

SIMULACIÓN DINÁMICA DE DIFERENTES ESTRATEGIAS DE CONTROL EN SISTEMA DE CALEFACCIÓN TODO AGUA CON BOMBA DE CALOR

Daniel Gutiérrez, Ignacio Ortega, Jaime Sieres*

1: Grupo de Investigación ‘Chemical Environmental and Thermal Engineering’ (ChETE), Escuela de Ingeniería Industrial, Universidad de Vigo.
Campus Lagoas-Marcosende. c/ Maxwell 9, 36310 Vigo.
e-mail: jsieres@uvigo.es

Resumen: *Este trabajo analiza distintas configuraciones de control y regulación para una instalación de calefacción todo agua, a escala unifamiliar, con bomba de calor geotérmica. Las simulaciones se han realizado con el software OpenModelica. Para la selección y parametrización de algunos componentes se ha recurrido también a la librería Buildings.*

Se analizan 3 estrategias de control diferentes, contemplando la posibilidad de utilizar en el circuito hidráulico de calefacción una circuladora de velocidad constante o variable, así como un control sobre la bomba de calor basado en una temperatura de retorno constante o una temperatura de salida variable. Una vez seleccionados los componentes y las estrategias de control diferentes, se evalúa su grado de eficiencia energética durante un periodo anual en base al cálculo del SCOP. Además, se observó que la estrategia de control considerada afectaba también a la frecuencia y duración de los ciclos de arranque y parada de la bomba de calor.

Palabras clave: bomba de calor, calefacción de recintos, Modelica, simulación, eficiencia.

1. INTRODUCCIÓN

Los sistemas de calefacción, dependiendo de la zona climática, llegan a suponer un importante consumo de potencia en edificios y viviendas, donde la carga térmica suministrada depende de variables multifactoriales (aislamiento, zona climática, ganancias de calor,...). Las cargas térmicas no permanecen invariables con el paso del tiempo, por lo que surge la necesidad de modelar sistemas dinámicos que respondan a esa naturaleza transitoria. En prol de la evolución hacia sistemas más sostenibles y eficientes, la integración de bombas de calor (BC) siempre aparece como una opción viable.

Actualmente, existen distintos programas o lenguajes especializados para simular el comportamiento dinámico de sistemas térmicos. Modelica surge en 1997 buscando una solución completa a problemas físicos de mayor tamaño [1]. Gracias al gran número de librerías disponibles, es posible parametrizar fácilmente, y desde un interfaz gráfico, los componentes basados en ecuaciones matemáticas complejas. Al utilizar algoritmos resolutivos complejos para llegar a la solución de un problema (basados en ecuaciones algebraicas/diferenciales) permite no dedicar tanto esfuerzo al módulo matemático [2]. En Modelica destaca la librería Buildings [3], que es una biblioteca gratuita de código abierto con modelos para la simulación dinámica de sistemas térmicos en edificios.

En este trabajo se analiza el comportamiento dinámico de una instalación de calefacción mediante BC a una escala de vivienda unifamiliar. Se considera la utilización de una BC geotérmica con un compresor de velocidad variable y emisores de calor con válvulas termostáticas. Se analiza la posibilidad de utilizar en el circuito hidráulico de calefacción una circuladora de velocidad constante o variable, así como un control sobre la BC basado en la temperatura de retorno del circuito o considerando una temperatura de salida variable. Las simulaciones se realizaron con la versión 1.22.2 del software OpenModelica [4], utilizando la librería Buildings junto con librerías estándar del lenguaje Modelica.

2. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

La Figura 1 muestra un esquema general del sistema considerado. El componente principal es una bomba de calor líquido-agua, que intercambia calor con el terreno mediante un pozo geotérmico vertical en el que se utiliza una mezcla agua – propilenglicol como fluido secundario. La BC produce agua caliente para calefacción de recintos. Si bien la vivienda tendrá distintos emisores térmicos, la suma de los caudales que circula por todos ellos se simula como la de un único emisor con una válvula termostática (válvula de dos vías). El circuito se complementa con una válvula reguladora de presión para derivar el exceso de caudal de agua que no es utilizado por los emisores térmicos. El control de la potencia generada puede realizarse o bien regulando el caudal de agua de calefacción o bien por control de la temperatura del agua, modulando la velocidad del compresor de la bomba de calor.

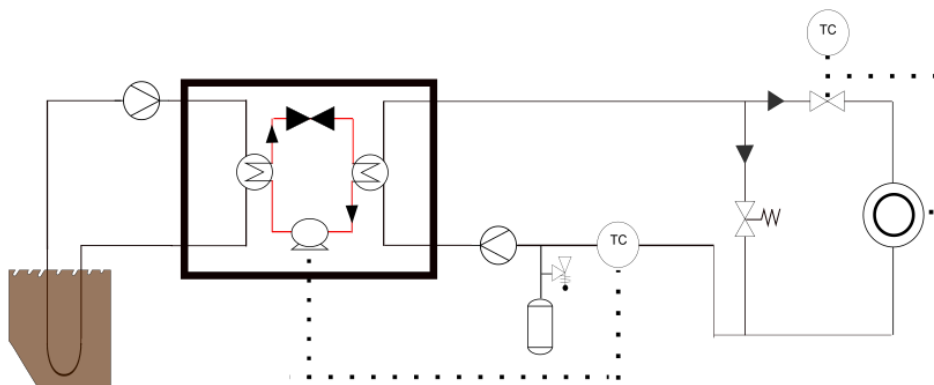


Figura 1. Esquema general de la instalación.

2.1. Carga térmica de la vivienda

En este trabajo no se plantea un cálculo detallado de la carga térmica de una vivienda, sino simular distintas configuraciones y estrategias de control sobre la BC. Por ello, se ha supuesto que la carga térmica varía de forma lineal con la temperatura exterior, según la ecuación (1). Conocida la carga de calefacción de diseño (\dot{Q}_{dis}) a una temperatura de diseño determinada (T_{dis}), se supone que la carga térmica (\dot{Q}_{ed}) varía linealmente con la temperatura exterior (T_j), siendo nula cuando la temperatura exterior supera los $16\text{ }^{\circ}\text{C}$ (T_{lim}).

$$\dot{Q}_{ed} = \dot{Q}_{dis} (T_j - T_{lim}) / (T_{dis} - T_{lim}) \quad (1)$$

OpenModelica tiene la capacidad de incorporar datos climáticos de años tipo extraídos de EnergyPlus desde el paquete ‘WeatherData’ y poder así conocer la temperatura exterior para una localidad determinada. En este trabajo, se ha supuesto una demanda máxima de 10 kW para una temperatura de diseño de -10 °C.

2.2. Bomba de calor

El componente utilizado para modelar la BC es ‘Carnot_y’ de la librería Buildings, que permite caracterizar el comportamiento de una BC de potencia de calefacción variable a través de la modulación de la potencia eléctrica consumida. La parametrización de la BC se ha realizado a partir de datos de un fabricante para condiciones B0W35 según EN 14511-2 [1], cuyos valores se recogen en la Tabla 1.

Tabla 1. Datos de la bomba de calor considerada en condiciones nominales B0W35.

Parámetro	Variable	Valor
Temperatura de entrada (salmuera) intercambiador exterior	$T_{ext,e,0}$	0 °C
Temperatura de salida (salmuera) intercambiador exterior	$T_{ext,s,0}$	-3 °C
Temperatura de entrada (agua) intercambiador interior	$T_{int,e,0}$	30 °C
Temperatura de salida (agua) intercambiador interior	$T_{int,s,0}$	35 °C
Potencia calorífica	$\dot{Q}_{BC,0}$	11,0 kW
COP	COP_0	4,0

Además, para la BC considerada, la potencia máxima del compresor ($W_{comp,max}$) es de 3,8 kW con posibilidad de regulación entre el 12,5 y el 100%. El valor del SCOP para clima medio (según EN 14825 [6]) es de 4,84.

Se ha parametrizado la BC para que proporcione las prestaciones indicadas en la Tabla 1 en condiciones B0W35 y el mismo valor de SCOP para clima medio. Los parámetros adicionales para modelar la BC se resumen en la Tabla 2.

Tabla 2. Parámetros adicionales utilizados para modelar la bomba de calor.

Parámetro	Variable	Valor
Salto mínimo de temperatura en intercambiador exterior para condiciones nominales	$\Delta T_{ext,0}$	3 K
Salto mínimo de temperatura en intercambiador interior para condiciones nominales	$\Delta T_{int,0}$	3 K
Caída de presión en intercambiador exterior para condiciones nominales	$\Delta P_{ext,0}$	5 kPa
Caída de presión en intercambiador interior para condiciones nominales	$\Delta P_{int,0}$	5 kPa
Corrección eficiencia a carga parcial $\eta_{PL} = a_1 + a_2 \cdot \dot{Q}_{BC} / \dot{Q}_{BC,0}$	a_1	0,989
Corrección eficiencia a carga parcial $\eta_{PL} = a_1 + a_2 \cdot \dot{Q}_{BC} / \dot{Q}_{BC,0}$	a_2	0,011

Desde el punto de vista dinámico, la transmisión de calor al fluido secundario sigue una respuesta parecida a la de un circuito RC (resistencia-condensador), otorgándole un valor de la constante de tiempo (τ) de 5 minutos.

2.3. Pozo geotérmico

Para simular el intercambio de calor con el terreno se ha utilizado el modelo ‘Boreholes.UTube’ de la librería Buildings. Se caracteriza con las propiedades del terreno (arenisca) y del material del tubo (bentonita) incluidas en la librería. Además, se indica la caída de presión nominal del fluido interior y medidas del tubo. El modelo de pozo es el de un tubo en forma de ‘U’ individual, con una profundidad de 150 metros. El terreno, al inicio de la simulación, tiene una temperatura estable de 10 °C.

2.4. Bombas circuladoras

Se utilizan los modelos ‘Movers.FlowControlled_m_flow’ de la librería Buildings para las bombas de los circuitos de agua y de salmuera. Las circuladoras tienen como señal de entrada el caudal instantáneo suministrado (respetando tiempos de respuesta). Parametrizando su caudal y salto de presión nominal (suma de pérdidas de presión del circuito cerrado), el componente genera una curva de rendimiento que se tiene en cuenta para estimar el consumo energético de la instalación.

2.5. Válvulas

El sistema cuenta con un bypass y una válvula de 2 vías que ajusta la potencia térmica del emisor. Ambas válvulas siguen un porcentaje de apertura no lineal (alta capacidad de control a bajas demandas), según recomendaciones para un control directo en los emisores [7]. La válvula de bypass abre cuando la presión diferencial en el circuito supera en 3.5 kPa la caída de presión en el circuito para condiciones nominales. Para las válvulas se ha utilizado el modelo 'Valves.TwoWayEqualPercentage' de la librería Buildings.

2.6. Emisores y vivienda

Son representados por un volumen de aire con una capacidad calorífica semejante a la de una vivienda, conectado a un emisor parametrizado para las condiciones de diseño. Para la potencia de diseño se suministrará un caudal nominal que experimentará un salto térmico de 5 °C (desde 35 °C hasta 30 °C).

3. ESTRATEGIA DE CONTROL Y REGULACIÓN

El sistema se configura para contemplar distintas posibilidades de control y regulación de la instalación. En todos los casos analizados se consideran los siguientes valores:

- La temperatura de consigna de la vivienda es de 21 °C con un diferencial de ± 1 K.
- En cuanto a la válvula de bypass, ésta se configura para que el porcentaje de apertura sea directamente proporcional al aumento de presión del circuito debido al cierre en el emisor (i.e. respecto a la presión existente con la válvula del emisor totalmente abierta).
- Para las válvulas de los emisores se utiliza un control PI en función de la diferencia entre la temperatura de la vivienda y la temperatura de consigna de 21 °C.
- La circuladora del circuito exterior (glicol) se regula con un control PI para mantener una variación de temperatura en el intercambiador exterior de la bomba de calor de 3 K. El caudal máximo de la circuladora se considera igual al caudal necesario para condiciones nominales de la bomba de calor (B0W35). Se asume que el rango de modulación es entre el 20% y el 100% del caudal máximo.
- La potencia suministrada a la bomba de calor se regula mediante un control PI. Se asume que el rango de modulación del compresor es entre un 12,5% y un 100% de su potencia máxima (3,8 kW).

El resto de los parámetros de control y regulación dependen del caso considerado.

3.1. Circuladora de caudal constante y control BC por temperatura de retorno (caso 1)

El caudal de la circuladora del circuito interior (agua) se considera constante e igual al necesario en condiciones nominales (B0W35). En general, este caudal será superior al necesario en los emisores por lo que la diferencia retornará por la válvula de bypass.

El control PI que actúa sobre la potencia de entrada de la bomba de calor se realiza en base a la temperatura de retorno del agua. El valor de consigna considerado es de 30 °C.

Cuando la demanda de calefacción es inferior a la potencia mínima entregada por la bomba de calor, la temperatura de retorno empezará a aumentar. La bomba de calor y las circuladoras se apagan en el caso de que la temperatura de retorno supere los 35 °C. El arranque se produce cuando la temperatura de la vivienda disminuye por debajo del diferencial marcado respecto al valor de consigna (i.e. 20 °C).

3.2. Circuladora de caudal variable y control BC por temperatura de retorno (caso 2)

En este caso se considera que la circuladora del circuito interior (agua) se regula con un control PI para mantener una variación de temperatura en el intercambiador interior de la bomba de calor de 5 K. El caudal máximo de la circuladora se considera igual al caudal necesario para condiciones nominales de la bomba de calor (B0W35). Se asume que el rango de modulación es entre el 20% y el 100% del caudal máximo.

El control sobre la potencia de entrada de la bomba de calor coincide con el caso anterior.

3.3. Circuladora de caudal variable y BC con temperatura de salida variable (caso 3)

Aplica lo mismo que en el caso anterior en cuanto a la bomba del circuito de agua. En este caso, un control PID actúa sobre la potencia de entrada de la bomba de calor para conseguir una temperatura de salida variable. En la simulación se asume que esta temperatura es la necesaria para que, en el rango de modulación de la BC, la potencia calorífica en el emisor sea la necesaria para mantener la temperatura de consigna deseada (21 °C).

4. RESULTADOS

Se ha simulado el sistema con las 3 posibilidades de control descritas anteriormente. La simulación se ha realizado para un año completo considerando los datos climáticos de la ciudad de Estrasburgo. Para mayor claridad se presentan únicamente los resultados entre el 1 de enero a las 12 p. m. y el 5 de enero a las 12 p. m. En la Figura 2 se representa, para el intervalo de tiempo considerado, la evolución de la carga térmica de la vivienda (izquierda) y de la temperatura de impulsión de la bomba de calor para los 3 casos considerados (derecha). En el caso 1, al ser el caudal y la temperatura de retorno constantes, la temperatura de impulsión aumenta con el aumento de la carga térmica (que coincide con la potencia suministrada por la bomba de calor). Para el caso 2 el caudal de impulsión se regula para intentar mantener una variación de temperatura constante entre impulsión y retorno de 5 K, lo que explica el valor constante de 35 °C en la temperatura de impulsión. Por último, en el caso 3 la temperatura de salida de la bomba de calor es variable y se ajusta al valor necesario para mantener la vivienda en la temperatura de consigna. En este caso, además, el caudal se regula para mantener una variación de temperatura entre impulsión y retorno de 5 K

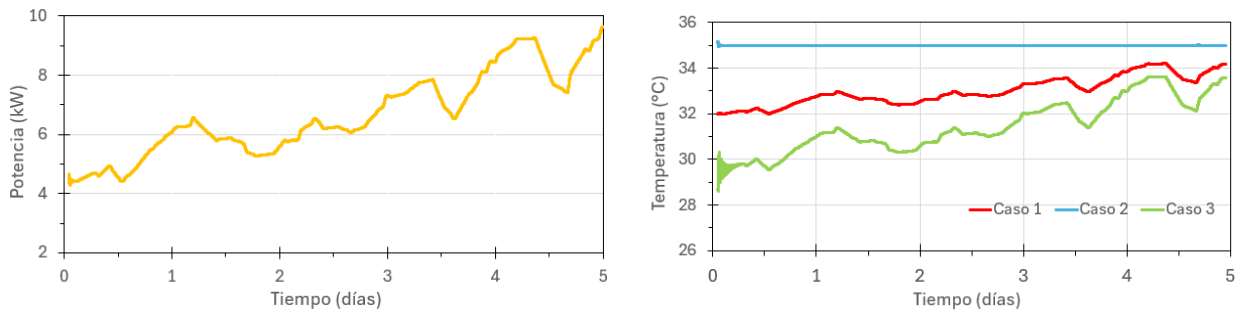


Figura 2. Carga térmica (izquierda) y temperatura de impulsión para los 3 casos analizados (derecha).

En la Figura 3 se representa el caudal impulsado por la bomba de agua (izquierda) y el que circula por la válvula de bypass (derecha) para los 3 casos analizados. Para los casos 2 y 3 el caudal de agua de impulsión es el mismo y su valor aumenta al hacerlo también la carga de calefacción (véase la Figura 2). En cuanto al caudal que circula por la válvula de bypass, puede verse que es menor en el caso 2 que en el caso 1, al ser menor el caudal impulsado por la bomba. Además, en el caso 3 el caudal de bypass es nulo al poder ajustar la bomba de calor la temperatura de impulsión al valor necesario en los emisores de la vivienda.

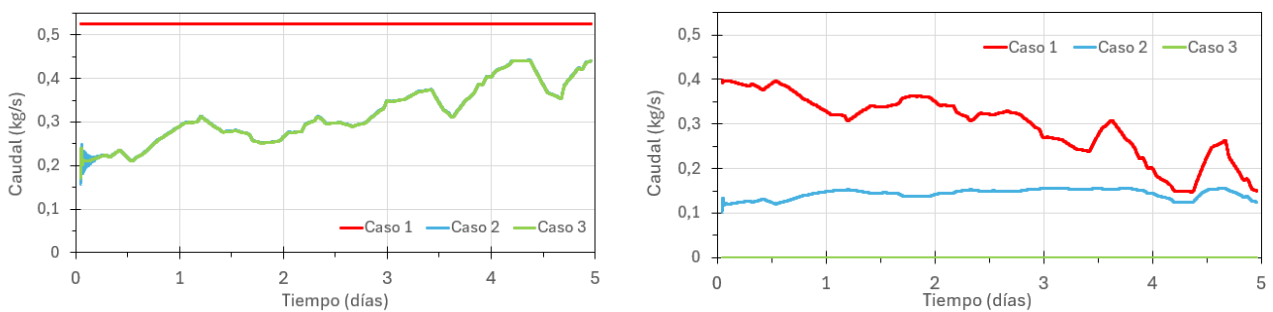


Figura 3. Caudal impulsado por la bomba de agua (izquierda) y caudal por la válvula de bypass (derecha).

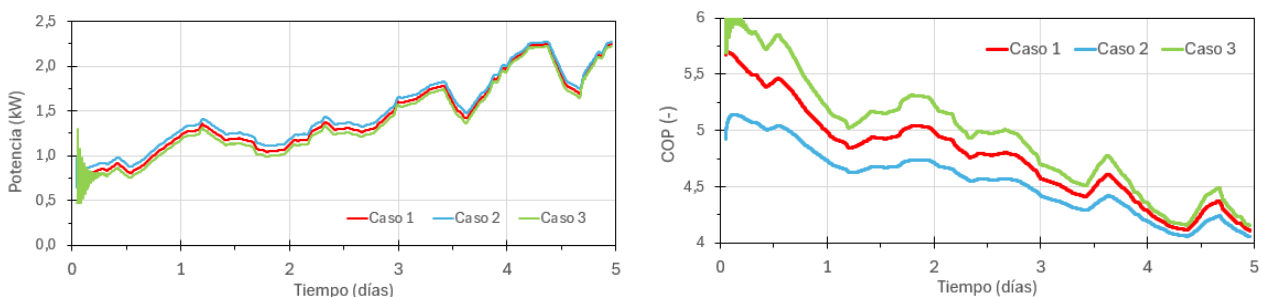


Figura 4. Potencia consumida (izquierda) y COP (derecha) de la bomba de calor.

Los valores de potencia eléctrica consumida por la bomba de calor y del COP se muestran en la figura 4. En el caso 3 la bomba de calor trabaja con temperatura de salida variable, por lo que disminuye la temperatura de salida a medida que disminuye la carga de calefacción (véanse figuras anteriores). Como consecuencia, el COP aumenta y la potencia requerida por la bomba de calor disminuye respecto a los otros casos. En cuanto a los casos 1 y 2, los resultados indican que el caso 1 tiene un mayor COP que el caso 2, lo que se debe a las menores temperaturas de impulsión en el primer caso. Realizada la simulación para un año completo, se obtuvieron valores del SCOP de 4,65, 4,47 y 4,73 para los casos 1, 2 y 3, respectivamente.

Analizando periodos temporales puntuales de baja demanda (en torno a 3 kW o menos), se observó que los ciclos de funcionamiento (arranque/parada de la BC) del caso 1 son menos frecuentes pero de mayor duración que los del caso 2, pues al calentar la BC un mayor caudal de agua se alcanza más tarde la temperatura de corte de 35 °C en el retorno. En la figura 5 se observa cómo comienza esta situación el día 21 de enero al mediodía, periodo en el que se tienen temperaturas exteriores moderadas. La BC para cuando en el retorno se superan los 35 °C y vuelve a arrancar cuando la temperatura en la vivienda baja de los 20 °C.

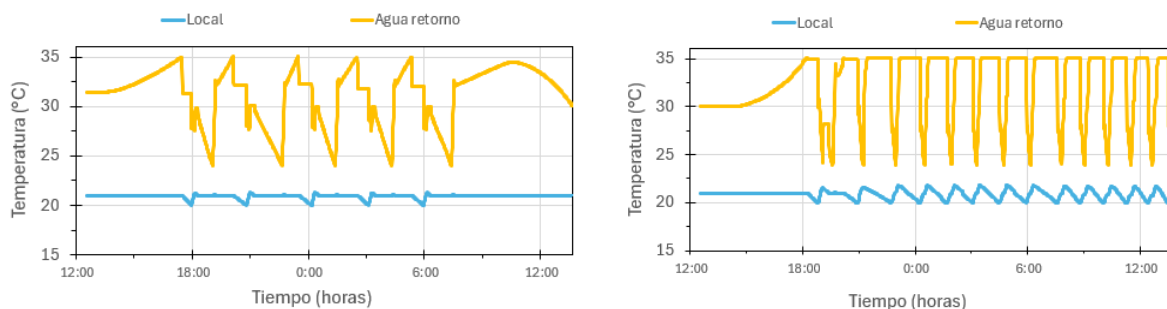


Figura 5. Temperatura de retorno y de local para el caso 1 (izquierda) y caso 2 (derecha).

5. CONCLUSIONES

En este trabajo se analizó el comportamiento dinámico de una instalación de calefacción a escala de vivienda unifamiliar con una BC geotérmica y 3 estrategias de control diferentes. La simulación se realizó para un año tipo considerando datos climáticos de Estrasburgo. En base a los resultados del SCOP, se concluye que la opción con una circuladora de velocidad variable en el circuito de agua junto con un control sobre la BC basado en una temperatura de salida variable es más eficiente que la utilización de una circuladora de velocidad constante o un control de la BC en base a la temperatura de retorno.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo es parte del proyecto TED2021-129982B-I00 financiado por MCIN/AEI/10.13039/501100011033 y por la Unión Europea “NextGenerationEU”/PRTR.

REFERENCIAS

- [1] Fritzson P. Principles of object oriented modeling and simulation with Modelica, Wiley-IEEE Press, 2004.
- [2] O.S Modelica Consortium, <https://openmodelica.org/doc/OpenModelicaUsersGuide/>, consultado el 2024/05/09.
- [3] Wetter M, Zuo W, Nouidui TS, Pang X. Modelica Buildings library, Journal of Building Performance Simulation, 2014, 7(4):253-270.
- [4] Fritzson, P et al. The OpenModelica integrated environment for modeling, simulation, and model-based development, Modeling, Identification and Control, 2020, 41(4):241–295.
- [5] CEN, Standard EN 14511-2: 2018. Air conditioners, liquid chilling packages and heat pumps for space heating and cooling and process chillers, with electrically driven compressors. Part 2: Test conditions. Brussels, Belgium, 2018.
- [6] CEN, Standard EN 14825: 2018. Air conditioners, liquid chilling packages and heat pumps, with electrically driven compressors, for space heating and cooling - Testing and rating at part load conditions and calculation of seasonal performance. Brussels, Belgium, 2018.
- [7] Siegenthaler J. Modern hydronic heating and cooling for residential and light commercial buildings, Cengage, 4ª ed., 2023.