica, que es el producto de su masa por su calor específico  $(mC_p)_i$  y por su temperatura  $T_i$ . El intercambio de calor del nodo (i) con los demás nodos del sistema (j) se expresa como el producto de un coeficiente global de intercambio de calor  $K_{ji}$  por la diferencia de temperaturas  $(T_j - T_i)$ . Por último debe considerarse el calor generado o consumido en el nodo  $q_i$ . Realizando el balance de energía para cada uno de los nodos se obtiene:

Nodo 1:

$$(mC_p)_1 \cdot \frac{dT_1}{dt} = Q_{SOL} + F_R A_C U_C (T_5 - T_1) + \varepsilon_{12} C_{\min(1,2)} (T_3 - T_1) \cdot Fb$$

Nodo 2:

$$(mC_p)_2 \cdot \frac{dT_2}{dt} = \varepsilon_{12} C_{\min(1,2)} (T_1 - T_2) \cdot Fb + (UA)_{23} (T_3 - T_2) + \varepsilon_{24} C_{\min(2,4)} (T_4 - T_2) \cdot Fa \\ + (mC_p)_{agua} (T_{fria} - T_2) + Q_{AUXAGUA}$$

Nodo 3:

$$(mC_p)_3 \cdot \frac{dT_3}{dt} = (UA)_{23} (T_2 - T_3) + (UA)_{35} (T_5 - T_3) + (UA)_{34} (T_4 - T_3) + (n\rho C_p V)_{35} (T_5 - T_3) \\ + (n\rho C_p V)_{34} (T_4 - T_3)$$

Nodo 4:

$$(mC_p)_4 \cdot \frac{dT_4}{dt} = (UA)_{34} (T_3 - T_4) + (UA)_{45} (T_5 - T_4) + (n\rho C_p V)_{45} (T_5 - T_4) + \varepsilon_{24} C_{\min(2,4)} (T_2 - T_4) \cdot Fa + \\ Q_{AUXH} + (n\rho C_p V)_{43} (T_3 - T_4)$$

La temperatura del nodo 5, al ser éste un nodo fijo es una variable independiente, que depende de las condiciones atmosféricas.

## 4. PARÁMETROS DEL SISTEMA

### 4.1 PARÁMETROS A DIMENSIONAR

El objetivo del dimensionamiento es determinar el tamaño de los componentes del sistema termosolar, el cual está expresado en las ecuaciones como la magnitud de distintos parámetros. Para el caso del campamento minero los parámetros son:

- Área del campo de colectores  $A_C$ .
- Volumen del tanque de acumulación  $m_2$  (La masa es función del volumen).
- Potencia del intercambiador entre fluido colector y el fluido de uso  $\varepsilon_{12} C_{\min(1,2)}$ .
- Potencia del intercambiador entre el fluido de uso y el ambiente  $\varepsilon_{24} C_{\min(2,4)}$ .
- Flujo de masa en los colectores  $m_1$  (La masa en los colectores depende del flujo de masa en ellos).

No debe confundirse los parámetros a dimensionar con las incógnitas del sistema de ecuaciones. En el sistema de ecuaciones las incógnitas son las temperaturas de los nodos flotantes ( $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$  y  $T_4$ ).

El valor de los parámetros a dimensionar en un principio no es conocido, por lo que se debe elegir algún valor. El valor elegido debe estar dentro de límites racionales (un campo de colectores de 2000 m<sup>2</sup>, para un sistema termosolar doméstico, es poco racional). El valor irá ajustándose a medida que el dimensionamiento se lleve a cabo.

Con excepción de los parámetros que deben ser dimensionados, el resto son conocidos y deben ser calculados para poder resolver el sistema de ecuaciones diferenciales. A continuación se resume el proceso de cálculo.

#### 4.2 CAPACIDAD CALORÍFICA DE LOS NODOS

La capacidad calorífica del nodo es el producto de su masa por su calor específico ( $mC_p$ ). En el caso de que el nodo esté compuesto de distintas sustancias, se debe sumar el producto de los calores específicos y las masas. Por ejemplo, el nodo 1 es el fluido colector y debido a que las temperaturas en la zona del campamento minero son bajas se decidió utilizar una solución anticongelante de etilen glicol al 30%. Esto implica que la capacidad calorífica del nodo será:

$$(mC_p)_1 = 0.3 \cdot m_{\text{total}} \cdot C_{p_{\text{etilenglicol}}} + 0.7 \cdot m_{\text{total}} \cdot C_{p_{\text{agua}}}$$

Donde  $m_{\text{total}}$  es la masa total de fluido colector, uno de los parámetros que debe ser dimensionado en la simulación, y que está compuesto de 70% de agua y 30% de etilen glicol, lo que reduce el punto de congelamiento a  $-17^\circ\text{C}$ .  $C_{p_{\text{etilenglicol}}}$  es el calor específico del etilen glicol ( $2459 \text{ J/Kgr}^\circ\text{C}$ ), y  $C_{p_{\text{agua}}}$  el calor específico del agua ( $4180 \text{ J/Kgr}^\circ\text{C}$ ).

Generalmente el calor específico de los materiales varía en función de la temperatura, sin embargo en este modelo se considera que es un valor constante, lo que facilita de gran manera la resolución del sistema de ecuaciones, conservando su linealidad sin producir errores de gran magnitud.

En el caso de los otros nodos, al tratarse de agua y aire ( $C_p = 1010 \text{ J/Kgr}^\circ\text{C}$  a  $20^\circ\text{C}$ ), el cálculo de la capacidad calorífica es más simple, ya que basta conocer el volumen del fluido de uso (volumen del tanque de acumulación, un parámetro que debe ser dimensionado), y el volumen de aire de las habitaciones del campamento.

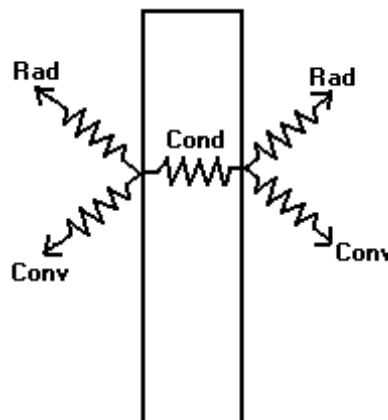
#### 4.3 COEFICIENTES DE INTERCAMBIO DE CALOR

El coeficiente de intercambio de calor entre dos nodos  $K_{ij}$ , indica la facilidad con que la energía fluye entre ellos y depende de las características del fenómeno de intercambio de calor (tipo de intercambio de calor, áreas, materiales, etc). Entonces, para poder calcular el coeficiente de intercambio de calor entre los nodos, es necesario determinar todas estas características.

En las ecuaciones es posible diferenciar tres diferentes tipos de coeficientes de intercambio de calor:

- a) Coeficiente global de intercambio de calor entre los nodos  $i$  y  $j$ ,  $UA_{ij}$ . El cálculo de este coeficiente varía en cada caso, ya que depende de las características del fenómeno. Dentro de las ecuaciones planteadas para el campamento minero, pueden diferenciarse dos casos: coeficientes del campamento  $UA_{34}$ ,  $UA_{35}$ ,  $UA_{45}$ ; y coeficiente del tanque  $UA_{23}$ . Estos coeficientes se calculan como el producto del coeficiente de transferencia de calor por el área de transferencia.

Los coeficientes del campamento corresponden al intercambio de calor que existe a través de los distintos elementos de la construcción (paredes, techo, ventanas y puerta) y ocurre a través de fenómenos combinados de conducción, convección y radiación. En las superficies se tiene radiación y convección combinadas en paralelo, mientras que a través de los materiales constructivos el calor fluye por conducción. El flujo de calor de un ambiente a otro ocurre en serie (radiación y convección en una superficie, conducción en serie a través de los distintos materiales, radiación y convección en la otra superficie). En la figura se observa un esquema del flujo de calor en los elementos del campamento.



**Figura 4** - Intercambio de calor entre los nodos 3,4 y 5.

El posible combinar el coeficiente de intercambio de calor por radiación y convección en un solo coeficiente. Este coeficiente depende de las características de la superficie y de la ubicación de la misma (interior, exterior). En bibliografía referida a la calefacción de edificios puede encontrarse valores recomendados para el mismo [10], [11], [12].

En el caso del campamento minero, para los coeficientes de conducción se usó la conductividad térmica de los materiales que componen el edificio [5], considerando para las ventanas y el techo, donde existe un espacio de aire interior, éste como una resistencia térmica ( $R= 0.14$  y  $0.18 \text{ m}^2\text{K}/\text{m}^2$  respectivamente) [11]. En la bibliografía referida a calefacción de edificios, existen valores recomendados para coeficientes globales de transferencia de calor para los distintos elementos constructivos (paredes, techos, ventanas, puertas), los cuales pueden aplicarse en la mayor parte de los casos [10], [11].

Si bien los coeficientes de radiación, convección y, en menor medida, conducción dependen de la temperatura, es posible considerarlos como constantes, ya que las variaciones en las temperaturas del sistema no son muy elevadas. Esto permite simplificar la resolución del sistema de ecuaciones diferenciales.

En el caso del tanque, puede asumirse que la transferencia de calor ocurre a través de conducción y convección. La radiación, al no existir grandes diferencias de temperatura entre el tanque y su entorno (para tanques interiores), puede ser despreciada. El intercambio de calor ocurre a través de tres superficies distintas, la tapa superior, el cilindro del tanque y la tapa inferior. El cálculo de los coeficientes de convección se realiza a partir de correlaciones adecuadas a cada caso (superficie caliente hacia arriba, superficie caliente hacia abajo, superficie fría hacia arriba, superficie fría hacia abajo y pared vertical) [5]. Es necesario realizar iteraciones de las mismas, ya que estas dependen de la temperatura. Para mantener la linealidad de las ecuaciones diferenciales es posible usar las temperaturas del instante anterior en las iteraciones. Para la conducción a través de los materiales del tanque se usa la conductividad térmica de los materiales del tanque.

b) Coeficiente de intercambio de calor por renovación de aire,  $(n\rho C_p V)_{ij}$ : Este coeficiente se aplica en el caso de dos ambientes comunicados entre sí (nodos 3 y 4), o de un ambiente comunicado con el exterior (nodos 3 y 4 con el nodo 5). Es posible cuantificar el calor intercambiado entre los ambientes conociendo la densidad del aire  $\rho$  ( $1.173 \text{ Kg}/\text{m}^3$ , valor considerado como constante pero que en realidad varía ligeramente en función de la temperatura), el calor específico del aire  $C_p$ , el volumen de aire del ambiente  $V$  y el número de renovaciones por hora  $n$ . Este número generalmente varía entre 0 y 3, e indica la frecuencia con la que se renueva totalmente el aire de un ambiente. En edificios viejos, o ambientes en los que existe mucha entrada y salida de aire, este valor será elevado (1-3 veces/hora), mientras que en edificios nuevos será bajo (0.1 – 0.6 veces/hora) [4]. El número de renovaciones por hora también puede estimarse conociendo el número de ventanas y puertas de un ambiente. Según recomendaciones del “ASHRAE Handbook of Fundamentals” se tiene: habitaciones sin ventanas exteriores  $n=0.5$ ; habitaciones con ventanas o puertas exteriores en un lado  $n=1$ ; habitaciones con ventanas o puertas exteriores en dos lados  $n=1.5$ ; habitaciones con ventanas o puertas en tres lados y recibidores de entrada  $n=2$  [10].

c) Coeficientes de los intercambiadores de calor entre los nodos 1 y 2, 2 y 4,  $\varepsilon_{12} C_{\min(1,2)}$ ,  $\varepsilon_{24} C_{\min(2,4)}$ . Este coeficiente es el producto de la efectividad del intercambiador  $\varepsilon$  y de la capacidad calorífica menor de los dos fluidos  $C_{\min(i,j)}$ . El valor de la efectividad depende de las características del intercambiador (tipo de intercambiador, coeficiente de intercambio, calor específico de los fluidos) y se encuentra entre 0 y 1. El valor de  $\varepsilon_{12} C_{\min(1,2)}$ ,  $\varepsilon_{24} C_{\min(2,4)}$  se conoce también como potencia de intercambio, ya que indica la potencia que es posible transmitir por el intercambiador.

#### 4.4 PARÁMETROS DEL COLECTOR

Los parámetros del colector son la eficiencia óptica  $\tau\alpha$ , el factor de remoción  $F_R$  y el coeficiente global de pérdidas  $U_c A_c$ . La eficiencia óptica indica la capacidad del colector de dejar pasar la radiación solar, es el producto de la absorptancia  $\alpha$  y la transmitancia  $\tau$ . Para los colectores de cubierta simple este valor es igual a 0.81. El factor de remoción  $F_R$  indica la capacidad del colector de transmitir la energía de la placa colectora al fluido.

$F_R$  depende de el flujo de masa en los colectores  $m$ , la capacidad calorífica del fluido colector  $C_p$ , el coeficiente global de pérdidas del colector  $A_c U_c$ , y el factor de eficiencia del colector  $F'$  que es la relación entre la resistencia térmica entre placa colectora y el ambiente y la resistencia térmica entre fluido y el ambiente.  $F'$  indica cuan buena es la transferencia entre la placa absorbadora y el fluido. Con fines prácticos se puede considerar  $F'=1$ , despreciando la resistencia térmica entre la placa absorbadora y el fluido. Para colectores de placa plana  $F_R$  se calcula mediante la relación [2], [4]:

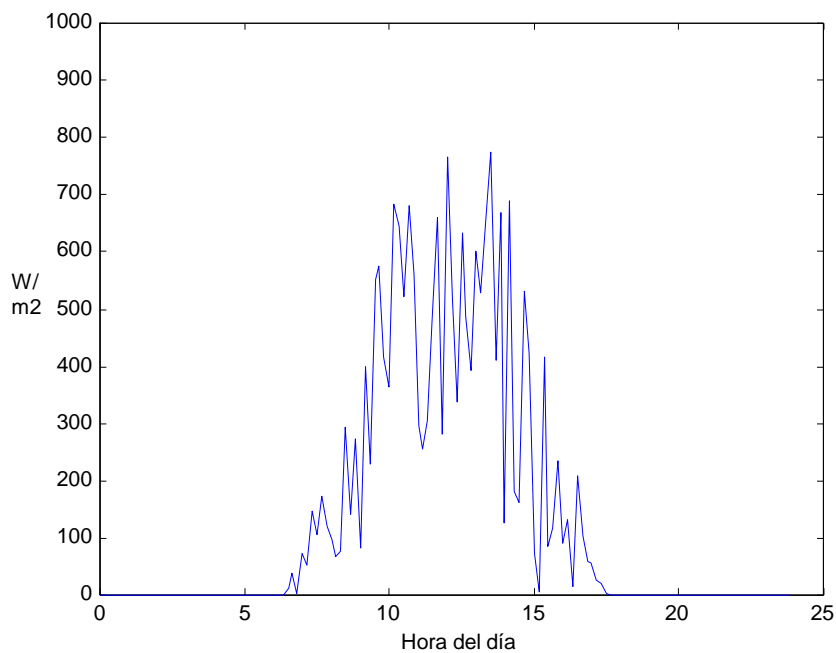
$$F_R = \frac{\dot{m} \cdot C_p}{A_C \cdot U_C} \cdot \left[ 1 - e^{\left( \frac{A_C \cdot U_C \cdot F'}{m \cdot C_p} \right)} \right]$$

El coeficiente global de pérdidas del colector  $U_C A_C$  indica cuanta energía pierde el colector hacia el ambiente. Depende de factores constructivos del colector, y aunque gran parte de la energía se intercambia por radiación (intercambio que depende de la temperatura a la cuarta), generalmente se lo toma como un valor constante. Si bien este valor varía de colector a colector para la se puede tomar un colector de fabricación nacional promedio con un coeficiente de pérdidas de  $6.5 \text{ W/m}^2$  y un colector importado promedio con un coeficiente de pérdidas de  $4 \text{ W/m}^2$  [2].

#### 4.5 PARÁMETROS EXTERNOS

Los parámetros denominados “externos” son aquellos que corresponden al nodo 5 y a la adición o sustracción de energía a los nodos. Son la radiación solar incidente en los colectores, la temperatura ambiente, la temperatura del agua fría y el perfil de consumo de agua.

Los datos de la radiación solar en nuestro país pueden obtenerse del “Mapa de Distribución de la Energía Solar en Bolivia” [7]. Estos datos se presentan en forma de radiación media diaria sobre un plano horizontal para cada uno de los meses. Para la simulación se debe conocer la radiación sobre un plano con  $30^\circ$  de inclinación a intervalos de 10 min. Para ello primero es necesario calcular la radiación media diaria sobre un plano inclinado, usando un modelo de transposición isotrópico [8]. Luego se calcula los valores de radiación a intervalos de 10 min., usando una correlación que asume que la radiación es simétrica respecto al medio día [8]. Es necesario usar también en la simulación perfiles de radiación que simulen días nublados (valores aleatorios) y días con exceso de radiación, con el fin de observar el desempeño del sistema termosolar. En la figura se observa el perfil de radiación para un día nublado.



**Figura 5** - Perfil de radiación.

Para simular la temperatura ambiente puede usarse una serie de Fourier con dos armónicos. El uso de solo dos armónicos se justifica, por el hecho de que los cambios en la temperatura ambiente no son muy bruscos [11]. En el caso del campamento minero se aproximó la serie de Fourier a partir de mediciones realizadas, obteniendo un coeficiente de correlación de 0.96. Para las temperaturas medias mensuales se usaron los datos de la ciudad del Alto (zona climática más parecida de la que se disponían datos), ajustando la temperatura  $0.55 \text{ }^\circ\text{C}$  por cada 100 m de altitud [6]. Por último se recomienda considerar la temperatura del agua fría como la temperatura ambiente menos tres grados [2].

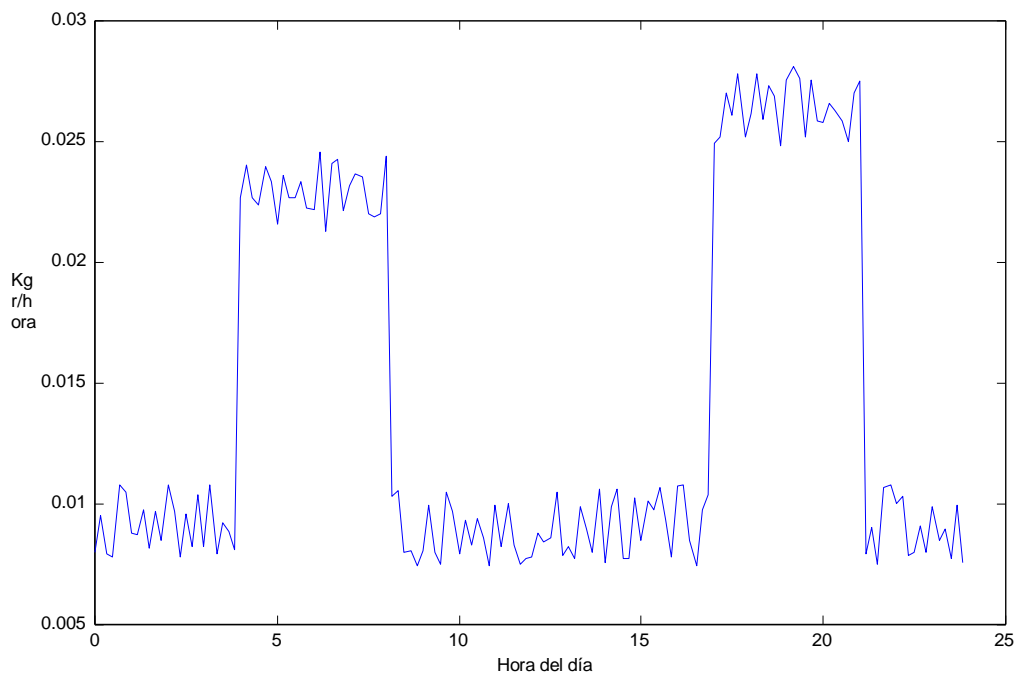
El último parámetro externo que se debe cuantificar es el consumo de agua. Con una perspectiva simple se lo puede considerar como constante, dividiéndolo a lo largo del día. Sin embargo para simular verazmente el comportamiento del sistema es aconsejable realizar un perfil un poco mas detallado. Para el campamento minero, a partir de observaciones y mediciones realizadas, se realizó un perfil compuesto de un consumo constante, un consumo aleatorio y dos periodos

de mayor consumo, coincidentes con los cambios de turno. En la figura 5 se observa el perfil de consumo de agua para el campamento.

#### 4.6 FUNCIONES DE CONTROL “ON-OFF”

Adicionalmente en las ecuaciones se incluyó dos funciones de control “On-Off”,  $F_a$  y  $F_b$ . Éstas simulan el comportamiento de los termostatos que realizan el control del sistema termosolar. La función  $F_a$  simula el termostato que controla la calefacción. Si la temperatura de las habitaciones  $T_4$  es menor a un valor prefijado de  $15^\circ\text{C}$ , tiene un valor de 1. Cuando la temperatura de las habitaciones alcanza el valor prefijado,  $F_a$  es igual a cero, por lo que se simula que el intercambiador de calor entre el fluido de uso y las habitaciones no está funcionando.

La función  $F_b$  simula el control del bombeo del fluido colector a través de los colectores. Este termostato evita que el fluido del tanque sea enfriado por el fluido colector cuando no haya radiación solar. Si la temperatura del fluido colector  $T_1$  es mayor a la temperatura del fluido de uso (o fluido del tanque)  $T_2$ ,  $F_b$  es igual a 1, y el intercambiador entre los dos fluidos está en funcionamiento. Por lo contrario, si el fluido colector está más frío que el fluido de uso (por ejemplo en la madrugada)  $F_b$  es igual a cero, simulando que no existe flujo ni en los colectores ni en el intercambiador de calor.



**Figura 6** Perfil de consumo de agua para el campamento minero

### 5. SIMULACIÓN DEL SISTEMA TERMOSOLAR

La simulación del sistema se realiza resolviendo el conjunto de ecuaciones diferenciales. Si bien existen muchos métodos, uno de los métodos que más se usa en la simulación de sistemas termosolares es el método implícito de Euler. Si bien es un método simple, es a la vez potente y se ajusta a las necesidades del modelo. Este método tiene además la ventaja de asegurar la estabilidad del sistema, no así el método explícito que, aunque es más simple, puede tener problemas de convergencia.

El primer paso de este método es expresar las derivadas en forma de diferencias finitas:

$$\frac{dT_i}{dt} = \frac{(T_i^+ - T_i)}{\Delta t}$$

Luego se reordena las ecuaciones de manera que todas las incógnitas (temperaturas no conocidas) queden en un solo lado:

$$a \cdot T_1^i + b \cdot T_2^i + c \cdot T_3^i + d \cdot T_4^i = e \cdot T_1^{i-1} + K$$

De esta manera se obtiene un sistema lineal de ecuaciones que puede expresarse de forma matricial:

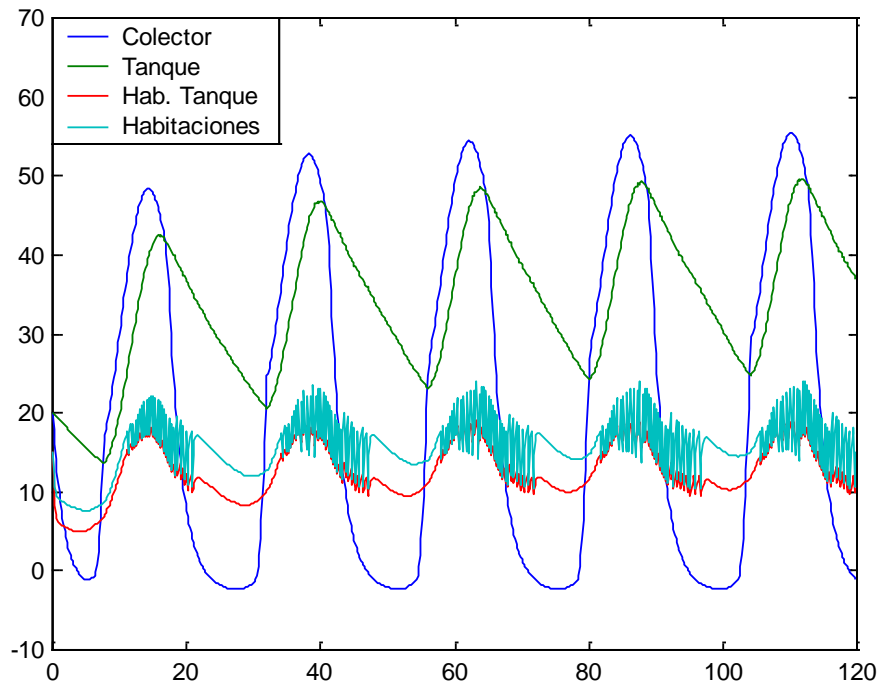


$$A \cdot T = B$$

y puede resolverse:

$$T = A^{-1} \cdot B$$

De esta manera pueden conocerse las temperaturas del sistema a intervalos determinados de tiempo. Comúnmente se uso como intervalo de tiempo 10 min. ya que la constante de tiempo del sistema, tiempo que tarda el sistema en reaccionar a un estímulo, es de este orden. En la figura se observa el resultado para una simulación de 5 días.



**Figura 7** - Simulación del sistema.

## 6. DIMENSIONAMIENTO

El proceso de dimensionamiento consiste en observar el efecto de la variación de los parámetros a dimensionar en las variables del sistema (temperaturas máximas, mínimas y promedio, demanda adicional de energía). Sin embargo, la variable que define el tamaño de los componentes es el costo, ya que generalmente se busca la factibilidad financiera de la instalación. Para ello es necesario considerar el costo de instalación, tomando costos unitarios para cada uno de los parámetros a dimensionar (excepto el flujo de masa en los colectores, cuyo costo es difícil de cuantificar directamente), el costo de operación y mantenimiento, y el costo de la energía extra tradicional.

La demanda de calefacción y agua caliente puede cubrirse con un sistema termosolar pequeño, con un bajo costo de inversión, pero que determina un uso elevado de energía tradicional (electricidad y GLP), con un costo de operación elevado. Por el contrario, es posible cubrir la demanda con un sistema termosolar grande, que determina un elevado costo de inversión, y un consumo de energía tradicional bajo, lo que significa un bajo costo de operación. Mediante las simulaciones es posible determinar la combinación de costo mínimo, y observar además el comportamiento del sistema, lo que permite evaluar la factibilidad técnica del sistema. El sistema será factible técnicamente si las temperaturas se encuentran dentro de rangos aceptables (la temperatura de los colectores no puede ser mayor al punto de ebullición, por ejemplo), y si es posible fabricar o conseguir todos los componentes del sistema.

En la tabla se observan los valores encontrados para el sistema termosolar del campamento minero:

Parámetro	Valor
Área de colectores	68 m <sup>2</sup>
Volumen del tanque	6500 lts
Potencia del intercambiador fluido – fluido	3550 W/°C
Potencia del intercambiador fluido-aire	620 W/°C
Flujo de masa en los colectores	44 Kgr/(m <sup>2</sup> h)

Se determinó que este sistema es factible tanto técnica como económicamente, ya que, debido al elevado costo de la energía en el campamento, tiene una Tasa Interna de Retorno de 59.05 %, ahorrando 4.50 \$us en consumo de energía por cada dólar invertido.

## 7. CONCLUSIONES

El uso de un modelo matemático para el dimensionamiento de un sistema termosolar es un método flexible, que se ajusta a diversas configuraciones de sistemas. Puede usarse tanto para sistemas pequeños, como para sistemas de gran envergadura. Mediante la simulación del modelo es posible observar el comportamiento del sistema termosolar, de la misma forma que si fuera un experimento físico, pero sin necesidad de construirlo. Es posible también observar que efecto producen la variación de los parámetros del sistema termosolar en su comportamiento, cosa que realizada físicamente sería complicada.

El modelo del sistema termosolar debe describir lo más fielmente posible al sistema y debe incluir los fenómenos más relevantes del mismo. El cálculo de los parámetros del sistema debe mantener su relación con los fenómenos reales, pudiendo incluir simplificaciones que faciliten la resolución del sistema de ecuaciones, sin generar grandes errores.

El uso de un modelo matemático no sólo es útil en el dimensionamiento de sistemas termosolares, si no que puede extenderse al estudio de distintos sistemas: térmicos, eléctricos, químicos, mecánicos, etc. Actualmente, la potencia de los equipos de computación, y la existencia de programas especializados en la simulación de modelos, MATLAB por ejemplo, facilitan en gran manera la simulación de cualquier sistema que pueda ser modelado en base a un conjunto de ecuaciones diferenciales, brindando gran cantidad de información respecto al sistema simulado.

## 8. REFERENCIAS

- [1] A. Alarcón. “Diseño de un Sistema de Aprovechamiento de Energía Termosolar para el Campamento del Proyecto Minero “Buena Esperanza – Suches”. Tesis UPB, 2001.
- [2] D. Cabrera y Javier Gil. *Sistemas Solares para el Calentamiento de Agua*. PROPER-Bolivia & GTZ, 1996.
- [3] J. A. Duffin and William A. Beckman. *Solar Energy Thermal Processes*, Editorial Wiley Interscience, 1974.
- [4] J. A. Duffin and William A. Beckman. *Solar Engineering of Thermal Process*, Editorial Wiley Interscience. Segunda Edición, 1991.
- [5] F. P. Incropera and P. DeWitt David. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, Editorial John Wiley & Sons. Tercera Edición, 1990.
- [6] Instituto Nacional de Estadística. *Anuario Estadístico 1988*, CD-ROM, 1998.
- [7] *Mapa de Distribución de la Energía Solar en Bolivia*. Viceministerio de Energía e Hidrocarburos. PROPER – Bolivia, GTZ, ESMAP Banco Mundial. 1998.
- [8] B. Norton. *Solar Energy Thermal Technology*, Editorial Springer – Verlag, 1992.
- [9] G. Oelert et al. *Economic Issues of Renewable Energy Systems*, GTZ. Segunda Edición, 1988.
- [10] R. Simonson. *Computing Methods in Solar System Design*, Editorial Macmillan Press, 1984.
- [11] J. Threlkeld. *Ingeniería del Ambiente Térmico*, Editorial Prentice Hall International. Segunda Edición, 1975.
- [12] H. Y. Wong. *Transmisión de Calor para Ingenieros*, 1977.