

## **SISTEMA DE CALEFACCION HIBRIDO: SOLAR – BOMBA DE CALOR**

Jorge Follari, Daniel Perelló, Luis Odicino  
Laboratorio de Energía Solar y Medio Ambiente, U.N.S.L.  
Chacabuco y Pedernera, 5700 San Luis  
Telef.: 02652-424027 int. 119 Edificio Chacabuco, e-mai: [follari@unsl.edu.ar](mailto:follari@unsl.edu.ar)

**RESUMEN** Se analizan las opciones actualmente existentes de calefacción de una vivienda y se propone la alternativa de un sistema híbrido: solar – bomba de calor. Se plantean las variables termodinámicas de dicho sistema y la conveniencia teórica del mismo. Se estudia la factibilidad y se comparan costos de su implementación. Se muestra la factibilidad de su uso y se ven las ventajas de este frente a algunas de las otras opciones y el tiempo de amortización.

**PALABRAS CLAVES** Energía solar, Bomba de Calor, Calefacción.

### **INTRODUCCIÓN**

El ritmo de vida y el estándar de confort actual, lleva a que el requerimiento de calefacción sea cada vez mayor, lo que significa un mayor consumo de energía. Esto se contrapone con una toma de conciencia de la necesidad de disminuir el consumo de energía y bajar la emisión de gases contaminantes. Ante esta premisa se decidió estudiar las distintas posibilidades de calefacción y sus posibles alternativas combinando algunas de ellas y viendo además las mejoras posibles de realizar. Un análisis económico, de eficiencia y renovabilidad de la fuente, nos da una visión de la conveniencia relativa de las alternativas existentes. De allí continuamos analizando y proponiendo soluciones a las actuales dificultades existentes en la alternativa elegida, que es un híbrido conformado por colectores solares y una bomba de calor.

Tipos de calefacción existentes:

#### **a) CALEFACCIÓN A GAS**

En este caso debemos diferenciar dos tipos:

- 1) Gas Natural: Con la cada vez más extensa red de gas natural en la Argentina, es quizás la forma de calefacción más popular en las grandes ciudades, por ser además una de las más económicas y de menor complicación en su uso. Tiene el inconveniente de ser una fuente emisora de gases invernadero. Pero es un dilema a futuro de mediano a corto plazo, pues pensar en una calefacción basada solamente en este recurso hoy ya en declinación en Argentina, sobre todo en las nuevas construcciones que deberán durar estimativamente más tiempo que el recurso mismo, parece ser al menos una imprudencia.
- 2) Gas envasado: Este es un caso que presenta algunas similitudes con el del gas natural pero además es mucho más costosa (unas 6 veces en Argentina) que este y es mayoritariamente usado en zonas remotas. Actualmente (caso muy presente este año) tiene la limitación de la provisión en tiempo del producto. En San Luis se han presentado problemas de suministro sobre todo a los usuarios que usan los garrafones llamados comúnmente “zeppelines”. En ambos casos también un aspecto a tener en cuenta es el de los accidentes típicos de todos los inviernos con las pérdidas de gas y CO.

#### **b) CALEFACCIÓN ELÉCTRICA CON RESISTENCIAS**

Una fuente de calefacción de fácil instalación y de bajo costo inicial, muy eficiente, pues cada kW suministrado es usado casi por completo en calefacción. Directamente no produce contaminación en el lugar de uso. Pero si hay que tener en cuenta como es el proceso de generación de la electricidad, que en el caso argentino tenemos una gran incidencia de generadores térmicos, que pasan a ser una fuente de contaminación importantes, sobre todo si usan fuel oil como combustible. Otra problemática actual son las restricciones energéticas vigentes que impiden su uso en algunos lugares y horarios determinados.

#### **c) CALEFACCIÓN SOLAR** Otro caso en el que debemos diferenciar dos aspectos.

- 1) **SOLAR PASIVO** es el desafío para los arquitectos diseñar casas que tengan una buena aislación, gran masa acumuladora y aberturas que pierdan poco calor durante la noche y ganancia diurna en invierno. No producen contaminación e incrementan el costo de la construcción de las viviendas en un valor que no es muy significativo (aproximadamente entre un 5 a 12%) y producen un ahorro importante en el gasto futuro en calefacción. Este tipo de calefacción tiene el inconveniente que debe ser incluida en el diseño, es decir que es muy importante solo en el caso de nuevas construcciones. Generalmente debemos considerar alguna fuente de calefacción alternativa complementaria en este caso.
- 2) **SOLAR ACTIVO** consiste en colectores planos que calientan un reservorio importante de calor, generalmente una cisterna aislada de agua durante todo el año, para ser usada en el invierno. Este caso es una propuesta alentadora para un futuro, pero en la actualidad es casi impracticable por los altos costos de los equipos y su instalación, estos demoran mucho tiempo en ser amortizados. La temperatura requerida para calefacción es considerable (hasta 70° C) y los colectores solares planos a esas temperaturas tienen su eficiencia relativamente baja.

La inversión es alta por la dimensión de colectores requerida y de acumuladores grandes que incrementan en forma sustancial el costo del sistema.

#### **d) CALEFACCIÓN SOLAR – GAS**

Estos sistemas combinados son ahorradores de consumo de gas, es decir el fluido que se usa para calefaccionar es básicamente precalentado por el componente solar. Tienen las ventajas y desventajas ya comentadas para los dos sistemas simples. Puede ser importante en el caso de calefacción con gas envasado, por el costo de este.

**e) CALEFACCIÓN CON BOMBA DE CALOR**

Este es un buen ejemplo de uso cada vez más extendido a través de las mejoras en los intercambiadores. Tiene el inconveniente de producir condensación en la unidad externa y en días de temperaturas menores de 7° C esta condensación se congela y deja de funcionar correctamente y hasta puede provocar la ruptura del equipo. La ventaja es que tienen una mayor eficiencia que la calefacción con resistencias. Se logran con los equipos comerciales disponibles, coeficientes de eficiencia del orden de 3 a 4.

**f) CALEFACCIÓN HÍBRIDA: BOMBA DE CALOR – SOLAR**

Este caso es el que a priori tendría mayor interés en un futuro inmediato, ya que aprovecha las ventajas de ambos sistemas y elimina el inconveniente del posible congelamiento de intercambiador externo. Trabajando con el intercambiador externo, dentro de un fluido (una cisterna de agua) que a su vez es calentado por energía solar, se evitaría el problema del congelamiento. Además se modifica el rango de temperaturas de trabajo de la bomba lo que incrementa el coeficiente de eficiencia a valores de 6 a 8.

**ANÁLISIS COMPARATIVO DE FUNCIONAMIENTO y CONSUMO ENERGÉTICO**

Veamos una estimación comparativa de las distintas opciones de calefacción de una vivienda.

Suponiendo una demanda de 350 MJ/día: es decir una potencia de calor de 4,05 kW.

**OPCIÓN 1** Colectores solares térmicos

Con colectores solares trabajando en forma directa, debemos tener una temperatura de aproximadamente 60° C. Un colector trabajando a esta temperatura tiene una eficiencia del orden del 45% y suponiendo una radiación solar diaria de 17.5 MJ/día m<sup>2</sup> en el plano inclinado del colector, tenemos un aporte efectivo de 8 MJ/m<sup>2</sup>. Es decir necesitamos 44 m<sup>2</sup> de colectores. Gasto diario nulo. Gasto de instalación inicial alto del orden de \$35.200 de colectores y un 40% mas para la cisterna.

**OPCIÓN 2** Gas natural.

Utilizando calefactores de tiro balanceado tenemos una eficiencia del orden del 50%. El m<sup>3</sup> de gas natural normalizado a 9300 kcal/m<sup>3</sup> equivale a 38.9 MJ/m<sup>3</sup>, es decir tendríamos un consumo de 18 m<sup>3</sup>/día. Esto equivale a un costo de aproximadamente 200 \$/mes. Gasto de instalación moderado a bajo.

**OPCIÓN 3** Gas envasado.

En el caso del gas envasado el costo de instalación es igual al de la Opción dos, pero el gasto diario se ve incrementado a aproximadamente 6 veces.

**OPCIÓN 4** Bomba de calor.

El uso de las llamadas bombas de calor o mas comúnmente con la de nominación comercial de acondicionadores de aire frío/calor (calor no por resistencia), tenemos una opción cada vez más usada. Por ejemplo el coeficiente de eficiencia informado por las fábricas está del orden de 2.5 a 4.2 dependiendo de las temperaturas de trabajo. Es decir podríamos hablar de un coeficiente medio del orden de 3. Tienen una eficiencia de más de tres veces la obtenida por uso directo de resistencias.

A pesar de que a priori podríamos decir que estos dispositivos tienen un buen coeficiente de eficiencia, deberíamos ver si podemos incrementarla.

La eficiencia en un frigorífico: Un análisis del proceso en un sistema hidrostático líquido-vapor realiza en un ciclo completo de refrigeración, nos muestra dos ciclos adiabáticos (fig. 1 ), aumento adiabático de la presión desde 1 a 2 en el compresor y caída adiabática de la misma de 3 a 4 cuando pasa a través de la válvula de estrangulamiento. Entre ambos hay dos ciclos a presión constante 2 a 3 en el condensador y 4 a 1 en el evaporador que son las etapas de intercambio de calor. Es claro que el ciclo 4 a 1 es el que absorbe calor del foco frío en un cambio de fase a presión y temperatura constantes. Si el intercambiador hace el proceso entre el aire exterior y el fluido del sistema, el intercambio en el lado externo requiere que el foco se encuentre varios grados más caliente que el fluido de trabajo, típicamente de unos 15 a 20° C. Si nosotros tenemos el aire exterior a 5° C, temperatura típica nocturna de invierno, el aire se enfriará alrededor del intercambiador y muy probablemente se condense y congele, anulando el intercambio y pudiendo romper el intercambiador. Si realizamos el intercambio con una fuente de agua a por ejemplo 15° C, la diferencia de temperatura entre el fluido y el foco de intercambio exterior puede reducirse a 2 a 3° C. Es decir el frigorífico funcionará sin fallas, pero además su eficiencia se aproxima a la de Carnot, ya que estamos haciendo un intercambio a temperaturas muy próximas entre fluido del sistema y foco exterior (La condición ideal de reversibilidad sería la de iguales temperaturas).

Si en el interior de la vivienda, hacemos el intercambio con agua de un termotanque a, por ejemplo 50° C, también se aproximará a un ciclo reversible isotérmico y la eficiencia de Carnot será:

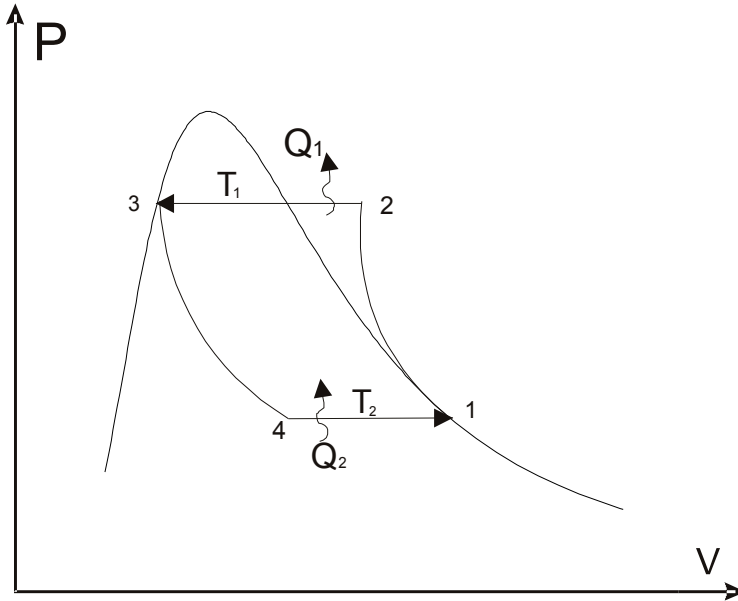


Fig.1: Diagrama V –P sobre el que trabajará el sistema.

$$\omega_c = \frac{Q_2}{W} = \frac{Q_2}{Q_1 - Q_2} = \frac{1}{\frac{Q_1}{Q_2} - 1} = \frac{1}{\frac{Q_1}{Q_2} - 1} = \frac{1}{\frac{T_1}{T_2} - 1} = \quad (1)$$

Para nuestro caso:

$$\omega_c = \frac{1}{\frac{323}{288} - 1} = \frac{1}{1.121 - 1} = \frac{1}{0.121} = 8.2 \quad (2)$$

El rendimiento real será algo menor, del orden de 7 a 8. Esto es el doble de la eficiencia comercial normal de 3 a 4 de una “bomba de calor” cuyo sistema se mueve entre -10° C y 70° C para obtener igual calentamiento. En este caso tenemos:

$$(3)$$

Con lo que habremos ahorrado del orden del 50% de energía eléctrica.

**ESTUDIO DE COSTOS** Hacemos un estudio de costo para el caso de calefactores de gas, aire acondicionado frío-calor (bomba de calor) y el caso híbrido bomba de calor más colectores solares.

**COSTOS CALEFACCIÓN TIRO BALANCEADO**

El costo de instalar un sistema de calefacción como el requerido es de aproximadamente \$ 1200. La diferencia sustancial será en el combustible utilizado.

Gas natural, 200 \$/mes.

Gas envasado 1200 \$/mes.

**COSTOS EQUIPO FRÍO – CALOR (BOMBA DE CALOR)**

Recordemos como funciona una bomba de calor entre dos focos térmicos y calculemos la eficiencia teórica máxima, es decir la eficiencia de Carnot.

Si suponemos que el foco frío está a 10° C es decir 283° K y el foco caliente está a 23° C, 296° K.

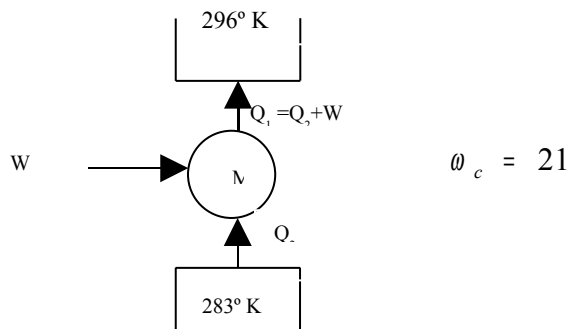


Fig.2: Esquema de un frigorífico trabajando entre dos focos térmicos

El sistema alcanzará temperaturas máximas de 40° C y mínimas del orden de -10° C. De modo que su eficiencia será entre 313° K y 263° K, para estas temperaturas  $\omega_c = 5.2$ , la eficiencia real será menor que esta. Las eficiencias de los equipos comerciales que se consiguen en Argentina son de entre 3 y 4. Esto nos muestra que las temperaturas sugeridas para el sistema son aproximadamente reales.

Con una eficiencia de 3, la potencia requerida será de 1.5 kW. En un día serán 36 kWh y al mes 1080 kWh. Si el precio por kWh es de \$0.2, tendremos un gasto de 216 \$/mes

### COSTOS EQUIPO HÍBRIDO

Para este caso requerimos colectores de baja temperatura (menos de 25° C). Como la temperatura es similar a la exterior, entonces no requiere caja ni cubierta y su rendimiento típico es de 0.65. Por lo tanto obtenemos en San Luis, 11.3 MJ/m<sup>2</sup> diarios en un colector inclinado adecuadamente o 5.5 MJ/m<sup>2</sup> en un colector horizontal.

Como  $Q_1 - Q_2 = W$

Recordando nuestra demanda de 350MJ/día =  $Q_2$ , tenemos  $W = (350/8) \text{ MJ/día} = 43.75 \text{ MJ/día}$

Por lo tanto será  $Q_1 = 306 \text{ MJ/día}$ . Es decir se requiere de 27 m<sup>2</sup> de colector inclinado o 25 m<sup>2</sup> de colector horizontal con espejos. Se puede estimar el costo de colector (inclinado) en 450 \$/m<sup>2</sup>. Es decir \$ 12150 más un 10% de instalación. Si usáramos colectores plásticos horizontales con espejos, pueden captar 12 MJ/m<sup>2</sup> día. Se requieren entonces 25 m<sup>2</sup> cuyo costo es de 180 \$/m<sup>2</sup> que hacen un total de \$4500. La instalación puede estimarse en \$650.

A este costo hay que sumarle el precio de la bomba de calor, ahora de 0.75 kW de potencia y costo aproximado en el mercado hoy día de \$1.800. Además se requiere de una cisterna aislada de 20.000 litros para tener acumulación de 4 días sin sol, cuyo costo puede estar en los \$ 3.000.

Costo total aproximado con colectores metálicos inclinados \$ 18.150

Costo total aproximado con colectores plásticos horizontales con espejos \$9.900.

El costo en electricidad es de 108 \$/mes.

### COMPARACION DE COSTOS

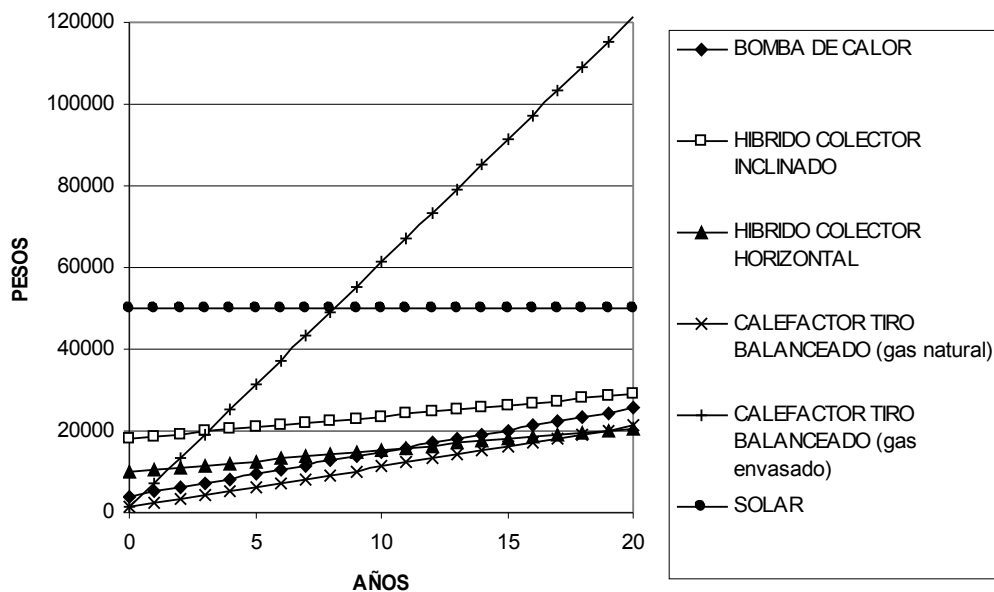


FIG. 3 Costos comparativos de instalación y uso de las opciones evaluadas de calefacción, no se tienen en cuenta los costos de mantenimiento de ellas.

## **PROBLEMAS A RESOLVER**

Es conocido que los equipos “frío –calor” funcionan muy bien en verano, cuando fluye calor del interior de una vivienda a unos 25° C (foco frío) y lo disipan en un foco caliente exterior que puede estar entre 25° C y 35° C. Aquí, la eficiencia es alta, por la pequeña diferencia de temperatura entre los focos y no hay dificultades de funcionamiento, a lo sumo hay una condensación en el equipo intercambiador interior que moja bajo el equipo.

Cuando en invierno el funcionamiento se invierte, el calor fluye desde el exterior, que de noche típicamente tiene una temperatura de 5° C hacia el interior de la vivienda donde se desea tener una temperatura de entre 20° y 23° C. Allí aparece el problema de que el intercambiador exterior que enfría con el aire, llega a unos -10° C. Esto hace que el agua presente en el aire se condense y luego se congele, dificultando fuertemente el intercambio. Vale decir que cuando más se necesita aparecen problemas serios de funcionamiento. Aquí además la eficiencia es peor que en verano, ya que la diferencia de temperaturas entre el interior el exterior es considerablemente mayor.

Para resolver esto, proponemos usar una cisterna de agua, para que el intercambiador exterior intercambie con ella enfriándola. Esto tiene tres efectos importantes, por un lado permite funcionamiento sin fallas, por otro mejora el intercambio por ser el fluido con el que intercambia el agua y no aire por último trabaja a una temperatura próxima a la del foco caliente, con lo que la eficiencia mejora fuertemente a más del doble y el gasto en electricidad decae a menos de la mitad.

Es evidente que para que la cisterna mantenga su temperatura entre 15 y 25° C, tendremos que aportarle energía. Si lo hacemos con colectores solares, estaríamos proviendo más del 80% de la energía necesaria con una fuente renovable. Y con un detalle relevante, los colectores que en este caso trabajan con pequeñas diferencias de temperaturas con el ambiente del orden de 10° C, no requieren caja aisladora ni cubierta y además tienen mayor rendimiento. Pueden usarse colectores plásticos o metálicos, lo que amplía la oferta como vimos en el ejemplo.

Por otro lado no se requieren cisternas de grandes dimensiones que almacenen de verano a invierno como sería en el caso de calefacción solar, solamente se requerirá de una que soporte 4 días sin sol o lo que el clima local determine. También la aislación requerida es mucho menor por su pequeña diferencia de temperatura con el ambiente. Por consiguiente la inversión total decae fuertemente.

En estos momentos estamos por comenzar la faz experimental a fin de poner a punto el dimensionamiento del intercambiador, el régimen de circulación del agua en el, el control automático de funcionamiento, la eficiencia del conjunto de colectores y del sistema híbrido completo. Es decir una puesta a punto que nos muestre los parámetros óptimos de funcionamiento y los componentes que mejor se desempeñen.

## **CONCLUSIONES**

Si observamos la fig. 3 vemos que estamos, con el sistema híbrido, frente a una alternativa interesante, que puede hacer más eficiente el aporte de la energía solar, la haga accesible en términos económicos y confiable en su funcionamiento. La experiencia nos dirá si esta perspectiva se confirma parcial o totalmente y cuales serán las formas que finalmente adopte.

## **REFERENCIAS**

Duffie J. A. y Beckman W. A. (1991). Solar Engineering of Thermal Processes, 2ª edición. Wiley Interscience, New York.

Mark W. Zemansky, Calor y Termodinámica, 5ª edición, Aguilar.

“Alternativas para mejorar calefones solares comerciales”, Tesis de Maestría En Energías Renovables, UNSa. mayo 2003, Msc. Jorge Follari

**ABSTRACT** We analyze the options existent at present of a home calefaction and propose the alternative of a hybrid system: solar – heat pump. The thermodynamic variables of said system are established as well as the theoretical convenience of the same. The feasibility is analyzed and implementation cost are compared. Feasibility in its use is shown, and we see the advantages compared to other options and the amortization time.

**KEYWORDS** solar energy, heat pump, heating.