

APLICACIÓN RESIDENCIAL DE BOMBA DE CALOR A GAS

ENSAYO DE UN PROTOTIPO

Ernst-Jan Bakker (M.Sc.) y Niels Sijpheer del Centro ECN – Energy Research Centre, en Petten (Holanda), son autores del trabajo de investigación y análisis, dentro del Programa “Energy in the Built Environment”, titulado “TESTING A PROTOTYPE GAS-FIRED RESIDENTIAL HEAT PUMP”(ref-doc. s3-p07)[#9214], cuya presentación y exposición como ponencia tuvo lugar con motivo de las reuniones patrocinadas por International Institute of Refrigeration – IIR en la “9th International IEA Heat Pump Conference”, Zürich (2008). Por gentileza de sus autores y con el permiso del International Institute of Refrigeration – IIR (www.iif-iir.org) (iif-iir@iif-iir.org), y de la IEA-Heat Pump Conference, ofrecemos a nuestros lectores la versión adaptada para la revista Frío Calor Aire Acondicionado.

SINOPSIS

Se ha desarrollado una nueva bomba de calor de absorción a gas para aplicaciones residenciales, que proporciona tanto calefacción como refrigeración. ECN ha ensayado un prototipo en una de sus viviendas de ensayo. Para calefacción se empleó una configuración directa agua – agua, y para refrigeración una configuración indirecta aire – aire. Como fuente de energía se han empleado dos intercambiadores de calor aplicados al suelo y en el exterior. Los experimentos mostraron resultados prometedores, en cuanto a rendimiento energético, confort térmico y fiabilidad. Además se ha hecho una comparación de dos sistemas de distribución de refrigeración: refrigeración por aire frente a suelo refrigerante. En comparación con la refrigeración por aire, el suelo refrigerante alcanzó un confort térmico similar (y potencia de refrigeración), a una temperatura de suministro significativamente más elevada (generalmente con mejor rendimiento energético para las bombas).

1. INTRODUCCIÓN

Considerando las actuales ambiciones en la UE por un sistema de suministro de energía más sostenible, se espera que la tecnología de la bomba de calor gane más importancia en los próximos años. Recientemente se ha desarrollado una nueva bomba de calor a gas para aplicaciones residenciales, al demostrar la posibilidad de proporcionar un alto confort térmico combinado con una elevada eficiencia energética, además del potencial de ahorro energético en el parque de edificios existentes. La compañía que desarrolla esta bomba desea permanecer en el anonimato en este documento.

Tras los alentadores resultados de los experimentos en laboratorio y tras un ensayo preliminar en campo (2003-2004), se mejoró un primer prototipo de bomba de calor a gas, obteniéndose un segundo prototipo muy compacto. ECN fue

consultado para ensayar este prototipo en una de sus viviendas de ensayo, ya que dispone de las instalaciones deseadas para investigar como en “la vida real”, así como de las herramientas de análisis necesarias.

La bomba de calor a gas puede utilizarse con diferentes fuentes (por ejemplo aire y suelo) y sistemas de distribución (aire y bajo el suelo). En este documento se exponen los resultados de los experimentos con todas estas opciones, tanto para el modo de calefacción como de refrigeración.

En países con densas redes de gas, como en Holanda y otros países europeos, la tecnología de absorción de gas resulta una opción interesante. La tecnología ofrece significativos ahorros energéticos y refrigeración opcional, en comparación con la caldera común HE a gas. Además necesita una fuente relativamente pequeña en el subsuelo o al aire, en comparación con las bombas de calor a compresión, y no presentan problemas de ruido en comparación con los compresores. Sin embargo, hasta la fecha existen pocos productos disponibles para viviendas unifamiliares.

2. LA BOMBA DE CALOR

La bomba de calor aquí descrita se ha desarrollado especialmente para aplicación residencial, enfocando el desarrollo tanto para casas nuevas como para el parque de edificios existentes. La bomba de calor está basada en un ciclo de absorción utilizando gas natural para activar el ciclo (= para proporcionar calor al generador).

El prototipo (figura 1) es una unidad relativamente compacta para montar en pared (con un volumen de unos 0.21 m³ y un peso de 80 kg). La temperatura de suministro para la calentar el ambiente con el prototipo ensayado puede variar entre 35 y 50°C. La salida térmica se modula entre 2 y 4 kW.

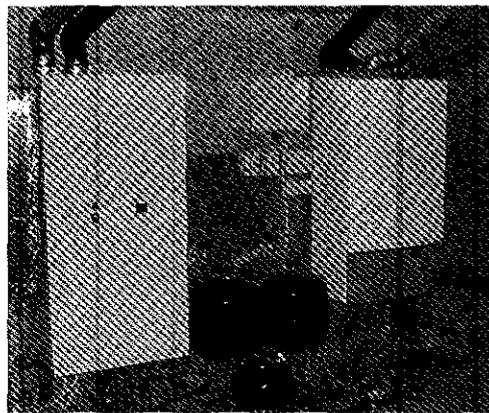


Figura 1: Prototipo de bomba de calor (con caldera HE a la derecha)



Figura 2: Viviendas de investigación del ECN, donde se ensayó la bomba de calor

3. PUNTO DE VENTA DEL ECN, EPCAD/CE

La bomba de calor se ha ensayado en una de las viviendas de ensayo ubicadas en las instalaciones de ECN en Petten, como se muestra en la figura 2. Estas casas representan la casa típica en hilera tal como se construye y se utiliza comúnmente en Holanda. La bomba de calor a gas se aplica en la "vivienda B", la segunda casa a partir de la izquierda en la figura 2.

Algunas de las características de estas casas de ensayo son las siguientes: orientación Sur, bien aisladas ($R_o > 5 \text{ m}^2\text{K/W}$), fachada estanca al aire ($q_{v,10} < 40$ litros/seg.), acristalado altamente eficiente ($U_{cog} < 0.9 \text{ W/m}^2\text{K}$), área habitable con gran superficie acristalada, protección solar en la primera y en la segunda planta, ventilación equilibrada con una recuperación de calor altamente eficiente y cuatro sistemas diferentes de distribución a baja temperatura (aire, suelo, pared y radiadores, que se pueden utilizar tanto para calefacción como para refrigeración).

Las casas no están habitadas, pero el comportamiento "medio" de ocupación se simula con patrones semanales de carga interna debida al uso de aplicaciones domésticas y pre-

sencia de personas, uso del agua caliente doméstica, puntos de consigna de ventilación y temperatura, y producción de CO_2 y humedad.

La planta superior (ático) no está directamente calefactada o ventilada, y se utiliza para instalar todos los componentes del HVAC. Un completo sistema de monitorización registra todos los flujos de energía (calor y electricidad), datos climáticos (irradiación, viento, temperatura ambiente y humedad), temperaturas (aire interior, masa de edificación y caudales de agua), y otros criterios de confort, tales como niveles de humedad y de CO_2 .

3.1 Configuración para calefacción

La bomba de calor se conecta a los intercambiadores de calor verticales (fuente: el suelo) y proporciona calor a la vivienda utilizando un sistema de calefacción por el suelo (bomba de calor directa agua - agua). Una caldera a gas estándar de alta eficiencia proporciona agua caliente doméstica. En la figura 3 se muestra la configuración del sistema.

Debido a las medidas citadas anteriormente, la demanda para calentar la vivienda es muy pequeña. Para obtener datos suficientes de medición, se aumentó la demanda de calefacción utilizando un bypass en la recuperación de calor en el aire de ventilación. El termostato que controla la bomba de calor se monta en la sala de estar. El punto de consigna se mantuvo continuamente a 21°C . Para mantener la condición física correcta para el proceso de absorción dentro de la bomba de calor, el control de la bomba de calor se dispuso para que proporcionase una temperatura constante de suministro de 35°C . El rendimiento se ha medido durante un período de 12 semanas (Febrero - Abril).

3.2 Configuración para refrigeración

Después de los experimentos de calefacción en invierno, se cambió la configuración de la bomba.

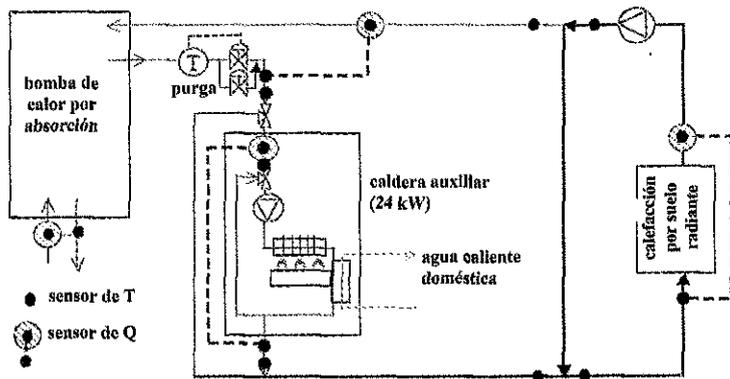


Figura 3: Configuración de bomba de calor en la estación invernal

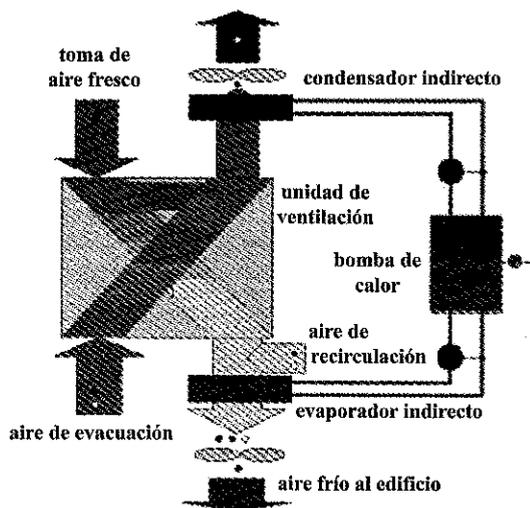


Figura 4: Configuración de la bomba de calor durante la estación estival

de calor para ensayar el funcionamiento en refrigeración. La bomba de calor se configuró como bomba de calor indirecta aire – aire; el evaporador enfrió aire de ventilación (+ recirculación) a través del intercambiador de calor, y el aire ambiente enfrió el condensador a través de un intercambiador de calor. Se tomaron medidas especiales para recoger el vapor de agua condensado del intercambiador de calor aire – agua y de la bomba de calor. La figura 4 muestra esquemáticamente la configuración.

El aire frío, en total unos 280 m³/h, se distribuyó a tres dormitorios, a la cocina y a la sala de estar. La unidad de protección solar y ventilación con recuperación de calor se utilizó para reducir la carga de refrigeración los días con alta irradiación y/o elevadas temperaturas ambiente. Se midió el rendimiento durante un período de 7 semanas (Julio – Septiembre).

6. RESULTADOS DE LAS PRUEBAS

6.1. Temperatura

Durante el período de ensayo la temperatura media exterior fue de 4.2°C, la mínima de -5.8°C y la máxima de 17.3°C. La figura 5 muestra la temperatura ambiente medida.

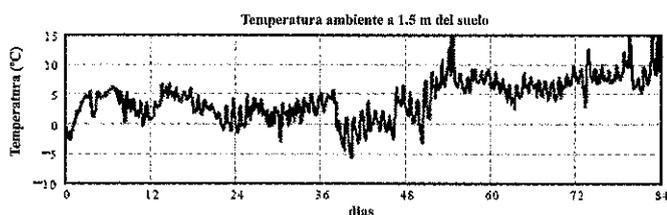


Figura 5: Temperatura ambiente durante la estación invernal

La Figura 6 muestra el balance energético de la bomba de calor durante la estación invernal, en donde se considera "sólo calefacción". El consumo de electricidad (bombas, controles, etc.) de la bomba representa un 5% de la aportación total de energía. Cabe esperar que este consumo se pueda reducir significativamente optimizando la electrónica y las bombas. La relación entre la cantidad total de calor suministrado y la energía necesaria para suministrar este calor (gas y electricidad) es de 1.1. La salida de energía muestra el calor útil suministrado y las pérdidas de energía (22%) a nivel del sistema.

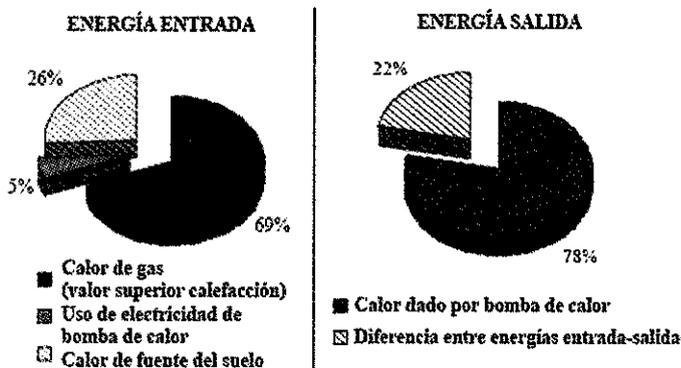


Figura 6: Balance energético de bomba de calor en estación invernal

El factor de rendimiento (COP) caracteriza el rendimiento energético de una bomba de calor. Para determinar el factor medio de rendimiento (COP) sólo se considera el funcionamiento en estado estable, y viene definido como la relación entre la salida térmica y la entrada de gas¹ cuando la salida térmica es > 2 kW. (¹: La cantidad de calor producido por la combustión de gas depende la calidad del gas y del proceso de combustión. Sólo se mide el valor calorífico del gas, definido por el así denominado valor superior de calentamiento (~ 36 MJ/m³; combustión completa de 1 m³ gas incluyendo la condensación del vapor de agua)

El COP medio diario basado en el Poder Calorífico Inferior (PCI) medido durante el ensayo en campo es de 1.45. Este valor ha sido muy constante durante el ensayo, como ilustra la figura 7 (mes de Febrero). Durante este mes, la temperatura de la fuente del suelo varió entre 6 y 8°C, resultando una subida media de temperatura de 28°C para la bomba de calor.

Los datos de Marzo y Abril indican que, cuando la carga es muy pequeña, al aumentar las conmutaciones on-off se reduce el COP: durante el periodo total del ensayo en campo, el COP global es del orden del 10 – 15% más bajo que el COP en condiciones estables.

La bomba de calor modula su potencia para proporcionar una temperatura constante de suministro de 35°C. Se han



Figura 7: COP de la bomba de calor (estado estable, LHV) para calefacción durante Febrero

registrado picos de casi 4 kW_{th}, pero el punto de trabajo estaba típicamente en unos 2.5 – 3 kW_{th}. Los datos indican un buen comportamiento a carga parcial.

Los niveles de temperatura adoptados en la vivienda cumplen los criterios de confort y el punto de consigna del termostato (no menos de 20°C en sala de estar). Los niveles acústicos producidos por la bomba de calor de absorción son aceptables (similares a la caldera de gas).

La aplicación de la bomba de calor de absorción bajo estas condiciones dio como resultado significativos ahorros para la calefacción: bajo condiciones estables, esta bomba de calor es un 35% más eficiente que la caldera estándar HE a gas (con una eficiencia del 107% al PCI).

Durante este experimento de refrigeración, la temperatura ambiente fue de 17.7°C, y el máximo de 27.9°C. La figura 8 muestra el balance energético de la bomba de calor durante el verano. La relación entre la cantidad total de calor extraído del evaporador y la energía necesaria para la bomba de calor (gas y electricidad) es de 0.37. Transformando los valores medidos a energía primaria, el factor medio de rendimiento llega a ser de 0.35.

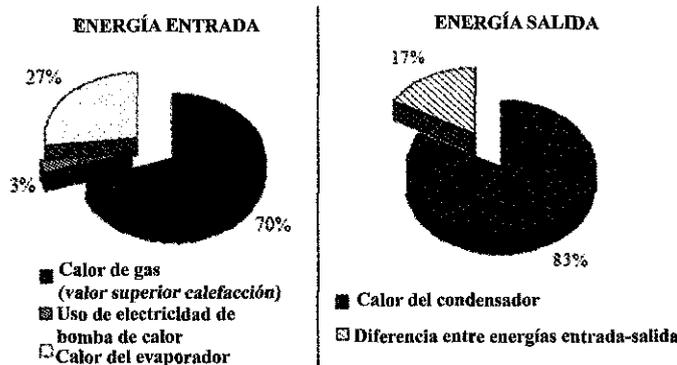


Figura 8: Balance energético de la bomba de calor en la estación invernal

El COP para refrigeración se define por la relación del calor extraído en el lado del evaporador y la aportación necesaria (térmica o electricidad) para la bomba de calor. La aporta-

ción térmica se determina como se ha descrito anteriormente (en los resultados del ensayo en invierno). Para determinar el Factor medio de Rendimiento (COP) se considera sólo el funcionamiento en condiciones estables, definido por la relación entre la salida térmica y la aportación de gas, cuando ésta es > 3 kW. El valor medio diario del COP es de 0.43, basado en el Poder Calorífico Inferior (PCI) medido durante el ensayo en campo. Este valor no ha sido muy constante durante el ensayo en campo, como queda ilustrado en la figura 9.

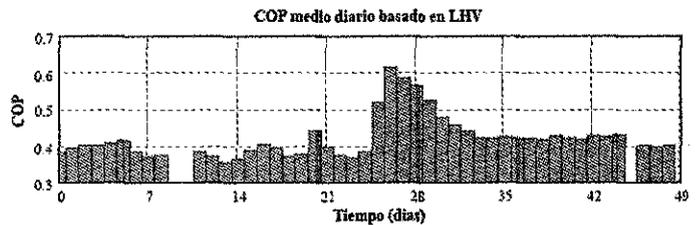


Figura 9: COP de la bomba de calor (estado estable, LHV) para refrigeración

Los valores relativamente altos de COP medidos los días 25 al 32 están originados posiblemente por un aumento de caudal de aire sobre el evaporador. Antes del ajuste de caudal de aire, el COP medio diario estaba sobre 0.39. Este aumentó hasta un 0.42 después del ajuste, tras un aumento inicial de hasta más de 0.5.

La potencia de refrigeración fue de 1.5 kW de media, pero existieron picos de hasta 3 kW (durante los cuales el COP se aproximó a 0.8). La temperatura de aire frío varió típicamente entre 10 y 15°C.

Debido al aumento de la demanda de confort térmico, la refrigeración doméstica se está convirtiendo cada vez más en un tema de mayor importancia en Holanda y en otros países europeos. En Holanda cabe esperar un crecimiento anual de penetración del aire acondicionado entre el 10 y el 15% [1].

La aplicación de una bomba de calor de sorción permite dos tipos diferentes de refrigeración. En una de las casas para ensayo se hicieron experimentos que permitieron la comparación de la refrigeración por aire y suelo refrigerante, considerando tanto el rendimiento energético como el confort térmico [3]. Los experimentos estaban destinados para responder a la pregunta de cuál de los métodos antes citados para refrigerar una habitación proporciona igual confort térmico con las temperaturas más elevadas del agua enfriada. El agua enfriada guarda relación directa con la energía, porque determina la subida de temperatura y, por lo tanto, el rendimiento de la bomba de calor.

Para el sistema de refrigeración por aire, el agua enfriada se produce con una temperatura que varía entre 6 y 9°C (mediante una pequeña enfriadora de absorción), enfriando el caudal de aire de ventilación del edificio, a través de un intercambiador de agua – aire. Debido a la temperatura relativamente baja del agua enfriada, tiene lugar la deshumidificación del caudal de aire (en el intercambiador de calor). Para proporcionar una refrigeración suficiente, se aumenta el caudal de aire (para ventilación) mediante la recirculación del aire.

Para el suelo refrigerante, se aplicó un sistema estándar bajo el suelo de calefacción/refrigeración con agua “enfriada” a partir de los intercambiadores de calor acoplados al suelo (refrigeración libre). El agua enfriada tiene una temperatura de suministro de 18 a 23°C. La deshumidificación no es una opción ya que no resulta deseable la condensación de vapor de agua en el suelo.

Los dos experimentos tuvieron lugar en la casa B destinada a ensayo, anteriormente descrita. Ambos sistemas de refrigeración proporcionaron una potencia media de refrigeración de 1.5 kW.

Para evaluar el confort térmico se emplea la teoría de Fanger [2], en la que se usa como indicador el denominado “Voto Medio de Predicción” (PMV = *Predicted Mean Vote*). Los datos de entrada para calcular el PMV son la temperatura media de radiación, la humedad relativa, la temperatura del aire, el ratio metabólico, la ropa y la velocidad del aire. Para mayor información sobre el PMV el lector puede consultar la documentación citada en [2].

Todas las temperaturas y la humedad relativa se proporcionan mediante los experimentos. Los demás datos de entrada se supone que son los indicados en la tabla 1.

Tabla 1: Datos de entrada supuestos constantes para calcular el PMV

Dato de entrada para PMV	Valor
Ratio metabólico (trabajo doméstico)	1.7 MET = 98.9 W/m ²
Factor de ropa (verano = 0.4; invierno = 1)	0.4 = 0.062 m ² K/W
Velocidad del aire	0.12 m/s

Los parámetros correspondientes a la ropa y al metabolismo ejercen la influencia más fuerte en el PMV. Ya que dichos parámetros se mantienen constantes en este estudio, la temperatura del aire se convierte en el parámetro determinante, como se puede apreciar en la figura 10.

Los resultados experimentales

Los experimentos se han realizado en la misma casa, pero en diferentes años. Durante el experimento de refrigeración con aire, las temperaturas ambiente y la radiación solar fueron más elevadas comparadas con las del período en el que se ensayó el suelo refrigerante.

El suelo refrigerante y por aire proporcionan una potencia media similar de refrigeración, pero con temperatura a 12°C más alta del agua enfriada para la refrigeración por el piso. Las figuras 11 y 12 muestran la potencia de refrigeración versus la temperatura de agua enfriada y el PMV vs la temperatura del aire en la sala de estar para ambos sistemas, respectivamente.

Los gráficos muestran que con temperaturas similares del aire en la sala de estar, la refrigeración por el suelo con temperatura de agua enfriada entre 18°C y 23°C, resulta en un efecto similar en el PMV que con refrigeración por aire (con una temperatura de agua enfriada entre 6 y 9°C).

Con las conclusiones antes citadas, es claro que para las condiciones climáticas holandesas, la refrigeración por el suelo de la habitación proporciona un confort térmico similar en comparación con el de refrigeración por aire, utilizando el sistema de ventilación estándar, pero además funciona a temperaturas mucho más elevadas del agua enfriada. Sin duda, la comparación efectuada en este estudio no permite llegar a conclusiones sobre los efectos dinámicos (tiempo de respuesta para la suelo refrigerante frente a la refrigeración por aire), o sobre la posible diferencia en el confort térmico bajo condiciones climáticas “extremas” (por ejemplo humedad relativa muy elevada).

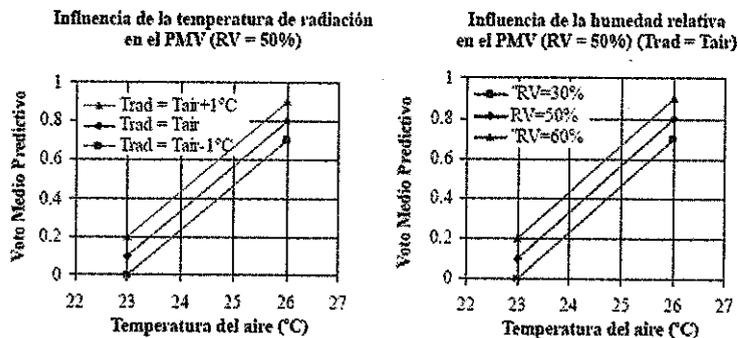


Figura 10: Influencia de los parámetros medidos en el PMV

CONCLUSIÓN Y RECOMENDACIÓN

La bomba de calor por absorción que se ha ensayado

calor

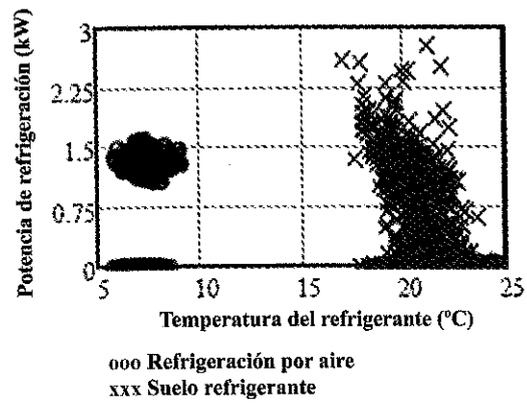


Figura 11: Potencia de refrigeración vs temperatura de agua enfriada en periodo diurno

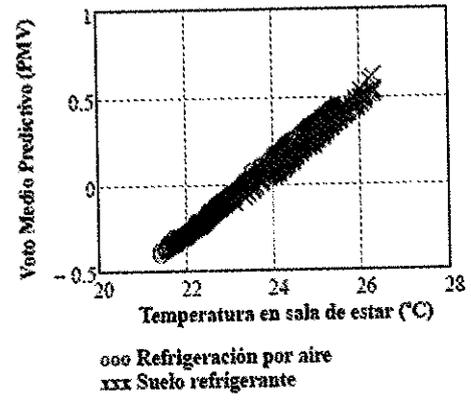


Figura 12: PMV vs temperatura del aire en periodo diurno en sala de estar

mostró un funcionamiento fiable y un prometedor rendimiento energético. En el modo calefacción (agua – agua directo) se midió un COP suficientemente estable, como promedio 1.45 (en estado estacionario) a una subida de temperatura de unos 28°C. El rendimiento en modo refrigeración (aire – aire) alcanzó valores de más de 0.5, pero el rendimiento variaba significativamente y se puede mejorar (por ejemplo, mejorando la transmisión de calor en la unidad de tratamiento de aire). La bomba de calor ha mostrado flexibilidad en las fuentes y en los sistemas de distribución, y un buen rendimiento a carga parcial.

Considerando el rendimiento energético y otras ventajas, las bombas de calor a gas, tal como se ha mostrado recientemente en ISH 2007 (fig. 13), podrían aportar una significativa contribución para aumentar la eficiencia energética, tanto en edificios nuevos como en los existentes, al compararlas con las calderas de gas HE. La comparación con las bombas de calor eléctricas está fuertemente influenciada por la situación nacional, en lo que se refiere a eficiencia y emisión de producción central de energía, y la disponibilidad de gas ecológico.

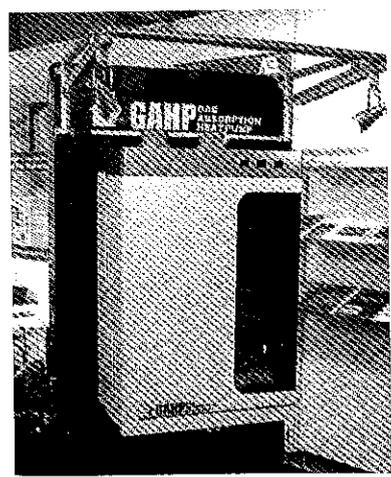


Figura 13: Ejemplo de bomba de calor a gas, para aplicación residencial (presentada en ISH 2007)

Se ensayaron diferentes configuraciones para el prototipo descrito en este documento con el fin de investigar las capacidades de diseño. Esto proporcionó información para un futuro desarrollo. Cabe esperar que el próximo prototipo tenga un rendimiento energético mejorado y represente un paso significativo más cercano al mercado.

Los autores desean manifestar su agradecimiento a los desarrolladores de la bomba de calor por tener la oportunidad de publicar este interesante desarrollo.

REFERENCIAS

- (1) P.P. van Kempen, D. Teeuwen, "Marktanalyse en -prognose van airconditioningsystemen in woningen", Van Kempen, Haarlem, 2001.
- (2) P.O. Fanger, "Thermal comfort, analysis and applications in environmental engineering", Danish Technical Press, Copenhagen, 1982.
- (3) N.C. Sijppeer et al., "Floor cooling and air-cooling, the effects on thermal comfort of different cooling systems", Solar Air-conditioning conference, Tarragona, Spain, 2007.

ABREVIATURAS

- COP: Factor de Rendimiento [-]
- HE: Alta Eficiencia (referida a la situación de la caldera - condensación)
- PCI: Poder Calorífico Inferior (PCI) (del gas natural) [MJ/m³]
- MET: Ratio Metabólico [W/m²]
- PMV: Voto Medio Predictivo [-]
- Q: Energía (calefacción o refrigeración) [kWh]
- Q_{v,10}: Indicador para la tasa de infiltración (fuga de aire a una diferencia de 10 Pa) [lit/sec]
- RC: Resistencia Térmica del elemento de construcción [m²K/W]
- RV: Humedad Relativa [%]
- T: Temperatura [°C]
- T_{air}: Temperatura del Aire [°C]
- Trad: Temperatura de Radiación [°C]
- U_{cog}: Conductancia Térmica en centro del cristal (sin efectos de marcos) [W/ m².K]