

ESTUDIO EXPERIMENTAL Y MODELIZACIÓN DE UNA BOMBA DE CALOR DE ACS

María Amorós^{1*}, Francisco Javier Aguilar¹, Ícaro Cesar Vera¹, Pedro Juan Martínez¹ y Pedro Vicente Quiles¹

1: Departamento de ingeniería mecánica y energía, Universidad Miguel Hernández de Elche.
Avda. de la Universidad, S.N, Elche.
maria.amorosg@umh.es

Resumen: *Se aborda una instalación de generación de agua caliente sanitaria mediante bomba de calor, bajo diferentes condiciones de funcionamiento. El trabajo presenta, en primer, los resultados de un estudio experimental, que se llevan a cabo bajo condiciones controladas de funcionamiento en laboratorio. Los ensayos se realizan sobre una bomba de calor aire/agua de ACS con un depósito integrado de 215 litros con una potencia nominal de 1,75 kW. Se realizan ensayos de consumo de agua con perfiles similares a los indicados a la Norma UNE-EN1614:2017. Posteriormente, se lleva a cabo la modelización del sistema propuesto, para lo cual se emplea el software TRNSYS. Los resultados obtenidos muestran una excelente concordancia entre los datos experimentales y los resultados de la simulación, con una desviación media inferior al 2% entre la energía térmica aportado por la bomba de calor en el ensayo experimental y su correspondiente simulación. El modelo de simulación propuesto ha sido validado con éxito, demostrando su capacidad para simular con precisión el comportamiento real de las bombas de calor.*



Figura1. Foto de la instalación experimental.

Palabras clave: Agua caliente sanitaria, bomba de calor, validación, trnsys.

1. INTRODUCCIÓN

La Directiva de eficiencia energética de los edificios de la UE 2018/844[1] marca un hito importante en la lucha contra el cambio climático al establecer estrategias para la descarbonización de los edificios para 2050. Esta iniciativa busca reducir significativamente las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas con el sector de la edificación, que es uno de los mayores consumidores de energía en la Unión Europea.

Las bombas de calor aire-agua han experimentado un crecimiento significativo en popularidad en el sector de la edificación debido a sus altos niveles de eficiencia y fiabilidad.

Además, en [2] se presenta un estudio donde se desarrollan experimentos y modelos TRNSYS para caracterizar el COP del sistema, que varía principalmente entre 1,5 y 5 dependiendo de la temperatura y humedad del aire y de la temperatura promedio del agua en el tanque. En [3] se exponen varios sistemas para la generación de ACS, donde se expresa que la bomba de calor, frente a otros sistemas como calentadores de gas o eléctricos tienen menor impacto ambiental.

El presente artículo describe los trabajos experimentales llevados a cabo sobre una bomba de calor de ACS, representada en la Figura 2, con la finalidad de caracterizar su comportamiento bajo diferentes condiciones de funcionamiento. Asimismo, los resultados experimentales han servido para desarrollar una modelo de simulación con TRNSYS del sistema propuesto, así como para la validación de dicho modelo.

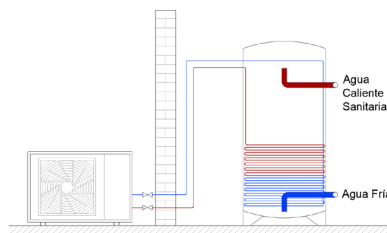


Figura 2. Esquema del sistema.

2. DESCRIPCIÓN DE LAS INSTALACIONES EXPERIMENTAL

El estudio experimental se realiza en condiciones controladas de laboratorio, para ello se dispone de dos cámaras climáticas de 6x5x3,5 m, y cada una de ellas está equipada con sistemas de control de temperatura. En la cámara climática 1, donde se ubica la unidad interior de ACS, se simulan las condiciones del interior de la vivienda. En la cámara climática 2 se ajustan las condiciones de operación para simular el exterior de la vivienda, pudiendo variar la temperatura de operación entre 9 y 32°C. Esta instalación de ensayos se puede observar en la Figura 3 y se explica detalladamente en el estudio realizado por Aguilar & Quiles en [4].

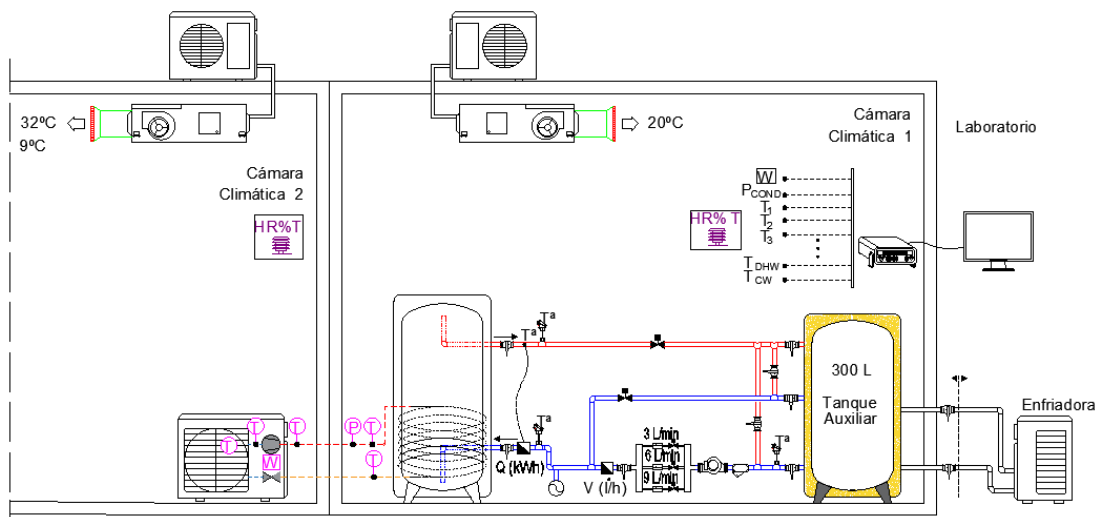


Figura 3. Instalación experimental para la prueba de la bomba de calor de ACS

Dicha instalación ha sido completamente sensorizada para analizar el funcionamiento del sistema propuesto bajo condiciones controladas de operación, incluyendo: sensores de temperatura y presión para definir el ciclo de refrigeración, sensores de temperatura en la entrada y salida de agua, sensores de temperatura y humedad ambiental en las cámaras climáticas, caudal de agua, medición de la potencia consumida por la bomba de calor

y los parámetros eléctricos. Además, hay un sensor multipunto con 16 termopares ubicados equidistantemente dentro del tanque para analizar la estratificación del agua. La Tabla 1 incluye la lista de todos los sensores utilizados en las instalaciones de prueba.

Tabla 1. Variables medidas en la instalación de ensayos.

Variable	Unidades	Sonda	Símbolo
Caudal de agua impulsado por la bomba	l/min	SM600	\dot{f}
Temperatura del agua a la entrada de la bomba de calor	°C	Pt100/RTD 4 hilos	T_{RED}
Temperatura de preparación del ACS	°C	Pt100/RTD 4 hilos	T_{ACS}
Intensidad absorbida por la bomba de calor	A	Datalogger	I
Tension de red	V	Datalogger	V
Temperatura ambiente de la Cámara Climática 1	°C	Termopar tipo K	T_{CC1}
Temperatura ambiente de la Cámara Climática 2 (T ext)	°C	Termopar tipo K	T_{CC2}
Temperatura del agua en el depósito auxiliar	°C	Pt100/RTD 4 hilos	T_{TANK}
Duración del consumo de agua	min	Datalogger	Δt
Temperatura del agua en el depósito de la BdC	°C	Termopar tipo K	$T_1, T_2... T_{16}$

3. ESTUDIO EXPERIMENTAL

Los estudios experimentales llevados a cabo en este trabajo se describen de forma detalla en el artículo presentado en [5].

3.1 Ensayo de enfriamiento

Para realizar un análisis energético, en primer lugar, se deben conocer las pérdidas que se producen en el depósito, y para ello se realiza un ensayo que permite determinar el valor del coeficiente de perdidas térmicas en éste. El procedimiento realizado consiste en elevar la temperatura del mismo a un valor de 55°C y dejar enfriar durante un periodo de tiempo prolongado, hasta que el descenso de temperatura sea lo suficientemente significativo para que el cálculo sea preciso. En la Figura 4 se puede ver que en este ensayo la variación de temperatura fue de unos 15 °C, llegando hasta aproximadamente los 40 °C. La temperatura del depósito va disminuyendo y así se obtiene el coeficiente de pérdidas UA del depósito.

$$UA = \frac{Q_{perdidas}}{(T_{agua} - T_{ambiente})} \quad (1)$$

Donde:

UA=coeficiente de perdidas térmicas en W/°C

$Q_{perdidas}$ = pérdida de potencia, en forma de calor, en el depósito en W

T_{agua} = temperatura del agua en °C

$T_{ambiente}$ = temperatura del ambiente en °C

Mediante el análisis energético se obtiene un valor de UA = 2,6 W/°C. En la Figura 4 se observa la evolución de las 16 sondas de temperatura instaladas en el depósito de la bomba de calor.

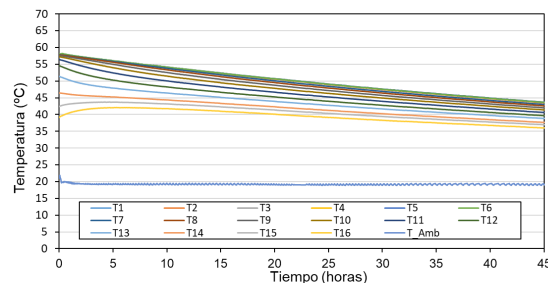


Figura 4. Evolución de la temperatura de ACS en el depósito

3.2 Ensayo de calentamiento

Se realizan ensayos de calentamiento del agua desde una temperatura de inicio de 22 °C hasta una temperatura de 55°C, como se observa en la Figura 5, modificando las temperaturas ambiente exteriores, desde un valor de

9°C hasta un valor de 32°C. Mediante dos métodos alternativos, método de refrigerante y método de balance de energía conseguimos obtener la expresión bicuadrática con la que regulamos la potencia de la bomba de calor en función de la temperatura del agua del depósito y la temperatura exterior.

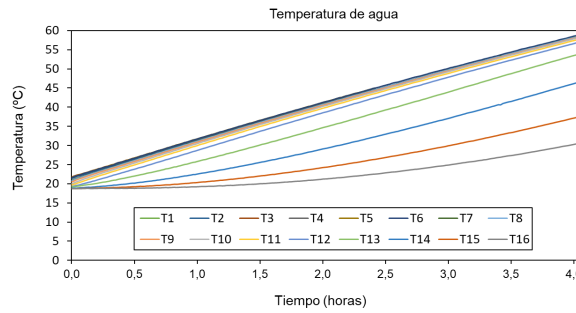


Figura 5. Evolución de la temperatura de ACS en el depósito

3.3. Ensayo de consumos

Para el análisis energético de la bomba de calor se definió un perfil de ciclo de captación de agua caliente conforme a la norma UNE-EN 16147:2017 [6], que está relacionado con la eficiencia energética de las bombas de calor ACS con depósito incorporado. En concreto se tomó como referencia la curva L de la citada norma, donde la energía térmica extraída es de 11,655 kWh/día con una temperatura de preparación de 55°C y una temperatura del agua de red de 10°C.

Tabla 2. Perfil de extracciones de agua caliente en base al procedimiento de ensayos definido en el estudio.

Consumo	1	2	3	4	5	6	7	8
Hora	7:00	8:00	9:00	10:00	14:00	18:00	20:00	21:00
Caudal (l/min)	5,80	8,86	3,62	3,23	2,80	2,76	2,79	8,83
Energía (kWh)	1,64	3,59	0,63	0,52	0,30	0,38	0,71	13,44

Como se muestra en la Tabla 2, el perfil de consumo ensayado está formado por 8 tomas de agua, repartidas en 24 horas en un horario comprendido entre las 7:00 de la mañana y las 21:00 de la noche. La temperatura de servicio del ACS durante todas las extracciones es de 55°C y la temperatura del agua de entrada es de 10°C. Las condiciones de funcionamiento utilizadas son 20°C de aire que entra al evaporador de la unidad exterior y una temperatura del aire de 20°C en la habitación donde se encuentra el tanque.

La energía suministrada por la bomba de calor para satisfacer la demanda de ACS (Q_{ACS}) se calcula mediante la siguiente expresión:

$$Q_{ACS} = \left(\sum_{i=1}^{i=8} \rho(T) * C_p * \dot{f}_i * \Delta T_i * (T_{ACS,i} - T_{red,i}) \right) * \frac{1}{3600} \quad (2)$$

Donde:

$\rho(T)$ =densidad de ACS (kg/m³)

C_p = calor específico del agua (kJ/(kg·°C))

\dot{f}_i = caudal de ACS (l/min)

ΔT_i =tiempo de consumo (min)

$T_{ACS,i}$ =temperatura de consumo de ACS en i, (°C)

$T_{red,i}$ =temperatura del agua de red en i, (°C)

Además, la cantidad total de electricidad consumida (E_{Tot}) por la bomba de calor se obtiene a partir de las medidas de tensión (V) y corriente (A) durante las 24 horas que dura la prueba, de acuerdo con la ecuación que se muestra a continuación, donde el subíndice “j” hace referencia a cada uno de los 1440 rangos de medición ($\Delta t_j=1$ min):

$$E_{Tot} = \sum_{j=1}^{j=1441} V_j(V) * I_j(A) * \cos(\varphi) * \Delta t_j \quad (3)$$

Finalmente, el rendimiento de la bomba de calor se puede determinar a partir de la relación entre ambos términos, según:

$$SCOP_{DHW} = \frac{Q_{DHW}}{E_{Tot}} \quad (4)$$

4. MODELIZACIÓN DEL SISTEMA

En este apartado se describe la modelización llevada a cabo del sistema propuesto, para lo cual se emplea el software TRNSYS. Los tipos empleados han sido el type 158, type 106 y type 9. El type 158 es capaz de simular un depósito de acumulación de agua con aporte de energía distribuida a través de las paredes de este, lo que recrea perfectamente la configuración del depósito de la bomba de calor con el serpentín del condensador integrado, tal y como se describía en el apartado 2. El fluido en el tanque de almacenamiento interactúa con el medio ambiente, a través de las pérdidas térmicas, empleando para ello el coeficiente UA determinado experimentalmente. Dispone de una corriente de flujo que entra, agua de red, y una corriente que sale del tanque de almacenamiento, simulando los consumos de ACS. El tanque se divide en nodos de temperatura isotérmica, para modelar la estratificación. Cada nodo de volumen constante es isotérmico e interactúa térmicamente con los nodos de arriba y de abajo a través de varios mecanismos: conducción de fluido entre nodos y a través del movimiento del fluido. La representación gráfica de los componentes principales queda reflejada en la figura 6.

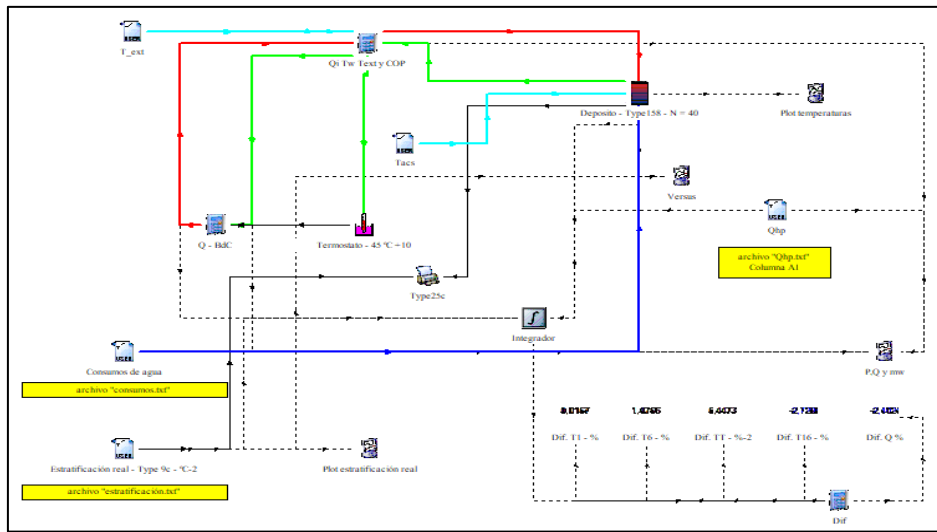


Figura 6. Representación gráfica de los componentes modelados en TRNSYS.

Con todos los datos experimentales obtenidos y la expresión bicuadrática (5) regulamos la potencia de la bomba de calor en función de la Temperatura del agua del depósito y la Temperatura exterior. Para modelar el consumo energético se ha empleado la relación que existe entre la expresión (5) y la expresión (6).

$$Q_{HP} = a + bT_{ext} + cT_{ext}^2 + dT_w + eT_w^2 + fT_{ext}T_w \quad (5)$$

$$COP = A + BT_{ext} + CT_{ext}^2 + DT_w + ET_w^2 + FT_{ext}T_w \quad (6)$$

Esta expresión proporciona una relación matemática que representa cómo varía la potencia de la bomba de calor en respuesta a los cambios en las condiciones ambientales y las demandas de carga térmica del sistema. Donde los valores de los coeficientes adquieren los valores que se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Valores para los coeficientes de la ecuación bicuadrática.

Coefficiente	a	b	c	d	e	f	A	B	C	D	E	F
Valor	1748,59	81,94	-0,44	-14,87	0,03	-0,26	6,076	0,094	0,000	-0,133	0,001	-0,001

Donde:

Q_{HP} es la potencia de la bomba de calor (en kW).

T_{ext} es la temperatura exterior (en °C).

T_w es la temperatura del agua del depósito (en °C).

a, b, c, d, e, f son coeficientes que se determinan a partir de los datos experimentales y se ajustan para optimizar el rendimiento del modelo.

La utilización de una expresión bicuadrática para regular la potencia de la bomba de calor en función de las temperaturas del agua del depósito y exterior permite una representación precisa y dinámica del comportamiento del sistema en diferentes condiciones climáticas y de carga.

Mediante un termostato (type 106) se regula el arranque y la parada de la bomba de calor, de tal forma que, si

la sonda de temperatura ubicada en el depósito, a una altura de 30 cm, se encuentra por encima de 50 °C, manda la orden de parar, en cambio si ésta se encuentra con un valor por debajo, la bomba de calor arrancará. Dicho type se hace funcionar con una histéresis de 10 °C Se dispone de datos experimentales de caudales de consumo, temperaturas exteriores de funcionamiento, temperaturas de agua de red, para simular el sistema, obtenidas del ensayo experimental.

La Figura 7 compara la potencia térmica entrega por la bomba de calor a lo largo de un ciclo completo de 24h de la simulación con los obtenidos en los ensayos experimentales llevados a cabo. Se observa que la evolución de la simulación recrea fielmente el comportamiento experimental de la bomba de calor. En términos energéticos, la energía térmica aportada por la bomba de calor al agua en los ensayos experimentales fue de 13,09 kWh, mientras que con la simulación se obtiene un resultado de 13,28 kWh, lo que supone una diferencia del 1,41%.

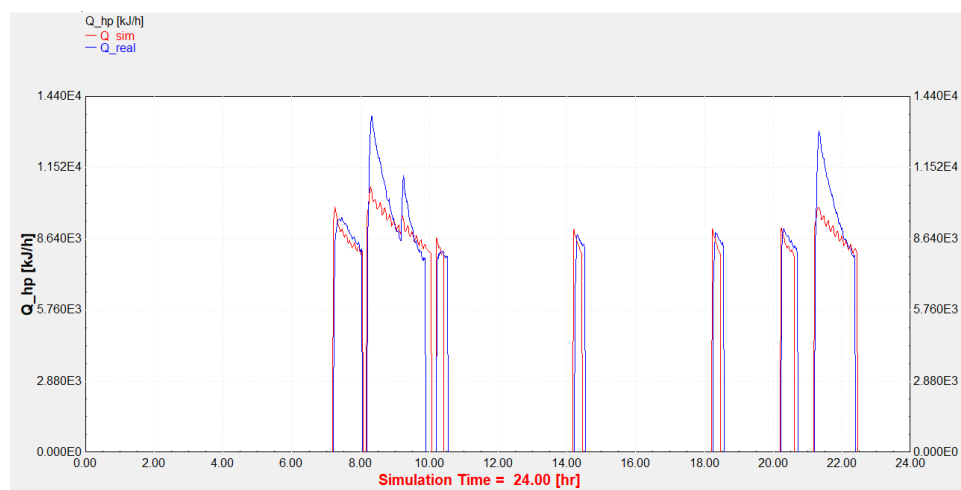


Figura 7. Potencia generada por la bomba de calor experimental/simulada en TRNSYS.

5. CONCLUSIONES

Se ha llevado a cabo la construcción de una instalación de ensayos capaz de analizar el funcionamiento de una bomba calor aire/agua para la producción de ACS bajo condiciones controladas de funcionamiento.

Se ha modelizado el sistema mediante el softwar TRNSYS.

En términos energéticos, la energía térmica aportada por la bomba de calor al agua en los ensayos experimentales fue de 13,09 kWh, mientras que con la simulación se obtiene un resultado de 13,28 kWh, lo que supone una diferencia del 1,41%.

Los resultados mostrados ponen de manifiesto que el modelo propuesto es capaz de simular el comportamiento real del sistema, por lo que se da por validado.

7. REFERENCIAS

- [1] Directiva (UE) 2018/844 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 30 de mayo de 2018, por la que se modifica la Directiva 2010/31/UE relativa a la eficiencia energética de los edificios y la Directiva 2012/27/UE relativa a la eficiencia energética.
- [2] Afarin Amirirad, Rakesh Kumar, Alan S. Fung, Wey H. Leong, Experimental and simulation studies on air source heat pump water heater for year-round applications in Canada, *Energy and Buildings*, Volume 165, 2018, Pages 141-149
- [3] Emilio-José Sarabia-Escriba, Víctor-Manuel Soto-Francés, José-Manuel Pinazo-Ojer, Salvador Acha, Economic and environmental analysis of domestic hot water systems for single-family homes, *Energy and Buildings*, Volume 286, 2023, 112925.
- [4] F.J. Aguilar, P.V. Quiles, Análisis del SCOP de una Bomba de calor compacta para ACS bajo condiciones reales de funcionamiento. *CYTEF 2022*.
- [5] M. Amorós, F.J. Aguilar, P.V. Quiles, Experimental analysis of a Heat Pump Water Heater to produce DHW. *13CNIT*, 2023.
- [6] UNE-EN 16147:2017 Bombas de calor con compresor accionado eléctricamente. Ensayos y requisitos para el mercado de equipos para agua caliente sanitaria, 2017.