

CAPÍTULO 7

CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS

7.1 - CONCLUSIONES

7.1.1 - CONCLUSIONES DEL BANCO DE ENSAYOS

7.1.2 - CONCLUSIONES ACERCA DEL PROTOTIPO DESARROLLADO

7.2 - PERSPECTIVAS

7.2.1 - PERSPECTIVAS DEL BANCO DE ENSAYOS

7.2.2 - PERSPECTIVAS ACERCA DEL PROTOTIPO

7.1 - Conclusiones

En este apartado se presentan las conclusiones obtenidas del análisis y evaluación del comportamiento tanto del banco de ensayos como del prototipo construidos.

7.1.1 - Conclusiones del banco de ensayos

Se ha diseñado y construido un banco de ensayos para poder analizar el rendimiento de equipos de refrigeración y bombas de calor agua-agua. El banco de ensayos permite evaluar equipos activados por energía eléctrica, gases calientes provenientes de la combustión del gas natural, vapor o agua caliente que proporcionen una potencia frigorífica de hasta 250 kW.

Tras la fase de diseño y construcción se ensayó una enfriadora de agua de absorción de Agua-Bromuro de Litio de simple efecto accionada por agua caliente para la puesta a punto del banco de ensayos. Posteriormente se utilizó para caracterizar el funcionamiento del prototipo construido.

De la experiencia acumulada durante estos dos períodos de experimentación en los que se utilizó el banco de ensayos, se han obtenido las conclusiones que a continuación se indican:

- a) La instrumentación instalada en el banco de ensayos cumple con los requisitos establecidos por la normativa vigente y permite determinar con precisión las prestaciones de equipos de refrigeración y bombas de calor agua-agua.
- b) El sistema de control establecido en el banco de ensayos permite conseguir una gran estabilidad en las temperaturas de operación de los circuitos del evaporador y del absorbedor/condensador.
- c) El sistema presenta una baja inercia térmica y responde rápidamente a los cambios de condiciones.
- d) Se ha mostrado como un sistema eficaz para el estudio dinámico de los equipos ensayados.
- e) El sistema de adquisición de datos permite realizar el análisis del funcionamiento de los equipos ensayados y puede utilizarse como una herramienta eficaz para el análisis de estrategias de control así como para el diagnóstico de problemas de funcionamiento.

7.1.2 - Conclusiones acerca del prototipo desarrollado

Se ha diseñado y construido un prototipo basado en un ciclo de absorción-compresión de doble efecto que puede funcionar con un alto rendimiento en modo refrigeración pero que también pueda funcionar como bomba de calor para aplicaciones de calefacción. Este equipo utiliza fluidos orgánicos para su funcionamiento así como intercambiadores de calor de placas.

El análisis de los resultados obtenidos durante la experimentación con el prototipo construido así como durante las fases anteriores de diseño, construcción y puesta en marcha ha permitido realizar las siguientes conclusiones:

- a) La simulación termodinámica ha permitido establecer la configuración del ciclo de doble efecto así como las condiciones de operación de cada uno de los componentes del equipo.
- b) La disponibilidad del programa de cálculo de intercambiadores placas CAS200® ha sido clave para cumplir con el objetivo de calcular y diseñar los intercambiadores de calor de placas que integran el prototipo en su totalidad. Mediante este programa de cálculo, con las condiciones de operación determinadas en la simulación termodinámica del ciclo y las restricciones térmicas e hidráulicas impuestas en cada intercambiador se ha determinado en cada caso a la configuración idónea, tanto por lo que respecta al tamaño de placa, tipo de corrugación como número de placas.
- c) Las experiencias realizadas en el prototipo han permitido constatar la viabilidad técnica de la configuración propuesta con la mezcla orgánica seleccionada.
 - ✓ Los equipos móviles, bombas de solución y compresor, han mostrado un buen grado de estanqueidad en las condiciones de baja presión exigidas. Durante la experimentación no se ha detectado ningún problema de contaminación de la solución por el aceite del compresor.
 - ✓ Los diversos materiales utilizados en el montaje en el prototipo (acero al carbono, acero inoxidable, vidrio, juntas de teflón, soldaduras de acero inoxidable y de plata, etc) no han mostrado síntomas de degradación o corrosión.
- d) Es de destacar el buen comportamiento del sistema de absorción utilizado basado en la tecnología de intercambiadores de placas soldadas y un sistema de distribución de la solución mediante una boquilla de aspersión colocada en el puerto de entrada del intercambiador del absorbedor. El salto térmico entre el agua y la solución a la salida del absorbedor ha sido en todos los casos inferiores a los 5 °C.

A pesar de no disponer de mediciones directas de concentración, los valores estimados muestran que estos valores son próximos a los de equilibrio. Este buen funcionamiento del absorbedor queda reflejado en la experiencia que se realizó aumentando el caudal de solución comentada en el apartado 4.5.1. En esta experiencia se observó una disminución de la presión del absorbedor al aumentar el caudal de solución lo cual es indicativo de una mayor capacidad de absorción. Por lo tanto, aunque no se pudieron realizar experiencias para comprobar la efectividad del sistema de control de capacidad basado en la variación del caudal de solución, los resultados de esta experiencia parecen indicar que sería un sistema de control válido.

- e) En el absorbedor se han medido valores del coeficiente global de transferencia de calor de hasta 530 W/m²K. Este valor implica que el valor del coeficiente de convección en el lado de la solución sería de 871 W/m²K. Valor francamente elevado para tratarse de un fluido orgánico y claramente superior a los presentados en Vallès (2000). Este aumento en el coeficiente de transferencia de calor se cree que es debido a la mejora en la distribución de la solución entre las placas del

intercambiador. Esto ha sido posible porque se ha seleccionado un intercambiador con un mayor diámetro en el puerto de entrada que ha permitido colocar el sistema de distribución en el interior del puerto de entrada del intercambiador.

- f) Con el tipo de evaporador seleccionado, basado en un sistema de termosifón, las experiencias realizadas en el prototipo indican que es necesario un pequeño caudal de purga en el evaporador para ir eliminando las trazas de absorbente que contiene el refrigerante a la entrada del evaporador. Como en este ciclo el absorbente opera a una presión superior a la del evaporador se requiere una pequeña unidad de bombeo.
- g) Se precisa que el evaporador no este situado en la parte inferior del prototipo con el fin de obtener una mayor columna hidrostática y evitar de esta forma los problemas de cavitación que han surgido en la bomba de purga del evaporador en alguna de las experimentaciones realizadas.
- h) Como los resultados de simulación termodinámica del ciclo no predicen una acumulación tan elevada de absorbente, sería conveniente aumentar el tamaño de los separadores de gotas para reducir las posibilidades de arrastre de absorbente por los vapores de refrigerante.
- i) Las experiencias realizadas en el prototipo permiten afirmar que la configuración seleccionada para el evaporador, basada en un sistema de termosifón y con placas de altura considerable, no es adecuada para el funcionamiento del ciclo como bomba de calor y en modo refrigeración parece estar en el límite de funcionamiento como lo indica la gran diferencia en el comportamiento observado en las experiencias realizadas con el agua de refrigeración a 8 y a 10 °C. La velocidad de circulación parece ser que es muy lenta y si cae la presión del evaporador deja de circular el refrigerante a través de las placas del evaporador. Con una baja presión en el evaporador, la presión hidrostática del líquido a la entrada del evaporador implica un subenfriamiento importante y que no se pueda generar suficiente vapor para establecerse la circulación de refrigerante. Este efecto se ve agravado por la acumulación de absorbente no prevista en la fase de diseño. Por lo tanto, se concluye de estos resultados que dada la baja presión de operación del evaporador sería interesante reducir la columna hidrostática a la entrada del evaporador. Una posible solución sería la de montar el intercambiador de placas en posición horizontal.
- j) Se ha constatado un rendimiento volumétrico muy pobre en la etapa de compresión, lo que repercute muy negativamente en el consumo eléctrico del prototipo y que ha supuesto la principal limitación en la fase experimental para alcanzar las potencias de diseño en modo refrigeración. Para aumentar dicho rendimiento volumétrico se considera la posibilidad de recubrir la superficie de los lóbulos del compresor con una película de teflón, con el fin de reducir la holgura entre dichos componentes, aumentar el rendimiento volumétrico y reducir con ello la demanda eléctrica de dicha unidad.
- k) El análisis termodinámico del ciclo indica la importancia de la eficiencia de los intercambiadores de solución en el rendimiento del ciclo. Por ello se prestó especial atención en el diseño de estos componentes con el fin de asegurar una alta eficiencia tanto en el funcionamiento en modo refrigeración como en bomba de calor. Los

resultados experimentales han mostrado en todos los ensayos un comportamiento excepcional, obteniendo en todo momento rendimientos superiores al 95%.

- l) El comportamiento de los generadores y condensadores ha sido muy satisfactorio, mostrando una alta eficacia tal como indicaban los cálculos de diseño.
- m) El comportamiento del sistema de control ha superado con creces las expectativas creadas. En los ensayos realizados, la estabilidad en el funcionamiento del prototipo ha sido muy buena, tal y como puede verse en los históricos de las presiones y potencias térmicas de intercambiadas con los circuitos del agua. Las únicas fluctuaciones encontradas son causadas básicamente por el evaporador, cuando éste opera por debajo de la presión de 4.5 kPa debido a una inestabilidad del flujo en el interior del evaporador.
- n) En los lazos específicos de control de los niveles de líquido a la salida de los generadores, han sido correctos aunque se han detectado oscilaciones mantenidas, en alguno de los ensayos, debido a la no linealidad en las bombas centrífugas entre la velocidad de rotación y el caudal impulsado. Por este motivo, y a la vista de los resultados, se recomendaría para un futuro, su sustitución por unas bombas de engranajes, por su mayor linealidad entre la velocidad del rotor y el flujo impulsado, de forma casi independiente de la altura de impulsión.

7.2 - Perspectivas

Derivado de las conclusiones mencionadas, se presentan a continuación las perspectivas propuestas de mejora para solucionar los problemas detectados en la fase de experimentación.

7.2.1 - Perspectivas del banco de ensayos

El banco de ensayos construido permite estudiar el funcionamiento de equipos de refrigeración y bombas de calor tanto en régimen estacionario como en dinámico. Esta segunda opción abre la posibilidad de utilizar el banco de ensayos para el estudio de la implantación de sistemas de control avanzados en equipos de absorción.

7.2.2 - Perspectivas acerca del prototipo

La experimentación llevada a cabo en el prototipo ha permitido detectar una serie de limitaciones que impiden alcanzar, con el diseño actual, la potencia nominal de refrigeración de 20 kW establecidos en las condiciones de diseño.

- a) La primera limitación encontrada ha sido el rendimiento volumétrico del compresor. La mejora de este rendimiento volumétrico es necesaria en primer lugar para conseguir aumentar el caudal de vapor de refrigerante trasvasado desde el evaporador al absorbedor y alcanzar así la potencia de 20 kW. En segundo lugar esta mejora del rendimiento volumétrico ha de permitir reducir las revoluciones del motor y con ello disminuir el consumo eléctrico del compresor. Por lo tanto, la

primera acción ha realizar en el prototipo sería la mejora del rendimiento del compresor. Para ello esta previsto recubrir la superficie de los lóbulos del compresor con una película de teflón, con el fin de reducir la holgura entre dichos componentes.

- b) Los resultados de la experimentación indican que el diseño del evaporador, con un CB300 en posición vertical y funcionando como termosifón, se encuentra en el límite de operación en modo refrigeración y no funciona en las condiciones de bomba de calor. Para disminuir el subenfriamiento a la entrada del evaporador está previsto modificar la disposición del evaporador y ensayar el evaporador montado en una posición horizontal con las placas en vertical con el refrigerante en las conexiones inferiores. Esta configuración permitiría además aumentar la columna hidrostática en la aspiración de la bomba de purga, disminuyendo así los problemas de cavitación de esta bomba.
- c) La acumulación de absorbente en el evaporador ha sido superior a la prevista por la simulación termodinámica. Esto puede deberse a una baja eficacia de los separadores de gota por lo que se debería aumentar el tamaño de estos separadores de gotas. Si esto soluciona el problema, tendrá una importante repercusión en el rendimiento del ciclo porque permitirá reducir el caudal de purga.
- d) Este trabajo de investigación se ha desarrollado en el marco de un proyecto subvencionado por la CICYT y el programa europeo FEDER que con el título “Desarrollo tecnológico de la climatización por absorción a gas basada en el uso de fluidos orgánicos e intercambiadores de placas” tiene como objetivo el desarrollo de una bomba de calor de absorción de doble efecto, accionada a gas y que utilice fluidos orgánicos para la calefacción y refrigeración de edificios. Tras solucionar los problemas del prototipo, la tarea que quedaría para completar el proyecto sería analizar si es posible utilizar un quemador de llama directa como fuente de calor del generador de alta o sería necesario un sistema indirecto con vapor similar al utilizado en el prototipo.