

ANÁLISIS TEÓRICO-EXPERIMENTAL DEL COMPORTAMIENTO DE UNA BOMBA DE CALOR CON SISTEMA DE CAPTACIÓN HÍBRIDO GEOTÉRMICO-AEROTÉRMICO

DIZ MONTERO, Rubén; FERNÁNDEZ SEARA, José; ÁLVAREZ PARDIÑAS, Ángel,

FERNÁNDEZ CID; Diego

jseara@uvigo.es

Universidad de Vigo, Escuela de Ingeniería Industrial, Área de Máquinas y Motores Térmicos

RESUMEN

La climatización y producción de ACS mediante bombas de calor está experimentando un importante desarrollo, tanto a nivel tecnológico como de implantación debido a la necesidad de sistemas cada vez más eficientes. Estos sistemas se basan en el aprovechamiento del calor existente en un medio (tierra, agua o aire) para transferirlo al lugar a climatizar, siendo los sistemas que emplean el aire ambiente (aeroterminia) y el calor existente bajo la superficie terrestre (geoterminia) los que mayor nivel de implantación han alcanzado. Si bien la solución más habitual pasa por el empleo de alguna de estas dos tecnologías de modo independiente, actualmente se están comercializando equipos que combinan ambos sistemas, de modo que se consiguen aprovechar las ventajas particulares de cada uno de ellos, como son el menor coste del captador aerotérmico frente al geotérmico, el aprovechamiento de periodos con elevadas temperaturas del aire ambiente o la posibilidad de funcionamiento aun en casos con riesgo de congelación del terreno.

Teniendo en cuenta la escasa información sobre este tipo de equipos, se ha llevado a cabo un estudio teórico-experimental con el que pretende alcanzar una mejor comprensión sobre el funcionamiento de este tipo de sistemas, obteniendo mapas de funcionamiento que permitan establecer el sistema de captación óptimo en función de las condiciones ambientales. Para ello se ha construido un banco de ensayos que ha permitido estudiar el comportamiento de una bomba de calor comercial acoplada a un aerotermo, a un sistema que simula los pozos geotérmicos o a ambos elementos en serie.

Palabras clave: Sistema híbrido aerotérmico-geotérmico, Bomba de calor

1. Introducción

El continuo incremento del coste de la energía junto con las cada vez más estrictas normas medioambientales han provocado el desarrollo de sistemas de climatización y producción de agua caliente sanitaria (ACS) más eficientes y basados en el aprovechamiento de fuentes de energía renovables. En ocasiones, el empleo de una única de estas fuentes puede no ser suficiente para alcanzar la eficiencia exigida o no permite cubrir toda la demanda térmica existente, por lo que se plantea la hibridación de diferentes tecnologías, pudiendo ser ambas de origen renovable o no.

Por otro lado, las bombas de calor son utilizadas para la producción de ACS y climatización, siendo los sistemas que aprovechan el calor acumulado bajo la superficie terrestre (geotermia) y los sistemas que aprovechan el calor existente en el aire ambiente (aerotermia) los más extendidos. Cada uno presenta ventajas e inconvenientes particulares relativos al coste, espacio necesario, dependencia de las condiciones ambientales o eficiencia. Los sistemas aerotérmicos requieren una menor inversión, pero dependen de las condiciones ambientales, mejorando las prestaciones cuanto mayor es la temperatura ambiente. Por su parte, los geotérmicos requieren una mayor inversión y están sujetos a la disponibilidad de espacio, sin embargo, la elevada estabilidad de la temperatura del terreno a partir de pocos de metros de profundidad hace que su comportamiento sea en general más eficiente.

Recientemente, se está planteando el uso de sistemas híbridos que combinen ambos sistemas, que pueden trabajar ambos de forma simultánea o independiente. Las principales ventajas de los sistemas híbridos frente a los geotérmicos son la posibilidad de obtener una mayor eficiencia gracias a la selección del captador apropiado según las condiciones [1-4], y que un captador aerotérmico resulta más barato que el captador geotérmico para la misma potencia de intercambio. Además, algunos fabricantes plantean el uso de sistemas híbridos en los que el sistema de captación geotérmico deja ser suficiente, bien sea por un incremento de la demanda o bien por el deterioro del sistema de captación. En comparación con los sistemas aerotérmicos, los sistemas con captación híbrida están menos expuestos a las condiciones ambientales desfavorables, y además presentan potenciales ventajas desde el punto de vista de la realización de los desescarches o del apagado de ventiladores durante la noche para evitar ruidos donde su ubicación próxima a locales habitados pueda generar molestias.

Teniendo en cuenta los potenciales beneficios y la escasa información, se ha realizado un estudio comparativo del comportamiento de una bomba calor con captador geotérmico, aerotérmico e híbrido.

2. Análisis teórico

Para el análisis teórico se han utilizado unas ecuaciones facilitadas por el fabricante del compresor de la bomba de calor, que permiten obtener el consumo y la potencia producida en función de la velocidad de giro del compresor y las temperaturas de evaporación y condensación del ciclo.

El procedimiento seguido ha consistido en fijar unas condiciones de condensación, incluyendo la demanda de calefacción, y determinar las condiciones de evaporación necesarias para que, incluyendo el consumo ventilador, el sistema con aerotermo permita obtener la misma eficiencia que sin él. Por este motivo, se ha determinado cuanto es necesario aumentar la temperatura de evaporación con el sistema híbrido para obtener el mismo COP que con el sistema puramente geotérmico, compensando el incremento del consumo. Este análisis se realizó variando la demanda de calefacción, la temperatura de evaporación de partida para el sistema de captación geotérmico y el consumo del ventilador.

En la Figura 1a se muestra el aumento en la temperatura de evaporación que es necesario conseguir con el sistema de captación híbrido frente a la temperatura de evaporación supuesta para el sistema de captación geotérmica para compensar el consumo de ventilador supuesto de 160 W, y en función de la demanda de calefacción. En esta Figura se puede ver que el aumento en la temperatura de evaporación necesario para compensar el consumo del ventilador aumenta cuanto menor es la potencia de calefacción producida y mayor es la temperatura de evaporación supuesta como dato de partida correspondiente al sistema de captación geotérmico, oscilando los valores obtenidos entre 2 y 10 °C. En la Figura 1b, por su parte, se muestra el aumento en la temperatura de evaporación que se debe conseguir con el sistema de captación híbrido frente al consumo supuesto para el ventilador del

aerotermino, para una temperatura de evaporación de partida con el sistema con captación geotérmica de 5 °C y diferentes demandas de calefacción. La principal conclusión es que el aumento necesario en la temperatura de evaporación para compensar el consumo del ventilador es mayor cuanto mayor es el consumo del ventilador.

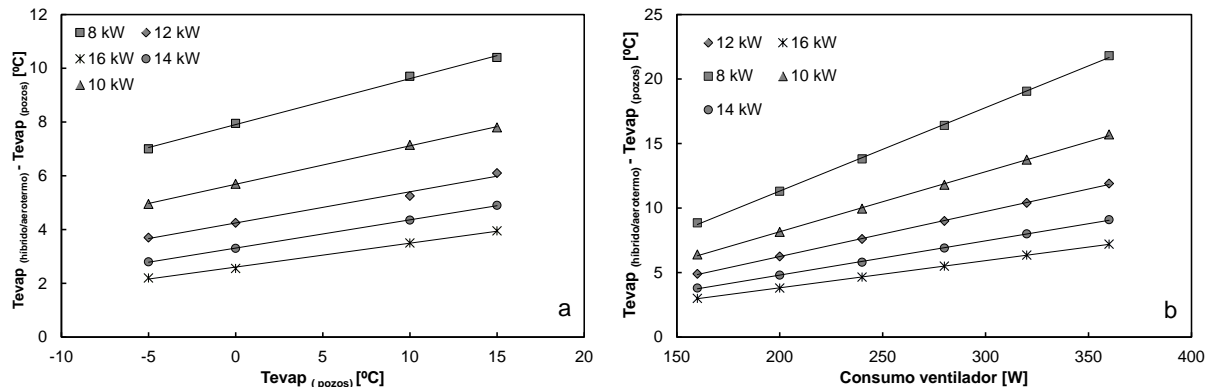


Figura 1: Mejora necesaria en la temperatura de evaporación frente a: a) temperatura de evaporación con captación geotérmica. b) consumo del ventilador

Teniendo en cuenta que el sistema híbrido resulta más ventajoso cuanto mayor es la relación entre el consumo de la bomba de calor y el consumo del ventilador, el uso en sistemas con tecnología de velocidad variable en la que el funcionamiento de la bomba de calor se produce mayoritariamente a carga parcial puede representar un inconveniente. En este sentido, sería interesante plantear el uso de ventiladores accionados con motores de velocidad variable. En cuanto al campo de aplicación de estos sistemas, la necesidad de incrementar la temperatura de evaporación para poder compensar el consumo del ventilador hace que energéticamente sea más apropiado para periodos con elevadas temperaturas de aire ambiente, periodos en los que generalmente no hay demanda de calefacción, por lo que su principal beneficio puede obtenerse en casos de demandas importantes de ACS en periodos cálidos, o casos particulares como el calentamiento de piscinas.

3. Análisis experimental

3.1. Equipo experimental

El elemento fundamental del equipo experimental es una bomba de calor comercializada para trabajar con captadores geotérmicos, y adaptada para trabajar con un sistema de captación híbrido aerotérmico-geotérmico, de modo que mediante el accionamiento de dos válvulas de tres vías se pueda seleccionar cada uno de los sistemas de captación de modo independiente o ambos acoplados en serie (Figura 2).

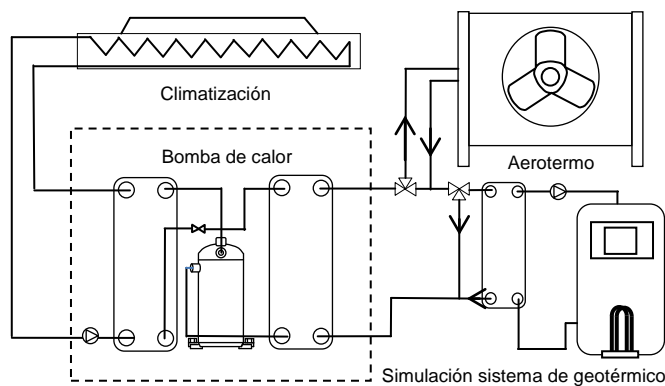


Figura 2: Esquema instalación experimental.

Los componentes principales son un compresor scroll con tecnología inverter, dos intercambiadores de placas, una válvula de expansión electrónica y dos bombas circuladoras de velocidad variable. Como medio condensante se utiliza un circuito cerrado de agua, dotado de los elementos de disipación

necesarios, mientras que el medio de evaporación fue una disolución de propilenglicol al 25%. El sistema de captación geotérmico se simuló con un intercambiador de placas alimentado por una corriente de agua caliente a una temperatura igual a la temperatura supuesta para el terreno (14 °C). La cantidad de calor aportada a la corriente de agua se limitó a la capacidad de disipación estimada para el captador geotérmico que se quería simular, para lo cual se actuó sobre la cantidad de calor aplicada al agua en un termo eléctrico. Para el cálculo de la potencia máxima que es capaz de disipar el sistema de captación geotérmico se supuso un pozo de 100 metros longitud con sonda doble y una capacidad de extracción de 70 W/m, obtenida para el caso de un suelo granítico ((Orche, 2011) [5]).

Para controlar las condiciones de funcionamiento del sistema de captación aerotérmico, este fue instalado en el interior de una cámara, junto con los elementos necesarios para el control de la temperatura. Para controlar la temperatura interior se empleó un set de resistencias eléctricas y una batería de tubos y aletas con un fluido a baja temperatura.

En cuanto a la toma de datos, se recogieron mediante el MODBUS, los parámetros utilizados por la bomba de calor para su control, tales como temperaturas y presiones en todos los circuitos, régimen de giro o niveles de consumo, y mediante una tarjeta de adquisición de datos las medidas de sensores externos. La comunicación de la adquisición con la bomba de calor se gestionó mediante LabVIEW.

3.2. Procedimiento experimental y tratamiento de datos

En este trabajo se han realizado dos tipos de ensayos destinados, por un lado, a realizar un análisis paramétrico, variando la velocidad de compresor (2000-6000 rpm), la temperatura de impulsión de agua caliente (30 °C y 35 °C) y del aire en el interior de la cámara de ensayo (0°C, 7°C y 15 °C), y por otro obtener mapas con las zonas de funcionamiento óptimas de cada sistema. Respecto a la obtención de mapas de funcionamiento, se han elaborado mapas de máxima potencia y máxima eficiencia.

Para determinar la frontera que delimita las zonas de funcionamiento con máxima potencia entre los modos aerotermia e híbrido se realizaron ensayos en modo híbrido con diferentes temperaturas del aire y se obtuvo el régimen de giro del compresor para el cual la temperatura de salida del glicol del aerotermo coincide con la temperatura estimada para el terreno. De esta forma, se obtuvo una curva por encima de la cual (mayores temperaturas de aire) el sistema de captación geotérmico actúa absorbiendo calor del glicol, por tanto su efecto es negativo, mientras que por debajo el terreno cede calor al glicol, y por tanto el sistema híbrido permite aumentar la temperatura de evaporación del ciclo y por tanto obtener una mayor potencia. Para determinar la frontera que delimita el cambio de funcionamiento óptimo de modo híbrido a modo solo pozos, se realizaron ensayos en modo solo pozos obteniendo la temperatura de impulsión de anticongelante para diferentes velocidades de giro del compresor, de modo que solo con temperaturas de aire superiores a dichas temperaturas el sistema híbrido mejora el sistema puramente geotérmico.

El segundo punto de vista desde el que se puede abordar la comparación es el de la eficiencia de la bomba de calor, evaluada mediante el COP, para cuyo cálculo se han tenido en cuenta el consumo total de la bomba calor, incluyendo el consumo del ventilador. En este caso, la frontera que delimita las zonas de funcionamiento en modo aerotermia y e híbrido no se ve alterada, ya que el consumo del ventilador es común en ambos casos. Para determinar el límite de funcionamiento de la zona de mayor eficiencia con la captación geotérmica se han obtenido, en primer lugar, curvas de COP frente a la temperatura del aire para cada velocidad de giro del compresor con los sistemas aerotérmico e híbrido, y se ha obtenido la temperatura de aire para la cual se obtiene el mismo COP para las mismas revoluciones.

4. Resultados

En la Figura 3 se muestran los valores de la potencia térmica producida por la bomba de calor con los tres sistemas de captación frente a las revoluciones del compresor, para una temperatura de impulsión a climatización fija de 35 °C y temperaturas ambiente de 0, 7 y 15 °C.

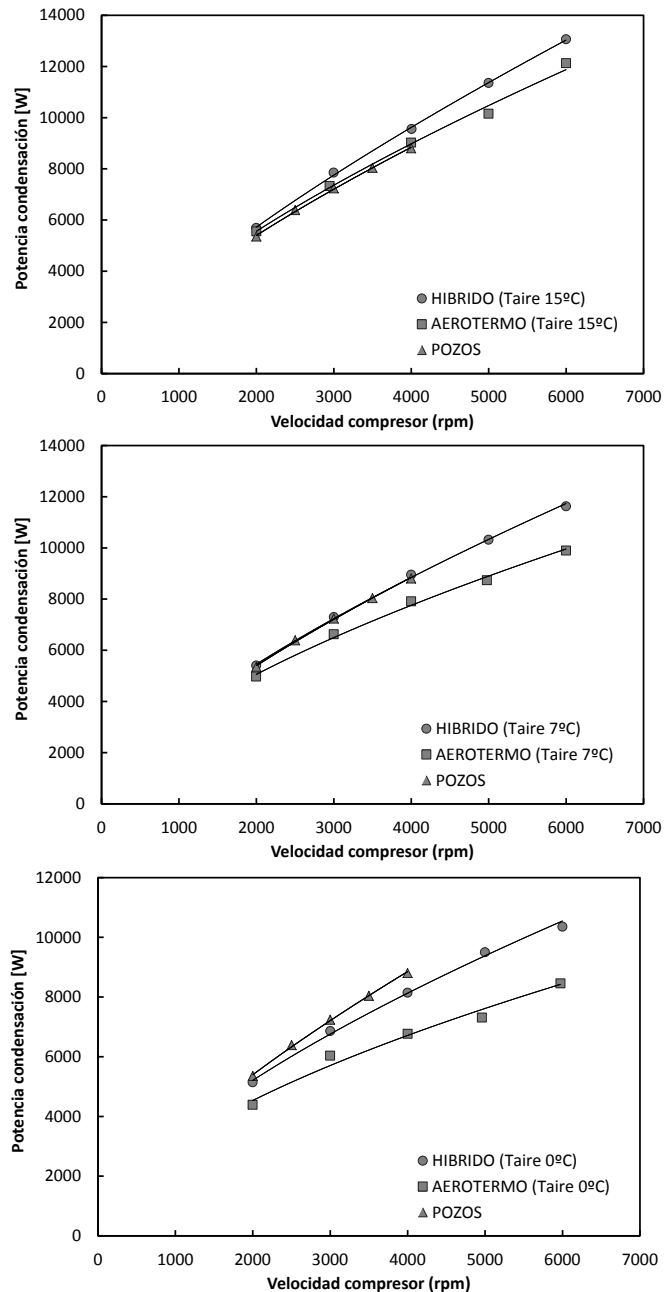


Figura 3: Potencia térmica producida por la bomba de calor frente a las revoluciones del compresor en función del sistema de captación y la temperatura del aire ambiente.

La potencia obtenida aumenta con las revoluciones de compresor, siendo ligeramente inferior este aumento a altas revoluciones. Para el caso de la captación geotérmica no se muestran datos para mayores velocidades del compresor de 4000 rpm, ya que en esas condiciones la necesidad de absorción de calor supera la capacidad de extracción del terreno considerada. Respecto a la temperatura del aire se debe tener presente que la potencia entregada por la bomba de calor cuando se emplea el sistema de captación geotérmico es independiente de la temperatura del aire, por lo que la curva obtenida para el sistema de captación geotérmico es la misma en las tres gráficas. En el caso de considerar una temperatura del aire de 15 °C, se puede ver como la diferencia entre la potencia obtenida con la captación aerotérmica y geotérmica es mínima, siendo ligeramente superior la obtenida con el sistema aerotérmico, mientras que la obtenida con la captación híbrida es apreciablemente superior, cuantificándose la mejora respecto a la captación aerotérmica en un 6,5%. Para una temperatura del aire de 7 °C, la potencia obtenida con los sistemas híbrido y geotérmico es muy similar, es decir, el uso del aerotermo no aporta ninguna mejora, si bien es necesario recordar que

el sistema de captación geotérmico se supuso dimensionado para cubrir únicamente una demanda parcial, por lo que el aerotermo si es necesario para los casos con mayor potencia. Además, se puede apreciar que respecto al caso anterior la diferencia media entre la potencia térmica producida por la bomba de calor con captación híbrida y captación aerotérmica aumenta, situándose en un 11,8%. Por último, para una temperatura de aire de 0 °C la potencia térmica producida por la bomba de calor con captador geotérmico es superior al obtenido con cualquiera de los otros dos sistemas, aumentando la diferencia entre el sistema híbrido y aerotérmico hasta el 17%.

Si bien la determinación del sistema de captación que permite obtener la máxima potencia de calefacción resulta interesante, el parámetro que mejor caracteriza el sistema es su eficiencia. Por este motivo, se muestran en la Figura 4 los valores del COP obtenidos en la instalación con los tres sistemas de captación frente a las revoluciones del compresor, para una impulsión a climatización fija 35 °C, y temperaturas del aire de 0, 7 y 15 °C.

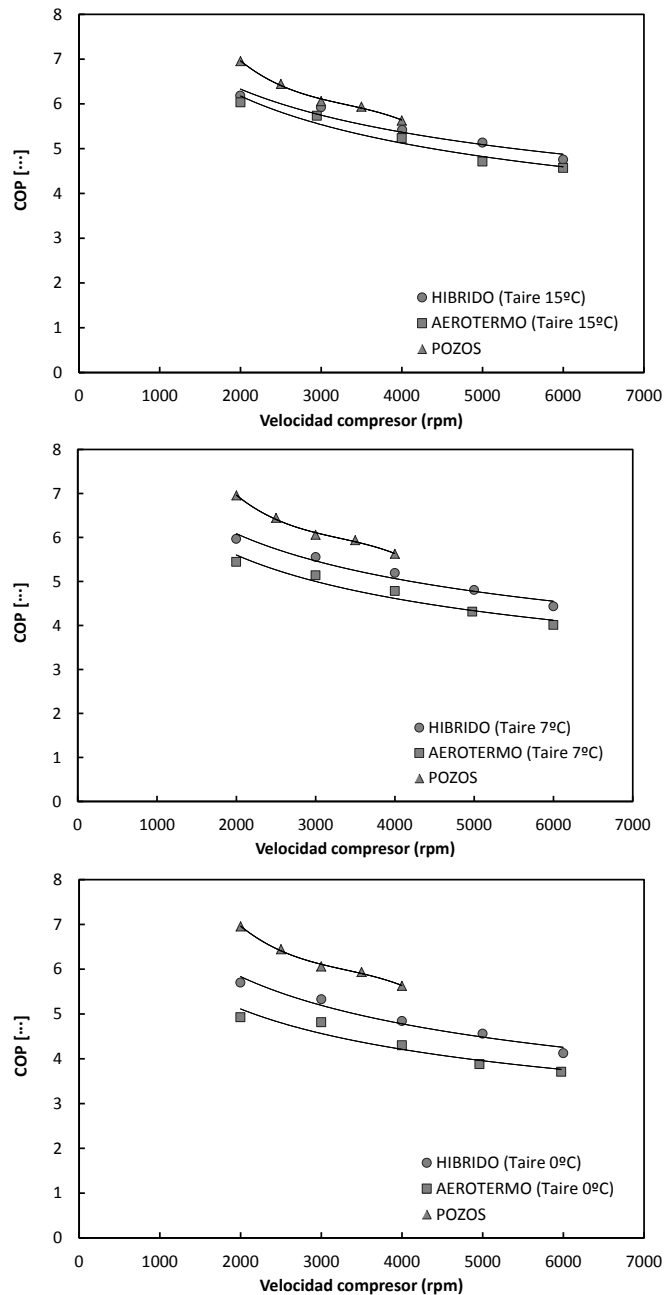


Figura 4. COP de la instalación frente a las revoluciones del compresor en función del sistema de captación y la temperatura del aire ambiente.

El COP disminuye cuanto mayor es la velocidad de giro del compresor, independientemente del sistema de captación empleado y de la temperatura del aire considerada. Además, se puede observar que en el rango de revoluciones en el que es posible utilizar únicamente el sistema de captación geotérmica, los valores de COP obtenidos con este sistema de captación son superiores a los obtenidos con los otros sistemas, para el rango de temperaturas de aire entre 0 y 15 °C. En cuanto a la comparativa de los resultados obtenidos con el sistema híbrido y aerotérmico, se puede observar que en el rango de temperaturas de 0 a 15 °C el sistema híbrido permite obtener mayores prestaciones que el sistema con captador puramente aerotérmico. En cuanto a los valores de COP obtenidos con los tres sistemas se sitúan entre 6,95 y 3,71, variando con las revoluciones del compresor e independiente de la temperatura del aire entre 6,95 y 5,95 para la captación geotérmica.

Teniendo en cuenta la metodología explicada en el apartado anterior, se ha elaborado mapas para la selección del sistema de captación óptimo desde el punto de vista de la potencia obtenida (Figura 5a) y de la eficiencia obtenida (Figura 5b).

En esta Figura se puede ver como con el sistema de captación aerotérmico se obtiene una mayor potencia de calefacción que con cualquiera de las otras dos alternativas para elevadas temperaturas de aire, situándose el límite entre 16 °C (2000 rpm) y 20,5 °C (6000 rpm). Por su parte, el sistema de captación geotérmico permite obtener una mayor potencia a bajas temperaturas del aire, si bien según las hipótesis de capacidad de extracción máxima del terreno las revoluciones máximas a las que se puede utilizar únicamente este sistema son 4000 rpm. En este caso es necesario puntualizar que el comportamiento real en esta zona es más complicado de establecer, de forma que el cambio de una zona a otra será más progresivo.

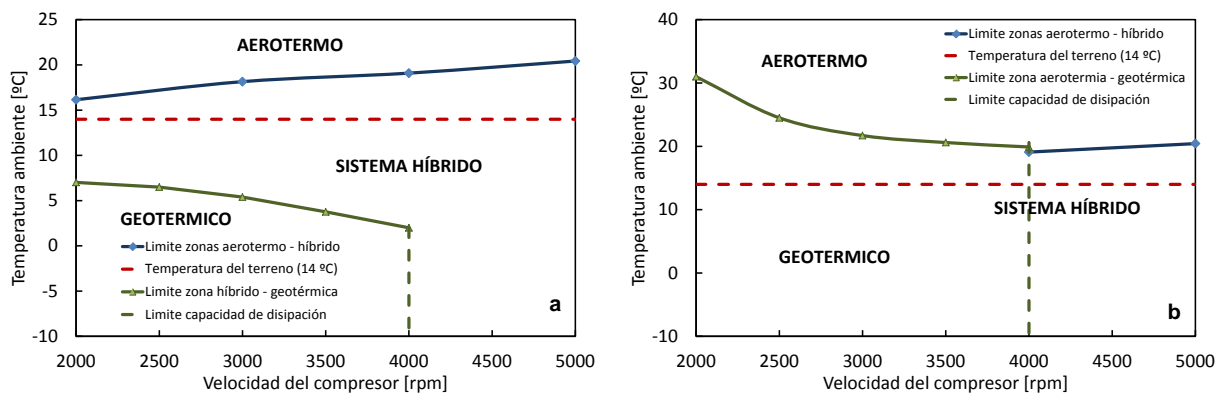


Figura 5. Mapa de funcionamiento a) de máxima potencia. b) de máxima eficiencia

Como ya se indicó con anterioridad, la frontera que delimita la separación entre la zona de funcionamiento con máximo COP en modo solo aerotermo y en modo híbrido no se ve alterada, ya que el consumo del ventilador es común en ambos casos, por lo que la principal diferencia entre este mapa y el de máxima potencia de calefacción reside en la frontera entre la zona de funcionamiento en modo solo pozos y la zona en modo solo híbrido. Los resultados obtenidos mostraron que las temperaturas de aire obtenidas para el cambio de sistema geotérmico a sistema híbrido se sitúan por encima del límite en el que el sistema aerotérmico es más eficiente que el sistema híbrido, de forma que por debajo de 4000 rpm no tiene sentido emplear el sistema híbrido. Al igual que se indicó antes, el límite real de la zona solo pozos no va a coincidir con una línea perfectamente vertical para 4000 rpm, pero con los medios disponibles no fue posible definir con más precisión el comportamiento en esta zona. Por último, respecto a esta Figura indicar que según la metodología empleada, se puede deducir que existe un punto para el cual las revoluciones del compresor son 4000 rpm y una temperatura del aire de 18,8 °C para el cual los tres sistemas son igual de eficientes.

Si bien en el estudio teórico se exponía que el sistema híbrido puede ser menos apropiado para bombas de calor con tecnología Inverter, a la vista de estos resultados se plantea que si puede ser un interesante opción siempre que se dimensione el captador geotérmico para poder cubrir únicamente la demanda de la instalación a carga parcial (mayor parte del tiempo) de forma más eficiente, y utilizar el

aerotermino únicamente para los casos con unas condiciones ambientales muy favorables o para aquellos periodos en los que la demanda sea máxima.

5. Conclusiones

Se ha llevado a cabo un estudio teórico-experimental para alcanzar una mejor comprensión sobre el funcionamiento de este tipo de sistemas, obteniendo mapas de funcionamiento que permitan establecer el sistema de captación óptimo en función de las condiciones ambientales.

En el estudio teórico se ha comprobado que el sistema híbrido está más justificado en aquellos casos en los que la relación entre el consumo de ventilador y el consumo de la instalación sea lo menor posible.

En cuanto al estudio experimental, se realizó un análisis paramétrico para evaluar cómo influyen las revoluciones del compresor, la temperatura de impulsión a calefacción y la temperatura del aire en la potencia térmica producida y en la eficiencia de la instalación y en la potencia de calefacción producida para cada uno de los sistemas de captación. Para un rango de temperaturas de aire de 0 a 15 °C el sistema que permite obtener la máxima eficiencia es siempre el sistema de captación geotérmico en los casos que es capaz de cubrir la demanda de calefacción existente, mientras que en el caso de producción térmica el sistema óptimo pasa de ser el geotérmico al híbrido para una temperatura en torno a 7 °C.

Por otra parte, se construyeron mapas que definen el sistema de captación óptimo en función del régimen de funcionamiento del compresor y de la temperatura ambiente, obtenidos estos para una temperatura de impulsión fija. Estos mapas muestran que dependiendo de las condiciones de funcionamiento, el uso de cualquiera de los tres sistemas de captación puede estar justificado, tanto desde el punto de vista de la eficiencia de la instalación, como de la potencia de calefacción que es posible alcanzar. Finalmente, destacar que los mapas obtenidos fueron obtenidos para un aerotermino concreto y un hipotético sistema de captación, por lo que los límites concretos obtenidos solo son aplicables a este caso, si bien la existencia de diferentes zonas obtenidas sí podría ser generalizada a cualquier tipo de instalación. De todas formas, un análisis con una instalación real incluyendo efectos como la inercia térmica del terreno o condiciones con elevada formación de escarcha debería ser realizado.

6. Referencias

- [1] Yavuzturk, C., Spitler J.D.. *Comparative Study to Investigate Operating and Control Strategies for Hybrid Ground Source Heat Pump Systems Using a Short Timestep Simulation Model*. ASHRAE Transactions, 2000. Vol.106, pp.192-209.
- [2] Hackel, S., Nellis, G., Klein S.. *Optimization of hybrid geothermal heat pump systems*. 9th International IEA Heat Pump Conference (20-22 May 2008), Zurich, Switzerland.
- [3] Lubis, L.I., Kanoglu, M., Dincer, I., Rosen, M.A.. *Thermodynamic analysis of a hybrid geothermal heat pump system*. Geothermics. Vol. 40, pp.233–238.
- [4] Allaerts, K., Coomans, M., Salenbien, R.. *Hybrid ground-source heat pump system with active air source regeneration*. Energy Conversion and Management. Vol. 90, pp. 230–237.
- [5] Orche, E.. *Energía Geotérmica*. Universidad Politécnica de Madrid, 2011. Madrid.