

ESTUDIOS Y ENSAYOS DE CALEFACCIÓN DE SISTEMAS DE CLIMATIZACIÓN POR COMPRESIÓN DE VAPOR CON LA INCORPORACIÓN DE AGUA DE SUBSUELO EN EL EVAPORADOR

R. Spotorno, A. Busso*, C. Campbell, J. Pochettino, G. Figueredo, F. García

GITEA-Grupo de Investigación en Tecnologías Energéticas Apropriadadas

Universidad Tecnológica Nacional-Facultad Regional Resistencia

French 414 .3500 Resistencia-Chaco. República Argentina

Tel: +54 3624 432928/Fax: +54 3624 432683/e-mail: rubenspotorno@yahoo.com

*GER-Grupo en Energías Renovables-FaCENA-UNNE

Recibido 11/09/15, aceptado 16/10/15

RESUMEN: Se exponen los resultados experimentales del proceso de calefacción de un sistema de climatización por compresión de vapor, utilizando aire y agua de subsuelo en el evaporador del equipo. Para tal fin se utilizó un split de 5.23 kW de potencia instalado in situ en la habitación a calefaccionar. En el balance energético del sistema de climatización y bomba sumergible, se determinó que la reducción del consumo eléctrico fue del orden del 17 % al 20 %, cuando se utiliza agua de subsuelo en el evaporador del equipo, en comparación con un sistema de climatización convencional que utiliza aire. Además se logró determinar que la potencia calorífica aportada al refrigerante por el agua de subsuelo es superior a la del aire ambiente, lo cual se traduce en una reducción del consumo eléctrico.

Palabras clave: compresión de vapor, calefacción, agua de subsuelo y reducción de consumo.

INTRODUCCIÓN

Las principales fuentes de consumo de energía eléctrica en las regiones subtropicales húmedas son los sistemas de aire acondicionado, que se han convertido en una necesidad para industrias, comercios y hogares, a pesar de los elevados costos energéticos y ambientales que ellos implican.

Climatizar mediante un sistema de climatización por compresión de vapor puede ser un método eficiente, sin embargo la energía de entrada es trabajo suministrado mecánicamente y, por tanto, costoso.

En la región del Nordeste de la República Argentina, los parámetros de temperatura y humedad relativa son elevados aproximadamente durante cinco o seis meses del año. Estas características hacen que el acondicionamiento ambiental, en especial la refrigeración, sea una necesidad para lograr confort térmico, ya sea a nivel residencial, industrial y comercial, Spotorno et al. (2013).

Además durante los meses de invierno, si bien las temperaturas no son relativamente bajas, se requiere en ciertas horas diarias calefaccionar los ambientes de los hogares y laborales.

En cuanto a la utilización de aguas subterráneas en climatización de edificios, Ampofo et al. (2006), reportaron estudios de la utilización de estas aguas, en la que destacan el empleo de las mismas debido a su excelente eficiencia energética, el incremento de la viabilidad y ayudar a reducir el impacto ambiental de los edificios.

Chihping y Hungjiun (2011), describieron la viabilidad de la utilización de aguas subterráneas que circulan como fuentes de energías renovables para la utilización en aire acondicionado en la cuenca de Taipei.

En la literatura técnica existen estudios de sistemas de condensadores enfriados con agua, citando a (Dossat, 2001).

El GITEA (Grupo de Investigación en Tecnologías Energéticas Apropriadas), dependiente de la Facultad Regional Resistencia, reportaron los estudios termodinámicos y simulación mediante el programa Solkane 8, de un sistema de climatización por compresión de vapor con la incorporación del recurso geotérmico en el condensador del equipo y sin él, Spotorno et al. (2013). El GITEA además reportó los ensayos experimentales y simulación de un sistema de climatización por compresión de vapor de un equipo didáctico utilizado en la elaboración del laboratorio de la asignatura Termodinámica Técnica que se cursa en la Facultad Regional Resistencia en la carrera Ingeniería Electromecánica, Spotorno et al. (2014).

El presente trabajo expone los resultados experimentales del proceso de calefacción, obtenidos de un sistema de climatización por compresión de vapor con la incorporación de agua de subsuelo en el evaporador del equipo. En esta oportunidad los ensayos se realizaron con un sistema de climatización por compresión de vapor instalado in situ en las habitaciones que se realiza el proceso de calefacción propiamente dicho.

MATERIALES Y MÉTODOS

La figura 1 muestra la gráfica en planta de las habitaciones a calefaccionar, en la cual se detalla sus dimensiones. Tres de sus paredes están construidas de mampostería y otras tres de placa de yeso con aislamiento interior de poliestireno expandido de 20 mm de espesor, el piso es de mosaicos graníticos. El techo es de chapa galvanizada con aislamiento de poliuretano inyectado en la cara interior de la cámara de aire y cielorraso de madera machimbrada. Las habitaciones tienen dos puertas y una ventana con marco de chapa y vidrio simple. Cabe aclarar que las habitaciones reciben radiación solar solamente a la tarde sobre su pared orientada al noreste y sobre el techo todo el día. Las tres paredes restantes se comparten con otras oficinas y/o laboratorios. Esta situación hace que exista una escasa incidencia de las condiciones ambientales externas sobre la habitación a calefaccionar. Durante los ensayos, la carga térmica presente en la habitación a climatizar consistió en 3 computadoras, diez tubos fluorescentes de 40 W cada uno y tres personas permanentemente desarrollando actividades de oficina, lo que representa una carga total aproximada de 1500W. El proceso de calefacción se realizó a las habitaciones 1 y 2 indicadas en la figura 1. En la misma figura se visualiza las unidades exterior e interior (AA Ext-AA Int), correspondiente al sistema de climatización.

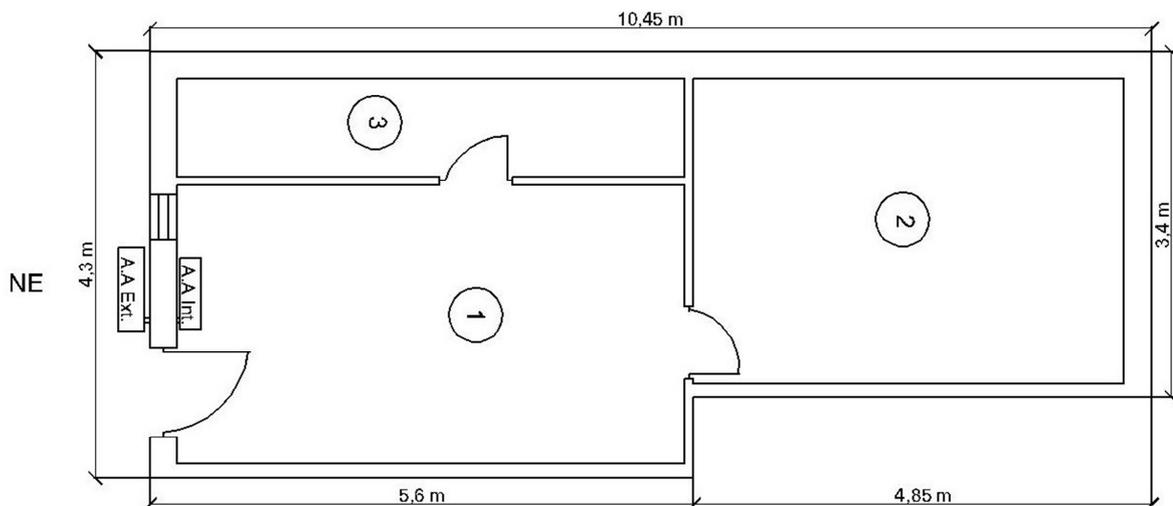


Figura 1: Gráfica en planta de las habitaciones a calefaccionar

La investigación se realizó utilizando para calefaccionar las habitaciones testigos, un equipo de aire acondicionado (A.A) tipo split de 5.23 kW de potencia, marca Comfortmaker, modelo FCWFRQ1822F. La figura 2 muestra un esquema funcional general empleado. En el mismo se identifican los diferentes componentes: habitación, bomba sumergible, tanque de almacenamiento de agua de subsuelo, A.A (Split).

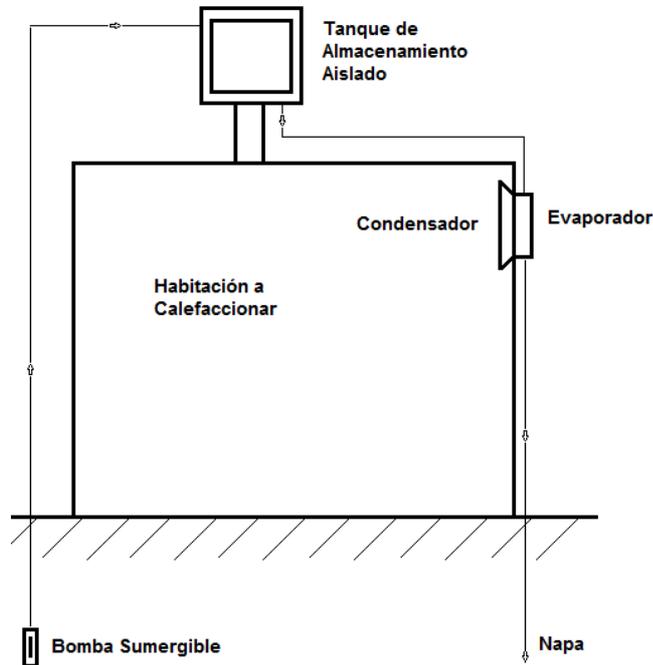


Figura 2: Esquema funcional general empleado

El sistema de climatización por compresión de vapor con la adaptación correspondiente para utilizar el agua de subsuelo se visualiza en la fotografía de la figura 3.

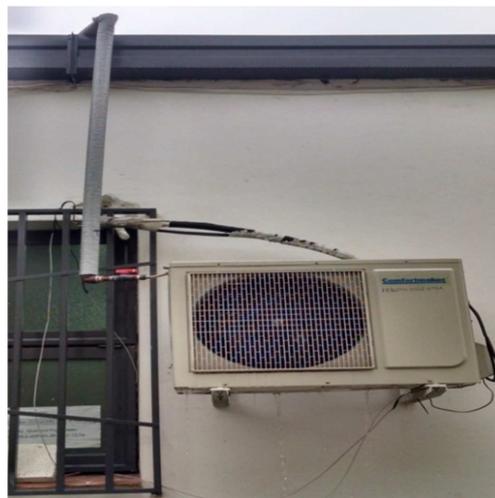


Figura 3: Fotografía del sistema de climatización

Con la finalidad de registrar la temperatura del refrigerante en diferentes puntos del equipo de climatización, se instalaron cuatro termocuplas tipo K con una precisión de 0.5°C , cuya disposición se visualiza en la gráfica de la figura 4. Los datos se registraron conectando estos sensores a un módulo adquisidor de datos NUDAM 6018 y éste, por medio de la interfase RS232 NUDAM 6520, a la PC. El

registro de datos se realizó en forma automática a intervalos de 30 segundos. La medición del consumo de energía eléctrica del equipo de climatización se realizó con un medidor de energía monofásico tipo F-72, clase 2, marca General Electric.

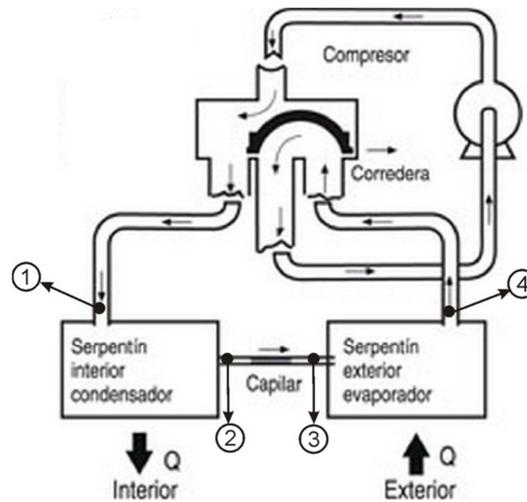


Figura 4: Disposición de termocuplas en diferentes puntos del equipo

A continuación se detallan los parámetros que se registraron en los distintos puntos indicados en la figura 4.

Punto 1: Medición de temperatura del refrigerante a la salida del compresor

Punto 2: Medición de temperatura del refrigerante a la salida del condensador

Punto 3: Medición de temperatura del refrigerante a la salida del capilar

Punto 4: Medición de temperatura del refrigerante a la salida del evaporador

Con el fin de realizar los ensayos de calefacción se configuró el equipo de A.A para una temperatura de 22°C.

Los ensayos realizados tenían una hora de duración y consistía en lo siguiente:

En primera instancia se efectuó el ensayo de calefacción utilizando aire en el evaporador del equipo. A continuación se realizó el mismo ensayo con la particularidad de utilizar agua de subsuelo. Para la realización del mismo se impulsaba agua a un tanque elevado y térmicamente aislado con capacidad de 1 m³, por medio de una bomba sumergible. La alimentación del evaporador del sistema de climatización se efectuó simplemente por gravedad, mediante una manguera transparente de PVC con una serie de orificios de diámetros que permitiera que el agua caiga en forma de cascada. La regulación del caudal de agua que circuló por el evaporador del equipo se realizó mediante una válvula globo. La temperatura del agua de subsuelo que se utilizó en los ensayos de calefacción registró un valor aproximado de 23° C.

Cabe destacar que entre la realización de los ensayos en que se utilizó aire y agua de subsuelo en el evaporador del sistema de climatización, se esperó un periodo de media hora en cual se producía la apertura de puertas y ventana de las habitaciones, de manera tal que las condiciones térmicas interiores sean aproximadamente iguales que al inicio del primer ensayo.

Con el objeto de analizar el comportamiento del sistema de climatización utilizando aire y agua de subsuelo en el evaporador, se realizaron ensayos cuyos resultados más representativos se detallan a continuación:

RESULTADOS EXPERIMENTALES

El caudal volumétrico de agua de subsuelo que se utilizó en los ensayos de calefacción registró un valor aproximado de 500 lts-h⁻¹.

Ensayo 14-07-2015

Al inicio de cada ensayo se midió la temperatura interior de las habitaciones a calefaccionar, registrándose para este ensayo un valor de 15°C. La temperatura del aire ambiente exterior registró un valor aproximado de 14°C.

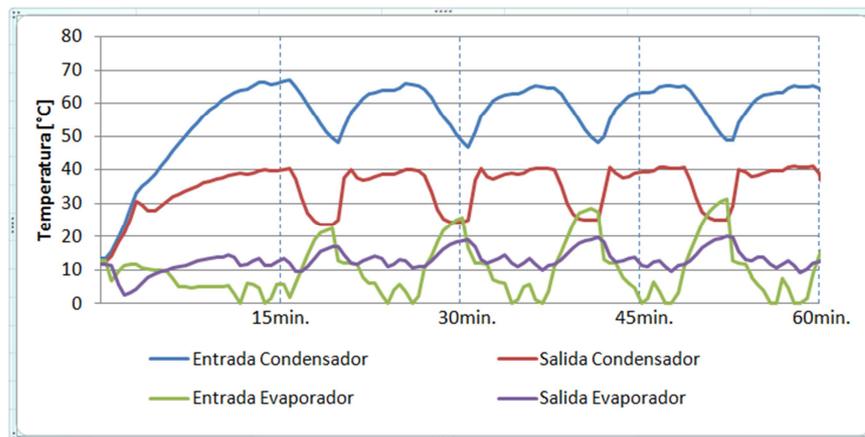


Figura 5: Temperatura del refrigerante utilizando aire en el evaporador

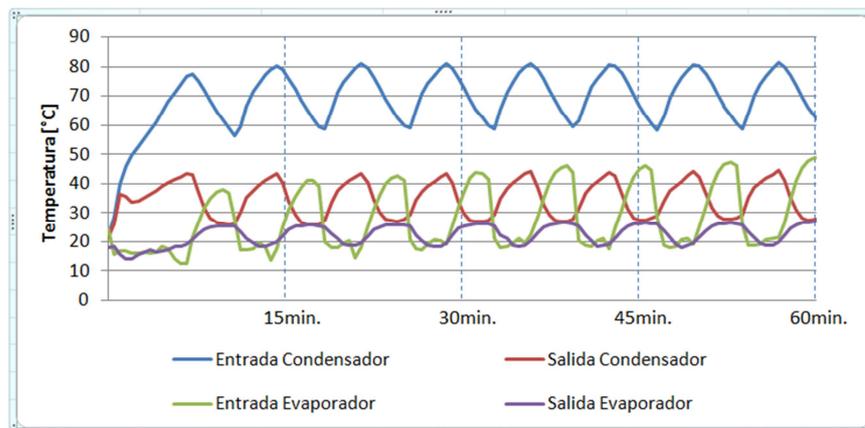


Figura 6: Temperatura del refrigerante utilizando agua de subsuelo en el evaporador

Si comparamos las gráficas de las figuras 5 y 6, los incrementos de temperaturas entre la entrada y salida del refrigerante en el condensador para el caso que se utiliza aire es del orden de los 28°C, mientras que para el ensayo que se utiliza agua de subsuelo es de aproximadamente 38°C, lo que se manifiesta como una mejora en el proceso de calefacción.

En la figura 7 se observa el gráfico representativo del consumo de energía eléctrica para cada ensayo. La barra de color azul representa el consumo de energía eléctrica durante el ensayo de calefacción utilizando agua de subsuelo en el evaporador, mientras que la barra de color naranja representa el consumo de energía eléctrica durante el ensayo de calefacción utilizando aire ambiente en el evaporador del sistema de climatización. En este ensayo la reducción del consumo fue del orden de 23 %.

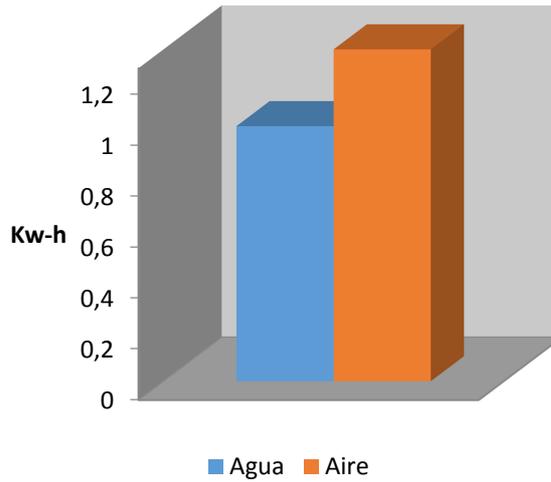


Figura 7: Consumo de energía eléctrica

Ensayo 15-07-2015

En este ensayo las temperaturas interiores de las habitaciones registraron un valor aproximado de 14°C.

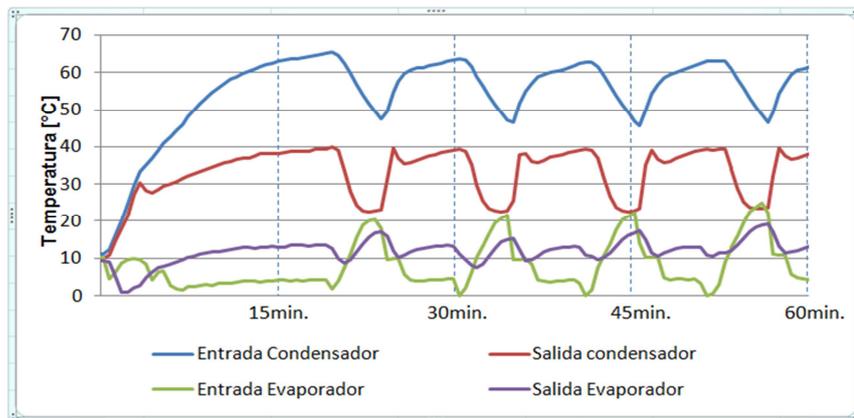


Figura 8: Temperatura del refrigerante utilizando aire en el evaporador

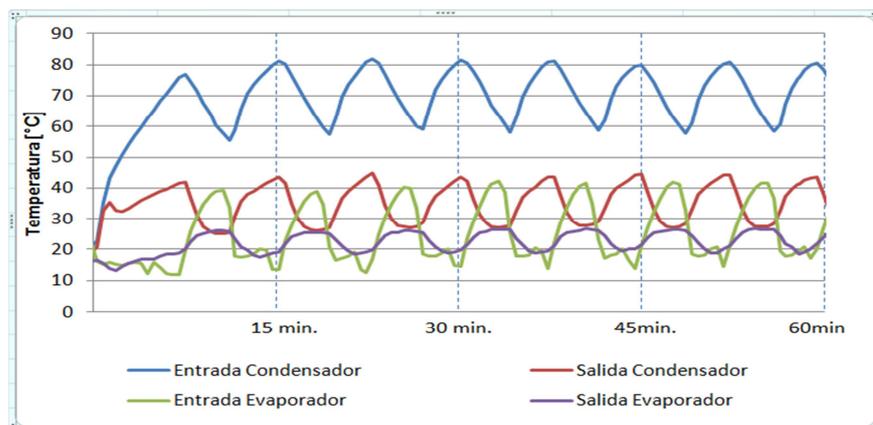


Figura 9: Temperatura del refrigerante utilizando agua de subsuelo en el evaporador

La temperatura del aire ambiente exterior registró un valor aproximado de 13°C.

En la gráfica representativa de los ensayos se puede observar que los periodos de funcionamiento del motocompresor son más prolongados cuando se utiliza aire en el evaporador del equipo (figura 8), que cuando se utiliza agua de subsuelo en el evaporador (figura 9), lo que se manifiesta en una reducción del consumo de energía eléctrica.

En la figura 10 se representa el consumo de energía eléctrica para los ensayos en que se utiliza aire y agua de subsuelo en el evaporador del equipo. En este caso la reducción del consumo de energía eléctrica fue del orden del 23 %.

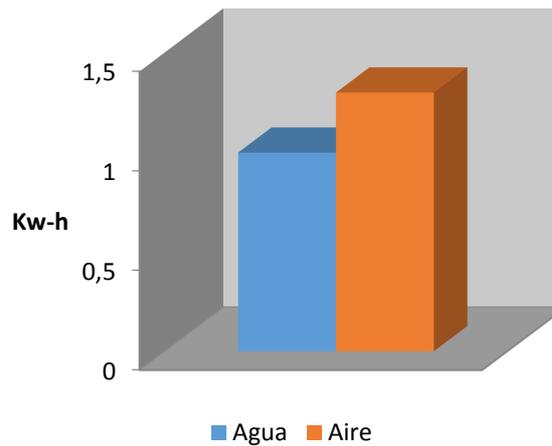


Figura 10: Consumo de energía eléctrica

Ensayo 16-07-2015

Las temperaturas interiores de las habitaciones en el inicio del ensayo fueron de 14°C. La temperatura del aire ambiente exterior para este ensayo registró un valor aproximado de 13°C.

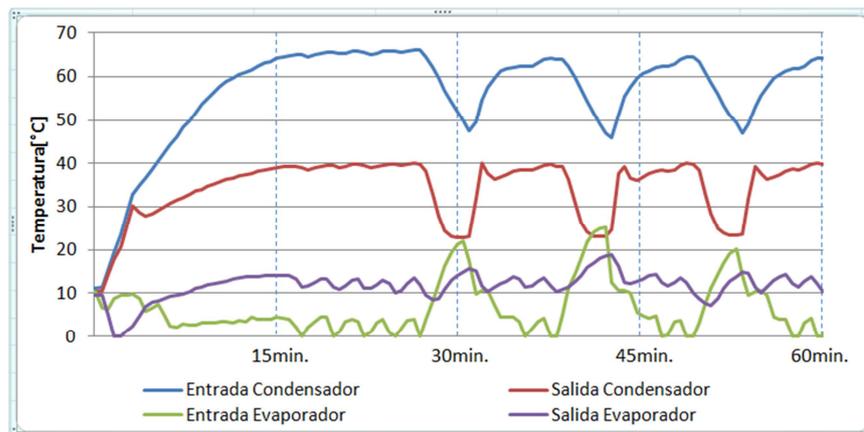


Figura 11: Temperatura del refrigerante utilizando aire en el evaporador

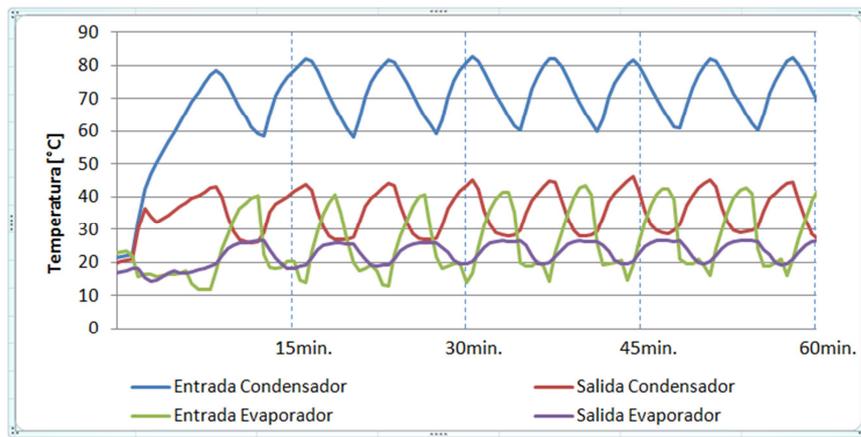


Figura 12: Temperatura del refrigerante utilizando agua de subsuelo en el evaporador

Si comparamos las gráficas correspondientes de las figuras 11 y 12, también se puede observar que para el ensayo que se utiliza aire en el evaporador del equipo, los periodos de funcionamiento del motocompresor son más prolongados que cuando se utiliza agua de subsuelo en el evaporador, con lo cual el consumo de energía eléctrica es mayor en el primer ensayo.

En la figura 11 la temperatura del refrigerante a la salida del evaporador es del orden de los 12°C aproximadamente y el compresor eleva la temperatura cercana a los 65°C (entrada del condensador). Mientras que en la figura 12 la temperatura del refrigerante a la salida del evaporador es de aproximadamente 23°C y la de entrada al condensador después del proceso de compresión es de 80°C, con lo cual se manifiesta que la energía cedida en el condensador es mayor.

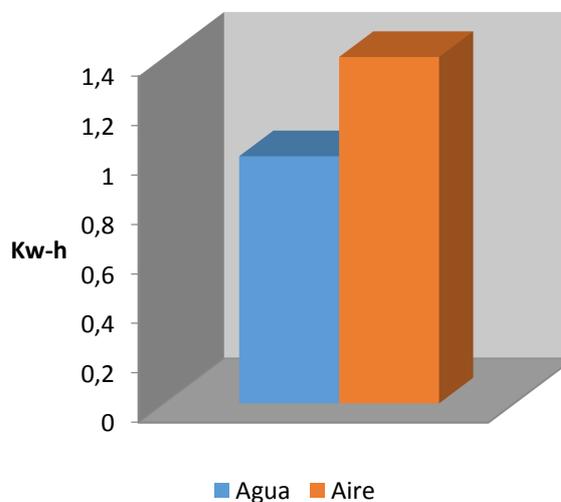


Figura 13: Consumo de energía eléctrica

Mediante el registro de consumo de energía eléctrica de los ensayos anteriores, se logró determinar una reducción del consumo eléctrico cercano al 30 %, para el caso que se utiliza agua en el evaporador del sistema de climatización. En la figura 13 se observa el gráfico representativo del consumo de energía eléctrica para cada ensayo.

Cálculo de la potencia calorífica aportada por el aire-agua al refrigerante en el evaporador:

Considerando que durante el proceso de calefacción el refrigerante en el evaporador absorbe energía cedida por el aire ambiente o el agua de subsuelo según el ensayo que se realiza, se puede calcular la potencia calorífica aportada.

A-Potencia calorífica aportada por el aire ambiente al refrigerante: De los diferentes ensayos realizados se registraron valores de diferencias de temperaturas entre la entrada y salida del aire en el evaporador en el orden de 4°C. El caudal másico de aire se determinó registrando valores de velocidades mediante un anemómetro de hilo caliente marca Lutron AM-4204, en distintos puntos del evaporador. Realizando una media aritmética de las velocidades se determinó el valor de 2.23 m·s⁻¹. Se calculó el caudal volumétrico teniendo en cuenta la sección del evaporador, obteniendo un valor aproximado de 0.355 m³·s⁻¹. Posteriormente se determinó el caudal másico mediante la fórmula 1.

$$\dot{m} = \dot{V} \cdot \rho = 0.436 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} \quad (1)$$

Donde ρ es la densidad del aire a la temperatura ambiente de 14°C, igual a 1.226kg·m⁻³.

Teniendo en cuenta que el calor específico del aire es de: 1.007 KJ/kg K, se determina la potencia calorífica aportada mediante la fórmula 2.

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot C_p \cdot \Delta t \quad (2)$$

$$\text{Por lo tanto: } \dot{Q} = 0.436 \frac{\text{Kg}}{\text{s}} \cdot 1.007 \frac{\text{KJ}}{\text{K} \cdot \text{Kg}} \cdot 4 \text{ K} = 1.756 \text{ KW} \quad (3)$$

B-Potencia calorífica aportada por el agua de subsuelo al refrigerante: De los diferentes ensayos realizados se determinaron valores de diferencias de temperaturas entre la entrada y salida del agua de subsuelo en el evaporador en el orden de 8°C. El caudal másico de agua para los ensayos fue de 500 litros·h⁻¹ aproximadamente, que fueron registrados mediante una probeta y un cronómetro. El calor específico del agua es de 4.18 KJ/kg K. La potencia calorífica del agua aportada al refrigerante, se determina también por la fórmula 2. Por lo tanto:

$$\dot{Q} = 500 \frac{\text{Kg}}{\text{h}} \cdot \frac{1}{3600} \frac{\text{h}}{\text{s}} \cdot 4.18 \frac{\text{KJ}}{\text{K} \cdot \text{Kg}} \cdot 8 \text{ K} = 4.64 \text{ KW} \quad (4)$$

Se observa que la potencia calorífica aportada al refrigerante por el agua de subsuelo es superior a la del aire ambiente, lo cual se traduce en una reducción del consumo eléctrico y en una mejora del COP del sistema de climatización, que se verifica de los cálculos termodinámicos presentados por Spotorno et al. (2013).

Cálculo del consumo eléctrico de la bomba sumergible:

Se determinó el consumo eléctrico de la bomba sumergible para llenar el tanque de almacenamiento de 1000 litros, registrando un consumo aproximado de 0.14 kw·h durante veintitrés minutos de funcionamiento de la misma. Cabe aclarar además que para cada ensayo de calefacción de 1hora se utilizan aproximadamente 500 litros de agua de subsuelo. Por lo tanto se puede decir que por cada ensayo el consumo de la bomba es de 0.07 kW·h.

Balance energético del sistema de climatización por compresión de vapor:

En base a los ensayos realizados, si consideramos que aproximadamente el ahorro de energía eléctrica es del orden de 0.3 kW·h y que el consumo de la bomba sumergible fue de 0.07 kW·h, podemos decir que el ahorro es de 0.23 kW·h durante cada hora de funcionamiento del sistema de climatización.

Además si tenemos en cuenta que el motocompresor funciona en intervalos de tiempos mientras se calefacciona la habitación, y en los intervalos de parada no es necesario la circulación de agua por el evaporador del equipo, se podría mediante un sistema de control producir el cierre de la válvula que permite la circulación de agua y por lo tanto el consumo de la misma sería menor, con lo cual se obtendría una mejora en el consumo eléctrico del sistema de climatización por compresión de vapor mediante la incorporación de agua de subsuelo.

CONCLUSIONES

Se realizaron ensayos de calefacción de un sistema de climatización por compresión de vapor de 5.23 kW de potencia, mediante la incorporación del recurso geotérmico (agua de subsuelo) y sin él. Se logró determinar reducciones del consumo eléctrico del orden del 17 % al 20%, cuando se utiliza agua de subsuelo en el evaporador del equipo en comparación con un sistema de climatización convencional que utiliza aire.

Se determinó la potencia calorífica aportada por el aire y el agua de subsuelo al refrigerante en el evaporador del sistema de climatización durante los ensayos de calefacción. La potencia calorífica aportada al refrigerante por el agua de subsuelo es superior a la del aire ambiente, lo cual se traduce en una reducción del consumo eléctrico y en una mejora del COP del sistema de climatización.

Teniendo en cuenta la reducción de consumo eléctrico cuando se utiliza agua de subsuelo respecto a utilizar aire ambiente en el evaporador del equipo y considerando el consumo de la bomba sumergible, el balance energético total nos permite establecer que el sistema de climatización funcionando como calefacción cuando se emplea agua de subsuelo, consume menor energía eléctrica, siendo la reducción del consumo del orden de 0.23 kW-h por cada Kw-h consumido por el sistema de climatización convencional.

El consumo de agua de subsuelo durante el ensayo de calefacción fue de aproximadamente de 500 litros/hora. Si consideramos que el motocompresor funciona en intervalos de tiempo mientras se calefacciona la habitación, y en los intervalos de parada no es necesario la circulación de agua por el evaporador del equipo, se podría realizar mediante un sistema de control el cierre de la válvula que permite la circulación de agua y por lo tanto el consumo de la misma sería menor, con lo cual se obtendría una mejora en el consumo eléctrico.

Se plantea a futuro realizar ensayos del sistema de climatización por compresión de vapor, con el evaporador del equipo sumergido en agua logrando un régimen permanente en la circulación de la misma, con la finalidad de comparar resultados respecto a los obtenidos en el presente trabajo.

Reconocimiento: se agradece al becario Roque Méndez por la colaboración.

REFERENCIAS

- Ampofo F., Maidment G., Missenden J. (2006). Groundwater cooling systems in London. *International Journal of Low-Carbon Technologies. Renewable Energy Journal*. Paper14.
- Chihping K., HungjiunL. (2011). The feasibility of using circulating groundwater as renewable energy sources for air-conditioning in Taipei basin. *Renewable Energy* 39, 175-182.
- Dossat R. (2001). *Principios de Refrigeración*. 21ª edición, pp. 324-332. Editorial Continental. México.
- Spotorno R., Busso A., Pochettino J., Figueredo G., García F., Benítez F. (2013). Estudios termodinámicos en la mejora de sistemas de climatización por compresión de vapor mediante la incorporación del recurso geotérmico (agua de subsuelo). *Acta de la XXXVI Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Medio Ambiente*. Vol. I. pp. 06.43-50.

Spotorno R., Busso A., Campbell C., Pochettino J., Figueredo G., García F., Benítez F. (2014). Ensayos experimentales y simulación de un sistema de climatización por compresión de vapor con la incorporación del recurso geotérmico (agua de subsuelo). Acta de la XXXVII Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Medio Ambiente. Vol. 2. pp. 06.71-78.

ABSTRACT

The experimental results shown here were obtained using a heating process with a compressed steam air conditioning system, using air and subsoil water in the evaporator. A split of 5.23 kW has been used to heat the room. After thermal balance, where we analyzed the submersible pump power, the electricity consumption reduction has been determined in the order of 17 % to 20 %, using subsoil water compared to a conventional air conditioning system using air. Also it was determined that heat output by subsoil water provided to the refrigerant is higher than of the air, this is translated in a lower electric consumption.

Keywords: vapor compression, heating, subsoil water and reducing consumption.