

ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO Y OPTIMIZACIÓN DE UN SISTEMA DE AIRE ACONDICIONADO SOLAR CON PRE-ENFRIAMIENTO DEL AIRE DE ENTRADA AL CONDENSADOR MEDIANTE ATOMIZACIÓN POR ULTRASONIDOS.

Jorge Fabregat^{1*}, Pedro Martínez¹, Javier Ruiz¹, Alberto Rodríguez¹, Francisco J. Aguilar¹ y Manuel Lucas¹

¹ Universidad Miguel Hernández de Elche.
Avda. de la Universidad, s/n, 03202 Elche, España.
* jfabregat@umh.es

Resumen: Las estrategias de aplicación más directa para la mejora del rendimiento de sistemas de aire acondicionado son el uso de fuentes de energía renovables y la mejora de eficiencia de estos mediante la disminución de su temperatura de condensación. Una materia emergente de estudio es la utilización de equipos de ultrasonidos para la mejora de la eficiencia de una amplia variedad de procesos, con interesantes resultados en el campo del pre-enfriamiento evaporativo. El presente estudio tiene como objetivo el análisis y la optimización de un sistema de refrigeración solar tipo Split convencional accionado mediante energía fotovoltaica, el cual cuenta con una hibridación del condensador utilizando atomizadores por ultrasonidos para la mejora de su eficiencia. Se ha llevado a cabo un estudio experimental para diferentes configuraciones de atomizadores activos, con el objetivo de modelizar el comportamiento de este sistema en diferentes condiciones de operación. Se analizarán los resultados energéticos para diversas localizaciones y se optimizará el criterio de control del sistema de pre-enfriamiento ultrasónico en función de las condiciones de trabajo.



Figura 1. Prototipo utilizado como banco de pruebas. Sistema de refrigeración solar con pre-enfriamiento evaporativo del aire de entrada al condensador.

Palabras clave: Eficiencia energética, Enfriamiento evaporativo, Unidad de aire acondicionado tipo Split, Atomizadores ultrasónicos

1. INTRODUCCIÓN

Las técnicas de enfriamiento evaporativo aplicadas al condensador de una máquina frigorífica representan una de las soluciones más eficaces y de aplicación inmediata para la mejora de la eficiencia de los sistemas de aire acondicionado domésticos y comerciales en todo el mundo. Mediante estas técnicas, es posible reducir significativamente el consumo de energía eléctrica y los picos de potencia consumida, con excelentes resultados en regiones con climas cálidos y secos.

Goswami [1] presentó hace tres décadas un trabajo fundacional el cual dio inicio a una cantidad considerable de estudios que muestran los beneficios del uso de las técnicas de pre-enfriamiento evaporativo aplicadas a diferentes sistemas de aire acondicionado, tales como Martínez et al. [2] y Yu et al. [3]. Un estudio reciente es el desarrollado por Jacob et al. [4], donde los autores desarrollaron modelos termodinámicos tanto para el ciclo de compresión de vapor simple, como para el ciclo híbrido de compresión de vapor por evaporación (HEVC), con pre-enfriamiento del aire de entrada al condensador, con una potencia frigorífica de 3,5 kW. Se elaboró una comparativa de los resultados para 21 climas globales diferentes, resultando la adopción de la tecnología HEVC beneficiosa para la totalidad de estos, con al menos una reducción del 5% en el consumo anual de energía. Destacan los resultados sobre climas cálidos y secos, con más de un 20% de reducción de la energía anual consumida. Los autores tuvieron en cuenta que en este tipo de climas la disponibilidad de agua se encuentra comprometida, por lo que tuvieron en cuenta en el estudio el impacto del uso de estas tecnologías en las reservas mundiales de agua dulce. Así, evaluaron el volumen de agua necesario para hacer funcionar este sistema HEVC de 3,5kW, situándolo en 21 L de agua por cada kWh ahorrado.

Entre las técnicas de enfriamiento evaporativo convencionales, encontramos el pre-enfriamiento mediante superficie mojada o rellenos evaporativos (pads) o mediante atomización (spray o mist generator). La principal ventaja de los sistemas basados en rellenos evaporativos es la no producción de aerosoles, evitando la propagación de Legionella, y, como principal desventaja, destaca la caída de presión en la corriente de aire del condensador, que conlleva la reducción de la capacidad de extracción de calor. En comparación los sistemas de rellenos evaporativos, los sistemas de atomización o spray ofrecen una mayor flexibilidad, un bajo coste y una pérdida presión en la corriente de aire del condensador mucho menor, casi despreciable. Sin embargo, poseen el inconveniente de la posible generación de corrosión e incrustaciones en los tubos del intercambiador del condensador si el agua alcanza estos en su fase líquida. Sobre estas premisas, surge la necesidad de buscar alternativas que solventen los aspectos negativos de cada uno de los sistemas de pre-enfriamiento convencionales.

Una materia emergente de estudio es la utilización de equipos de ultrasonidos para mejorar la eficiencia en diversidad de procesos. Los equipos de ultrasonidos están formados por transductores piezoeléctricos, que son capaces de transformar señales electrónicas de alta frecuencia en vibraciones. Yao [5] concluyó que la utilización de equipos de ultrasonidos posee unas interesantes aplicaciones en procesos de transferencia de calor y masa. Martínez et al. [6] realizaron un estudio en túnel de viento sobre el uso de un equipo de atomización ultrasónico formado por 10 transductores sumergidos en agua para su uso como pre-enfriador evaporativo en condensadores refrigerados por aire, en el que se obtuvo una eficiencia de enfriamiento evaporativo directo del 83,7%. Si bien los resultados de este estudio fueron satisfactorios y el interés científico quedó en manifiesto, los autores encontraron limitaciones en la neblina generada por estos transductores, situándose en su mayor parte en la parte inferior del túnel de viento. El uso de sistemas de pre-enfriamiento por ultrasonidos podría implicar las mismas desventajas que los sistemas de atomización de agua convencionales, aunque mediante el uso de esta tecnología es posible generar gotas de menor tamaño con respecto al sistema de convencional por spray. Además, son capaces de inyectar agua a más bajas velocidades, disminuyendo estos dos factores el riesgo de aparición de incrustaciones en el intercambiador por una mayor rapidez de evaporación de agua y por un aumento del tiempo de contacto entre las gotas y el aire, reduciendo así la distancia de evaporación total.

Por otro lado, una opción para reducir el consumo de energía primaria asociado a la climatización de edificios es mediante el uso de energía solar. Los autores cuentan con una amplia experiencia en el campo de la denominada refrigeración solar. Aguilar et al. [7] desarrollaron un modelo computacional capaz de simular el comportamiento de una bomba de calor fotovoltaica en diferentes ubicaciones y condiciones de trabajo.

El objetivo del presente artículo es el análisis del comportamiento de un sistema de atomización por ultrasonidos para el pre-enfriamiento del aire de entrada al condensador de un sistema de aire acondicionado tipo split, alimentado mediante energía solar. Posteriormente, se plantea un estudio de las ventajas del uso de este sistema comparando el consumo energético frente a un sistema HVAC solar convencional. El análisis se realizará sobre las localidades de Alicante, Madrid y Sevilla. Para ello, se hará uso del modelo y resultados obtenidos en Aguilar et al. [7].

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. CONFIGURACIÓN EXPERIMENTAL

En el presente estudio, el dispositivo ultrasónico utilizado, es un nebulizador ultrasónico de malla de baja potencia. Estos atomizadores ultrasónicos constan de un piezoeléctrico cerámico que rodea una membrana metálica porosa de 8,5 mm de diámetro y una placa de circuito oscilador que genera una señal de impulsos a una frecuencia de 108 kHz para generar la atomización del agua. Cuando se suministra corriente, el piezoeléctrico inicia un ciclo de expansión/contracción. Esta oscilación obliga al agua a pasar a través de orificios microscópicos de unos 10 μm de tamaño mecanizados en la membrana metálica, y empuja las gotas formando una columna de agua pulverizada. El caudal másico por atomizador es de aproximadamente $1,95 \cdot 10^{-5}$ kg/s y este componente se caracteriza por su bajo coste y un consumo de energía de aproximadamente 1,3 W. Con el objetivo de caracterizar la geometría de las microperforaciones, se empleó una técnica fotográfica, observando que estas eran de aspecto cónico con un diámetro máximo de 50 μm y diámetro mínimo de 10 μm

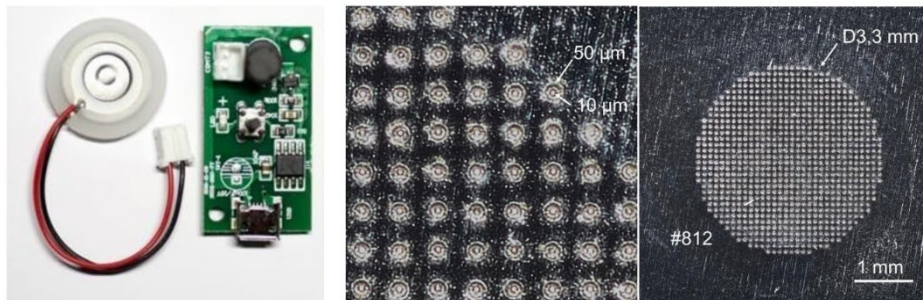


Figura 2. (a) Atomizador ultrasónico utilizado. (b) Imagen microscópica de los orificios para la salida del agua del atomizador.

Para el diseño del sistema de atomización, se configuró una instalación hidráulica de recirculación y suministro directo, haciéndose uso de una bomba de bajo caudal modelo RS PRO 20, con un caudal máximo de 650 ml/mín y una potencia consumida de 5 W. Así mismo, se optó por la creación de una parrilla confeccionada con alambre metálico rígido para sujetar la instalación en el estudio sobre el condensador del sistema HVAC. Se decidió realizar el análisis térmico para configuraciones de 81 atomizadores (dispuestos en 9 columnas), 63 atomizadores (dispuestos en 7 columnas) y 45 atomizadores (dispuestos en 5 columnas). La Figura 3 muestra el banco de ensayos experimental utilizado para el estudio de rendimiento de este sistema. El prototipo constaba principalmente de tres subsistemas: un sistema de aire acondicionado de uso residencial (subsistema A), el prototipo de pre-enfriamiento del aire de entrada al condensador mediante atomización ultrasónica (subsistema B), y dos módulos fotovoltaicos para suministro eléctrico (subsistema C).



Figura 3. Prototipo de sistema de aire acondicionado solar con pre-enfriamiento del aire de entrada al condensador mediante atomización por ultrasonidos.

2.2. Sensórica

Si bien el objeto de los ensayos experimentales era la elaboración de un análisis térmico-energético del prototipo, los resultados relevantes para este estudio constan del rendimiento térmico del prototipo sobre una instalación real. Para ello, se colocaron sensores de temperatura y humedad en la parte delantera y trasera del prototipo de pre-enfriamiento, así como en la salida de aire del condensador, con el objetivo de monitorizar la temperatura y la humedad relativa del aire a través del sistema y analizar los cambios psicrométricos del aire en la sección de preenfriamiento y a su paso por el condensador. Por otro lado, se registraron las condiciones ambientales mediante sensores de temperatura y humedad relativa del aire ambiente y sensores de velocidad y dirección del viento, todos ellos situados en una estación meteorológica en el tejado del laboratorio donde se realizaron las pruebas, junto a la instalación solar. Se utilizó un sistema de adquisición de datos DAQ970A de Keysight Technologies, equipado con dos módulos multiplexores de canales DAQM901A (2/4 hilos) que admitían hasta 44 entradas, con DMM de 6 ½ dígitos incorporado, 50.000 lecturas por segundo y ganancia programable para cada canal individual, para registrar todas las medidas tomadas durante las pruebas. La frecuencia de adquisición de datos era cada 5 segundos. El control del inicio y parada de la adquisición y almacenamiento de datos se realizó desde un PC con el software BenchVue instalado para establecer la comunicación con el sistema de adquisición de datos. La configuración de cada canal y el ajuste de su ganancia y offset en función del tipo de sonda conectada se creó y compiló utilizando el software BenchVue.

2.3. Procedimiento experimental

Se realizaron pruebas experimentales con el evaporador funcionando a plena carga para evaluar el rendimiento del sistema de aire acondicionado solar con y sin preenfriamiento. El procedimiento experimental seguido durante los días de prueba comienza a las 8:00 horas, cuando se enciende el sistema de aire acondicionado. El sistema de preenfriamiento se pone en marcha a las 14.00 horas, lo que favorece un mayor rendimiento térmico y un mejor aprovechamiento del caudal de agua atomizada. A partir de esta hora, el prototipo funciona continuamente hasta las 17:00, momento en que se desactiva el sistema de preenfriamiento. El aire acondicionado permanece encendido hasta las 20:00, momento en el que toda la instalación se apaga por completo y finaliza la jornada de pruebas.

2.4. Modelo utilizado.

El modelo utilizado en el presente estudio corresponde con el desarrollado por Aguilar et al. [7]. En citado estudio, los autores desarrollaron un modelado geométrico del edificio a través de la herramienta informática unificada LIDER/CALENER (HULC), definiendo los parámetros característicos del edificio mediante los planos del edificio estudiado y los resultados obtenidos a partir de un estudio experimental termo-energético en este. Para la caracterización matemática del sistema de bomba de calor, realizaron una correlación del parámetro característico EER de la máquina a partir del factor de carga y la diferencia de temperaturas entre el condensador y el evaporador. Así mismo, los autores desarrollaron una correlación del parámetro EER en función del salto térmico de la unidad interior y exterior (DT) y el factor de carga (LF), utilizado en el presente estudio. Esta correlación responde a la siguiente expresión:

$$EER = 5.7055 - 0.0474 * (DT) + 4.3236 * LF - 0.0009 * DT * LF - 7.1835 * LF \quad (1)$$

Ambos modelos, edificio y sistema, están directamente relacionados y fueron utilizados para conocer el comportamiento del sistema de accionamiento fotovoltaico. La herramienta informática HULC permitió conocer parámetros como la carga térmica horaria, la irradiancia solar y las temperaturas interior y exterior del edificio. Los resultados previstos para el periodo estival concordaron excelentemente con los datos experimentales con diferencias en torno al 5%. Una vez validado el modelo sobre la localidad estudiada, en Alicante, se realizó una simulación sobre las localidades de Madrid y Sevilla, con fines comparativos.

Sobre este punto de partida, en el presente estudio se ha realizado un modelo computacional sobre los datos obtenidos en el estudio del comportamiento térmico del dispositivo de pre-enfriamiento por ultrasonidos. Este modelo permite, conociendo de antemano la demanda de refrigeración de cada una de las horas del día y los datos de temperatura y humedad de la estancia a climatizar, conocer cuál es el número óptimo de atomizadores activos que conllevarán a un mayor ahorro con respecto al sistema convencional. El límite físico que contempla dicho modelo es el funcionamiento simultáneo de 81 atomizadores dispuestos en 9 columnas, correspondiente a la configuración máxima estudiada experimentalmente.

3. RESULTADOS

3.1. Caracterización del pre-enfriamiento.

Los resultados de rendimiento térmico del sistema de pre-enfriamiento se muestran a continuación para cada una de las configuraciones ensayadas, observando que la totalidad del agua atomizada es evaporada e incorporada a la corriente de aire de entrada al condensador, con una incertidumbre máxima del 12%. Además, podemos observar que para ninguna de las configuraciones se alcanzaron condiciones de saturación. Para facilitar una síntesis más global de los resultados, junto a los valores de eficiencia evaporativa, es decir, cociente entre el salto térmico obtenido frente al salto térmico máximo hasta condiciones de saturación, se muestran los resultados de saltos térmicos conseguidos para cada una de las configuraciones. Así mismo, se muestran los resultados de temperaturas y salto térmico en condiciones de estacionariedad obtenidos en el ensayo para la mayor configuración estudiada de 9 columnas, correspondientes a 81 atomizadores.

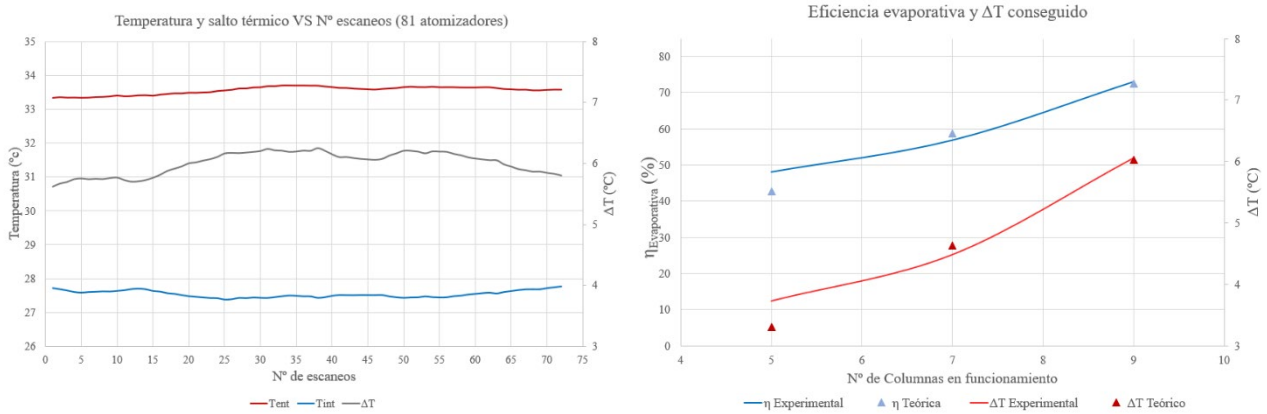


Figura 4. Resultados de eficiencia evaporativa y salto térmico conseguidos por el prototipo.

3.2. Comparativa con un sistema sin hibridación.

Como se ha citado previamente, el objeto del presente estudio es la comparativa entre un sistema con accionamiento fotovoltaico convencional y uno híbrido, mediante pre-enfriamiento de entrada del aire con técnicas de ultrasonidos. Para ello, se han utilizado los datos y el modelo obtenidos en Aguilar et al. [7]. Se valorará la comparativa, en el periodo estival (Junio-Septiembre), para las localidades de Alicante, Sevilla y Madrid, donde las cargas térmicas de refrigeración resultan 2486 kWh/año, 2218 kWh/año y 1730 kWh/año, respectivamente. Se observa que para las tres localidades estudiadas la presente tecnología es beneficiosa, observando resultados significativos para los meses de julio y agosto, donde la máquina trabaja con valores de factor de carga cercanos a 1, observando reducciones máximas en la potencia pico consumida de en torno a 150 W. Se muestra a continuación, con fines ilustrativos para observar las ventajas del uso de esta tecnología, la evolución en la potencia consumida para el día 23 de julio para la localidad de Alicante, así como la evolución de temperaturas diaria, entendiendo temperatura de entrada como temperatura de entrada a la sección en la que se encuentra el prototipo de atomización y temperatura intermedia a la temperatura tras el prototipo de atomización.

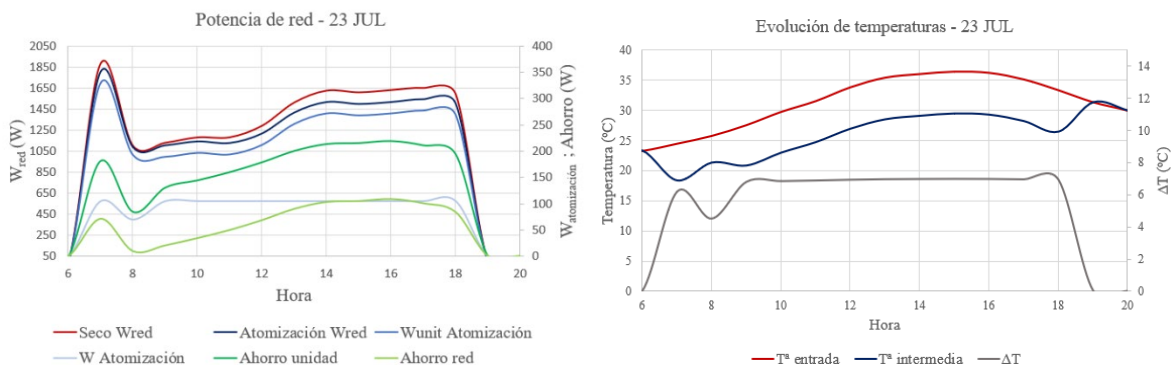


Figura 5. Comparativa de la evolución de la potencia consumida y temperaturas (23 Jul, Alicante).

La reducción de la potencia consumida por la unidad de aire acondicionado se redujo en un máximo del 13,5% sin tener en cuenta la potencia consumida por el sistema de pre-enfriamiento, con una reducción de 220 W. Teniendo en cuenta el consumo de este prototipo, la reducción máxima de la potencia pico de red se redujo en un 6,35%, con una reducción de 108,7 W. La reducción total diaria del consumo del sistema de aire acondicionado fue de 2,15 kWh, lo que supone una reducción del 12,3%. Por otro lado, teniendo en cuenta el consumo del sistema de pre-enfriamiento por ultrasonidos, la reducción global con respecto a un sistema sin hibridar resulta de un 4,59%, reduciendo el consumo de energía en 0,85 kWh. Este último valor resulta muy cercano a estudios de la bibliografía, que sitúan el valor de reducción de la energía consumida mediante sistemas de pre-enfriamiento en torno a un 5%. En cuanto a los valores de saltos térmicos conseguidos por el dispositivo de pre-enfriamiento, se alcanzaron saltos térmicos de 7°C y una eficiencia evaporativa de 100% para la primera hora de funcionamiento y de en torno al 45-77% para el resto de la jornada.

4. CONCLUSIONES

En el presente artículo se ha realizado un análisis comparativo entre un sistema con accionamiento fotovoltaico hibridado con técnicas de enfriamiento evaporativo y uno convencional, observando que el uso de técnicas de ultrasonidos aplicadas al condensador de una máquina frigorífica doméstica para el pre-enfriamiento de la corriente de aire a este supone un ahorro en la potencia consumida por estos aparatos. Se ha de tener en cuenta que los modelos que se han utilizado como referencia responden a unas condiciones determinadas y no han sido creados específicamente para la elaboración de un análisis de este tipo, observando una fuerte dependencia del factor de carga y subestimando el salto térmico conseguido en la corriente de aire que trasiega la unidad exterior. Con todo esto, se consiguió una reducción máxima del pico de potencia consumida de 154,07 W en dicha localidad en el mes de agosto. La reducción máxima del consumo de energía diario fue de un 4,59 % para el día 23 de julio, mientras que la reducción de energía consumida teniendo en cuenta únicamente la unidad de aire acondicionado fue del 12,3%. Para este día, la máxima reducción de la potencia pico consumida en la red se redujo en un 6,35%, mientras que la reducción de potencia pico consumida por el sistema de aire acondicionado fue del 13,5%.

Se plantea como trabajo futuro la realización de una campaña de ensayos sobre la planta piloto con el objetivo de obtener un análisis termo-energético del prototipo sobre condiciones de laboratorio, con el fin de crear un modelo propio. Por otra parte, también es de interés la puesta en marcha del prototipo sobre una instalación real, así como la optimización del consumo de los atomizadores ultrasónicos utilizando un sistema de alimentación propio y que otorgue de un mayor control sobre estos.

REFERENCIAS

- [1] Goswami, D. Y. et al., Experimental Investigation of Performance of a Residential Air Conditioning System with an Evaporatively Cooled Condenser. *Journal of Solar Energy Engineering*, 1993. Vol. 115. Pp. 206-211
- [2] Martínez, P., et al., “Experimental study on energy performance of a split air-conditioner by using variable thickness evaporative cooling pads coupled to the condenser”, *Applied Thermal Engineering*, 105, pp. 1041 – 1050.
- [3] Yu, F., et al., “Theoretical and experimental analyses of mist precooling for an air-cooled chiller”, *Applied Thermal Engineering*, 2018. 130, pp. 112 – 119.
- [4] Jacob T., et al., Evaluation of hybrid evaporative-vapor compression air conditioners for different global climates,
- [5] Yao, Y. (2016). Research and applications of ultrasound in HVAC field: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 58, 2–68.
- [6] Martínez, et al., “Experimental study of an ultrasonic mist generator as an evaporative cooler”, *Applied Thermal Engineering*, 2020. 181, p. 116057.
- [7] M Aguilar, F.J.; Ruiz, J.; Lucas, M.; Vicente, P.G. Performance Analysis and Optimisation of a Solar On-Grid Air Conditioner. *Energies* 2021, 14, 8054.
- [8] Ramisetty, K. A., Pandit, A. B., & Gogate, P. R. (2013). Investigations into ultrasound induced atomization. *Ultrasonics Sonochemistry*, 20(1), 254–264.