

# BOMBA DE CALOR PARA CALENTAMIENTO RESIDENCIAL DE AGUA EN SANTAFÉ DE BOGOTÁ

Javier A. Ramírez H.<sup>1</sup>

G. Orlando Porras R.<sup>2</sup>

## Abstract

*Here we present a basic development of a residential heat pump water heater for local use. It was designed, built and tested as a replacement for an electric resistance water heater. Results were succesful and proved energy efficiency heat pump water heater's advantage. Based on an experimental design methodology, performance was improved by mean of adjusting parameters to appropriate levels. Also, a market analysis facing the possibilities of heat pump water heater was made realizing the economical capability of local users. Finally, we recomend some key points to direct the local development of this technology.*

## Palabras clave

*Bombas de calor, Calentamiento de agua, Ahorro de energía, COP, Eficiencia energética.*

## 1. INTRODUCCIÓN

En Colombia, Santafé de Bogotá es la ciudad que más energía destina al calentamiento residencial de agua debido al clima determinado por su ubicación geográfica (temperatura ambiente media anual de 14°C). Llega a consumir la mayor parte del 9% de la energía (de todo tipo) que la nación usa a nivel residencial para este fin (figura 1) [1].

Una encuesta realizada por correo electrónico entre los estudiantes de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Los Andes revela que en el 42.0% de sus hogares se tiene calentador de resistencia eléctrica de acumulación (de tanque), en el 23.2% de los casos se usa calen-

tador de gas natural de paso, en el 15% de los casos se cuenta con ducha eléctrica, en el 4.3% de los casos se usa calentador de GLP de paso y el 2.9% de los hogares usan calentador eléctrico de paso. El resto tienen otro tipo de tecnología o combinaciones de las anteriores. Además, la encuesta indica que el agua caliente es usada mayormente para la ducha y para el lavado de ropa.

La encuesta fue respondida por 75 personas en total y se debe aclarar que están ubicadas en los estratos socioeconómicos 4, 5 y 6 principalmente. Estos estratos representan cerca del 19% del total de viviendas de Santafé de Bogotá [2]. No se tiene conocimiento de otros estudios realizados sobre este particular.

---

<sup>1</sup> Estudiante de Magíster, Universidad de los Andes

<sup>2</sup> Profesor Asistente, Universidad de los Andes

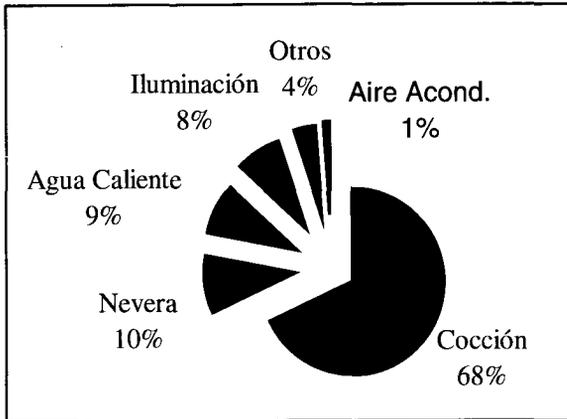


Figura 1

Uso de la energía en el sector residencial

Existe una tecnología para el calentamiento de agua denominada *bomba de calor* que no ha sido usada en Colombia y que bajo el análisis mostrado arriba representa una posibilidad para mejorar la eficiencia energética y económica de este proceso. Una bomba de calor para calentar agua es una máquina que toma el calor disponible en el ambiente (fuente de calor de baja temperatura) y lo transfiere al volumen de agua a calentar (depósito de calor de alta temperatura). La energía que debe aportarse a este proceso es una cantidad pequeña que permite mover el calor entre los dos recipientes térmicos. Como resultado, la razón entre la energía facturada y la energía entregada efectivamente al agua para su calentamiento es menor a uno, a diferencia de otros sistemas como el calentador de resistencia eléctrica donde esta misma relación es igual o mayor a uno. Así se logra un ahorro de energía y de dinero (figura 2).

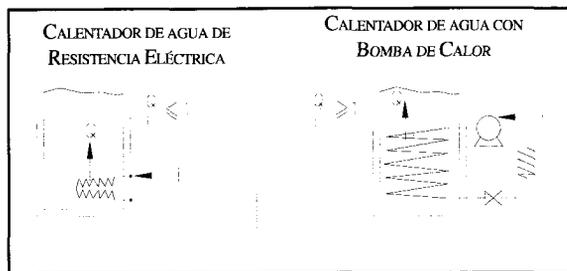


Figura 2

Esquema comparativo entre un calentador de resistencia eléctrica y uno de bomba de calor

## 2. CICLO DE COMPRESIÓN DE VAPOR

La bomba de calor es un sistema basado en el *ciclo de compresión de vapor*. Este ciclo termodinámico es el mismo que generalmente se usa en los sistemas de refrigeración residencial cuya sustancia de trabajo son los clorofluorocarbonos (CFC).

El ciclo consta de una serie de procesos termodinámicos que sufre la sustancia de trabajo (figura 3). El proceso comprendido entre los estados 1 y 2 es la *compresión* de la sustancia en fase gaseosa. Este proceso es el responsable de la energía facturada. Entre los estados 2 y 3 se presenta la condensación de la sustancia a temperatura y presión altas mediante un intercambiador de calor. El calor se retira de la sustancia y se entrega al agua. El proceso entre los estados 3 y 4 se denomina *expansión* y se logra a través de un estrangulamiento del flujo (restricción severa). En este proceso, que se realiza sin intercambio de calor alguno, disminuye drásticamente la presión y temperatura de la sustancia líquida al punto que empiezan a aparecer las primeras burbujas de vapor. La evaporación completa de la sustancia, entre los estados 4 y 1, ocurre en un intercambiador de calor a baja temperatura y presión que mueve el calor del medio ambiente hacia la sustancia de trabajo. El ciclo se repite indefinidamente hasta lograr el nivel de temperatura deseado en el agua. Como el propósito es calentar el agua, esta masa es aislada térmicamente de sus alrededores.

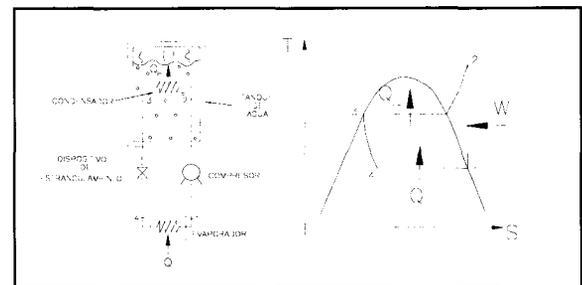


Figura 3

Ciclo de compresión de vapor y diagrama de estados

Este ciclo termodinámico es el mismo que utilizan los sistemas de refrigeración. La diferencia básica entre una bomba de calor y un refrigerador es la región de intercambio de calor donde se ubica el aislante térmico: en la bomba de calor, el condensador y la masa de agua; en el refrigerador, el evaporador y la masa de aire circundante (línea discontinua en la figura 3).

La medición del rendimiento de este ciclo se hace mediante la comparación de la cantidad de calor entregada al área de interés y el trabajo mecánico o eléctrico

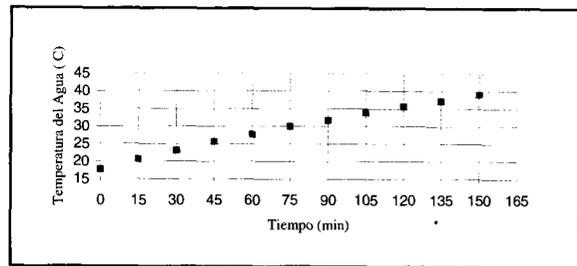
consumido en la operación del compresor. En el caso de la bomba de calor se acostumbra a usar el coeficiente de operación COP (*Coefficient of Operation*) definido como el cociente del calor de alta temperatura (condensador) y el trabajo en el compresor. El COP puede alcanzar valores hasta de 5 para diferencias de temperatura entre depósitos de calor de 40°C con bombas de calor eléctricas grandes y avanzadas. Esto representa un ahorro en energía del 80% si se compara con un calentador de resistencia eléctrica. En equipos residenciales de alta eficiencia el COP ha llegado hasta 3 (66% de ahorro). Nótese que por cada unidad de trabajo consumido en el compresor, la bomba de calor entrega 5 o 3 unidades de energía térmica al agua respectivamente. Este último hecho es la esencia del potencial de la bomba de calor dentro del marco del uso racional de energía.

### 3. EXPERIENCIAS CON LA BOMBA DE CALOR EN CALENTAMIENTO DE AGUA

En el Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Los Andes se han desarrollado varios proyectos de grado sobre el tema de las bombas de calor para calentamiento de agua. En primer lugar, se hicieron estudios sobre las diversas tecnologías de calentamiento doméstico de agua. Cabe destacar los proyectos de grado que analizaron los calentadores eléctricos de acumulación y de paso a gas [3], [4]. De esta manera se desarrollaron bases de comparación entre las diversas tecnologías.

Posteriormente se diseñó, construyó y evaluó un prototipo de bomba de calor para calentamiento residencial de agua con tanque de acumulación de 60 litros que alcanzó un COP promedio de 1.75 y logró un calentamiento desde 18°C hasta 50°C en otro experimento [5], [6]. Las figuras 4 y 5 ilustran respectivamente la evolución de la temperatura del agua y del COP en el caso experimental donde se obtuvo el mejor rendimiento dentro de un lapso de operación de 150 minutos normalizado para todas las pruebas.

La bomba de calor fue diseñada para las condiciones de Santafé de Bogotá: temperatura media anual de 14°C, presión atmosférica local de 74.4 kPa, temperatura del agua del acueducto de 18°C, humedad relativa promedio anual del 70% [3]. Corrientemente no se encuentran bombas de calor comerciales ajustadas a estas condiciones tan particulares ya que estos dispositivos, al ser reversibles en los flujos de calor, son usados para



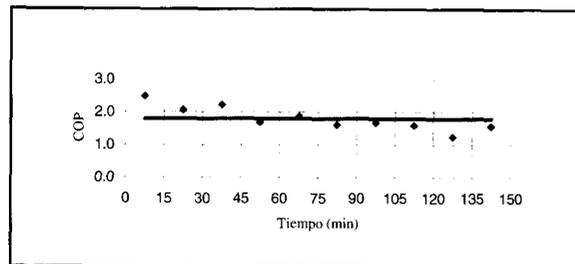
**Figura 4**

*Evolución de la temperatura del agua para el caso de mejor rendimiento*

aplicaciones múltiples (calefacción y refrigeración) en lugares con estaciones.

Desde un comienzo hubo restricciones de dinero para este proyecto y por tal motivo el calentador fue construido con partes usadas de circuitos de refrigeración que operaban con refrigerante R-12. Algunos de los elementos no cumplían exactamente con las especificaciones correspondientes para una bomba de calor. Como consecuencia el rendimiento de la bomba fue inferior a lo esperado. Sin embargo, se pudo apreciar claramente las bondades de esta tecnología en cuanto al ahorro de energía.

Las pruebas de laboratorio de la bomba de calor fueron rigurosas. Estuvieron basadas en la metodología experimental clásica (específicamente diseño factorial fraccionado). Se evaluó el rendimiento del aparato mediante la variación sistemática de parámetros clave para optimizar su operación. Los parámetros fueron: tamaño de compresor, grado de estrangulamiento del refrigerante, flujo de aire ambiente a través del evaporador, masa del refrigerante en el circuito y el volumen del espacio donde operaba la bomba de calor (figura 6). En total se realizaron 60 experimentos diferentes que representaron más de 200 horas de laboratorio. Como resultado se obtuvo un mapa de respuesta del rendimiento de la bomba de calor frente al cambio en las



**Figura 5**

*Evolución del COP para el caso de mejor rendimiento*



## 6. RECOMENDACIONES

Se recomienda continuar con las labores de investigación y de actualización ambiental de la bomba de calor. En este sentido el Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Los Andes continuará desarrollando proyectos de grado y tesis de magíster en el tema.

Es necesario que las entidades del Gobierno ayuden a promover el desarrollo y uso racional de la energía a través del empleo de la tecnología de la bomba de calor. Sin embargo también es importante que la empresa privada se vincule y asuma un rol activo en su desarrollo.

Los vínculos con entidades internacionales que tengan experiencia en el manejo de la tecnología de la bomba de calor serían fundamentales en la búsqueda de un desarrollo acelerado en el tema. Ya hay algunos estudiantes colombianos en el extranjero cuyo objetivo académico se centra en este punto.

No basta con el interés de la academia sobre el tema. Se necesita tener disponibles fuentes de financiación dedicadas específicamente a este tipo de trabajos.

## 7. REFERENCIAS

- [1] *Plan Energético Nacional. Autosuficiencia energética sostenible 1997-2010*. Unidad de Planeación Minero Energética. Ministerio de Minas y Energía, 1997.
- [2] *Resumen de localidades de Santafé de Bogotá 1997*. Departamento Administrativo de Planeación Distrital. Subdirección Económica de Competitividad e Innovación. Santafé de Bogotá, 1999.
- [3] *Modelo energético de calentadores de agua eléctricos*. Andrés Felipe Córdoba. Departamento de Ingeniería Mecánica. Universidad de Los Andes. Santafé de Bogotá, 1997.
- [4] *Modelo teórico y experimental de un calentador de paso de agua, utilizando gas como combustible*. Miguel Palacios Lleras. Departamento de Ingeniería Mecánica. Universidad de Los Andes. Santafé de Bogotá, 1997.
- [5] *Adaptación de bombas de calor al calentamiento doméstico de agua*. Diana Barbosa & Javier Ramírez. Departamento de Ingeniería Mecánica. Universidad de Los Andes. Santafé de Bogotá, 1997.
- [6] *Optimización de bombas de calor mediante diseño de experimentos*. Javier Ramírez. Departamento de Ingeniería Industrial. Universidad de Los Andes. Santafé de Bogotá, 1999.
- [7] *Supercifras en m<sup>3</sup>. Análisis sectorial para gas*. Superintendencia de Servicios Públicos. Santafé de Bogotá, 1999.