



# Desarrollo y construcción de una bomba de calor geotérmica con refrigerantes naturales

A. Cerezuela<sup>1</sup>, M. Zamora<sup>1</sup>

<sup>1</sup> CIAT. Departamento de I+D+i. Pol. Llanos de Jarata s/n. 14550 Montilla, Córdoba, España. acerezuela@grupociat.es

**Resumen:** Se ha desarrollado y construido un prototipo de bomba de calor geotérmica con propano como refrigerante dentro del proyecto europeo “Next Heat Pump Generation” (NxtHPG) [1]. La bomba de calor geotérmica de propano ha sido diseñada para aplicaciones tanto de calefacción como de refrigeración al tratarse de un equipo reversible. Por otro lado, también es capaz de abastecer una demanda de agua caliente sanitaria gracias a la inclusión de un recuperador de gases calientes. En el prototipo se emplean dos compresores en tándem lo que proporciona un alto COP también en condiciones de carga parcial. El equipo ha sido específicamente diseñado y optimizado para propano con la participación del resto de socios del proyecto (fabricantes de compresores e intercambiadores de calor entre ellos). Se ha realizado una selección de componentes específicos certificados para trabajar con gases inflamables. Hasta la fecha se han realizado simulaciones con información de los fabricantes de los componentes. La capacidad prevista por los modelos es de 45 kW con un COP de 3.3 en condiciones de agua en el circuito interior 40/45°C y etilenglicol (20%) a 0/(-3°C) en el circuito exterior.

**Palabras clave:** Bomba de calor, Refrigerantes Naturales, Propano, Reversible, NxtHPG

## 1. INTRODUCCIÓN

Se ha desarrollado y construido una bomba de calor geotérmica con propano como refrigerante dentro del proyecto europeo “Next Heat Pump Generation” (NxtHPG) [1]. El objetivo de este proyecto es el desarrollo de 5 bombas de calor de alta eficiencia y capacidad >35KW que trabajan con dos de los más prometedores refrigerantes naturales que existen: el CO<sub>2</sub> y el propano.

El proyecto NxtHPG engloba a los siguientes participantes:

- a) Dos fabricantes de compresores: Danfoss CC and DORIN;
- b) Dos fabricantes de intercambiadores de calor: LU-VE and ALFA-LAVAL;
- c) Dos fabricantes de bombas de calor: CIAT and ENEX;
- d) Varias instituciones investigadoras: UPVLC, KTH, ENEA, UNINA, NTNU, EPFL;
- e) La Asociación Europea de Bombas de Calor.

En la actualidad existe una gran preocupación por el respeto al medio ambiente, lo cual se ha traducido en nueva normativa más exigente en cuanto al uso de refrigerantes y a la creación de tasas a los gases fluorados. Se están desarrollando nuevos refrigerantes sintéticos de bajo impacto ambiental, los cuales tienen el inconveniente de ser ligeramente inflamables. El nuevo reglamento europeo F-GAS plantea un programa de reducción del uso de refrigerantes HFC de alto GWP en los próximos 15 años, lo que va a suponer requerimientos de continuos cambios de la tecnología. Por otra parte, a medida que se disminuye el GWP de los HFC, aumenta su inflamabilidad, por lo que habría que ir cambiando también los sistemas de seguridad asociados al grado de inflamabilidad. Por su parte, las olefinas, que ya tienen un GWP muy bajo, tienen usos limitados debido a sus bajas densidades y sus altos precios.

Una solución definitiva es apostar por los refrigerantes naturales (amoníaco, hidrocarburos, CO<sub>2</sub>), cuyo GWP es casi nulo, son de bajo precio y están exentos de pagar tasas. Algunos de ellos, como el propano, presentan la ventaja de tener muy buenas propiedades termodinámicas para la climatización mediante compresión mecánica.

## 2. SELECCIÓN DEL REFRIGERANTE

Los hidrocarburos (HC) pertenecen al grupo A3 de refrigerantes (de acuerdo a la clasificación de seguridad que figura en la norma EN 378-1:2008). La “A” se refiere a la clase más baja de toxicidad, mientras que el número “3” hace referencia a la clase de mayor inflamabilidad. Esta gran inflamabilidad es el mayor factor a tener en cuenta, debido a su influencia en el diseño y fabricación de bombas de calor que usan este tipo de refrigerantes.

Los hidrocarburos que han sido valorados para ser usados como gases refrigerantes son: metano, etano, isopentano, propileno, butano, isobutano y propano. A continuación se muestran las curvas entalpía-presión de los tres primeros:

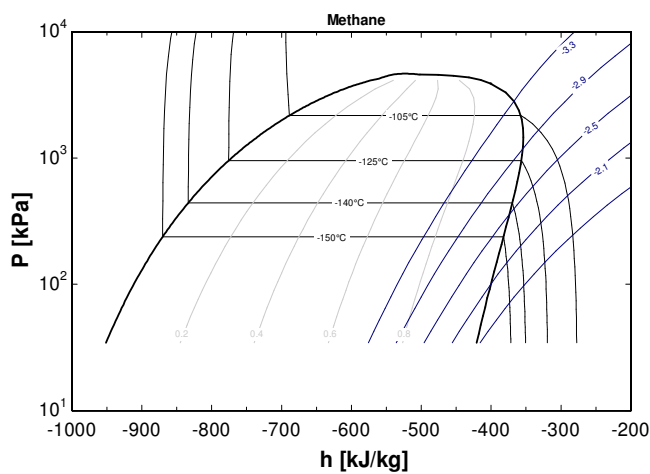


Figura 1. Curva entalpía-presión del metano

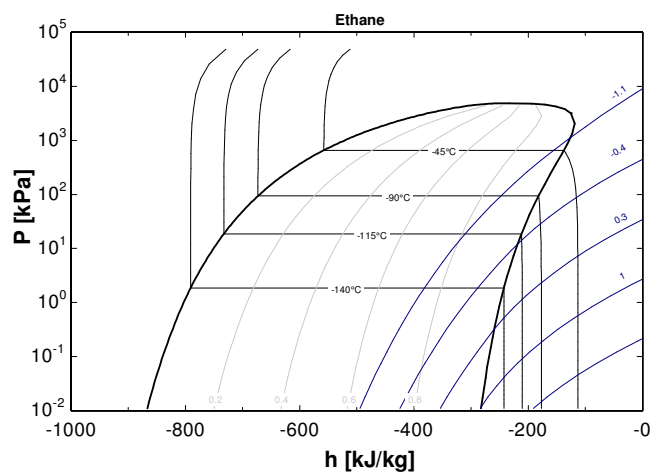


Figura 2. Curva entalpía-presión del etano

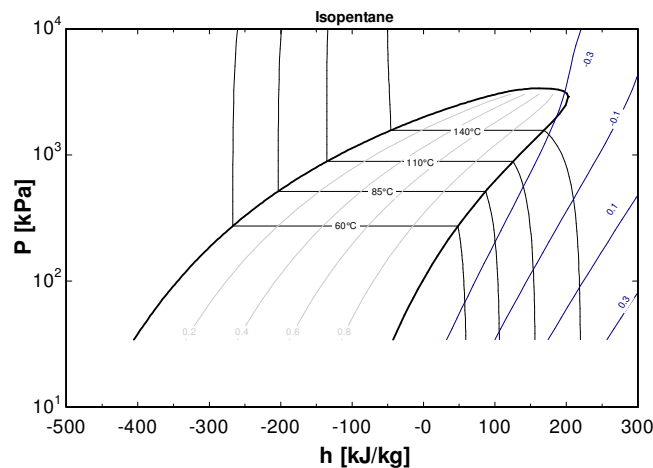


Figura 3. Curva entalpía-presión del isopentano

El metano, etano e isopentano tienen curvas de entalpía-presión que no son adecuadas para aplicaciones HVAC. El butano, isobutano, propileno y propano son las mejores opciones para bombas de calor, siendo el propano el refrigerante seleccionado debido a que existe gran experiencia, no sólo por parte de CIATESA con este refrigerante, sino porque fue una de las opciones para sustituir al R-22 por tener capacidades semejantes, y además por tener presiones de trabajo parecidas al R-407C. Además parece que por parte del mercado existe una inclinación por el uso del propano frente a otros hidrocarburos.

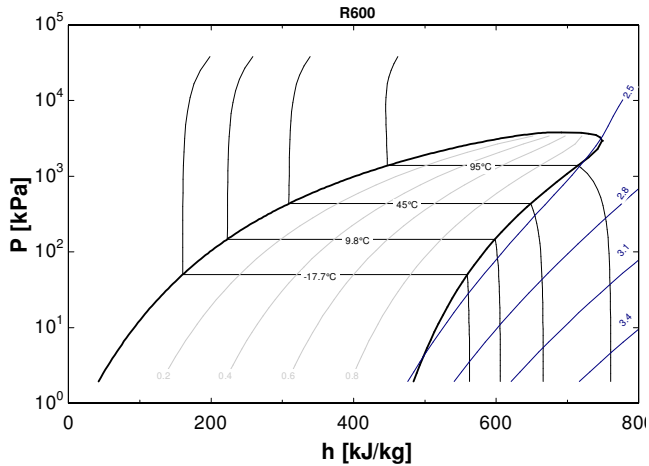


Figura 4. Curva entalpía-presión del butano

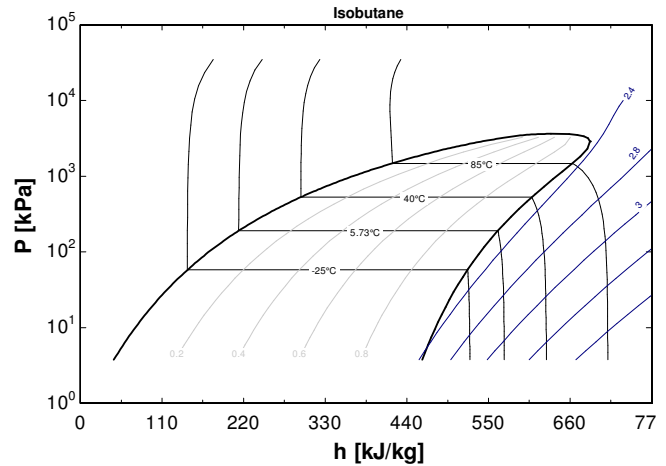


Figura 5. Curva entalpía-presión del isobutano

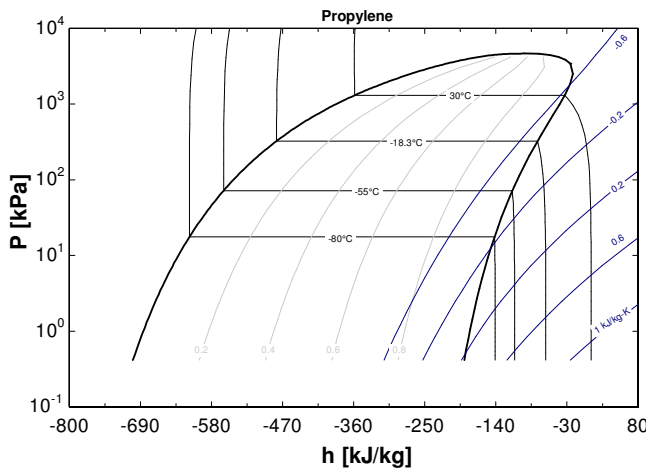


Figura 6. Curva entalpía-presión del propileno

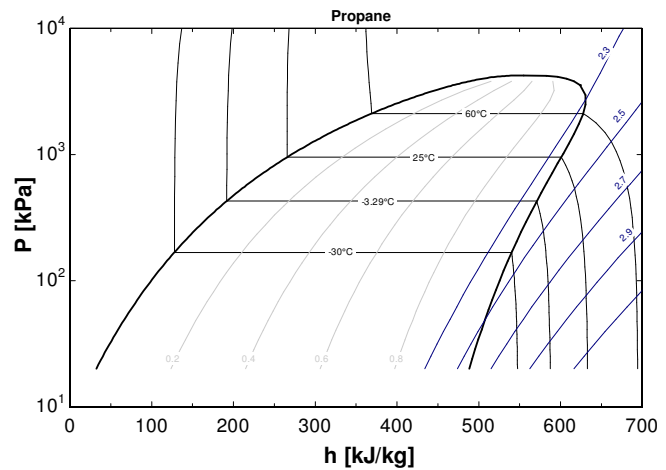


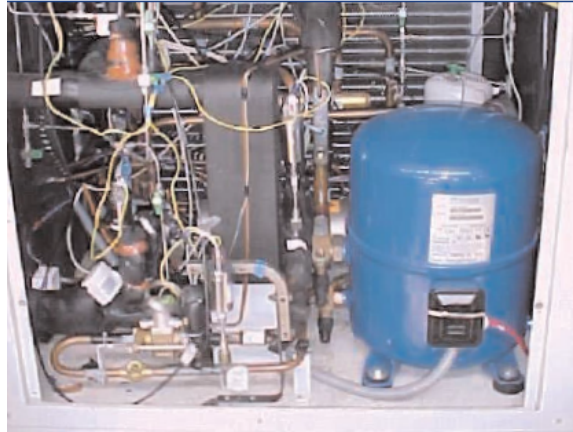
Figura 7. Curva entalpía-presión del propano

### 3. ESTADO DEL ARTE

CIATESA tiene amplia experiencia en la investigación no sólo de la optimización de bombas de calor, sino también del uso de propano como refrigerante natural en dichas bombas de calor. Como muestra de ello, la empresa ha participado en varios proyectos europeos dedicados a este propósito:

- 1) 1998-2000: IV PROGRAMA MARCO “HEAHP. High Efficiency Air-to-water Heat Pump” [1].

Para aplicaciones de climatización y bomba de calor, el propano R-290 es un refrigerante de excelentes propiedades termodinámicas, que puede ser un fácil sustituto de “drop-in” del R-22, ya que es compatible con el aceite mineral. En la investigación de esta materia, CIATESA fue un fabricante de climatización pionero. Entre 1998 y 2001 participó en un proyecto europeo para el desarrollo de una bomba de calor aire-agua trabajando con propano para aplicaciones comerciales en el sur de Europa. Entre las conclusiones más destacadas resultaron la posibilidad de construir dicho equipo con una capacidad frigorífica un 5% inferior a la del equipo convencional pero con aumento entre un 10 y un 19% en COP de refrigeración. En modo calefacción, el COP mejora entre un 15 y un 20%, pero en este caso debido a un aumento de la capacidad calorífica. El equipo podía operarse con un 66% menos de carga (masa) de refrigerante [1]. Este trabajo dio pie a una serie de publicaciones científicas por parte de la Universidad Politécnica de Valencia [4].



**Figura 8.** Prototipo de bomba de calor con propano construida en el proyecto HEAHP

2) 2003-2005: V PROGRAMA MARCO “GEOCOOL. Geothermal Heat Pump for Cooling and Heating along European Coastal Areas” [2]

Las barreras a las aplicaciones comerciales y con disipación por aire, se encuentran en las limitaciones normativas al uso de refrigerantes inflamables. Es por ello, que CIATESA continuó esta línea de trabajo con propano en un nuevo proyecto europeo ejecutado entre los años 2003 y 2005, empleando en este caso una bomba de calor agua-agua (para aplicación geotérmica) [5], que requería para su diseño basado en intercambiadores de placas una reducida carga de refrigerante. La bomba de calor empleaba un compresor scroll de R-22 no homologado por el fabricante para su uso con propano. A día de hoy, sigue en funcionamiento. Como conclusiones de este trabajo se exponen los siguientes puntos:

- a. El mejor diseño para favorecer el funcionamiento de la máquina en modo calefacción se tiene conectando los circuitos interior y exterior en contracorriente, con la válvula de expansión en sentido preferencial. El diseño de una máquina equilibrada, que favorezca ambos modos de operación se obtiene al conectar el condensador siempre en contracorriente, y el evaporador siempre en equicorriente.
- b. Del cambio de refrigerante R407C a propano, se observa una ganancia en COP de 11% en modo calefacción, y 30% en modo refrigeración.
- c. De los prototipos ensayados con propano, se concluye que el subenfriamiento óptimo para obtener el máximo COP en modo calefacción es de 9.5K, (condiciones de trabajo W10/W45), mientras que para el modo refrigeración es de 4.5K en el punto de trabajo W30/W7.
- d. En cuanto al sobrecalentamiento se observa que en modo calefacción afecta muy poco a las prestaciones de la máquina, trabajando con la configuración original: condensador y evaporador en contracorriente, sin embargo en modo refrigeración afecta mucho debido a que los intercambiadores se encuentran en equicorriente.

El esfuerzo de investigación realizado tanto por la comunidad científica como por algunos fabricantes como CIATESA no se veía respaldado en la década de 2000 por los fabricantes de compresores, especialmente los de tipo hermético *scroll* para climatización, que incluso llegaron a realizar una prohibición generalizada a través de ASERCOM (*European Association of Compressor Manufacturers*).



**Figura 9.** Prototipo de bomba de calor con propano construida en el proyecto GEOCOOL

3) 2004-2007: VI PROGRAMA MARCO “SHERHPA Sustainable Heat and Energy Research for Heat Pump Applications” [3]

En 2005, el fabricante BITZER homologó una gama de compresores semierméticos para su uso con R-290. CIATESA y la Universidad de Valencia colaboraron entonces entre 2005 y 2007 en un nuevo proyecto europeo, del 6º Programa Marco, en el que de nuevo se construyó un prototipo de bomba de calor agua-agua de 17 kW, empleando un compresor semihermético BITZER [3].

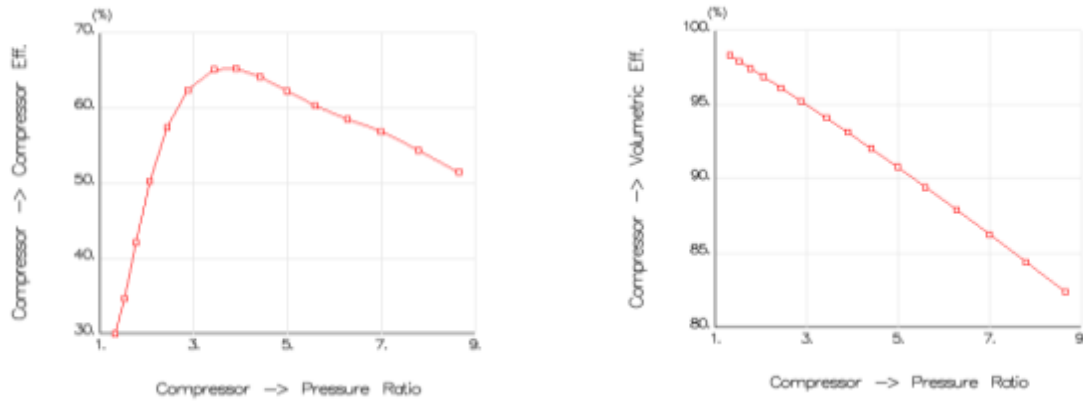


**Figura 10.** Prototipo de bomba de calor con propano construida en el proyecto SHERHPA

En contra de lo ocurrido en el sector del aire acondicionado, en la refrigeración comercial de pequeñas potencias, los hidrocarburos han tenido una gran aceptación. Puede decirse, que hoy día el uso de isobutano R-600a está extendido a nivel mundial en refrigeradores domésticos, neveras y congeladores, botelleros, y vitrinas de helados individuales, habiendo sustituido con éxito al R-134a, ya que la pequeña potencia frigorífica permite el diseño de circuitos con cargas de refrigerante inferiores a 150 gramos, y que no requieren ningún requisito de seguridad adicional. Aquí, en las aplicaciones de frío comercial de baja potencia, fabricantes como DANFOSS sí vienen siendo activos en la promoción de componentes y compresores para equipos de propano [6].

#### 4. SIMULACIONES

El prototipo de bomba de calor agua-agua construido en el proyecto NxtHPG tiene un circuito reversible, de manera que es capaz de proveer tanto calefacción como refrigeración, además es también capaz de cubrir una pequeña demanda de agua caliente sanitaria gracias a un recuperador de gases calientes. Este prototipo emplea dos compresores en tándem, con lo que se consigue mejorar el COPa cargas parciales. A continuación se van a exponer simulaciones realizadas con el programa IMST-ART del comportamiento del equipo en diversas condiciones. En la siguiente figura se pueden ver las curvas de la eficiencia y de la eficiencia volumétrica del compresor.



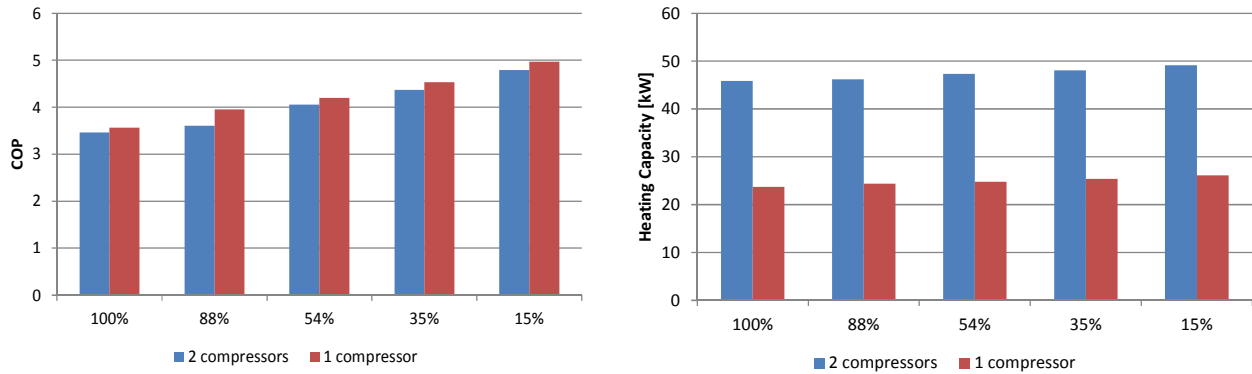
**Figura 11.** Eficiencia y eficiencia del compresor en función del salto de presión

Para comprobar el comportamiento del equipo a carga parcial se han realizado simulaciones a diferentes condiciones, las cuales se muestran en la Tabla I.

**Tabla I.** Condiciones a carga parcial utilizadas para la simulación en modo calefacción de la bomba de calor.

	Carga Parcial	INTERCAMBIADOR EXTERIOR Entrada/salida de la temperatura del agua	INTERCAMBIADOR INTERIOR Entrada/salida de la temperatura del agua
Simulación 1	100%	0/-3 °C	40/45 °C
Simulación 2	88%	0/ a °C	b /43 °C
Simulación 3	54%	0/ a °C	b /37 °C
Simulación 4	35%	0/ a °C	b /33 °C
Simulación 5	15%	0/ a °C	b /28 °C

La simulación 1 se corresponde con la operación a plena carga en la que la temperatura del agua en el intercambiador exterior es a la entrada de 0°C y a la salida de -3°C, mientras que la temperatura en el intercambiador interior es a la entrada 40°C y a la salida 45°C. Como las temperaturas en el agua en el intercambiador interior están por debajo de 0°C, se ha decidido que el fluido secundario sea una mezcla de agua con glicol al 20%. En estas condiciones de simulación se calculan los caudales, que serán usados para las restantes simulaciones. Estas simulaciones se han hecho tanto para un compresor como para los dos en tándem. La Figura 12 muestra los resultados de las simulaciones en las condiciones descritas en la Tabla I tanto con un compresor como con dos.



**Figura 12.** Comportamiento de la bomba de calor en modo calefacción a diferentes condiciones de carga

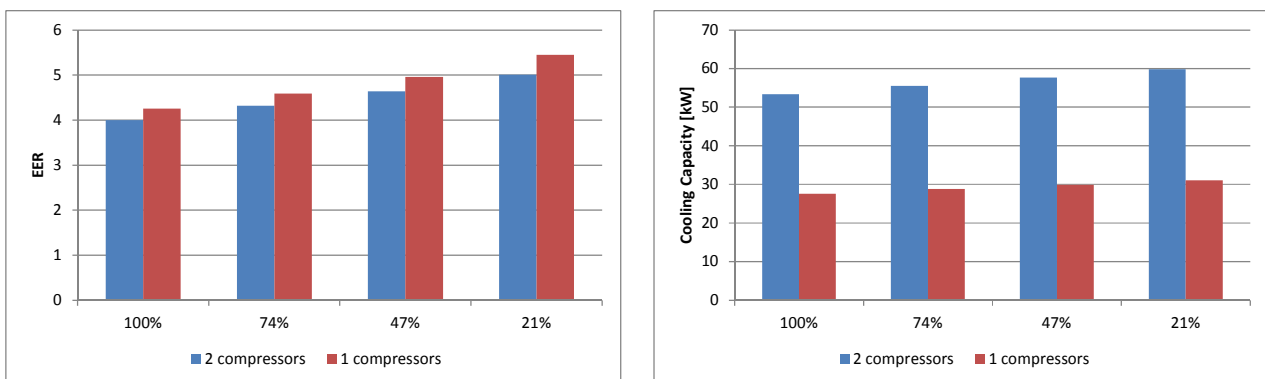
Al funcionar a carga parcial, la capacidad frigorífica proporcionada por el compresor que queda en marcha es entre un 1.73% y un 3.14% mayor. Por su parte el COP es entre un 2.81% y un 3.66% mayor.

Para el modo de refrigeración, las condiciones a carga parcial utilizadas para las simulaciones se muestran en la Tabla II. Las condiciones nominales se establecen para una temperatura de entrada y salida de agua en el circuito exterior de 30°C y 35°C respectivamente y para una producción de agua fría a 12°C/7°C. En estas condiciones se calculan los caudales de agua, y con dichos caudales se realizan las restantes simulaciones a carga parcial.

**Tabla II.** Condiciones a carga parcial utilizadas para la simulación en modo refrigeración de la bomba de calor.

	Carga Parcial	INTERCAMBIADOR EXTERIOR Entrada/salida de la temperatura del agua	INTERCAMBIADOR INTERIOR Entrada/salida de la temperatura del agua
Simulación 1	100%	30/35 °C	12/7 °C
Simulación 2	74%	26/ a °C	b /7 °C
Simulación 3	47%	22/ a °C	b /7 °C
Simulación 4	21%	18/ a °C	b /7 °C

La Figura 13 muestra los resultados de las simulaciones con uno y dos compresores en las condiciones especificadas en la Tabla II.



**Figura 13.** Comportamiento de la bomba de calor en modo refrigeración a diferentes condiciones de carga



En este modo la capacidad de refrigeración y el EER es mayor que en el modo de calefacción debido a que las condiciones escogidas para las simulaciones son más beneficiosas (menor relación de compresión). Estas simulaciones muestran la misma tendencia que en las simulaciones realizadas para el modo calefacción. El EER es mayor cuando la bomba de calor trabaja con un compresor que con dos consiguiendo aumentar desde un 6.4% en condiciones nominales hasta un 8.81% cuando la bomba de calor trabaja con una carga parcial del 21%. En cuanto a la capacidad frigorífica sucede que trabajando con un compresor la capacidad es mayor que la mitad de la capacidad cuando se trabaja con dos compresores. La media de esta mejora es de 1.8%.

## 5. DISEÑO DE LA BOMBA DE CALOR

En el proceso de diseño del circuito frigorífico hay que tener en cuenta que el equipo es reversible y que además tiene dos compresores en tándem, de manera que según la demanda circulara por las tuberías el refrigerante asociado a un compresor o a dos.

A continuación se muestran las velocidades del refrigerante en las diferentes tuberías del circuito de la bomba de calor, tanto en sus dos modos de funcionamiento como funcionando con un compresor y con los dos.

**Tabla III.** Velocidades del refrigerante en las diferentes tuberías de la bomba de calor en modo calefacción

TUBERÍAS	MODO CALEFACCIÓN 2 COMPRESORES	MODO CALEFACCIÓN 1 COMPRESOR
	Velocidad (m/s)	Velocidad (m/s)
<b>Descarga</b>	7.12	7.39
<b>Entrada desuperheater</b>	8.36	4.34
<b>Entrada intercambiador interior</b>	8.36	4.34
<b>Salida intercambiador interior</b>	0.91	0.46
<b>Salida válvula expansión</b>	10.30	5.04
<b>Salida intercambiador exterior</b>	18.94	9.50
<b>Salida válvula de 4 vías</b>	13.47	6.76
<b>Succión</b>	9.47	9.50

**Tabla IV.** Velocidades del refrigerante en las diferentes tuberías de la bomba de calor en modo refrigeración

TUBERÍAS	MODO REFRIGERACIÓN 2 COMPRESORES	MODO REFRIGERACIÓN 1 COMPRESOR
	Velocidad (m/s)	Velocidad (m/s)
<b>Descarga</b>	12.15	12.86
<b>Entrada desuperheater</b>	14.26	7.55
<b>Entrada intercambiador interior</b>	11.53	6.14
<b>Salida intercambiador interior</b>	12.15	5.76
<b>Salida válvula expansión</b>	0.72	0.37
<b>Salida intercambiador exterior</b>	7.56	4.03
<b>Salida válvula de 4 vías</b>	13.95	6.99
<b>Succión</b>	9.81	9.83



En la Tabla V se muestran los componentes principales utilizados para la construcción del prototipo.

**Tabla V.** Componentes principales que componen la bomba de calor

Componente	Fabricante	Observaciones
Filtro	DANFOSS	Puede ser usado con propano, biflow
Visor	DANFOSS	Puede ser usado con propano
Válvula de expansión	DANFOSS	Válvula termostática específica para propano, biflow
Válvula de 4 vías	DANFOSS-SAGINOMIYA	La bobina no es ATEX
Presostatos	DANFOSS	Específica para propano

A continuación pueden verse fotografías del prototipo en distintas fases de la construcción.



**Figura 14.** Fotografías del prototipo 2



## 6. AGRADECIMIENTOS

Este proyecto ha sido financiado por el Proyecto Europeo FP7 “Next Generation of Heat Pumps working with Natural fluids” (NxtHPG).

## 7. REFERENCIAS

[1] <http://erg.ucd.ie/enerbuild/pdfs/HEAHP.pdf>

[2] Geothermal Heat Pump for Cooling and Heating along European Coastal Areas. Final Report. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia, 2006. EU 5th Framework Programme, NNE5-2001-00847.

[3] CORBERÁN J. M., ZAMORA M. (2007). Ground Couple Hydrocarbom Heat Pump for Building Air Conditioning. SHERHPA Sustainable Heat and Energy Research for Heat Pump Applications. Project n°. :COLL-CT-2004-500229. Final WorkShop Brussels 13/11/2007.  
<http://www.greth.fr/upload/jt131107/Sherhpa-Corberan-Coupled%20HP-2.pdf>

[4] BLANCO J., URCHUEGUIA J.F., CORBERAN J.M., GONZALVEZ J. Optimized design of a heat exchanger for an air-to-water reversible heat pump working with propane (R290) as refrigerant: Modelling analysis and experimental observations. Applied Thermal Engineering Volume 25, Issues 14-15. Octubre 2005 2450-2462

[5] ZAMORA M., URCHUEGUIA. J. (2004). Empleo de bombas de calor acopladas a intercambiadores geotérmicos en áreas costeras mediterráneas. Proyecto GEOCOOL. Papeles del Congreso Mediterráneo de Climatización CLIMAMED 2004.

[6] JURGENSEN H. R-22 Replacement in Commercial Appliances. Danfoss Compressors GmbH.