



ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE LA ABSORCIÓN DE CALOR EN UNA INSTALACIÓN DE FRÍO SOLAR

Christopher Helbig^[*], Antonio José Gutierrez Trashorras, Isaac Sarries Olmos^[]**

[*] Alumno; [] Tutor(es)**

uo228148@uniovi.es

Departamento de Energía. Universidad de Oviedo.

RESUMEN

Este artículo presenta los resultados del trabajo de investigación sobre una máquina de climatización basada en la tecnología del Frío Solar, la ClimateWell 10, como trabajo final del Máster Universitario en Ingeniería Energética de la Universidad de Oviedo.

Se ha ensayado dicha máquina, que trabaja por medio de un ciclo de absorción con cristalización, en el modo de refrigeración. Para ello, se han realizado cinco ciclos completos de carga tratando de mantener la temperatura de entrada constante entre 70°C y 90°C, en intervalos de 5°C. La descarga se ha efectuado a temperaturas de frío entre 7°C y 15°C, y en intervalos de 2°C.

A través de las variables analizadas, tanto internas de la máquina como de la instalación en la que se integra, se ha descrito el comportamiento de las magnitudes durante los procesos, así como el patrón de la respuesta del sistema y las características - tanto de la carga como de la descarga - que están ilustradas mediante tablas y gráficas. Tras esto, los resultados obtenidos se han contrastado con los datos aportados por el fabricante.

Entre otras cosas, se puede concluir que los resultados experimentales son coherentes con las características técnicas de la máquina.

ABSTRACT

This article presents the results of the investigation of an air conditioning machine, which is based on solar cooling technology - the ClimateWell 10. The project forms part of a final thesis of the Master program in Energetic Engineering of the University of Oviedo.

The said machine works by means of an absorption cycle with crystallization and has been tested in refrigeration mode. For this, five full charging cycles has been realized keeping the inlet temperature constant from 70°C to 90 °C at intervals of 5°C. The discharge has been effectuated at cooling temperatures from 7°C to 15°C and at intervals of 2°C.

Through the analyzed variables, both internal - those of the machine and of the installation in which it is integrated, as well as the behavior of the magnitudes during the processes have been described. The pattern of the system response and the characteristics of both the charge and the discharge are also illustrated by tables and graphs. Furthermore, the obtained results have been contrasted with the data provided by the manufacturer.

Among other things, we can conclude that the experimental results are coherent with the technical characteristics of the machine.



INTRODUCCIÓN

La lucha contra el calentamiento global y la necesidad de reducir las emisiones de CO₂ nos lleva a buscar un nuevo tratamiento de los recursos de la Tierra. El crecimiento de la población mundial y las demandas energéticas [1,2] ha impulsado un esfuerzo para desarrollar nuevas tecnologías que sustituyan poco a poco las finitas fuentes convencionales. A pesar del inevitable ahorro energético, el aumento de la contribución a la energía global por fuentes energéticas renovables es imprescindible. Por consiguiente se han desarrollado una multitud de tecnologías para ahorrar energía y hacer un consumo más eficiente. Entre ellas, la captación de energía solar constituye una posibilidad con porvenir.

La compañía sueca ClimateWell, fundada en 2001, desarrolló una máquina de climatización basada en la tecnología del Frío Solar. Por medio de paneles solares que utilizan la energía solar térmica como una fuente de calor renovable se produce tanto calor como frío que apoya o incluso sustituye a los sistemas convencionales de climatización de una manera económica y ecológica. La máquina produce aire acondicionado por medio de un ciclo de absorción con cristalización.

Entre otras ventajas, la refrigeración por absorción permite el aprovechamiento de energías de bajo nivel térmico además, la coincidencia entre la oferta, que en este caso es la radiación solar, y la demanda, la necesidad de frío, hace que este sistema de frío solar tenga un gran interés. El frío solar puede contribuir en gran parte al ahorro energético de la climatización en las viviendas, lo que en ocasiones supone una parte importante de la energía consumida en las viviendas [3].

Dentro del Proyecto Singular Estratégico ARFRIOSOL se ha construido un banco de ensayos de Frío Solar en la Universidad de Oviedo. Este banco cuenta con una máquina y varios sistemas de captación y disipación de calor. En este trabajo se muestra la investigación básica realizada sobre el funcionamiento de la máquina en refrigeración, haciendo hincapié en su comportamiento bajo ciertas condiciones.

Refrigeración por Absorción

La refrigeración por absorción está basada en la unión de dos sustancias en dos estados de agregación distintos (gas y líquido), que a su vez está influida por la temperatura. El refrigerante es absorbido o desorbido del absorbente dependiendo de la temperatura y de la presión. Para que se lleve a cabo este proceso es necesario que las dos sustancias formen un par absorbente-refrigerante en el intervalo de temperatura empleado.

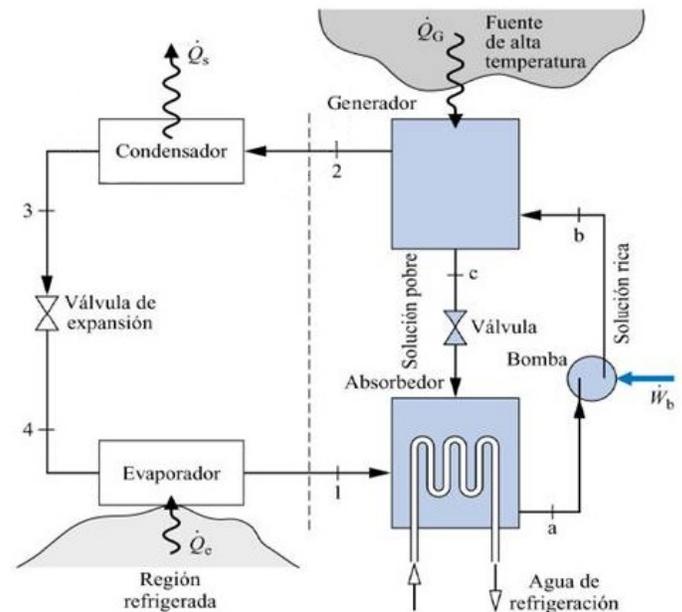


Ilustración 1. Esquema del sistema de absorción [4]

El sistema de refrigeración por absorción, en lugar de utilizar un compresor como sucede en los sistemas convencionales, emplea el fenómeno de la absorción para aumentar la presión del gas refrigerante. Como se ve en la ilustración 1, la compresión del refrigerante se lleva a cabo por el conjunto formado por el absorbedor, la bomba, el generador y una válvula de expansión. Los demás dispositivos, como el condensador, la válvula de expansión y el evaporador, son los mismos que los del sistema frigorífico de compresión mecánica. Asimismo, el refrigerante procedente de la salida del generador sigue las mismas etapas hasta la entrada en el absorbedor.

El vapor de refrigerante procedente del evaporador a baja presión entra en el absorbedor, y por tanto, en el ciclo de absorción-desorción. En



el absorbedor, se aprovecha de la aidez del absorbente líquido para capturar el vapor de refrigerante. El calor liberado a causa de esta reacción exotérmica se evacúa por un circuito de refrigeración.

El proceso de absorción se detendría si el absorbente llegara a saturarse con el refrigerante. Para evitarlo, el refrigerante se retira permanentemente del fluido bombeándolo al generador donde una fuente de alta temperatura le transfiere calor con el fin de que el refrigerante salga del absorbente.

Posteriormente, el fluido empobrecido en refrigerante sale del generador y cambia de presión en una válvula, llegando al absorbedor donde volvería a comenzar el proceso. El vapor de refrigerante procedente del generador entra en el condensador donde tiene lugar la condensación para la obtención de refrigerante en estado líquido. A continuación se produce la expansión isoentálpica del refrigerante líquido a través de una válvula de expansión. Como consecuencia de una muy baja presión en el evaporador, el refrigerante líquido se evapora a temperaturas relativamente bajas antes de volver al absorbedor. La energía necesaria para la evaporación se obtiene en forma de calor de la región refrigerada. El proceso de evaporación se detendría cuando se alcance la presión de saturación del refrigerante a esa temperatura en el evaporador. Por tanto, para evitarlo, se retira continuamente el vapor de refrigerante por medio del absorbedor.

Absorción con cristalización

ClimateWell modificó el principio de refrigeración por absorción y diseño una máquina frigorífica por absorción de tres fases. El nombre viene de los tres estados de agregación de la materia, ya que en el funcionamiento de la máquina se lleva a cabo la cristalización de la sal en disolución (sal - sólido, disolución - líquida, refrigerante - gaseoso).

Los reactores de tipo fluido muestran buenas características para absorber energía térmica pero tienen mala eficiencia en el almacenamiento. En cambio las sales sólidas tienen una baja conductividad térmica que les permite almacenar la energía eficientemente, pero su habilidad para absorber y desorber es baja. El sistema de tres fases une las ventajas de absorbentes sólidos y fluidos mediante una disolución de cloruro de litio

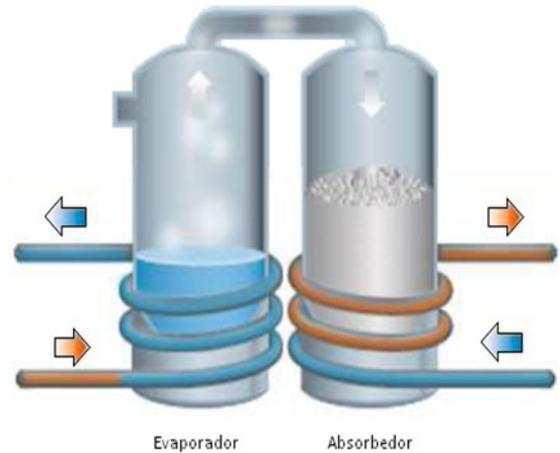


Ilustración 2. Modo Descarga [5]

(LiCl), es decir, consigue al mismo tiempo tanto una alta eficiencia de almacenar energía como una elevada potencia de carga o descarga.

La absorción tiene lugar en un barril que consta del evaporador y del reactor. El evaporador contiene agua pura y en el reactor se ubica la sal higroscópica, así como la disolución acuosa. Los dos depósitos están conectados e intercambian el agua que se desplaza en forma de vapor. La sal nunca cambia su lugar durante todo el proceso.

El principio de la absorción con cristalización funciona de la siguiente manera. En un estado de alto grado de vacío (0.01 bar) el agua se evapora a baja temperatura (7°C) en el evaporador y es atraído hacia el reactor donde la disolución de agua y sal absorbe el vapor de agua.

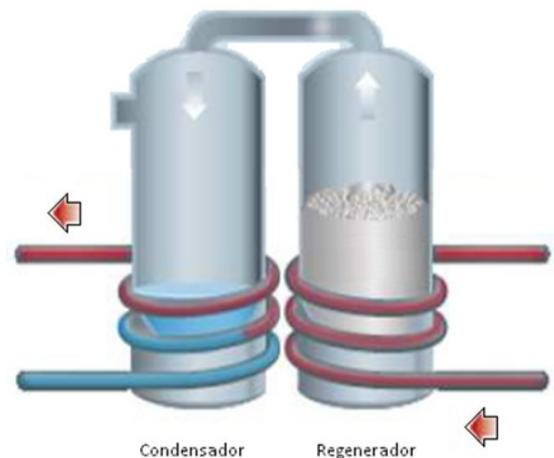


Ilustración 3. Modo Carga [5]



Ese proceso se produce a la presión de saturación del vapor de agua a la temperatura de evaporación. A causa de que la evaporación absorbe calor, el agua pura se enfría mientras la disolución se calienta debido a que la absorción es un proceso exotérmico. El enfriamiento producido en el evaporador se utiliza como fuente de frío y mediante un intercambiador de calor se transfiere al circuito de distribución, que lo enviará a su lugar de empleo. El reactor, cuando actúa como absorbente, produce una cantidad de calor que es necesario evacuar al ambiente. Este desplazamiento del agua del evaporador (temperatura baja) al reactor (temperatura media) representa la descarga.

En la carga, el vapor vuelve del reactor (temperatura alta) al condensador (temperatura media), y sus respectivas tareas cambian. El evaporador actuará como condensador, y el reactor como regenerador, añadiéndole a este último calor mediante una fuente térmica se hierve la disolución para que se desprenda el vapor de agua capturado. Éste se mueve al otro lado y se condensa allí. Según va saliendo el agua, la disolución salina se va concentrando, y pasado cierto punto, parte de dicha sal comienza a cristalizarse en el reactor, dispuesta en estado sólido para diluirse y absorber agua en el siguiente ciclo.

A pesar de que no es el objeto de este estudio, el modo de calefacción de la CW10 se consigue mediante el cambio de algunas conexiones internas de dicha máquina. Así, la transferencia de energía entre ambiente y local a climatizar ocurre al revés. La energía térmica es extraída del ambiente por el evaporador, y enviada por medio del circuito de disipación (condensador - absorbente) al interior del local para ser calentado.

En esta máquina no hacen falta válvulas ni una bomba para reducir o aumentar la presión entre los dos niveles condensador/generador y evaporador/absorbente. La presión cambia con el régimen de la máquina. La temperatura interna de la máquina condiciona la subida o la disminución de la presión en los barriles cerrados. Las bombas existentes aseguran el intercambio del agua en el evaporador y de la disolución en el reactor para mantener las sustancias bien mezcladas.

La Instalación

La máquina de refrigeración por absorción ensayada (CW10 de ClimateWell) es el modelo anterior a la que se vende actualmente. Esta máquina trabaja con 3 modos: carga, calefacción y refrigeración. También, contiene dos unidades de generación para un funcionamiento cuasi-continuo empleando una disolución acuosa de cloruro de litio (en vez de bromuro de litio que es el utilizado generalmente por este tipo de máquinas) como absorbente, y agua como refrigerante.

Este par refrigerante-absorbente presenta numerosas ventajas, especialmente interesantes en el campo de la climatización doméstica. Se trabaja con un refrigerante (agua) barato, inocuo y cuyas presiones de trabajo en este caso se encuentran por debajo de la ambiental. Además, el absorbente, es inocuo para las personas y el medio ambiente, y la separación del refrigerante de él, resulta sencilla. Como desventajas principales, cabe mencionar que el refrigerante no puede alcanzar temperaturas menores de 0°C y que es necesario recircular el absorbente con bombas internas para que no se cristalice en puntos críticos de la máquina.

CW 10	Refrigeración	Calefacción
Capacidad almacenada	60 kWh	76 kWh
Potencia Máxima	10/20 kW	25 kW

Tabla 1. Capacidad y potencias [6]

Según el fabricante, si se aprovechan los dos barriles al mismo tiempo, se alcanza una potencia de 20 kW para la refrigeración y de 25 kW para la calefacción, requiriendo un consumo eléctrico medio de unos 106 W para alimentar las bombas internas y el sistema de control. También, la máquina se regula por sí misma para abastecer con la temperatura configurada al circuito de climatización.

La instalación experimental está compuesta por 3 circuitos, de modo que tienen tanto 3 entradas como 3 salidas que le conectan a dichos sistemas.



El agua es el fluido caloportador, que por tanto se encarga de intercambiar energía. El sistema de captación suministra al generador energía en forma de calor cuyas posibles fuentes térmicas pueden ser: paneles solares, calor residual de procesos industriales o calderas de combustión. El sistema de distribución transporta el producto al lugar de uso. Esto puede ser por medio de suelos o techos radiantes, fancoils, climatizadoras, inductores o vigas frías. El calor absorbido por la máquina (tanto en el aporte como en el circuito de frío) se evacua por el sistema de disipación mediante torres de refrigeración, sondas geotérmicas o aerotermos. También, se puede usar el calor para el precalentamiento de ACS, agua caliente para procesos industriales o para la climatización de piscinas.

La instalación se puede accionar de dos modos distintos, estos son:

- El 'modo sencillo': se parte de la configuración estándar cargando un barril mientras el otro se descarga al mismo tiempo, asegurando una climatización de forma continua. El cambio de función de los barriles es llamado "swap", y dura unos 10 minutos.
- El 'modo doble': este modo permite cargar o descargar los dos barriles al mismo tiempo, con ello se consigue absorber una mayor potencia tanto en el modo de refrigeración como durante la carga. La carga y la descarga no suceden continuamente por lo que esta configuración es la adecuada en el caso de una instalación con gran inercia y una gran diferencia entre la temperatura exterior durante las horas nocturnas y las diurnas.

ClimateWell 10	
Ancho total	1380 mm
Profundidad	700 mm
Altura (con unidad de conexión)	2150 mm
Altura (sin unidad de conexión)	1850 mm
Ancho Barril	680 mm
Peso total	740 kg

Tabla 2. Medidas [6]

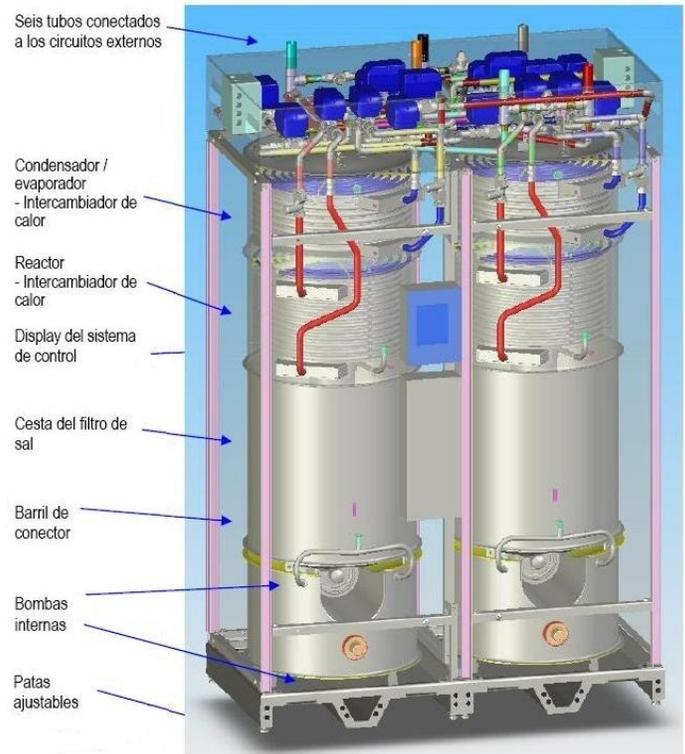


Ilustración 4. ClimateWell 10 [6]

MÉTODO DE TRABAJO

Este trabajo se centra en el comportamiento de la máquina ClimateWell 10 durante el verano, es decir que se estudia en el modo de refrigeración. Se carga la máquina para descargarla produciendo frío. No se tiene en consideración el caso de calefacción. La selección de los dispositivos utilizados en los 3 circuitos externos son los siguientes:

- El aporte de calor se realiza mediante una caldera eléctrica (sistema de aporte).
- Se utiliza una piscina para la disipación de calor (sistema de disipación).
- El frío producido se envía a un depósito (sistema de distribución).

En este estudio se controlan y monitorizan los caudales de la instalación, las temperaturas de las entradas y de las salidas así como las potencias de los 3 circuitos. Esto se ha realizado mediante el software LabVIEW de National Instruments.



Además, se han capturado los datos de los parámetros internos de la máquina, principalmente las temperaturas. También, se ha estudiado el comportamiento de las bombas y de las válvulas.

Carga

Para investigar la carga se realizan cinco ciclos completos tratando de mantener la temperatura de entrada constante. Según el fabricante, la temperatura de la fuente de calor debería estar en torno a unos 50° C más caliente que la temperatura del disipador de calor para que se inicie el funcionamiento de la misma. Por tanto, con una temperatura de la piscina de unos 20°C se empiezan los ensayos desde una temperatura mínima recomendada de 70°C. En intervalos de 5°C hasta 90°C se aumenta la temperatura del aporte. Se trata de ensayos en que el fluido caloportador procede de la caldera, a temperatura constante, hecho que no corresponde a una situación de funcionamiento real, en que las fuentes de aporte (captadores solares) aportan energía a temperaturas variables dependiendo de las condiciones ambientales. Esto se hace así para obtener resultados representativos y comparables.

El parámetro interno F de la máquina representa el "Charging Level" (estado de carga en un instante concreto). Para valores por encima de 0,8 este factor indica que el barril está sólo parcialmente cargado y para valores menores hasta llegar a 0 indica que el barril está bajo de energía. La configuración estándar de la máquina considera un barril cargado e inicia el "swap" cuando FH (media de los últimos valores de F) llegue a 0,9. Otro parámetro que se ha considerado es el "Level" que indica el nivel de carga y se mueve entre 0 y 100 siendo 0 el barril

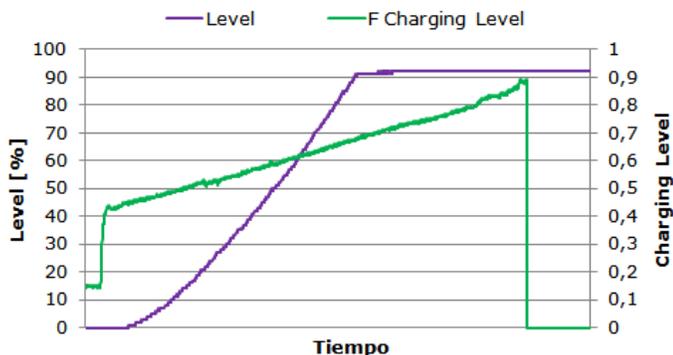
descargado.

Cuando se detiene el aporte de calor F baja hasta alcanzar el valor 0 y se marca el fin de la carga, mientras la máquina sigue disipando el calor residual restante. En el principio del ensayo, el factor F no sirve como criterio de fijación del instante del inicio de la carga porque los valores iniciales, a diferencia del valor final, aunque el barril esté descargado, no hay un valor fijo para este parámetro sino que tiene una cierta variación, probablemente por no haberse descargado de igual forma para cada ensayo. Para evitar definir un umbral arbitrario, se considera el momento en que tanto la bomba del circuito de captación como la del circuito de disipación arrancan como inicio de la carga, esto coincide con la subida de F. Además, al observarse un pequeño desfase entre el arranque de la instalación y el proceso de carga de la máquina se refuerza la decisión de contar como válidos exclusivamente los datos obtenidos desde el instante en que trabajan las dos bombas.

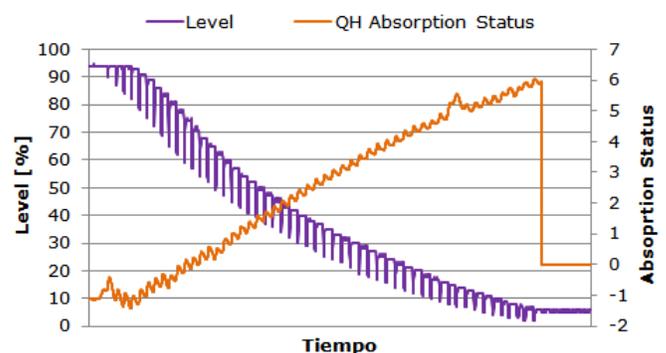
Descarga

Para el estudio de la descarga se realizan cinco ciclos completos a distintas temperaturas de frío que van desde los 7°C a los 15°C en intervalos de 2°C. Puesto que se considera que la demanda de aire acondicionado está el rango de 8-15°C, y la de refrigeración en el de 0-8°C [7], se puede afirmar que estas temperaturas cubren ambos campos de trabajo. Para conseguir esto, se fija la temperatura en el sistema de control, y la máquina (siempre que sea posible) mantendrá la misma temperatura de salida.

En el caso de la descarga, el parámetro interno que indica el estado del proceso de absorción es Q ("Absorption Status").



Gráfica 1. F y Level durante la carga



Gráfica 2. QH y Level durante la descarga



El sistema de control inicia el "swap" cuando QH, la media de los últimos valores de Q, llegue o supere al valor 5,9 durante la carga siempre y cuando el otro barril este cargado suficientemente ($FH > 0,77$). Igual que durante la carga, el parámetro "Level" representa el nivel de carga a escala de 0 a 100.

Cuando QH alcanza y mantiene un cero se detienen las dos bombas tanto del circuito de distribución de frío como las de la disipación de calor y se marca el fin de la descarga. Al principio del ensayo, entre el arranque de las bombas y la reacción de los factores Q y QH hay un desfase, variable según el ensayo, seguido por una fase transitoria en que la curva de QH se muestra fluctuante. Como criterio de fijación del instante del inicio de la descarga se ha definido el punto de QH mínimo. En el caso de que haya más puntos con el valor mínimo se utiliza el punto con el menor Q. Según la tendencia de QH durante del proceso, cuya tendencia es ascendente, suele ser el primero de estos puntos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El ensayo inicial ha consistido en la descarga completa, en modo sencillo, que se recomienda con el uso de captadores solares. Del mismo modo, y partiendo de los dos barriles totalmente descargados, la idea ha sido cargar uno y después otro seguido por una descarga igualmente separada para conseguir tanto el inicio como el fin de los procesos. Es decir, por ejemplo, en el caso de que la carga durase menos que la descarga y la máquina provocase el "swap", la descarga del barril A no podría terminar porque el barril B ya se consideraría suficientemente cargado (Barril A: $QH \geq 5,9$, Barril B: $FH > 0,77$). Ha resultado que la consideración separada de la carga y de la descarga en modo sencillo no sirve para dar resultados precisos. Al descargar un barril sin aporte de calor (p. ej. en un día nublado, sin radiación solar suficiente para accionar el sistema de captación) se produce una transferencia de energía de un barril a otro que resulta imposible de cuantificar, y por lo tanto evita conocer el comportamiento exacto de la parte activa de la máquina.

En teoría existen dos circuitos de disipación. Uno de ellos para evacuar el calor producido en el absorbedor del barril en descarga y el otro para

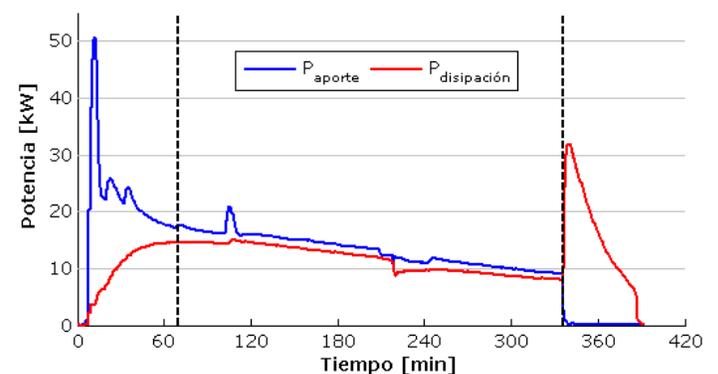
disipar el calor del condensador en el barril en carga. No obstante, resulta que en realidad los dos circuitos disipadores de calor están conectados en un mismo recorrido que atraviesa el absorbedor y el condensador, así que no se puede determinar la contribución de cada barril a la potencia de disipación global.

Como consecuencia de las conclusiones extraídas del ensayo inicial, se han efectuado los estudios en modo doble, esto es, cargando o descargando los dos barriles al mismo tiempo. De esta manera se pueden deducir las características del funcionamiento de un solo barril.

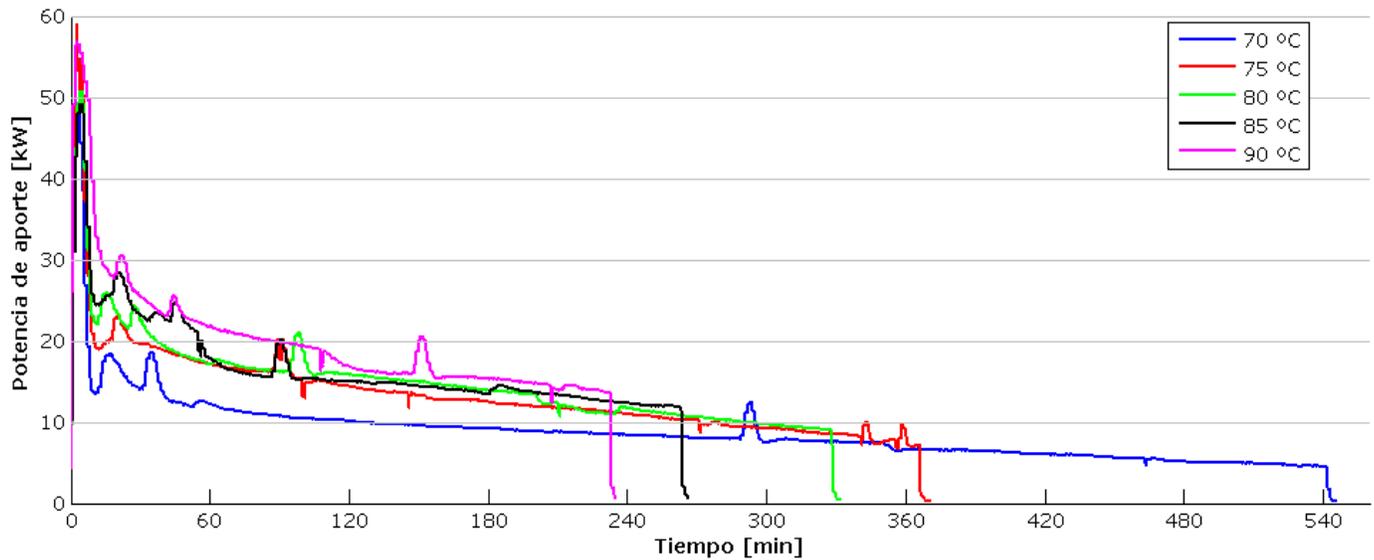
Los caudales del circuito de aporte y del circuito de distribución se han mantenido constantes a 16 l/min y a 14 l/min respectivamente. Estos valores están cerca del régimen de caudal recomendado por ClimateWell de 15 l/min. En el mismo rango, entre unos 10-14 l/min, se ha encontrado el flujo disipador. La variación del caudal en el circuito que conecta la piscina con la máquina se supone debido a la presencia de impurezas dentro de las tuberías y filtros, que resulta especialmente intensa en dicho circuito. En el caso de la descarga, han ocurrido múltiples cierres y aperturas de la válvula del circuito de disipación. Sin embargo, la reducción del caudal cambia de forma despreciable el coeficiente de transmisión de calor y no afecta a la capacidad que posee la instalación de disipar calor.

Carga

Todas las curvas de carga han seguido cualitativamente una forma determinada. Por supuesto, dependiendo de la temperatura aportada, cambia la amplitud de cada magnitud pero se puede identificar un patrón común.



Gráfica 3. Patrón de carga



Gráfica 4. Curvas de carga

Temperatura Aporte	Duración [h:min:s]	Potencia media [kW]	Energía aportada [kJ]	Temperatura Disipación
70 °C	09:06:09	8,72	285569	20,35 °C
75 °C	06:12:15	13,39	298275	19,02 °C
80 °C	05:32:01	14,91	296800	20,20 °C
85 °C	04:26:33	16,72	267248	19,26 °C
90 °C	03:55:35	19,93	281543	20,06 °C

Tabla 3. Datos de carga

Al arrancar la instalación, hay una fase transitoria que se caracteriza por una subida fuerte de la potencia del aporte, que cae enseguida en picado a un nivel muy por debajo del máximo. Después de un cierto tiempo de comportamiento transitorio, bajando y oscilando, la curva de la potencia del aporte se estabiliza y se acerca a la curva de la potencia de disipación. Ésta, por el contrario, va subiendo poco a poco hasta que casi alcanza el mismo nivel de potencia que el aporte. En la siguiente fase, salvo un pequeño pico de subida en el aporte, las potencias van bajando paralelamente. El efecto principal de refrigeración se realiza, de forma continua y estable, en esta etapa. Finalmente, al detenerse la máquina, cuando detecta que está totalmente cargada, el suministro de calor se detiene (cierre automático

por parte de la máquina de una válvula interna) y la potencia del aporte cae hasta cero. En cambio, la curva de la disipación se dispara, para bajar a continuación casi linealmente hasta cero. La potencia disipada al final compensa la aportada inicialmente.

Analizando las distintas cargas, principalmente, se constata que cuanto mayor sea la temperatura mayor será la potencia media del aporte. Por consiguiente, a raíz del aumento de la potencia la duración de todo el proceso disminuye. La carga con una potencia media de 8,72 kW a 70°C dura más de dos veces la carga con una potencia media de 19,93 kW a 90°C. Por lo tanto, la influencia de la temperatura es bastante grande y, por consiguiente, se debería tener en cuenta en la planificación y diseño del campo de captadores

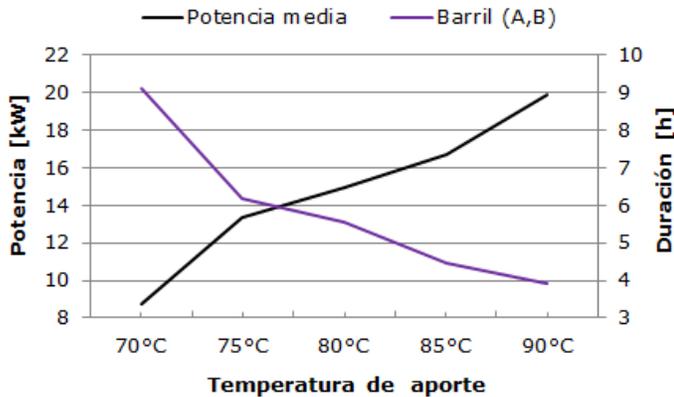


solares, o para las demás alternativas de fuentes de aporte.

Teniendo en cuenta algunos valores experimentales de potencias de carga y descarga, se calcula mediante la duración de las mismas el COP térmico (eficiencia térmica) según la siguiente expresión:

$$COP_{\text{térmico}} = \frac{E_{\text{frío}} \text{ [kJ]}}{E_{\text{aportada}} \text{ [kJ]}}$$

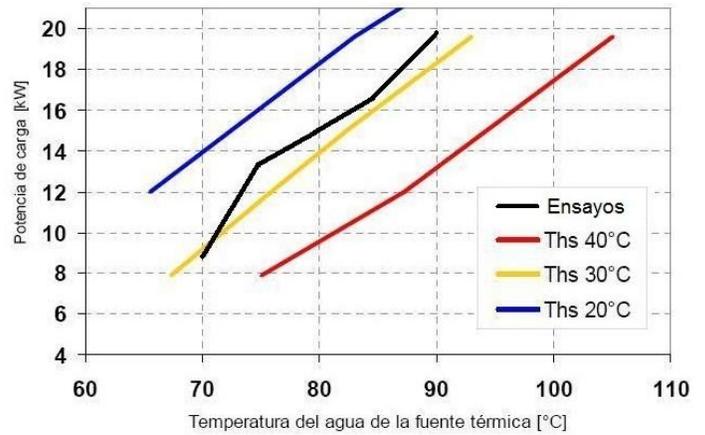
Se obtiene un COP térmico entre 0,62 y 0,65 (con cargas a 90 y 85°C respectivamente, descarga a 15°C, y disipación a 28°C) que es, según lo esperado, muy cercano al 0,68 aportado por la información de ClimateWell. Además, el COP varía muy poco y se muestra relativamente estable con las temperaturas, siendo algo superior cuanto mayores son las de aporte y frío, como muestra la teoría.



Gráfica 5. Duración y carga

La gráfica 6 es un diagrama de ClimateWell que muestra la potencia de carga en función de la temperatura del agua de la fuente térmica dependiendo de la temperatura del líquido del disipador de calor. Ésta indica que la potencia aumenta aproximadamente linealmente con la temperatura del agua de la fuente térmica (ca. 4 kW/10 °C). Las trayectorias casi paralelas en azul, amarillo y rojo corresponden a las temperaturas del disipador 20 °C, 30 °C y 40 °C respectivamente, y muestran la mejora de la capacidad de refrigeración a menores temperaturas de disipación. Al diagrama original, se ha añadido la curva negra que representa los resultados de los ensayos.

Se han realizado todas las cargas a una temperatura media de entrada en el circuito de disipación de T=19,78°C con valores entre 19,02°C y 20,35°C. Este rango se puede considerar lo suficientemente estable como para permitir dibujar la curva de la potencia de carga en función de la temperatura del agua de la fuente térmica respecto a dicha temperatura de referencia. La desviación de la potencia de carga a las temperaturas experimentales del disipador resulta despreciable respecto a las esperadas en una interpolación con los datos de ClimateWell.

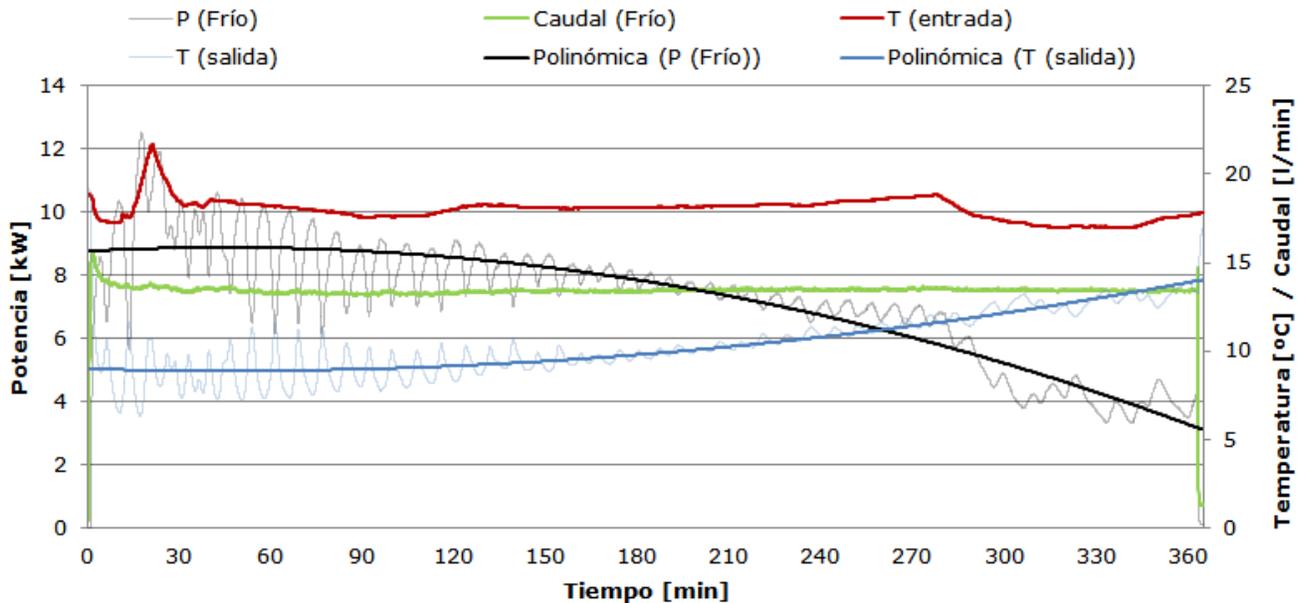


Gráfica 6. Rendimiento de carga [6]

La curva de los ensayos se sitúa, a excepción del punto a 70 °C, un poco por encima, y a lo largo, de la línea amarilla. Esa región del diagrama corresponde con los valores de una variable interna de la CW10, "T3", y se encuentra entre unos 26-28 °C, que representa la temperatura del líquido saliendo de la máquina a la piscina. La temperatura del disipador media T=19,78°C coincide con los datos emitidos por el sistema de control para la variable "T4", la temperatura del líquido entrante al disipador. Así que, se puede decir que los resultados obtenidos, comparados con los de ClimateWell, confirman la relación cualitativa entre temperatura de la fuente térmica y potencia de carga.

Descarga

En las pruebas se ha mantenido el caudal de aporte de frío constante, aunque, el caudal de la disipación oscila por cierres y aperturas de válvulas internas de la CW10. También, se ha mantenido constante la temperatura procedente de la región refrigerada, el depósito, para



Gráfica 7. Patrón de descarga

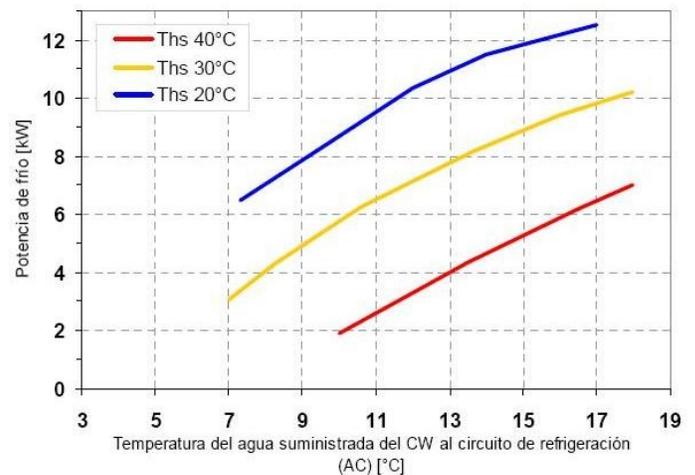
Investigar el rendimiento de la descarga bajo condiciones constantes. En el depósito, se ha mezclado el agua enfriada con agua caliente, compensando el flujo frío, para poder simular un sistema de climatización con una temperatura de entrada fija, independiente de la carga. Así, se observa el rendimiento de refrigeración a lo largo de la descarga, es decir, dependiendo del estado de carga de los barriles.

Al igual que en la carga, se nota un patrón en la respuesta del sistema. La potencia va bajando desde su mayor valor, justo después del inicio, cada vez más rápido según avanza el proceso. Durante la primera mitad de la descarga, la potencia se mantiene más o menos constante. Durante la segunda mitad, la potencia baja aunque sin llegar a cero.

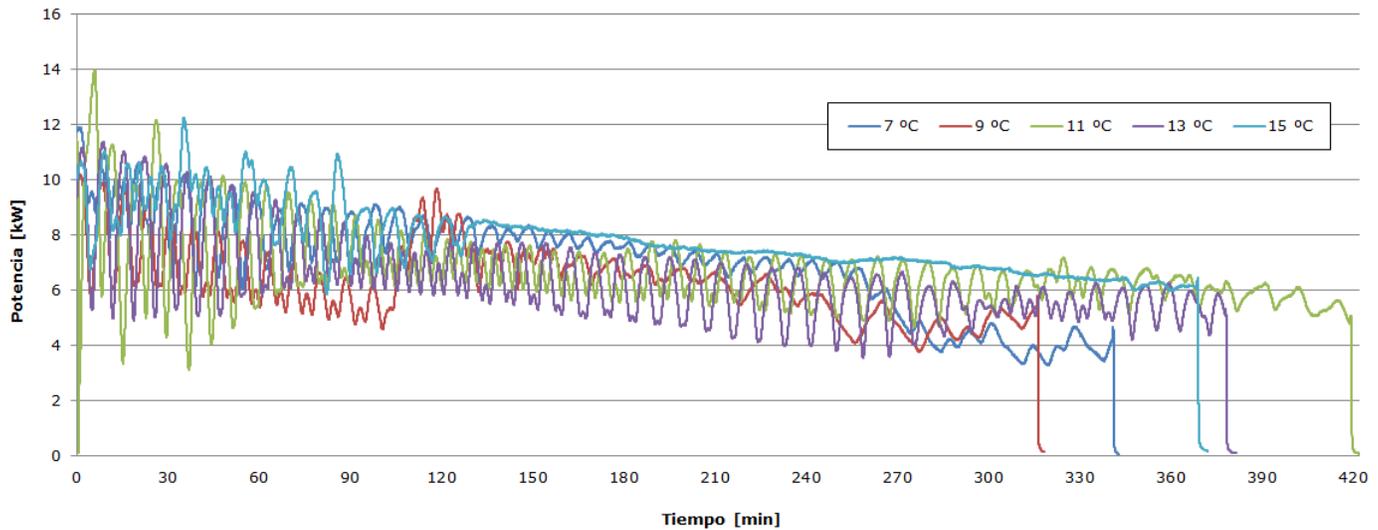
A causa de la reducción de la carga de los barriles, la potencia de frío se reduce, y al mantener constante la temperatura de consigna (entrada a la máquina) la temperatura de salida aumenta.

Se han realizado las descargas a la temperatura del dissipador media de $T=19,62^{\circ}\text{C}$ con valores entre $18,94^{\circ}\text{C}$ y $20,26^{\circ}\text{C}$. De igual modo que la carga, este rango se puede considerar suficientemente estable como para poder despreciar una desviación de la potencia a causa de las distintas temperaturas del dissipador.

A pesar de que los datos de los estudios de la descarga no sirven para sacar conclusiones tan detalladas como en el proceso de carga, podemos afirmar que las temperaturas conseguidas durante de la descarga, entre $10,11^{\circ}\text{C}$ y $12,90^{\circ}\text{C}$, se encuentran dentro del rango de temperaturas solicitadas al sistema, entre 7°C y 15°C , pero sin ajustarse específicamente a la temperatura de consigna fijada para cada caso. Asimismo las potencias de descarga medias de los ensayos se encuentran en un rango muy próximo, entre $6,33\text{ kW}$ y $7,77\text{ kW}$.



Gráfica 8. Rendimiento de refrigeración [6]



Gráfica 9. Curvas de descarga

Temperatura Frío	Duración [h:min:s]	Potencia media [kW]	Temperatura conseguida	Energía de frío [kJ]	Temperatura Disipación
7 °C	05:43:30	7.08	10.45 °C	145653	19.45 °C
9 °C	05:34:02	6.31	10.89 °C	120446	18.94 °C
11 °C	07:08:31	6.67	11.41 °C	168869	19.43 °C
13 °C	06:19:50	6.33	12.90 °C	144710	20.01 °C
15 °C	06:11:20	7.77	10.11 °C	173400	20.26 °C

Tabla 4. Datos de descarga

Dados los experimentos realizados, no se puede observar ningún tipo de orden en cuanto a la duración ni la tendencia dependiendo de la temperatura de consigna dada, y por tanto resulta complicada la comparación de dichos datos con el diagrama de comportamiento de la máquina facilitado por el fabricante, esto es, la relación entre el aumento de la potencia de frío con el correspondiente incremento de la temperatura del agua suministrada por la CW10 al circuito de refrigeración. Asimismo, una menor temperatura de disipación de calor también debería mejorar el comportamiento de la enfriadora. No obstante, se observa que la potencia de descarga es inferior a la de carga, y por tanto, ésta suele durar menos tiempo.

COP eléctrico y capacidad de almacenamiento

Según ClimateWell, el COP eléctrico en modo refrigeración es 77. Este coeficiente de eficiencia se calcula mediante la potencia de refrigeración o de calefacción dividida por la potencia eléctrica que se aporta a la máquina:

$$COP_{\text{eléctrico,frío}} = \frac{P_{\text{frío}}}{P_{\text{eléctrica}}}$$

Se considera que el valor del $COP_{\text{eléctrico}}$ así calculado no tiene sentido para el ensayo realizado ya que no tiene en cuenta la verdadera fuente de energía que alimenta a la máquina, pero da una visión de la pequeña cantidad de energía



eléctrica consumida por la misma (106 W) para producir el efecto frigorífico.

También, se ha observado la capacidad de guardar la energía química dentro de los barriles. Después de cargar los dos barriles completamente, se dejó la máquina parada durante 5 días, tan sólo con el sistema de gestión electrónica y las bombas de recirculación internas. Al cabo de este estudio, las variables F, FH y "Level" de ambos barriles mostraron que se habían descargado hasta un 50%. A partir de este estado de carga, al arrancar la CW10, se ha conseguido suministrar potencia como si no se hubiera descargado antes, pero a consecuencia de ello, la duración del proceso se ha reducido a la mitad.

CONCLUSIONES

En el estudio se ha analizado a grandes rasgos el comportamiento de la máquina en modo refrigeración. Las variables han seguido cualitativamente, tanto en la carga como en la descarga, estructuras determinadas, de modo que se ha podido identificar un patrón común en la respuesta del sistema.

Se ha observado que el rendimiento, según lo esperado, baja a lo largo de los procesos, por lo tanto es dependiente del estado de carga de los barriles. Esto implica, en cuanto a la descarga, que la potencia de frío se reduce, sobre todo a partir de la mitad de la capacidad del barril. Por tanto, al mantener constante la temperatura de consigna (entrada a la máquina) la temperatura de salida aumenta.

La potencia de descarga es inferior a la de carga, por lo tanto el proceso de descarga dura más tiempo.

Se ha obtenido un COP térmico con poca variación respecto a lo que afirma la información aportada por el fabricante, siendo algo mayor cuanto mayores son las temperaturas de aporte y frío, como muestra la teoría. Se puede decir que la descripción del producto de ClimateWell se corresponde con los resultados obtenidos.

Serían interesantes estudios más extensos que no son posibles en el marco de un Trabajo Fin de Máster, por ejemplo, en ambientes diferentes, a otras temperaturas de disipación o la investigación pormenorizada de la capacidad del almacenamiento de la energía química. Esto ayudaría a mejorar el porvenir del Frío Solar, y a

entender mejor el funcionamiento de una máquina que forma parte del pasado, del presente y probablemente del futuro de la climatización.

NOMENCLATURA

CW	ClimateWell
F	Charging Level
FH	Media Charging Level
Q	Absorption Status
QH	Media Absorption Status
Ths	Temperatura del disipador de calor

AGRADECIMIENTOS

El autor agradece su apoyo a todos los miembros del PSE-ARFRISOL, referencia PS-120000-2005-1, que es un proyecto científico-tecnológico singular de carácter estratégico aceptado por el Plan Nacional de I+D+I 2004-2007, cofinanciado con fondos FEDER y subvencionado por el antiguo Ministerio de Educación y Ciencia.

El autor agradece la amable colaboración del Departamento de Energía de la Universidad de Oviedo y del profesor responsable, Antonio José Gutiérrez Trashorras, del Área de Máquinas y Motores Térmicos. Y en particular, quiere mostrarle su gratitud a su co-tutor, Isaac Sarries Olmos, por sus amplios conocimientos en la máquina ensayada y por su apoyo inestimable en la realización de este estudio.

REFERENCIAS

- [1] BP: Energy Outlook 2030, Londres, 2012
- [2] Ministerio de Industria, Turismo y Comercio: La Energía en España 2010, Madrid. ISBN: 978-84-15280-08-8
- [3] Ministerio de Fomento: Código técnico de la Edificación, Madrid, 2006



- [4] Jorge Pistono Favero:
Apuntes del Máster de Ingeniería
Energética,
Universidad de Oviedo, 2010

- [5] ClimateWell:
How it works,
Estocolmo, 2012

- [6] ClimateWell:
Descripción del Producto ClimateWell 10,
Estocolmo, 2008

- [7] Y. Fan, L. Luo, B. Souyri:
Review of solar sorption refrigeration
technologies: Development and
applications,
Renewable & Sustainable Energy Reviews,
2007