



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES



Universidad de Valladolid

Universidad de Valladolid

ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

Modelado y simulación dinámica de un sistema de calefacción comunitario

**Grado en Ingeniería en Electrónica
Industrial y Automática**

Autor: Alberto Fiz Sastre

Valladolid, Julio de 2018

Tutor: Luis Felipe Acebes Arconada
Departamento: Ingeniería de Sistemas y Automática

Resumen

En el presente trabajo se pretende obtener el modelo matemático de los elementos de un sistema real y en funcionamiento de calefacción y agua caliente sanitaria de una comunidad de vecinos en un programa de simulación con un lenguaje orientado a objetos. Se usará para este propósito el software EcosimPro, con su lenguaje particular, EL.

EcosimPro es un programa de simulación que utiliza un lenguaje propio, EL (*EcosimPro Language*), que es muy similar a otros lenguajes de programación orientados a objetos. EcosimPro nos ofrece una potencia de cálculo muy interesante, y es posible simular tanto sistemas continuos, como discretos.

Para el desarrollo del trabajo, se creará una biblioteca de componentes propia, dónde se definirán los distintos elementos, su modelo matemático (que describirá el funcionamiento de los mismos), así como los puertos que posean para las interconexiones con otros elementos. Además, se diseñará y asignará un símbolo para cada componente.

Se obtendrán los parámetros que caracterizan a los elementos en base a los componentes reales de la instalación, mediante datos de los fabricantes y medidas tomadas del sistema real.

Se creará posteriormente una biblioteca dónde se definirán los distintos experimentos que se usarán para comprobar el correcto funcionamiento del sistema y para realizar las observaciones, análisis y predicciones deseadas.

PALABRAS CLAVE: modelado, simulación, dinámica, calefacción, ACS, EcosimPro, sistemas continuos.

Abstract

In this work it is expected to obtain the mathematical model of a real system, which is in operation, of a central heating and sanitary hot water system of a residential building in a program with an object oriented language. For this purpose, it will be used EcosimPro software, with its particular language, EL.

EcosimPro is a simulation software that uses its own language, EL (*EcosimPro Language*), which is very similar to other object oriented languages. EcosimPro offers a very high calculation capabilities, and it is possible to simulate both continuous and discrete systems.

To make this project, a new component library will be developed, where it will be defined the elements, their mathematical models (which will describe their behaviour), and the necessary ports to interconnect the components. Furthermore, a symbol will be designed and assigned to each component.

The components' parameters that characterize the real elements of the system will be obtained from the manufacturer or from experiments with the system.

It will also be created another library where different experiments will be made. These experiments will be used to verify the correct operation of the system and for observing, analyse and predict the behaviour of the real system.

KEYWORDS: modelling, simulation, dynamic, heating, DHW, EcosimPro, continuous systems.

Índice general

1. Introducción	7
1.1. Objetivos del trabajo	7
1.2. Ámbito y alcance del trabajo	8
1.3. Metodología seguida	8
1.4. Estructura del documento	9
2. Objeto de estudio	11
2.1. Sistemas de calefacción y ACS	11
2.2. Descripción del sistema real bajo estudio	16
3. Simulación de sistemas	23
3.1. Introducción a la simulación de sistemas	23
3.2. Herramientas y lenguajes de simulación de sistemas continuos de propósito general	24
3.3. Programas para simular sistemas de calefacción	24
3.4. EcosimPro: descripción y justificación de su elección	26
3.5. Metodología de modelado y simulación de sistemas	26
4. Desarrollo de la biblioteca de componentes	29
4.1. Creación de una biblioteca de componentes en EcosimPro	29
4.2. Puerto fluido	30
4.3. Definiciones previas del fichero «Componentes.el»	32
4.4. Bombas centrífugas	32

4.5. Válvulas	36
4.6. Caldera	39
4.7. Depósito	42
4.8. Viviendas	43
4.9. Intercambiadores de ACS	52
4.10. Tramo de tubería	56
4.11. Toma de agua	58
4.12. Referencia de presión	60
4.13. Controlador de calderas	61
4.14. Sensor de temperatura	63
5. Parametrización del modelo	65
5.1. Bombas	65
5.2. Calderas	66
5.3. Intercambiadores de calor	69
5.4. Viviendas	72
5.5. Válvulas	76
6. Experimentación con el sistema	77
6.1. Simulaciones de sistemas	77
6.2. Análisis comparativo de funcionamiento de la calefacción en una vivienda con control ON/OFF vs control continuo.	110
6.3. Análisis del sistema de control de las calderas	122
6.4. Análisis de relación coste/comfort de calefacción en una vivienda	125
6.5. Análisis de funcionamiento para distintas temperaturas de caldera	128
6.6. Análisis de funcionamiento para distintas temperaturas de ACS	130
7. Conclusiones	135
7.1. Grado de cumplimiento de los objetivos	135
7.2. Conocimientos adquiridos en los estudios del Grado utilizados	136
7.3. Líneas de desarrollo futuro	137

Capítulo 1

Introducción

1.1. Objetivos del trabajo

Los objetivos generales de este trabajo son complementar la formación recibida durante los estudios del Grado en Ingeniería en Electrónica Industrial y Automática, profundizar en los conocimientos sobre modelado y simulación de sistemas, especialmente en cuanto a sistemas reales se refiere, adquirir conocimientos sobre modelado y simulación con lenguajes orientados a objetos, completar los conocimientos adquiridos sobre sistemas continuos, y expandir mis conocimientos sobre sistemas térmicos e hidráulicos.

Los objetivos específicos están relacionados con el tema tratado en este trabajo, el modelado y simulación dinámica de un sistema comunitario de calefacción y agua caliente sanitaria. Entre ellos se encuentran el desarrollo de una biblioteca de componentes desde cero para modelar y posteriormente simular el sistema bajo estudio. Para ello, será necesario llevar a cabo una exhaustiva tarea de investigación previa, tanto sobre este tipo de sistemas, como del software más adecuado para hacerlo. Al tratarse de un sistema real, además será necesario llevar a cabo una documentación previa sobre la instalación real que se va a modelar en concreto.

Una vez el modelo de los distintos componentes básicos del sistema estén listos, se pretende realizar una serie de experimentos, con distinto grado de detalle, para verificar el funcionamiento de los elementos y comprobar el potencial de estos modelos.

También se pretende realizar algún tipo de análisis comparativo entre sistemas de control de la temperatura de las viviendas, enfrentando en el análisis el control de relé con histéresis de cualquier termostato típico de una vivienda contra un control PI con regulación continua, y comprobar mediante simulación cuál será mejor sistema.

Con este trabajo pretendo, a nivel personal, obtener un complemento a mi formación curricular, adquiriendo un conocimiento más profundo sobre el proceso de modelado y simulación de sistemas y en especial de sistemas reales. Además, pretendo adquirir conocimientos sobre lenguajes de simulación orientados a objetos. También considero interesante la temática propia del sistema, propio de disciplinas como la ingeniería fluidomecánica o la ingeniería térmica, y espero poder ampliar mis conocimientos en esas ramas, ya que son de gran interés en la industria.

1.2. **Ámbito y alcance del trabajo**

En este trabajo se pretende llegar a desarrollar un modelo de los componentes principales de una instalación de calefacción comunitaria, con el fin de poder desarrollar simulaciones de propósito general del funcionamiento normal del sistema.

Se pretende llegar a un grado de detalle que permita ver el funcionamiento general de los distintos elementos, sin llegar a profundizar en ningún campo concreto especialmente, de modo que se podrán hacer observaciones en todas las partes del sistema, en todos los componentes básicos, y se podrán realizar experimentos generales de todos los tipos: sobre el funcionamiento normal, comparación de elementos con distintos parámetros, comportamiento hidráulico, eficiencia energética, alternativas de diseño, alternativas de control, etc.

Es necesario llegar a un compromiso entre la complejidad del modelo desarrollado y los objetivos y precisión que se quieren obtener del mismo. Por ello no se pretende llegar a un modelo extremadamente detallado que permita ver el detalle del interior de los componentes, pero sí a un modelo aproximado que permita ver el comportamiento general con suficiente grado de precisión para realizar simulaciones de carácter general del sistema.

En este sentido, por ejemplo, es de gran interés obtener una aproximación de la evolución de las temperaturas a lo largo del circuito de radiadores de una vivienda, pero se considera innecesario llegar a generar un modelo que logre reproducir las corrientes convectivas de aire que se producirá por efecto de esos radiadores en la vivienda. Este tipo de análisis tiene una gran dificultad y requiere de potentes herramientas de análisis CFD, y apenas nos va a aportar información de interés para el punto de vista de la instalación que se pretende lograr en este proyecto.

1.3. **Metodología seguida**

Para el desarrollo del modelo del trabajo se ha seguido una estrategia de modelado «Bottom-up», comenzando por modelar con gran detalle cada elemento base individual del sistema para, posteriormente, ir generando grupos funcionales de mayor nivel agrupando esos elementos base.

En otras palabras, se ha comenzado por analizar los elementos básicos que componen la instalación, y se ha realizado un estudio individual de cada uno de ellos. Se han generado los componentes correspondientes a cada uno de esos elementos, con su modelo, para después ir eligiendo los componentes necesarios en cada caso para generar cada bloque del sistema y los distintos experimentos que se desean realizar.

Se ha decidido utilizar esta metodología ya que nos abre un abanico mucho más amplio de simulación, ya que a partir de los mismos elementos base podremos llegar a realizar multitud de sistemas complejos distintos. Además cada componente base es una representación de un elemento concreto real. Esto abre las puertas al modelado de cualquier instalación que utilice esos componentes, independientemente de su topología o función, haciendo mucho más versátil la biblioteca de componentes que se desarrollará.

1.4. Estructura del documento

En este apartado se va a realizar una breve descripción de la estructura seguida en el documento y qué se encuentra en cada sección.

El documento se ha dividido en 6 capítulos principales:

1. **Introducción:** Presentación del trabajo, objetivos, metodología y estructura.
2. **Objeto de estudio:** Investigación previa sobre los sistemas de calefacción y ACS comunitarios. Investigación sobre el sistema real bajo estudio.
3. **Simulación de sistemas:** Documentación previa sobre la simulación de sistemas, herramientas y lenguajes, y elección del software más adecuado para este trabajo.
4. **Desarrollo de la biblioteca de componentes:** Descripción detallada de cada componente, sus parámetros y su modelo.
5. **Parametrización del modelo:** Obtención de los parámetros que caracterizan cada componente con sus datos reales, obtenidos del fabricante o mediante experimentación.
6. **Experimentación con el sistema:** Se realizarán distintos experimentos con distinto grado de detalle del sistema real con los componentes desarrollados. Además se realizarán algunos análisis teóricos en base a los resultados de simulación sobre experimentos planteados para ello. Se analizarán distintas alternativas del control de la temperatura de las viviendas.
7. **Conclusiones:** Resumen del grado de cumplimiento de los objetivos marcados, conocimientos adquiridos y líneas de desarrollo futuro.

Capítulo 2

Objeto de estudio

2.1. Sistemas de calefacción y ACS

La función principal de las instalaciones de calefacción es la de mantener una temperatura de confort en los edificios durante el invierno, compensando las pérdidas térmicas del aislamiento de los cerramientos.

Existen múltiples tipos de calefacción y varias formas de clasificarlos: en base a la fuente de energía, en base al tipo de elemento calefactor, en base a la topología de la instalación, etc.

En base a la fuente de energía, podemos encontrar principalmente los siguientes casos:

- **Gas natural:** Es la fuente de energía más habitual en los núcleos urbanos, debido a que suele existir una distribución muy extendida por medio de una red de gasoductos que cada día crece más. La principal compañía de transporte de gas natural en España es Enagás. El gas natural es barato y las instalaciones necesarias para su uso no son muy complejas. El abastecimiento continuo a través de la acometida a la red de gasoductos hace que sea especialmente cómodo. [1]
- **Gas propano:** El gas propano tiene mayor poder calorífico que el gas natural, pero no existe una red de distribución, por lo que es necesario instalar un depósito en unas condiciones especiales (para cumplir con la normativa correspondiente, por motivos de seguridad), y es necesario estar pendiente de solicitar la recarga del mismo cuando se esté agotando. No obstante puede ser una buena solución para instalaciones alejadas de núcleos urbanos donde no exista una red de gasoductos de gas natural.
- **Gasoil C:** El gasóleo tipo C es el más barato de los tres existentes (A, B y C) y está concebido para su uso en calderas de calefacción o equipos de generación de calor. Es un combustible muy barato, pero con muchas impurezas. Además es mucho más contaminante que el gas natural o el gas propano. Su uso se desaconseja en la actualidad por existir alternativas mucho más ecológicas. [2, 3]
- **Energía eléctrica:** Los sistemas de producción de calor eléctricos tienen la ventaja de que pueden utilizarse de forma muy descentralizada, teniendo un equipo de producción de calor en cada punto exacto donde se necesite. Su instalación es muy sencilla. Sin embargo no es

nada práctico para calentar grandes espacios o viviendas completas, dado que la energía eléctrica tiene un coste superior al resto, y además es necesario contratar más potencia, lo que aumentará significativamente la factura de la luz. Puede servir en espacios pequeños o como complemento en puntos concretos.

- **Biocombustibles y biomasa:** Son recursos energéticos renovables. El más extendido en España para el uso doméstico es la leña, seguido por los pellets de madera. El uso de estos últimos está creciendo mucho en los últimos años. Aunque son una alternativa ecológica y no muy cara, las calderas y estufas de este tipo de combustibles necesitan de un mayor mantenimiento y limpieza, el combustible es más voluminoso (se requiere mayor espacio para almacenarlo) y la instalación es algo más compleja. Además, si la demanda de este tipo de combustibles sigue creciendo dejarán de considerarse renovables, ya que su capacidad de producción es limitada, y el precio aumentará considerablemente. [4, 5]

Sobre los tipos de calefactores, encontramos para uso domésticos principalmente los siguientes: [1, 6]

- **Radiadores de agua:** se trata de elementos metálicos con una gran superficie de contacto con el aire, por los que circula agua caliente procedente de las calderas (fluido caloportador). El radiador realiza un aporte energético a la estancia por medio de convección (calentando el aire que entra en contacto con él y generándose una corriente convectiva) y por radiación. Es el sistema más extendido para instalaciones domésticas. Su uso es sencillo y barato.
- **Suelo radiante:** bajo el suelo se coloca todo un circuito de tubos de agua de calefacción que transmiten el calor al suelo. Se logra una gran homogeneidad en la temperatura de toda la estancia, ya que el calor se aporta de forma distribuida por toda ella. Es un sistema con una dinámica algo más lenta (tarda más en calentar y en enfriar), debido a la capacidad térmica del suelo. Su instalación es algo compleja.
- **Bombas de calor:** se trata de un sistema muy parecido a los sistemas de refrigeración de aire acondicionado, y generalmente ambos van integrados en la misma instalación. Su instalación puede ser algo compleja según sea la distribución de la casa, ya que se requiere un equipo exterior. El sistema funciona en base a los mismos principios que el aire acondicionado o que un refrigerador, pero en el sentido inverso al de esos equipos, tomando energía térmica del exterior para introducirla dentro de la vivienda. Además este tipo de sistemas no se pueden utilizar en cualquier área climática, ya que se necesita una temperatura mínima en el exterior para que pueda funcionar. Es habitual encontrarlo en el sur de la península, donde los inviernos son más suaves y permiten un correcto funcionamiento. Además hay menor demanda de calefacción. Son muy eficientes.
- **Estufas y radiadores eléctricos:** se trata de equipos portátiles con una resistencia eléctrica que calienta el aire directamente (en ocasiones con la ayuda también de un ventilador), o un circuito de aceite en un radiador. Se pueden colocar fácilmente en cualquier sitio sin más necesidad que un enchufe para funcionar. Por contra su potencia es limitada, no son el sistema más barato y la distribución de calor es muy desigual.

En base a la topología de la instalación: [7, 8]

- **Calefacción central:** una serie de viviendas comparten un único sistema de calderas que impulsa el agua caliente a todas ellas. Las calderas de calefacción comunitaria son grandes y muy eficientes. Además, en este tipo de sistemas los gastos de mantenimiento de la caldera se reparte entre todos los usuarios y suele ser más barato que la suma de los gastos equivalentes a calderas individuales. Lo hay de varios tipos:
 - **Por columnas:** Los distintos radiadores se conectan en paralelo en circuitos que van en columnas, por plantas. Era un sistema muy habitual, pero actualmente está en desuso y se requieren de algunas modificaciones o complementos para cumplir con la actual normativa europea al respecto (directiva europea 27/2012/ue), especialmente a la hora de contabilizar la energía consumida en cada vivienda. Ver figura 2.1.1.
 - **En anillo:** Existe una única rama de distribución vertical de la que se van sirviendo las viviendas de las distintas plantas, pero dentro de cada vivienda se distribuye formando un anillo. Encontramos varios tipos en este apartado:
 - **Monotubular:** Todos los elementos de calefacción (normalmente radiadores) van en serie, uno a continuación de otro. Ver figura 2.1.2.
 - **Bitubular simple:** Existen dos conductos de agua, impulsión y retorno, que van recorriendo todos los radiadores, formando un anillo a lo largo de la vivienda. Todos los radiadores están conectados en paralelo, tomando su entrada de agua de la tubería de impulsión y conectando su salida a la de retorno. Ver figura 2.1.3.
 - **Bitubular en anillo de Tichelmann, o de retorno invertido:** Existen dos conductos, uno de impulsión y otro de retorno, que van recorriendo todos los radiadores, pero en sentido inverso. De este modo, siguiendo la tubería de impulsión desde la entrada a la vivienda, el primer radiador que se encuentre, será el último que encontraríamos siguiendo la tubería de retorno desde la salida de la vivienda. Con esto se consigue compensar las pérdidas de carga en el circuito y que en todos los radiadores haya un caudal y temperatura similar. Esto se logra porque con esta distribución se consigue compensar e igualar la longitud de tubería de ida y retorno que alimenta a cada radiador. Ver figura 2.1.4.
- **Calefacción individual:** cada vivienda de un mismo bloque tiene su propia caldera y su propio circuito de calefacción (en anillo normalmente). Las calderas individuales son más pequeñas, pero también son menos eficientes. Además todo el gasto de mantenimiento del sistema y la caldera recae en un único usuario, y por lo general es más caro que una única caldera central para todos.

En cuanto al agua caliente sanitaria, el sistema suele ir acorde a la topología del sistema de calefacción. De este modo es habitual que cuando se dispone de calefacción central, también haya un sistema de ACS central en la comunidad, y que éste se alimente de las mismas calderas que el sistema de calefacción. En estos casos suelen utilizarse unos acumuladores de ACS, que no son más que un intercambiador de calor con un gran depósito.

En instalaciones individuales lo más habitual es encontrar termos eléctricos, que son depósitos muy bien aislados con una resistencia eléctrica que mantiene el agua de su interior a una temperatura normalmente configurable. Si la calefacción también es individual, también pueden encontrarse pequeños intercambiadores como en sistemas centralizados, pero es menos frecuente.

Una guía muy completa e interesante sobre instalaciones centralizadas de calefacción y ACS en edificios de viviendas (como es nuestro caso), puede encontrarse en la referencia bibliográfica [9].

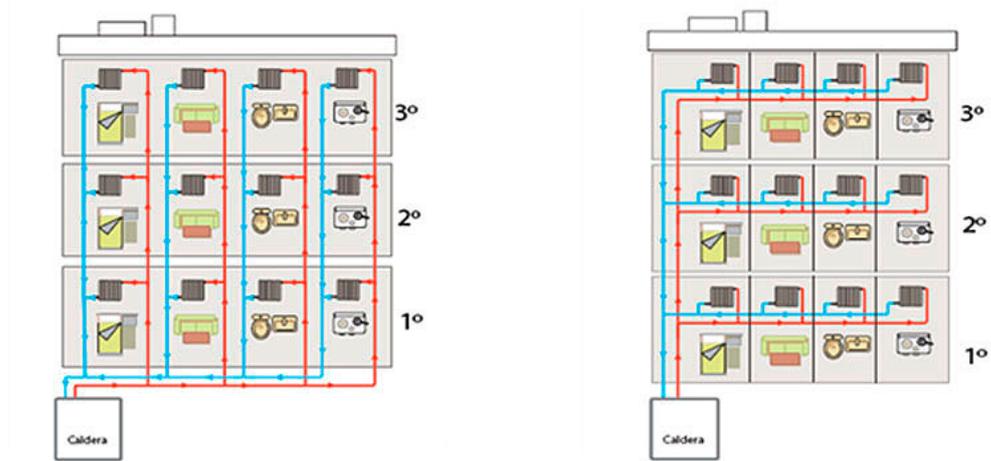


Figura 2.1.1: A la izquierda, calefacción por columna, a la derecha, calefacción por anillos

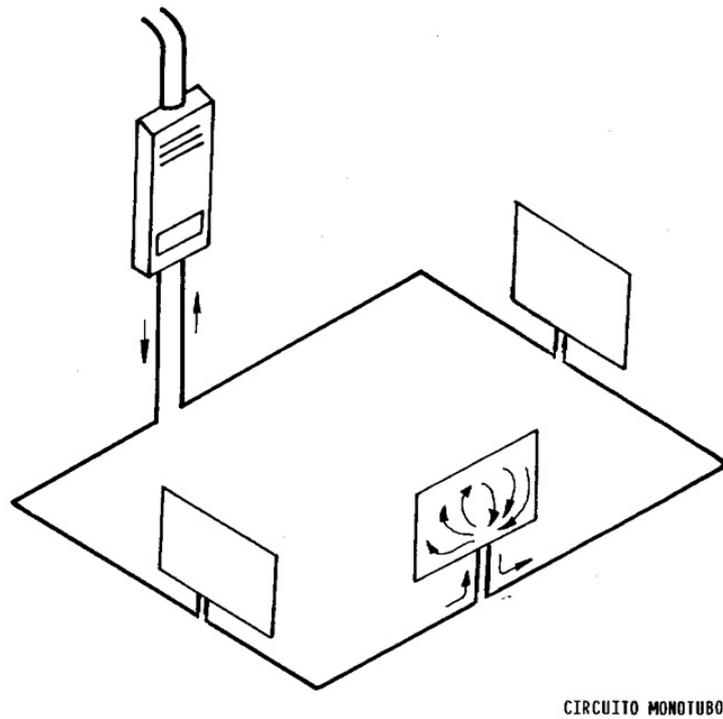


Figura 2.1.2: Esquema de un circuito de calefacción monotubular

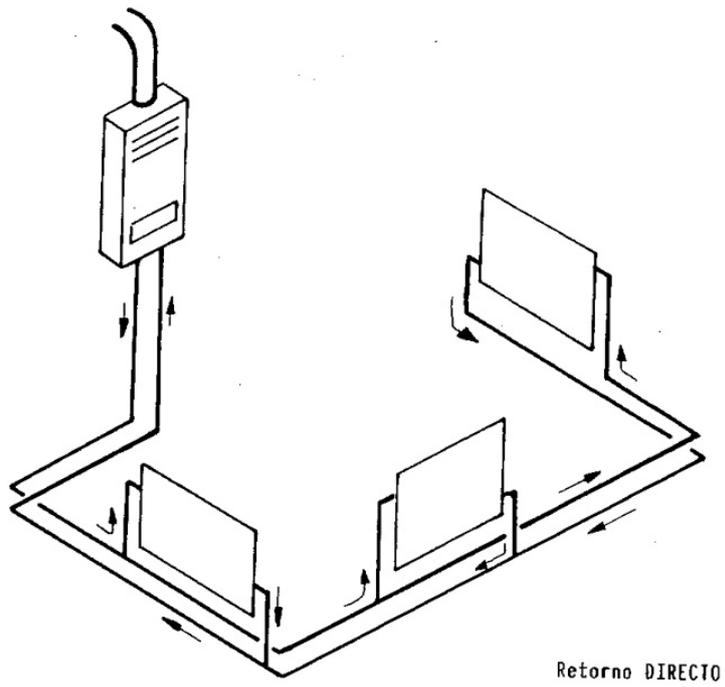


Figura 2.1.3: Esquema de un circuito de calefacción bitubular simple

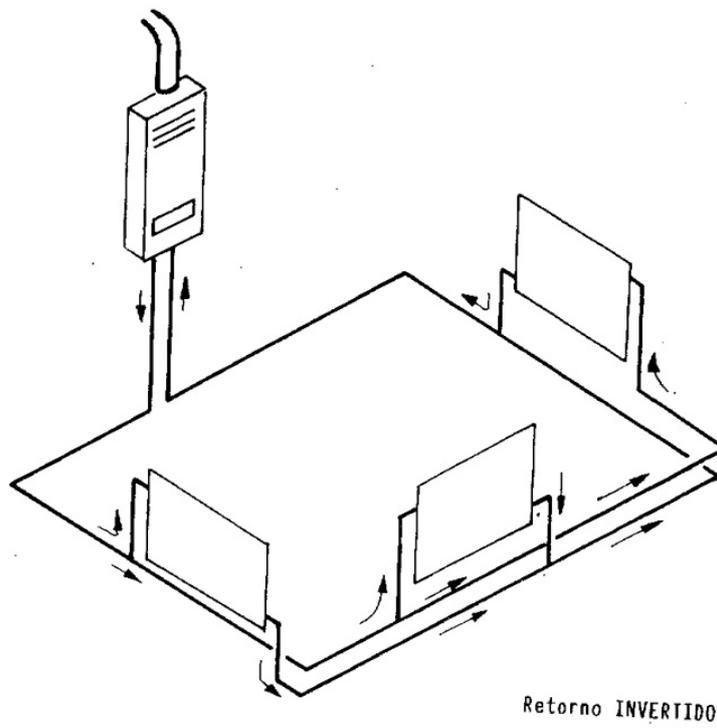
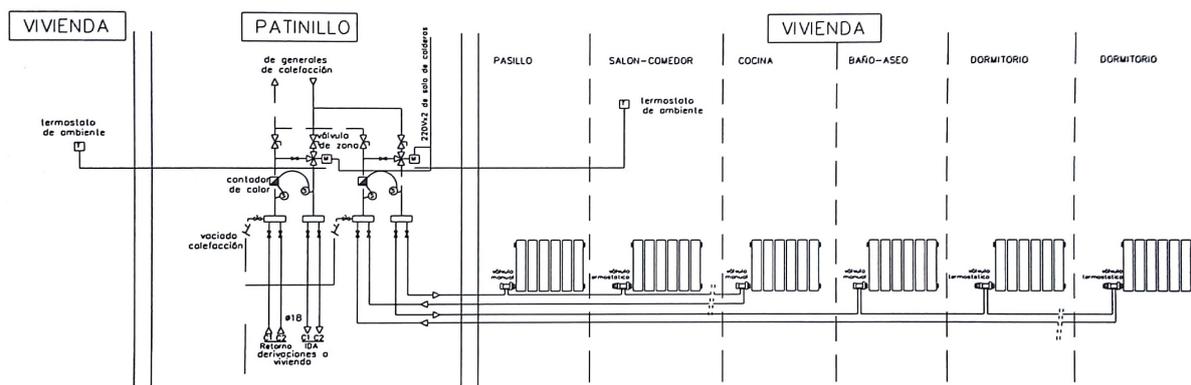


Figura 2.1.4: Esquema de un circuito de calefacción bitubular de retorno invertido

2.2. Descripción del sistema real bajo estudio

En este trabajo se va a realizar un estudio, modelado y simulación de un sistema real y en funcionamiento. No se trata de un sistema en fase de diseño sobre el que se eligen los parámetros y componentes deseados, sino que debo adaptarme a lo presente en la realidad. Por ello, lo primero es realizar un estudio del sistema real.

Se trata de un sistema de calefacción y ACS central, con una topología de distribución de calefacción en anillos. Cada vivienda tiene dos circuitos de calefacción de topología en serie, como puede verse en la figura 2.2.1.



ESQUEMA DISTRIBUCION CALEFACCION EN VIVIENDAS

Figura 2.2.1: Esquema de distribución de calefacción en viviendas

Tras consultar la documentación disponible acerca de la instalación, me baso en los planos del proyecto de la instalación de Calefacción y Agua Caliente Sanitaria (ACS).

Entre la documentación, se encuentran los planos de la instalación del sistema de la sala de calderas (figura 2.2.2). Aunque sin grandes detalles sobre el conjunto de la instalación, obtenemos la suficiente información sobre algunos de los componentes que se usan, como las bombas, las calderas o los intercambiadores de calor.

A nivel general, observamos que hay 4 calderas idénticas modelo *DTG-330S-18* del fabricante *De Dietrich* y dos intercambiadores de calor con depósito para el ACS, de 1000 litros, modelo *B-1000* también del fabricante *De Dietrich*. También hay una sonda de temperatura externa, que se utiliza para modificar la temperatura de regulación de las calderas. [10]

Además encontramos información sobre las distintas bombas centrífugas que se utilizan para la circulación del agua del sistema. Todas son del fabricante *Wilo* y podemos encontrar los modelos *TOP-S-65/13*, *TOP-S-50/10*, y *TOP-S-50/4* en distintas partes de la instalación.

Con esos datos, se procede a buscar información detallada sobre esos elementos principales de la instalación en las páginas oficiales de los fabricantes con el fin de obtener la mayor cantidad de información posible que pueda ser de utilidad para el modelado matemático de dichos elementos con la mayor precisión posible.

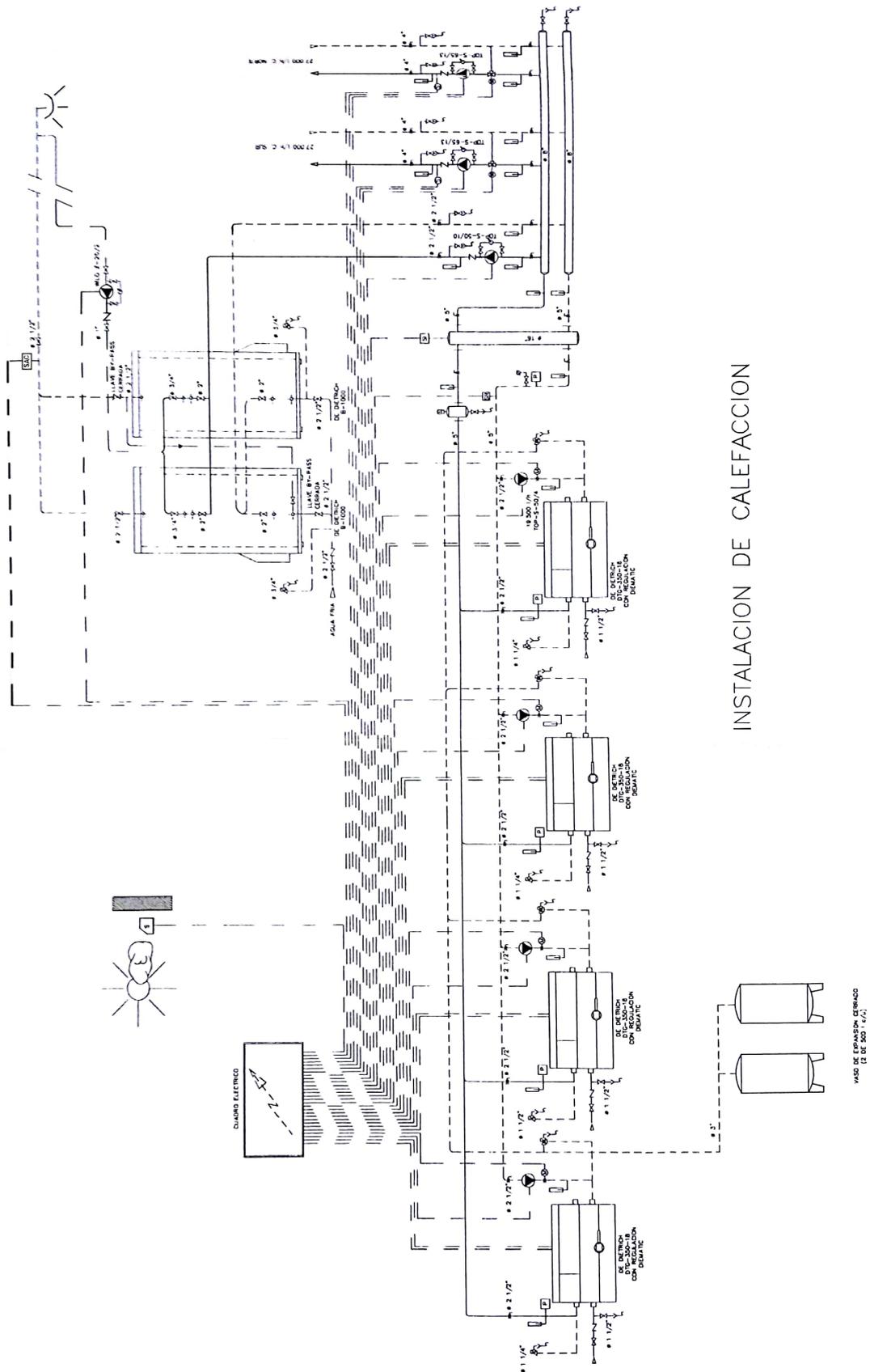


Figura 2.2.2: Esquema de la instalación de la sala de calderas



Figura 2.2.3: Vista general de la sala de calderas del sistema real



Figura 2.2.4: Fotografía de las cuatro calderas del sistema

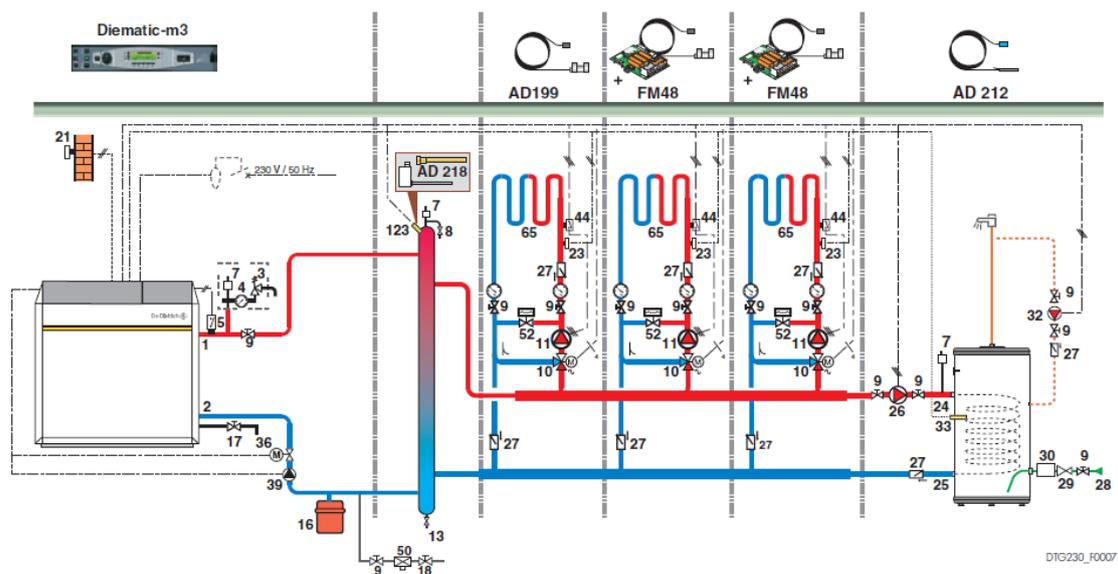


Figura 2.2.5: Esquema de ejemplo proporcionado por el fabricante de las calderas, *De Dietrich*

2.2.1. Recopilación de información de los fabricantes

Comenzamos por las bombas. En la página del fabricante, *Wilo*, encontramos fácilmente todos los modelos de bombas presentes en la instalación. Encontramos todos los datos técnicos de las mismas, e incluso gráficas de curvas características, lo cuál será especialmente útil para modelar las bombas con el comportamiento más real posible.

Se busca también información sobre las calderas en la página del fabricante. Aunque hay cierta discrepancia en la documentación de la comunidad, se elige el modelo *DTG-330S-18* por ser el más similar a lo indicado en dicha documentación y a lo observado en la instalación real.

Encontramos distintos documentos con información al respecto, con tablas de características de todas las variaciones del modelo de caldera, y con información detallada de interés para su modelado.

Además el fabricante aporta algunos esquemas de ejemplo sobre instalaciones utilizando sus productos, como el de la figura 2.2.5.

Finalmente, buscamos información sobre los intercambiadores de ACS, y encontramos el modelo correcto y toda la información necesaria en la web del fabricante.

En esta ocasión también nos muestra algunos ejemplos de esquemas de instalación, como el de la figura 2.2.6.

2.2.2. Experimentación con el sistema

Este trabajo trata sobre un sistema real y en funcionamiento, sobre el que no tenemos apenas capacidad de experimentación ni medición. No podemos variar las condiciones de funcionamiento

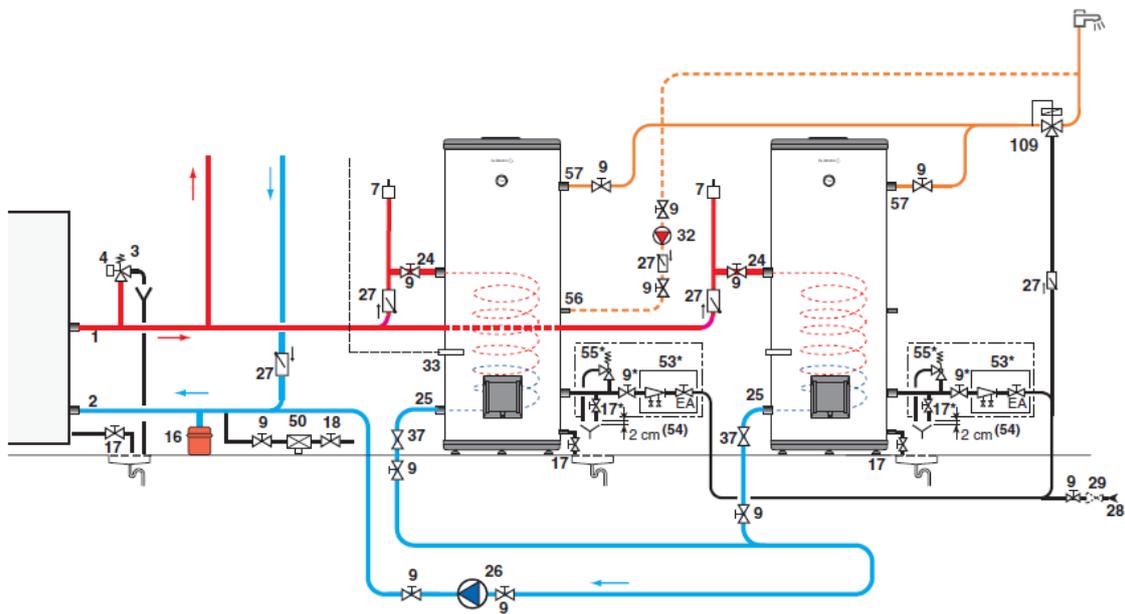


Figura 2.2.6: Esquema de ejemplo proporcionado por el fabricante de los acumuladores de ACS, *De Dietrich*

del sistema general, la temperatura de las calderas, ni hacer experimentos con el controlador de las mismas. Tampoco podemos modificar el estado de las bombas o las válvulas.

Las únicas medidas que podemos obtener son aquellas de las condiciones en las que se encuentra el sistema durante su operación normal.

En varias visitas a la sala de calderas, pude comprobar que la temperatura de funcionamiento a la que estaban configuradas las calderas era de 75°C , aunque este valor de referencia puede verse alterado por la sonda de temperatura exterior, pues con ello se trata de adelantarse y de ajustar la temperatura del circuito a los previsible aumentos de demanda si las condiciones son más desfavorables (con una temperatura exterior más baja).[10]

También pude observar que el agua caliente de los depósitos estaba controlada a unos 50°C . Aunque se sabe que tienen un controlador de relé con histéresis (un termostato), no se conocen los detalles sobre la histéresis del mismo.

Para tratar de obtener algo más de información sobre el comportamiento y la dinámica real del sistema, necesitaría tener más información sobre el circuito real del agua de las calderas (longitud real de tubería, pérdidas de carga...). No dispongo de esa información ni tengo medios para obtenerla, ya que no puedo experimentar con el conjunto del sistema.

Pero sí puedo experimentar con mi vivienda en particular.

Realizo una serie de experimentos tomando nota de las condiciones en distintos días y distintas situaciones, con las medidas que yo puedo observar de forma local en mi casa (temperatura de la vivienda) y con las medidas que me proporciona mi contador de calefacción, realizo una serie de experimentos para obtener un modelo aproximado de mi vivienda, que extrapolaré a todas las demás, al suponer que serán lo suficientemente similares como para poder generalizar ese modelo.

Como digo, todo esto se debe a que realmente no tengo acceso a más información. De tener acceso a más información, de cara a tratar de llevar este mismo trabajo a otro tipo de instalación dónde sí sea posible experimentar y dónde se tenga un conocimiento más detallado de la instalación real, o incluso desde la etapa de diseño del sistema, se podría hacer un modelo mucho más detallado y preciso del sistema, y predecir con gran fiabilidad tanto su funcionamiento estacionario, como dinámico. El fundamento y el proceso serían los mismos que voy a seguir en este trabajo, pero con la información de todos los elementos de una forma mucho más precisa.

Los experimentos que realizo en mi vivienda consisten, principalmente, en observar detalladamente el funcionamiento del sistema de calefacción, anotando todas las variables y condiciones que puedo observar, así como su evolución. Anoto la temperatura inicial de la vivienda antes de encender la calefacción, la temperatura final, el tiempo que tarda en calentarse la vivienda, el caudal que marca el contador de calefacción, así como las temperaturas de entrada y de salida del agua de los radiadores (según el contador), la potencia instantánea nada más encender el circuito, la potencia cuando el termostato está a punto de apagarse, el tiempo que tardan los radiadores en calentarse al encenderse y el tiempo que tardan en enfriarse al apagarse o la energía consumida.

También tomo nota de las condiciones ambientales, entre lo que destaca si el día es soleado o nublado, y la temperatura exterior.

Esto es importante, ya que si el día es soleado la vivienda se calentará gracias al aporte de energía del sistema de calefacción y también gracias a la radiación solar que entre por las ventanas. Además, la fachada del edificio estará a una temperatura superior que la temperatura ambiental exterior, y por tanto las pérdidas térmicas a través de la pared serán distintas.

No obstante, no dispongo de las herramientas y capacidades de medida suficientes para determinar el efecto y la influencia de la radiación solar sobre mi sistema.

Una forma relativamente sencilla de haber obtenido una aproximación, habría sido dejar la calefacción encendida alguna noche en que se conociera la temperatura exterior (dato fácilmente conocible a través de una fuente como la estación de la AEMET) y medir el consumo de calefacción durante esa noche. Con el sistema estacionario a una temperatura fija, toda la energía que aporte el sistema de calefacción, será exactamente la misma cantidad de energía que el sistema habría perdido a través de las paredes hacia el exterior, por la diferencia de temperaturas entre la vivienda y el exterior. En esas condiciones, de noche, podremos conocer el coeficiente de pérdidas de las paredes de la vivienda con cierta exactitud, ya que no hay ningún efecto de la radiación solar.

Posteriormente, y con ese dato de pérdidas térmicas de las paredes conocido, podríamos realizar una serie de experimentos similares pero durante el día, con sol directo y en días nublados, y determinar la incidencia de la radiación solar sobre el sistema en esos casos.

Sin embargo, no es posible realizar ese experimento porque la programación del sistema comunitario de calefacción apaga las calderas a las 23:00 horas. Por ello, tan sólo puedo realizar experimentos durante el día, con incidencia de radiación solar y un efecto indeterminado sobre el sistema.

Capítulo 3

Simulación de sistemas

3.1. Introducción a la simulación de sistemas

La definición de simulación es una de las más discutidas debido a que el campo de las simulaciones es especialmente extenso y completo.

Una **definición** que se podría dar de **simulación** es que *es el proceso de obtener un modelo simplificado de la realidad, someterlo a una serie de estímulos conocidos, y analizar la evolución y respuestas del mismo.*

Es una definición muy inespecífica, debido a que las simulaciones pueden utilizarse en prácticamente todos los ámbitos de estudio, como la ingeniería, la medicina, la economía, la electrónica, la balística, la biología, etc.

Los **objetivos** generales de una simulación son obtener información de cuál será el comportamiento de un sistema real ante unas determinadas entradas o situaciones, sin la necesidad de contar con el sistema real físicamente, así como servir de base de pruebas para el diseño de sistemas y controladores.

Las simulaciones son especialmente útiles a la hora de diseñar un sistema de control, permitiendo cálculos y reproducciones sobre el comportamiento del sistema real que permitan afinar el controlador antes de ponerlo a funcionar en la planta real. Esto mismo es de gran utilidad a la hora de probar sistemas que pueden suponer un gran peligro sin ningún riesgo real, como sistemas de control de grandes plantas industriales químicas, energéticas (nucleares y térmicas), o a la hora de formar a profesionales en el manejo de maquinaria y vehículos, como pilotos de avión u operadores de sistemas industriales.

Las simulaciones también son muy utilizadas en el campo de la ingeniería electrónica desde la etapa de diseño de circuitos, hasta su fabricación y puesta en marcha final.

Un **sistema** es un elemento o combinación de ellos, definidos por sus modelos, relacionados con el entorno por medio de unas «entradas» y unas «salidas», cuyas propiedades se desean estudiar. Para el estudio se aplican unos estímulos conocidos sobre las entradas al sistema, y se observan y analizan las salidas.

Hay dos tipos principales de sistemas: continuos y discretos. Aunque puede haber casos mixtos, dónde se combinen ambos tipos.

- **Sistemas continuos:** son aquellos que evolucionan de forma continua tanto en la magnitud de sus variables como a lo largo del tiempo. Normalmente se describen por medios de ecuaciones diferenciales.
- **Sistemas discretos:** son aquellos que evolucionan por eventos y normalmente con valores discretos. Típicamente se describen por medio de condiciones lógicas que se evalúan cuando se produce un evento específico.

El **modelo** es el conjunto de ecuaciones matemáticas y relaciones lógicas que definen el comportamiento y evolución del sistema o de cada uno de sus elementos. Dado que las simulaciones de sistemas pueden ser continuos o discretos, los modelos también serán distintos en esos casos.

En este trabajo se va a desarrollar un modelo de simulación de un sistema de calefacción y ACS comunitario. Se trata de un sistema continuo.

3.2. Herramientas y lenguajes de simulación de sistemas continuos de propósito general

Para desarrollar las simulaciones, necesitamos de herramientas y lenguajes de simulación. Este es un campo muy amplio.

A la hora de buscar el lenguaje o el software más adecuado, hay que ver cómo se desarrolla y hacia qué tipo de trabajo está orientado cada uno.

Así, entre los lenguajes de programación de propósito general, encontramos que los más habituales son C, C++, Fortran, Pascal o ADA. Dentro de los lenguajes de simulación de sistemas continuos, se encuentran lenguajes orientados a simulación de sistemas basados en ODEs, como ACSL, o Dynamo, entre otros, y también podemos encontrar otros orientados a bloques, como Simnon, o CSMP.

También encontramos software de entornos de modelado, como SIMULINK, basado en un lenguaje de simulación orientado a bloques, o programas como EcosimPro, gPROMS o ASCEND, con lenguajes orientados a objetos.

En definitiva existe una amplia variedad de lenguajes y software, no sólo dependiendo del tipo de sistema a simular, sino también del enfoque que se quiera hacer en su descripción.

3.3. Programas para simular sistemas de calefacción

Aunque es fácil encontrar muchas calculadoras sencillas sobre sistemas de calefacción, especialmente para el dimensionado y cálculo de costes de pequeñas instalaciones domésticas, es más difícil encontrar software pensado para simular un conjunto de sistema de calefacción, con todos sus elementos y sistemas, como se pretende en este trabajo.

Algunas herramientas para el cálculo de algunos sistemas, dimensionamiento, o demandas se pueden encontrar en la página web de Atecyr [11]. Podemos encontrar pequeños programas para

calcular cargas térmicas, instalaciones de refrigeración, instalaciones solares, etc. Sin embargo, ninguno de esas aplicaciones cubre por completo un sistema de calefacción y ACS comunitaria, desde el punto de vista que se busca en este trabajo.

Se pueden encontrar programas para el cálculo mediante técnicas CFD que pueden ser de utilidad para observar el comportamiento detallado de un sistema fluido, pero con los que es difícil y extremadamente ineficiente realizar un modelo de una instalación compleja por completo. Esto no significa que estos programas no sean de utilidad ya que sí permiten simular sistemas de calefacción, pero lo hacen desde otro punto de vista que no es el que se busca en este trabajo.

Si quisiéramos observar el detalle del interior de las viviendas, por ejemplo, deberíamos recurrir a estas potentes herramientas de cálculo CFD que fueran capaces de simular con detalle las corrientes convectivas que producirían los radiadores y todos los detalles de intercambios de calor entre elementos. Algunos ejemplos de este tipo de software podrían ser «Flow 3D»[12], «OpenCFD»[13] o «Ansys Fluent»[14]. Sin embargo este tipo de análisis es muy complejo y detallado, generando modelos de simulación muy pesados. En este trabajo no se busca ese grado de detalle. Se pretende generar una biblioteca de componentes de calefacción de propósito general que permita analizar de forma sencilla y rápida cualquier sistema de calefacción simplificando el análisis.

Otra alternativa más generalista sería utilizar programas de simulación de calefacción destinados al cálculo y dimensionamiento de las instalaciones, como, por ejemplo «HAP - Hourly Analysis Program»[15]. Sin embargo tampoco es lo que buscamos, ya que nosotros vamos a modelar un sistema real ya diseñado, construido y en funcionamiento.

Dado que no hay un software especializado que cumpla con los requisitos de este trabajo, deberemos crear nuestros propios componentes, especificando su modelo matemático y conexiones entre ellos para generar sistemas complejos, en algún programa o lenguaje que lo permita de una forma sencilla y eficiente.

Una opción podría ser utilizar MATLAB, con su herramienta SIMULINK, que es el principal software de simulación de sistemas continuos que se ha enseñado durante los estudios de la carrera.

En SIMULINK podríamos definir nuestros modelos matemáticos por medio de bloques de una forma gráfica muy visual. Sin embargo es un sistema poco práctico para sistemas de gran envergadura como es este caso. Entre otros motivos, porque para «escribir» una sola ecuación se requiere de varios bloques, por lo que puede ser algo tedioso si el número de ecuaciones y su complejidad es elevada. Además el diseñador debe realizar por sí mismo la manipulación matemática del modelo para interconectar todas las ecuaciones y variables del sistema. Más aún si cada elemento posee muchas variables que pueden ser de interés para observar en un determinado momento (pero no siempre, ni siempre las mismas).

En ese sentido, se ve como algo mucho más versátil utilizar un software de simulación con un lenguaje orientado a objetos, de modo que cada elemento y cada variable será muy fácilmente accesible, así como la escritura de las ecuaciones.

En un lenguaje orientado a objetos, podremos definir distintos tipos de componentes, con sus modelos propios, y posteriormente caracterizarlos por medio de parámetros e interconectarlos.

En este campo destaca EcosimPro, con su lenguaje EL. EcosimPro nos permitirá definir los componentes que queramos, y escribir las ecuaciones y condiciones lógicas de sus modelos que

determinarán el comportamiento de nuestro sistema. Además, EcosimPro se encargará de realizar la manipulación matemática del modelo para relacionar todas las ecuaciones e incógnitas. Esto ahorra mucho trabajo al diseñador. Además es especialmente cómodo a la hora de realizar modificaciones, ya que basta con reescribir las ecuaciones y él se encargará de reconstruir su modelo matemático automáticamente. De lo contrario, habría de volver a realizar la manipulación del modelo manualmente cada vez que se produjera un cambio importante en una ecuación.

3.4. EcosimPro: descripción y justificación de su elección

EcosimPro es una herramienta de simulación desarrollada por «Empresarios Agrupados A.I.E» para modelar todo tipo de procesos físicos que puedan expresarse en términos de Ecuaciones Diferenciales Algebraicas (DAEs) o bien de Ecuaciones Diferenciales Ordinarias (ODEs), así como para la simulación de eventos discretos.

El modelado de los distintos componentes físicos de un sistema está basado en el lenguaje propio de EcosimPro EL (*EcosimPro Language*), y es muy similar a cualquier lenguaje de programación orientado a objetos.

El software de EcosimPro ya viene equipado de serie con un conjunto de bibliotecas de componentes de muy diversos tipos (mecánicos, hidráulicos, eléctricos, control, ...), que se pueden usar para modelar cualquier tipo de sistema, aunque en este trabajo se desarrollará una biblioteca propia de componentes sobre el sistema de calefacción y ACS.

Las grandes ventajas de EcosimPro de cara al modelado y simulación de un sistema residen en su gran potencia de cálculo, y su gran capacidad de manipulación matemática.

EcosimPro es capaz de realizar la manipulación matemática del modelo simbólico de forma automática para generar las ecuaciones y relaciones necesarias para resolver el sistema, lo cual ahorra al usuario la necesidad de realizar dicha manipulación matemática del modelo manualmente, que en modelos a gran escala es casi imposible, y la necesidad de rehacerlo cada vez que se modifique algo en el modelo o en los experimentos que se realicen.¹

Por estos motivos se ha seleccionado este software para desarrollar los modelos de simulación de los distintos componentes de la instalación, y para el diseño y realización de los experimentos.

A la hora de aprender a utilizar el software EcosimPro ha sido de especial utilidad la referencia bibliográfica [17].

3.5. Metodología de modelado y simulación de sistemas

A la hora de realizar un proyecto de modelado y simulación de un sistema, es necesario seguir una serie de pasos y avanzar de forma organizada.

Por lo general, se puede hablar de los siguientes pasos o etapas:

¹Información extraída de [16].

1. **Definición del problema:** Consiste en definir claramente por qué se estudia el sistema y qué objetivos se persiguen con ello. En el caso de este trabajo se pretende desarrollar una biblioteca con los componentes necesarios para modelar un sistema de calefacción comunitaria real, que permitirá realizar cálculos y experimentos sin necesidad de alterar el sistema real o su funcionamiento.
2. **Planificación del proyecto:** el objetivo de este apartado es estimar qué recursos serán necesarios para llevar a cabo el estudio (dinero, personal, hardware, software...). En este trabajo vamos a necesitar un ordenador, una licencia del software EcosimPro, y permisos para acceder puntualmente a la salda de calderas del edificio y a la documentación existente sobre el mismo.
3. **Definición del sistema:** Debe especificarse qué aspectos de la realidad constituyen el sistema bajo estudio. En mi caso, voy a analizar tan sólo lo relativo al comportamiento térmico e hidráulico general del sistema, sin profundizar en aspectos constructivos ni en fenómenos puntuales o la posibilidad de fallos.
4. **Formulación conceptual del modelo:** Desarrollo de un modelo preliminar en el que se definen los componentes, variables descriptivas e interacciones que constituyen el modelo del sistema. Antes de diseñar cada componente, se ha generado un borrador enumerando las variables de interés en ese componente y cómo se relacionan, así como distintas ecuaciones con distinto grado de detalle sobre el comportamiento del sistema, para valorar la opción más adecuada del conjunto antes de escribir el modelo en EcosimPro.
5. **Diseño preliminar del experimento:** Definición de cuál será la actuación sobre el modelo y cómo se va a medir su comportamiento. Se definirá cuáles serán las entradas y cuáles las salidas, qué medidas se van a tomar. En este trabajo se realizarán una serie de experimentos para observar el comportamiento de distintos elementos y variables en cada caso.
6. **Preparación de los datos de entrada:** El procedimiento que se seguirá para asignar valores a las entradas durante la simulación. En los experimentos que se realizarán en este trabajo, las ecuaciones o expresiones que definirán las entradas del sistema de definirán en los ficheros de experimentos, pudiendo ser valores constantes (y ver la evolución natural del sistema sin alterar las condiciones), o podrían variarse por medio de expresiones o ecuaciones matemáticas que definan su evolución.
7. **Traducción del modelo:** Descripción de los elementos del modelo y su funcionamiento empleando el lenguaje de simulación, de modo que se pueda ejecutar la simulación. El lenguaje variará según el software que utilicemos. En el caso de este trabajo, como utilizamos EcosimPro, el lenguaje es EL.
8. **Verificación y validación:** Se trata de estudiar si los modelos de los elementos o sistemas se comportan como debieran y si la salida del modelo es creíble o la esperable en base al conocimiento sobre el sistema. Esto se ha realizado, en cada simulación, verificando que el comportamiento de los elementos es el esperado.
9. **Diseño experimental final:** Se diseña el experimento que proporcione la información necesaria para responder a las preguntas planteadas en el estudio. En este trabajo se realizan distintos experimentos, por una parte para verificar que se pueden realizar modelos con distinto grado de precisión, y para realizar un análisis comparativo entre distintas técnicas de control y tratar de ver cuál es la mejor alternativa. También se observará el detalle del funcionamiento del control de calderas.

10. **Experimentación:** Realización de los experimentos de simulación diseñados anteriormente.
11. **Análisis e interpretación:** Obtención de las conclusiones de los experimentos a partir de los datos obtenidos de la simulación de los mismos. Obtención de las respuestas que se buscaban, y comentario de fenómenos adicionales observados.
12. **Implementación y documentación:** Una vez obtenidos los resultados y las conclusiones, se deben presentar adecuadamente, acompañadas de los resultados y justificaciones oportunas. El modelo debe ser documentado y preparado para poder realizar nuevos estudios. En este trabajo se trata de explicar y presentar toda la información de los modelos desarrollados, así como sus resultados y funcionamientos en experimentación, para que puedan ser reutilizados posteriormente.

Capítulo 4

Desarrollo de la biblioteca de componentes

4.1. Creación de una biblioteca de componentes en EcosimPro

EcosimPro permite ordenar los distintos componentes, funciones y elementos que se diseñen en bibliotecas, de modo que es muy sencillo organizarlos. Esto es algo muy importante de cara al modelado y la simulación de grandes y complejos sistemas. En este apartado se verá como se han creado las bibliotecas de componentes y de experimentos que se usarán en el desarrollo del trabajo. Más adelante, se profundizará sobre el modelado y las propiedades de cada elemento.

Para crear una nueva Biblioteca tendremos que ir a *File – New – Library* y allí nos pedirá el nombre de la nueva biblioteca , y datos opcionales como el autor, la versión o una pequeña descripción.

Una vez creada, podremos comenzar a crear los ficheros dónde se realizarán la descripciones de nuestros componentes.

En este caso se van a crear 2 ficheros inicialmente:

- *port.el*: Donde se realizarán las descripciones de los tipos de puertos que vayamos a usar (en este caso sólo el puerto fluido, que se verá más adelante)
- *Componentes.el*: Donde se realizarán las descripciones de los elementos básicos que se usarán para crear distintos modelos del sistema para simular con él.

En el fichero de componentes se van a incluir otras bibliotecas propias de EcosimPro, porque se hará uso de alguno de sus elementos o funciones. Se hace con las siguientes líneas, que se ponen al principio del fichero:

```
USE PORTS_LIB VERSION "1.1.4"  
USE MATH VERSION "3.2.5"  
USE CONTROL VERSION "4.0.7"
```

Si durante el desarrollo de los modelos matemáticos de los componentes necesitáramos describir alguna función matemática, sería recomendable hacerlo en otro fichero particular denominado *Funciones.el*, para tenerlo todo bien organizado.

Si la biblioteca fuera muy grande y tuviera muchos componentes e incluso subsistemas comunes a varios componentes, también sería recomendable crear varios ficheros EL distintos para mantener el orden y la limpieza en el diseño de la biblioteca, lo cual facilitará su uso y su mantenimiento en el futuro, para desarrollos o trabajos futuros.

4.2. Puerto fluido

La mayor parte de los elementos de las simulaciones usarán al menos un puerto fluido, que será el encargado de simular las conexiones del sistema hidráulico entre los elementos. Es decir, se trata de los puntos de conexión de las tuberías del agua del sistema, para unir los diferentes componentes de la instalación.

El puerto lo definiremos en el fichero «Port.el», mencionado anteriormente. En él definiremos este puerto fluido, y podríamos definir otros tipos de puertos si fuera necesario en el futuro.

Para definir el puerto, debemos se declaran las variables correspondientes a las propiedades del fluido, para que de este modo se puedan conectar los distintos elementos en los modelos y simulaciones de todos los componentes.

Además, hay que definir la relación que puede existir en los distintos tipos de conexión.

Las principales propiedades del fluido que debemos representar son:

- La presión (P)
- El caudal (F)
- La temperatura (T)

Para la correcta definición del comportamiento de las conexiones entre elementos, además de las anteriores, debemos representar:

- La entalpía (h)
- El flujo energético (wh)

Todas las variables son de tipo *real*, pero además, algunas de ellas presentan particularidades:

1. Todos los puertos conectados al mismo nodo, deben tener la misma presión, por lo que la presión será una variable de tipo «*EQUAL*».
2. La suma de todos los caudales entrantes a un nodo debe ser igual a la suma de todos los caudales salientes. Por este motivo, el caudal es una variable de tipo «*SUM*».

3. Además, suponemos que todos los aportes de fluido que se realizan al mismo nodo se mezclan perfectamente, y por tanto se homogeneiza su temperatura, de modo que todos los puertos que tomen fluido de un mismo nodo la tomarán a la misma temperatura (esto significa que la temperatura es de tipo «*EQUAL OUT*»).
4. Para poder realizar esa mezcla homogénea de temperaturas, es por lo que era necesario tener en cuenta la entalpía del fluido y el flujo energético. La entalpía del fluido será igual a su calor específico por su temperatura. La entalpía no tiene trato especial. Es una variable *real* a secas.
5. El flujo energético en cambio obedece a las leyes de conservación de energía, y eso significa que todo el flujo energético de entrada, debe ser igual al flujo energético de salida (ya que en las conexiones de nodos ni se genera, ni se almacena ni se destruye energía), por lo que el flujo energético es tipo «*SUM IN*». El flujo energético se calcula como la entalpía por el caudal y por la densidad del fluido.

Las ecuaciones de la entalpía y del flujo energético son de tipo continuo.

De este modo, la definición de los puertos fluidos que se usarán posteriormente en el resto de componentes es:

```
-- Global constants
CONST REAL cp = 4186. UNITS "J/kg K" "Calor específico del agua"
CONST REAL d = 1000. UNITS "kg/m^3" "Densidad"

PORT fluid_port
  //Declaración de variables

  //La presión es igual para todos los terminales
  //conectados al mismo nodo.
  EQUAL REAL P UNITS "N/m^2" "Presion"

  //La suma de todos los caudales entrantes
  //debe ser igual a la suma de todos los caudales salientes
  SUM REAL F UNITS "m^3/s" "Caudal"

  EQUAL OUT REAL T UNITS "°C" "Temperatura"

  REAL h UNITS "J/kg" "Enthalpy"
  SUM IN REAL wh UNITS "W" "Energy flow"

CONTINUOUS
  -- Enthalpy
  h = cp * T
  -- Energy flow
  wh = d * F * h

END PORT
```

4.3. Definiciones previas del fichero «Componentes.el»

A partir de este punto, se van a exponer los modelos de los distintos elementos del sistema, que se definirán todos en el fichero «Componentes.el».

En la cabecera del fichero, declaramos una serie de variables globales que se usarán a lo largo del mismo, en la definición del modelo de los distintos componentes:

```
-- Libraries
USE PORTS_LIB VERSION "1.1.4"
USE MATH VERSION "3.2.5"
USE CONTROL VERSION "4.0.7"

-- Definiciones de datos y parámetros globales
REAL Text = 11          UNITS "°C"          "Temperatura Exterior"

CONST REAL rho = 1000   UNITS "kg/m^3"      "Densidad del agua"
CONST REAL Ce = 4186    UNITS "J/(kg·K)"    "Calor específico"
CONST REAL hg = 50.125  UNITS "J/kg"        "Calor de combustión"
//Calculado como la división de los 802 kJ/mol entre los 16g/mol del metano.
CONST REAL g = 9.81     UNITS "m/s^2"       "Gravedad"
CONST REAL rho_aire = 1.225 UNITS "kg/m^3"   "Densidad del aire"
CONST REAL Ce_aire = 1012 UNITS "J/(kg·K)"   "Calor específico del aire"
CONST REAL pi = 3.14159265359

CONST INTEGER Segm_Edificio = 20
CONST INTEGER Segm_Interc = 20
CONST INTEGER Segm_Tuberia = 20
```

Estas tres últimas líneas son las que se usan para indicar cuántos segmentos se usarán en los modelos de parámetros distribuidos de las viviendas, los intercambiadores de calor y las tuberías, respectivamente.

4.4. Bombas centrífugas

Las bombas centrífugas del sistema se modelan de forma sencilla, pero con datos reales muy precisos aportados por el fabricante. Las bombas se caracterizan o bien por una aproximación con una curva característica parabólica con los parámetros de la altura máxima de columna de agua, mca, (presión máxima) y por el caudal máximo, o bien como haremos nosotros, por medio de la toma e interpolación de distintos puntos de la curva característica real de las bombas, obtenidas de los datos del fabricante.

Las bombas tienen dos puertos fluidos: una entrada (IN) y una salida (OUT). El caudal y la temperatura de entrada son los mismos que los de salida. Sin embargo, la presión experimenta un aumento.

Como se ha dicho, tenemos varias opciones para modelar el incremento de la presión que se produce en una bomba centrífuga. La más sencilla es suponer que la curva característica de la bomba (dónde normalmente se representa la altura de columna de agua de presión frente al caudal) responde a una parábola perfecta, con el vértice (el punto de máxima altura) para un caudal igual a 0 m³/h, es decir, sobre el eje vertical, y las ramas hacia abajo.

De esta forma se puede caracterizar una bomba por medio de dos puntos característicos: la presión máxima, H_{max} (normalmente expresada en *mca* -metros de columna de agua-) y el caudal máximo F_{max} (normalmente en m³/h). La presión máxima se da para un caudal de 0 m³/h, y el caudal máximo se da para una presión de 0 mca.

Con esos dos datos, podemos calcular la ecuación de la parábola de la curva característica de la bomba sin más que operar y despejar en la ecuación de una parábola:

$$y = Ax^2 + Bx + C \quad (4.4.1)$$

Que siguiendo con el esquema de la gráfica de curva característica, tomaría la forma de :

$$H = AF^2 + BF + C \quad (4.4.2)$$

Como H_{max} se da para $F = 0$, y F_{max} se da para $H = 0$, entonces:

$$H_{max} = C \quad (4.4.3)$$

$$B = 0 \quad (4.4.4)$$

$$F_{max} = \sqrt{\frac{-C}{A}} \quad (4.4.5)$$

O escrito de otra forma:

$$A = \frac{-C}{F_{max}^2} \quad (4.4.6)$$

$$B = 0 \quad (4.4.7)$$

$$C = H_{max} \quad (4.4.8)$$

Con estas ecuaciones, y con el dato del caudal que circula por la bomba, se podría calcular el incremento de presión en la misma por medio de la ecuación general:

$$H = AF^2 + C \quad (4.4.9)$$

Sin embargo, en este caso se posee información mucho más detallada y precisa de la curva característica de las bombas, por lo que podemos afinar aún más el modelo.

Dado que el fabricante nos proporciona las gráficas de las curvas características de las bombas, podemos tomar medidas de varios puntos a lo largo de la curva real. Posteriormente almacenaremos esos puntos en una matriz en EcosimPro, que usaremos para realizar una interpolación lineal (punto a punto) de la curva real, que será mucho más preciso que la aproximación a la parábola anterior.

Dado que EcosimPro tiene potencia de cálculo más que suficiente, seleccionamos este último método para modelar nuestras bombas de la forma más realista posible.

El proceso de obtención de estas tablas de puntos se detallará más adelante, en el apartado 5.1 en la página 65.

De este modo, para la bomba modelo Wilo TOP-S-65/13, se obtiene la tabla (5.1).

Para el modelo Wilo TOP-S-50/10, se obtiene la tabla (5.2).

Y para el modelo Wilo TOP-S-50/4, se obtiene la tabla (5.3).

Que introducimos en nuestro modelo de EcosimPro de forma similar a lo siguiente:

```
TABLE_1D H_F={{0,9,...,22.75,25}, --Q (m3/h)
             {4.5,4.25,...,1.5,0}} --H
```

Y posteriormente, realizamos la interpolación con la siguiente función:

```
H = linearInterp1D(H_F,Fh)
```

De este modo, el modelo completo de nuestras bombas, queda así:

```
COMPONENT Bomba
  PORTS
    //CONEXIONES
    IN fluid_port INPUT
    OUT fluid_port OUTPUT

  DATA
    //PARÁMETROS
    //REAL HO = 100    UNITS "m"      "Presión máxima"
    //REAL FO = 10    UNITS "m3/s"  "Caudal máximo"
    TABLE_1D H_F={{0,10,20,25,30,32.5,35,40,45,49}, --Q (m3/h)
                  {13,12,10.6,9.9,9,8,7.2,5.7,3.8,0}} --H
```

```

DECLS
  //VARIABLES
  REAL T UNITS "°C"      "Temperatura"
  REAL P UNITS "N/m^2"   "Aumento de Presión"
  REAL F UNITS "m^3/s"   "Caudal"
  REAL Fh UNITS "m^3/h"  "Caudal"
  REAL H UNITS "m"       "Aumento de Presión"

  //REAL A
  //REAL C

CONTINUOUS
  //Ecuaciones para ligar los puertos
  INPUT.F = OUTPUT.F
  INPUT.T = OUTPUT.T

  //Ecuaciones para ligar los puertos con el componente
  P = OUTPUT.P - INPUT.P      //Cuidado con el orden
  F = INPUT.F
  T = INPUT.T

  //Ecuaciones del componente
  Fh = F*3600      //Conversión de unidades de caudal m^3/h <=> m^3/s
  P = rho*g*H     //Conversión de unidades de presión m <=> Pa

  //A = -C/F0**2
  //C = H0
  //H = A*F**2 + C

  H= linearInterp1D(H_F,Fh)

END COMPONENT

```

Aunque en esta definición del modelo de la bomba ya se está dando un valor a la tabla de la curva característica, eso será tan solo el valor por defecto. Se puede cambiar luego en cada componente que utilicemos, para poner a cada bomba los datos que correspondan.

Si en lugar del modelo con la tabla de los puntos precisos de la curva real quisiéramos modelar la bomba con la altura máxima de la columna de agua y el cauda máximo, tan sólo habría que cambiar el apartado DATA, dónde se definen los parámetros del componente a lo siguiente:

```

DATA
  //PARÁMETROS
  REAL H0 = 10  UNITS "m"      "Presión máxima"
  REAL F0 = 1   UNITS "m^3/s"  "Caudal máximo"

```

De nuevo, esos valores serían los valores por defecto. Sería posible modificarlos en cada caso según corresponda.

En el apartado DECLS, añadiríamos las variables REAL A y REAL C, que están comentadas en el código anterior

Y en el apartado CONTINUOUS, cambiaríamos la interpolación lineal por:

```
A = -C/F0**2
C = H0
H = A*F**2 + C
```

Estas líneas ya están presentes en el modelo, pero están comentadas. Tan sólo habría que descomentarlas y comentar las que están en uso para cambiar de un tipo de caracterización al otro.

El símbolo diseñado para el componente «Bomba» se muestra en la figura 4.4.1.

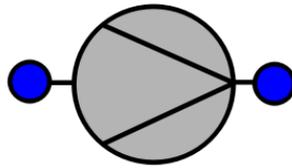


Figura 4.4.1: Símbolo del componente bomba

4.5. Válvulas

Las válvulas se usan para regular el funcionamiento del sistema. Son los elementos sobre los que actúan los distintos controladores para regular el flujo de agua en distintas partes del circuito.

Se caracterizan por su coeficiente C_v , que relacionará la pérdida de carga en la válvula con el caudal.

Se trata de un elemento de 2 puertos fluidos y un puerto de señal, que se utiliza para la regulación de apertura de la válvula.

La ecuación característica de una válvula podría considerarse alguna de estas dos:¹

$$F = C_v \cdot \text{ssqrt}(P) \quad (4.5.1)$$

$$F = C_v \cdot P \quad (4.5.2)$$

¹Datos obtenidos de [18, 19]

En la primera, la forma de la curva de la válvula sería parabólica, con las ramas hacia arriba. En la segunda, sería completamente lineal.

En la primera ecuación destaca el uso de una función un tanto particular. Se trata de la función matemática «*ssqrt()*», que calcula el valor de la raíz cuadrada con signo de lo que haya en el paréntesis. Básicamente, saca el signo fuera del cálculo de la raíz cuadrada. Es necesario su uso para que la válvula pueda admitir caudales en ambos sentidos, ya que en una válvula real es así y podría ocurrir durante una simulación. De lo contrario, si el sentido del flujo fuera el inverso al esperado en el diseño del componente, la caída de presión también sería negativa, y el modelo fallaría al intentar calcular la raíz cuadrada de un número negativo.

Normalmente la primera ecuación es más habitual, pero depende del tipo de válvula y de curva de carga real, ya que existen varios tipos, y aunque lo más habitual es una curva parabólica, también se pueden encontrar válvulas lineales. No obstante, la diferencia no es especialmente significativa en cuanto a la función y comportamiento en el sistema, y tampoco se tienen modelos realistas y precisos del sistema real, por lo que queda a decisión del diseñador elegir un modelo u otro para la simulación. Si se conociera el modelo exacto de las válvulas, podría acudirse a los datos del fabricante para tratar de obtener la máxima precisión en la caracterización del modelo de las válvulas.

En este caso, se elige la primera ecuación, a la que incorporamos la señal de control para controlar la apertura de la válvula de la siguiente forma:

$$F = Cv \cdot (u^2) \cdot \text{ssqrt}(P) \quad (4.5.3)$$

Además es necesario, de cara a que la simulación funcione correctamente, añadir una pequeña «dinámica ficticia» a la señal de control y a la caída de presión en la válvula. Esto es necesario porque si no, al generar el modelo matemático del conjunto del sistema hidráulico, se produciría un lazo algebraico que EcosimPro no sabría resolver, provocando errores en la simulación.

Las «dinámicas ficticias» se añaden como un sistema de primer orden con una constante de tiempo muy pequeña en comparación a la dinámica del resto del sistema. En este caso, se ha elegido una constante de tiempo de 1s. De esta forma se eliminan los lazos algebraicos, y si se tuvieran datos reales sobre las válvulas del sistema, se podría incluso modelar de esta forma la dinámica real de las mismas a la hora de modificar su grado de apertura.

De este modo, el modelo completo de la válvula, queda así:

```
COMPONENT Valvula
PORTS
  //CONEXIONES
  IN fluid_port INPUT
  OUT fluid_port OUTPUT

  IN analog_signal s_position "Input position signal"

DATA
  //PARÁMETROS
```

```

REAL Cv = 1

DECLS
//VARIABLES
REAL T      UNITS "°C"      "Temperatura"
REAL P      UNITS "N/m^2"   "Caída de Presión"
REAL F      UNITS "m^3/s"   "Caudal"
REAL Fh     UNITS "m^3/h"   "Caudal"
REAL u = 1
REAL u_set = 1

CONTINUOUS
//Ecuaciones para ligar los puertos
INPUT.F = OUTPUT.F
INPUT.T = OUTPUT.T

//Ecuaciones para ligar los puertos con el componente
P = INPUT.P - OUTPUT.P
F = INPUT.F
T = INPUT.T
u_set = s_position.signal[1]

//Ecuaciones del componente
F = Cv* (u**2) * ssqrt(P)

u' + u = u_set

Fh = F*3600

END COMPONENT

```

También existe un modelo de válvula fija (no regulada), que tendrá un determinado C_v constante, y ninguna señal de control. Se puede utilizar para representar válvulas manuales (no reguladas automáticamente) en el sistema, o el coeficiente C_v de algún tramo o elemento del circuito hidráulico.

Su modelo, muy parecido al anterior, es el siguiente:

```

COMPONENT Valvula_Fija
PORTS
//CONEXIONES
IN fluid_port INPUT
OUT fluid_port OUTPUT

DATA
//PARÁMETROS
REAL Cv = 1/2600000

```

```

DECLS
  //VARIABLES
  REAL T UNITS "°C"          "Temperatura"
  REAL P UNITS "N/m^2"      "Caída de Presión"
  REAL F UNITS "m^3/s"      "Caudal"
  REAL Fh UNITS "m^3/h"     "Caudal"

CONTINUOUS
  //Ecuaciones para ligar los puertos
  INPUT.F = OUTPUT.F
  INPUT.T = OUTPUT.T

  //Ecuaciones para ligar los puertos con el componente
  P = INPUT.P - OUTPUT.P
  F = INPUT.F
  T = INPUT.T

  //Ecuaciones del componente
  F = Cv * ssqrt(P)

  Fh = F*3600

END COMPONENT

```

Los símbolos de las válvulas se muestran en la figura 4.5.1.



A la izquierda, símbolo de las válvulas regulables, a la derecha, símbolo de las válvulas fijas

Figura 4.5.1: Símbolos de las válvulas

4.6. Caldera

La caldera es el elemento encargado de transformar la energía química procedente del gas natural en energía térmica para su aprovechamiento en el sistema.

Las calderas tienen 2 puertos fluidos (uno de entrada y otro de salida) y dos puertos de señal: uno de salida, para la señal de la temperatura del agua a la salida de la caldera, y otro de entrada para la señal de control de la potencia de funcionamiento de la caldera.

Se caracterizan por su potencia máxima, rendimiento (η) y coeficiente de pérdidas de carga C_v .

La caldera funciona como un elemento que aporta una energía al fluido. No se considera necesario para las simulaciones que se desarrollarán en este trabajo entrar en detalles sobre el funcionamiento interno de la caldera, y por ello, se modela directamente ese aporte de energía al fluido en un sencillo balance de energía:

$$Q_{in} + Q_{gas} = Q_{out} \quad (4.6.1)$$

$$Q_{in} = \rho \cdot F \cdot c_e \cdot T_{in} \quad (4.6.2)$$

$$Q_{out} = \rho \cdot F \cdot c_e \cdot T_{out} \quad (4.6.3)$$

Dónde ρ es la densidad del fluido (en este caso como es agua, se toman $1000\text{kg}/\text{m}^3$), F es el caudal (en m^3/s), c_e es el calor específico del fluido (en este caso, $4180\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) y T_{in} y T_{out} son las temperaturas en $^{\circ}\text{C}$ del fluido a la entrada y a la salida de la caldera respectivamente.

La variable Q_{gas} es la que se controla mediante la señal de entrada de control, que puede tener un valor entre 0 y 1, y se multiplica por la potencia máxima de la caldera, $Q_{gas_{max}}$. Además, se incorpora una pequeña dinámica al sistema, que le aporta la capacidad de evitar problemas cuando se produce un cambio en el valor de la señal de control, y nos permitiría modelar con más detalle la dinámica real de la caldera si tuviéramos datos para ajustar la constante de tiempo del sistema de primer orden que se ha elegido con el fin de representar los tiempos de calentamiento y enfriamiento de la caldera:

$$0,01 \cdot Q'_{gas} + Q_{gas} = Q_{Gas_{max}} \cdot \eta \cdot u \quad (4.6.4)$$

Dónde η es el rendimiento de la caldera, y u es la señal de control.

Además, se considera una caída de presión en la caldera proporcional al caudal que la atraviesa, es decir, siguiendo la ecuación lineal que se describía en el apartado de las válvulas (Ecuación 4.5.2 en la página 36).

En el modelo de las calderas, se han incluido una serie de variables para contabilizar la energía que se aportará al sistema y la cantidad de gas que se consumirá (en kg).

De este modo, el modelo completo de la caldera, es el siguiente:

```

COMPONENT Caldera
  PORTS
    //CONEXIONES
    IN fluid_port INPUT
    OUT fluid_port OUTPUT

    OUT analog_signal (n = 1) s_Tout "Temperatura de Salida"(2)

```

²En este caso, el parámetro «n=1» es un parámetro de construcción del puerto analógico, que nos indica el número de señales de salida que tiene. No tiene nada que ver con el resto del modelo del componente. No debe confundirse con el rendimiento de la caldera.

```

IN analog_signal s_u "Señal de control"

DATA
//PARÁMETROS
REAL QGas_max = 1500000 UNITS "W"      "Potencia"
REAL Cv = 1 //Para las pérdidas de carga en la caldera
REAL n = 1          UNITS "" "Rendimiento"

DECLS
//VARIABLES
REAL Tin           UNITS "°C"         "Temperatura"
REAL Tout          UNITS "°C"         "Temperatura"
REAL P             UNITS "N/m^2"      "Caida de Presion"
REAL F             UNITS "m^3/s"      "Caudal"
REAL Fh            UNITS "m^3/h"      "Caudal"

REAL Qin           UNITS "W"          "Potencia en entrada"
REAL Qout          UNITS "W"          "Potencia en salida"

REAL QGas = 0      UNITS "W"          "Potencia de gas"
REAL E = 0         UNITS "J"          "Energía"
REAL Emwh = 0     UNITS "MWh"         "Energía"

REAL WGas          UNITS "kg"         "Masa de Gas Natural consumida"

REAL u = 0
//Variable de control de la potencia de la caldera. Rango posible [0, 1]

CONTINUOUS
//Ecuaciones para ligar los puertos
INPUT.F = OUTPUT.F

//Ecuaciones para ligar los puertos con el componente
P = INPUT.P - OUTPUT.P
F = INPUT.F
Tin = INPUT.T
Tout = OUTPUT.T
u = s_u.signal[1]
s_Tout.signal[1] = Tout

//Ecuaciones del componente

//Caida de presion en la caldera
F = Cv * P
Fh = F*3600

//Balance de energía
Qin + QGas = Qout
Qin = rho*F*Ce*Tin

```

```

Qout = rho*F*Ce*Tout

0.001*QGas' + QGas = QGas_max * n * u

//Contaje de energía
E' = QGas
Emwh = E/(1000000*3600)

WGas = E/(hg*n)

```

END COMPONENT

El símbolo asociado a las calderas se muestra en la figura 4.6.1.

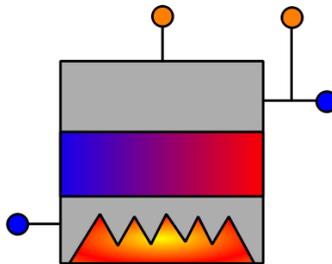


Figura 4.6.1: Símbolo de las calderas

4.7. Depósito

Aunque en la instalación no hay ningún depósito como tal (salvo los intercambiadores de calor con depósito del ACS, que se modelarán más adelante), es posible que en algunas ocasiones sea necesario incluir un depósito en el modelo de algún sistema para modelar algún retraso o alguna dinámica real del sistema que no esté presente en el modelo del resto de componentes, especialmente a la hora de hacer alguna simplificación de las instalaciones.

Podría ser el caso de algún punto de la instalación dónde haya cierta acumulación de fluido en las conducciones con un volumen tal que fuera necesario ser tenido en cuenta en la simulación.

Aunque no tenga función específica en este sistema, se considera un elemento bastante frecuente en este tipo de instalaciones, y por eso se ha decidido incluir su modelo.

El modelo del depósito tiene como parámetro únicamente su capacidad, y se presupone, por la naturaleza de este tipo de instalaciones, que está siempre lleno. Posee dos puertos fluidos, uno de entrada y otro de salida. Se trata, por tanto, de un depósito cerrado en que el caudal de entrada es el mismo que el caudal de salida.

Se supone que en el depósito se produce una mezcla perfectamente homogénea del fluido que entra con el resto de fluido en el interior del depósito.

Su evolución se rige según la siguiente ecuación:

$$T'_{out} = \frac{(T_{in} - T_{out}) \cdot F}{Capacidad} \quad (4.7.1)$$

Dado que el depósito tiene el mismo comportamiento hidráulico que un segmento de tubería de una sección muy grande, se aproxima que no tendrá ninguna caída de presión en su interior, ya que la caída de presión que puede haber en un depósito de este tipo será completamente insignificante comparado con lo que pueda encontrarse en el resto del circuito y de los elementos.

El modelo completo del depósito queda así:

```

COMPONENT deposito
  PORTS
    //CONEXIONES
    IN fluid_port INPUT
    OUT fluid_port OUTPUT

  DATA
    //PARÁMETROS
    REAL Capacidad = 1    UNITS "m^3"    "Capacidad"

  DECLS
    //VARIABLES
    REAL Tin              UNITS "°C"      "Temperatura a la entrada"
    REAL Tout             UNITS "°C"      "Temperatura a la salida"
    REAL F                UNITS "m^3/s"   "Caudal"
    REAL Fh               UNITS "m^3/h"   "Caudal"

  CONTINUOUS
    //Ecuaciones para ligar los puertos
    INPUT.F = OUTPUT.F
    INPUT.P = OUTPUT.P

    //Ecuaciones para ligar los puertos con el componente
    F = INPUT.F
    Tin = INPUT.T
    Tout = OUTPUT.T

    //Ecuaciones del componente
    Fh = F*3600
    Tout' = (Tin-Tout)*F/Capacidad
END COMPONENT

```

El símbolo asociado al depósito se muestra en la figura 4.7.1.

4.8. Viviendas

El modelo de las viviendas, de cara al consumo de calefacción, se realiza con un único elemento llamado «Viviendas», con dos puertos fluidos, y uno de salida de señal (que será la temperatura

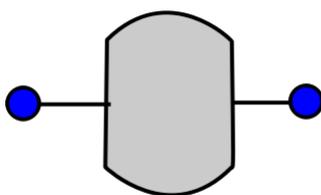


Figura 4.7.1: Símbolo del componente depósito

de las viviendas) y cuyos parámetros son:

- C_v : Para definir las pérdidas hidráulicas (caída de presión) en las viviendas.
- KS_{pared} : Para definir las pérdidas térmicas a través de las paredes de la vivienda al exterior.
- $Krad$: Para definir el aporte térmico de los radiadores de la vivienda.
- N : Para indicar el número de viviendas en el bloque «Viviendas».
- S_v : Para definir la superficie de las viviendas.
- CT_v : Para definir la capacidad térmica por vivienda.
- V_r : Para definir el volumen de agua contenido en el circuito de los radiadores de la vivienda.

Se supone que todas las viviendas definidas en un mismo componente «Viviendas» son idénticas y se rigen por los mismos parámetros.

En el modelo de las viviendas se tienen en cuenta las caídas de presión del circuito de radiadores de todas las viviendas, según la ecuación 4.5.2, pero con la particularidad de que hay que tener en cuenta el número de viviendas, por lo que en este caso se transforma en:

$$P = F \cdot \frac{C_v}{N} \quad (4.8.1)$$

Dado que la conexión de todos los circuitos de calefacción de las viviendas van en paralelo respecto de las mismas ramas de distribución, el hecho de que haya varias viviendas supone, de forma global, una menor caída de presión para el mismo caudal.

El modelado térmico de las viviendas es el más complejo de todo el sistema.

Una vivienda, desde el punto de vista térmico, es básicamente un intercambiador de calor, en el que un medio primario (el circuito de radiadores), aporta energía a un medio secundario (la vivienda), y dónde además existen unas pérdidas al exterior a través de las paredes.

Para modelar las pérdidas de la vivienda al exterior a través de las paredes, basta con tener en cuenta que esas pérdidas serán directamente proporcionales a la diferencia de temperaturas entre el interior y el exterior de la vivienda, a la superficie de contacto, y a un coeficiente de

conductividad térmica. En nuestro caso, hemos juntado en un mismo parámetro el coeficiente de conductividad y la superficie de contacto, en el parámetro K_{Spared} . Además, la temperatura de la vivienda se supone homogénea a lo largo de toda la superficie de contacto, igual que la temperatura exterior. De esta forma, la ecuación que describe las pérdidas térmicas a través de la pared al exterior de todo el bloque «Viviendas» es:

$$Q_{pérdidas} = N \cdot K_{Spared} \cdot (T_v - T_{ext}) \quad (4.8.2)$$

En el modelo de las viviendas, como en las calderas, se han incluido una serie de variables para contabilizar la energía aportada por el sistema de calefacción. Pero además, se han incluido dos cálculos diferentes de la misma:

1. **Desde el punto de vista del contador:** mide la temperatura de entrada del agua a las viviendas, la temperatura de salida, y el caudal. Con esos datos y la densidad del agua y el calor específico, calcula la potencia que se está aportando al sistema, e integrando, la energía. De esta forma, se obtiene el mismo cálculo que realiza el contador de calefacción de las viviendas. Realmente está midiendo la cantidad de energía que se aporta al circuito de radiadores.
2. **Desde el punto de vista de la vivienda:** se suman los calores que aportan todos los segmentos del sistema de parámetros distribuidos con el que se modela el circuito de radiadores. Con eso se obtiene la potencia instantánea real que aporta el sistema de calefacción a la vivienda. Integrando, se calcula la energía total.

La diferencia entre ambos puntos de vista es, principalmente, que existe un desfase entre uno y otro. Esto es debido a que la energía que contiene el fluido que entra a la vivienda, tarda un tiempo en ceder su calor a la vivienda realmente. Pero el principal desfase de se debe a los transitorios en los que se enciende la calefacción (y se abre la válvula de entrada a las viviendas), que primero deben calentarse los radiadores, y cuando se apaga, y los radiadores se enfrían. Esto se verá y se explicará con más detalle en los experimentos que se realizarán posteriormente con el sistema.

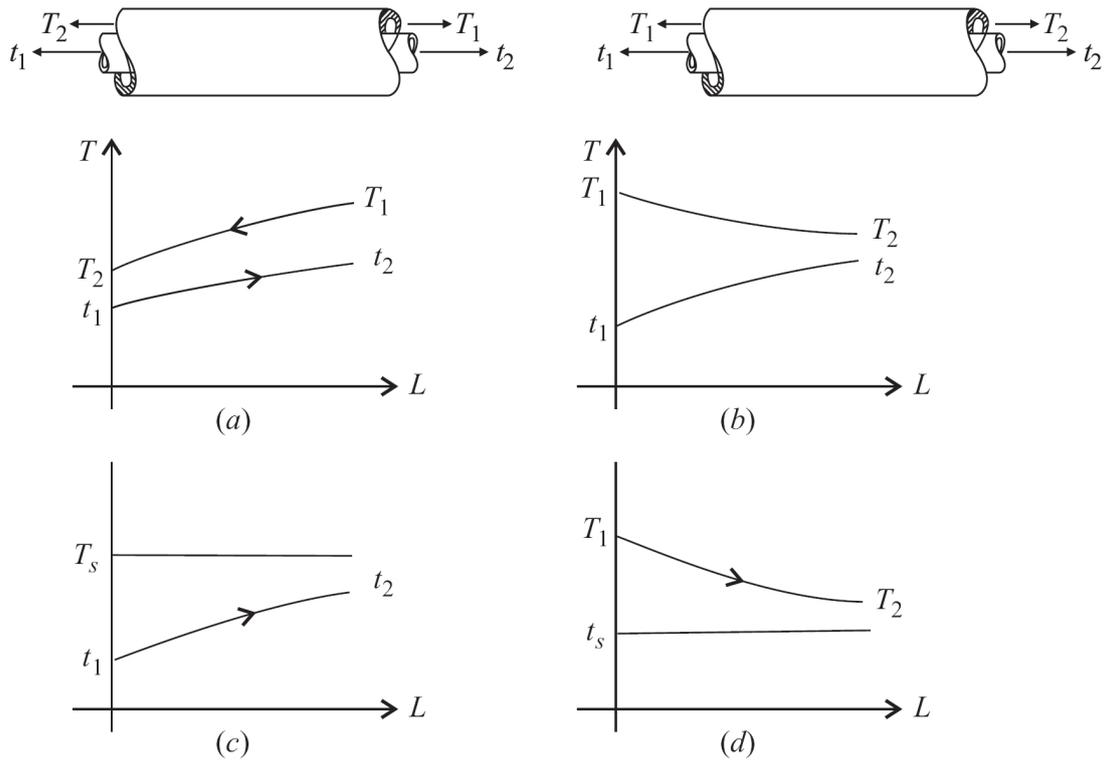
Para realizar un modelo verdaderamente aproximado a la realidad del intercambiador de calor que supone el circuito de radiadores y la vivienda, es necesario considerar un modelo algo complejo, ya que la temperatura a lo largo del circuito de radiadores no permanece constante, como sí ocurre con las pérdidas a través de la pared descritas antes.

En este punto, tenemos dos opciones:

4.8.1. Diferencia de temperaturas media logarítmica

La primera es modelar el sistema como una aproximación en la que el calor intercambiado es proporcional a la diferencias de temperaturas media logarítmica (LMTD), con la temperatura de entrada a los radiadores, la de salida, y la temperatura de la vivienda.

Existen varias ecuaciones para modelar la LMTD, en función de cómo sea el intercambiador. En este caso, tenemos que la temperatura de los radiadores (medio primario) va disminuyendo a lo



(a) Contraflujo; (b) flujo paralelo; (c) fuente con temperatura constante y receptor con incremento de temperatura; (d) temperatura constante en el receptor y fuente con temperatura en decremento.

Figura 4.8.1: Cuatro tipos de perfiles de temperatura en un intercambiador de calor

largo del circuito, y la temperatura de la vivienda es perfectamente homogénea y constante a lo largo de todo el recorrido del circuito de radiadores. De este modo, la ecuación que nos interesa, es la siguiente:³

$$LMTD = \frac{T_1 - T_2}{\ln \left(\frac{T_1 - t_s}{T_2 - t_s} \right)} \quad (4.8.3)$$

Dónde T_1 y T_2 son las temperaturas de entrada y salida del circuito primario (en este caso, del circuito de radiadores), respectivamente, y t_s es la temperatura del medio secundario (en este caso, la vivienda).

Sin embargo este método tiene varios problemas. El principal inconveniente es un problema matemático, ya que el logaritmo no está definido para 0 o para números negativos, lo que podría suponer problemas durante la simulación si las diferencias de temperaturas entre el circuito de radiadores y la vivienda se hiciera pequeño, o si en algún momento cambiara de signo y se hiciera negativa.

Además, con ese dato podríamos calcular fácilmente la potencia térmica que se transfiere cuando el sistema está en funcionamiento, pero sería muy complicado simular el enfriamiento de los

³Información extraída de [20]

radiadores cuando se apaga la calefacción, hasta que se igualen las temperaturas de las viviendas y los radiadores (y cuando estén próximas dichas temperaturas, surgiría además el problema matemático mencionado anteriormente), así como también sería difícil ver la dinámica en el encendido y desplazamiento del volumen de agua «fría» de los radiadores por el nuevo agua caliente que entra desde la distribución de calefacción.

Es por esto que lo mejor es definir un modelo más detallado del sistema, dado que EcosimPro tiene potencia de cálculo más que suficiente para llevarlo a cabo.

4.8.2. Sistema de parámetros distribuidos

Lo ideal sería desarrollar un sistema en derivadas parciales para describir perfectamente y de forma totalmente precisa la evolución del sistema no sólo a lo largo del tiempo, sino también a lo largo del recorrido del circuito de radiadores (ya que como hemos dicho, la temperatura se va reduciendo a lo largo del recorrido del circuito, y con ello, el aporte calorífico por unidad de longitud, o por elemento de radiador).

Sin embargo, EcosimPro no permite actualmente introducir ecuaciones diferenciales en derivadas parciales, por lo que me veo obligado a definir un sistema de parámetros distribuidos.

Esencialmente, el sistema de parámetros distribuidos consistirá en dividir el circuito de calefacción en un determinado número de segmentos iguales, cada uno de los cuales es considerado como perfectamente homogéneo, y conectado con el elemento anterior y con el siguiente, salvo el primero y el último, que estarán conectados con los puertos de entrada y salida, respectivamente.

Cada segmento se considera homogéneo, y todos están gobernados por las mismas ecuaciones para describir su comportamiento.

Cada segmento tendrá una cantidad de agua (como un pequeño depósito) que será la del volumen de todo el circuito dividido entre el número de segmentos; tendrá una entrada de agua desde el elemento anterior (o desde el puerto de entrada al componente, en el caso del primer elemento), que entrará con la temperatura de ese elemento anterior; tendrá una salida de agua, por dónde circulará el mismo caudal que en la entrada, pero por dónde el agua saldrá con la temperatura homogénea del segmento actual, hacia el siguiente segmento o hacia el puerto de salida en el último segmento.

A su vez, cada segmento hará un aporte de energía a la vivienda, que será proporcional a la diferencia de temperaturas entre la temperatura homogénea del segmento y la temperatura de la vivienda, y a una constante de proporcionalidad, que será el coeficiente global Krad, dividido entre el número de segmentos. Todos los segmentos tienen la misma constante de proporcionalidad.

De este modo, nos queda que las ecuaciones que describen el sistema de parámetros distribuidos son:

$$T[i]' = \frac{F}{N} \cdot \frac{(T[i-1] - T[i])}{V_i} - \frac{Q[i]}{(\rho \cdot Ce \cdot Vi)} \quad (4.8.4)$$

$$Q[i] = \frac{Krad}{Segm} \cdot (T[i] - T_v) \quad (4.8.5)$$

A excepción del primer elemento, donde $T[i - 1]$ se sustituye por la temperatura del puerto de entrada, T_{in} .

Dónde $T[x]$ es la temperatura (homogénea) del segmento x , V_i es el volumen de cada segmento, $Q[x]$ es el calor que transfiere el segmento x a la vivienda, ρ es la densidad del fluido, C_e es el calor específico, T_v es la temperatura de la vivienda y $Segm$ es el número de segmentos. Como F es el caudal de todo el conjunto «Viviendas», hay que dividirlo entre el número de viviendas, N , para calcular el caudal por cada vivienda.

Además, la potencia térmica total transferida a la vivienda puede calcularse como el sumatorio de la potencia transferida por todos los segmentos.

$$Q_{tot} = \sum Q_{[i]} \quad (4.8.6)$$

De esta forma, en cada segmento va disminuyendo la temperatura del fluido debido al aporte de energía que hace a la vivienda. Pero dicho aporte de energía individual sigue cumpliendo la ecuación de proporcionalidad sobre la diferencia de temperaturas de ese punto del circuito y la vivienda.

Si el número de segmentos fuera infinito, tendríamos el modelo exacto, correspondiente al sistema de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales. Con este modelo, podemos poner tantos segmentos como deseemos y cuantos más pongamos, más preciso será el resultado, pero debemos llegar a un compromiso entre la exactitud del modelo y la carga computacional que supondría a la simulación.

A partir de cierto número de segmentos, apenas se incrementa la precisión del sistema, dado que ya llega a un punto bastante exacto, pero la carga computacional sigue creciendo, por ello es importante determinar la precisión que se considera aceptable en la simulación que se quiera realizar y comprobar experimentalmente cuánto varía el resultado de una determinada simulación en función del número de segmentos que introduzcamos.

Además, con el número de segmentos también crece el número de ecuaciones de los modelos. La licencia de la que dispongo para realizar este trabajo tiene un límite de 1500 ecuaciones. Pueden parecer muchas, pero si realizo un modelo lo suficientemente complejo del sistema real, con varios elementos con modelos de parámetros distribuidos con un elevado número de segmentos, puede alcanzarse esa cifra fácilmente.

Con el modelo de parámetros distribuidos no tenemos ninguno de los problemas que había con la aproximación de la diferencia de temperaturas media logarítmica, ya que no existe ningún problema matemático, sea cual sea el sentido en que se transfiera la energía, el signo o la magnitud de la diferencia de temperaturas ni el problema del modelado del enfriamiento de los radiadores al apagar la calefacción (fenómeno que también está incluido en la descripción realizada en las ecuaciones 4.8.4 y 4.8.5).

Elegimos esta opción, y nos queda el siguiente modelo:

```

COMPONENT Viviendas
  PORTS
    //CONEXIONES
    IN fluid_port INPUT
    OUT fluid_port OUTPUT

    OUT analog_signal (n = 1) s_Tv "Temperatura de la vivienda"(4)

  DATA
    //PARÁMETROS
    REAL Cv = 1060000000 //Para las pérdidas de presión
    REAL KSpared = 303 UNITS "W/°C"
        "Pérdidas térmicas de las paredes de la vivienda"
    REAL Krad = 300 UNITS "W/°C"
        "Constante de transmisión de calor de los radiadores"
    REAL N = 1 UNITS "uds" "Numero de Viviendas"
    REAL Sv = 114 UNITS "m^2" "Superficie útil por vivienda"
    REAL CTv = 54372.8 UNITS "J/(°C·m^2)"
        "Capacidad térmica de la viviendas por m^2"
    REAL Vr = 0.025 UNITS "m^3" "Vol. de agua en los radiadores"

  DECLS
    //VARIABLES
    REAL Tin UNITS "°C" "Temperatura"
    REAL Tout UNITS "°C" "Temperatura"
    REAL P UNITS "N/m^2" "Caida de Presion"
    REAL F UNITS "m^3/s" "Caudal"
    REAL Fh UNITS "m^3/h" "Caudal"

    REAL QConsumo = 0 UNITS "W" "Potencia consumida por vivienda"
    REAL QConsumo_TOT = 0 UNITS "W" "Potencia consumida en todo el edificio"

    REAL Tv = 22 UNITS "°C" "Temperatura vivienda"

    REAL Vi
    REAL T[Segm_Edificio]
    REAL Q[Segm_Edificio]
    INTEGER i = 0

    REAL Ereal = 0 UNITS "J" "Energía"
    REAL Ereal_mwh = 0 UNITS "MWh" "Energía"

    REAL Qcont = 0 UNITS "W" "Potencia calefacción contador"
    REAL Econt = 0 UNITS "J" "Energía"
    REAL Econt_mwh = 0 UNITS "MWh" "Energía"

```

⁴En este caso, el parámetro «n=1» es un parámetro de construcción del puerto analógico, que nos indica el número de señales de salida que tiene. No tiene que ver con el resto del modelo del componente. No debe confundirse con el número de viviendas del componente.

```

INIT
  FOR( i IN 1,Segm_Edificio )
    -- Ta inicial del fluido
    T[i]= Tv
  END FOR

CONTINUOUS
  //Ecuaciones para ligar los puertos
  INPUT.F = OUTPUT.F

  //Ecuaciones para ligar los puertos con el componente
  P = INPUT.P - OUTPUT.P
  F = INPUT.F
  Tin = INPUT.T
  Tout = OUTPUT.T
  s_Tv.signal[1] = Tv

  //Ecuaciones del componente
  P = F * (Cv/N)    //Caida de presion en el edificio
  Fh = F*3600

  //Volumen de cada elemento del sistema de parámetros distribuidos:
  Vi = Vr/Segm_Edificio

  //Ecuaciones del primer elemento.
  T[1]' = (F/N*(Tin-T[1]))/Vi - Q[1]/(rho*Ce*Vi)
  Q[1] = Krad/Segm_Edificio*(T[1]-Tv)

  //Ecuaciones del resto de elementos.
  EXPAND_BLOCK (i IN 2, Segm_Edificio)
    T[i]' = (F/N*(T[i-1]-T[i]))/Vi - Q[i]/(rho*Ce*Vi)
    Q[i] = Krad/Segm_Edificio*(T[i]-Tv)
  END EXPAND_BLOCK

  //Conexión con la temperatura de salida.
  Tout = T[Segm_Edificio]
  //Contaje de consumo.
  SEQUENTIAL
    QConsumo=0
    FOR (i = 1 ; i<=Segm_Edificio ; i= i+1)
      QConsumo = QConsumo + Q[i]
    END FOR
  END SEQUENTIAL

  //El consumo total es el consumo de todo
  // el edificio (de todas las N viviendas).
  QConsumo_TOT = QConsumo*N

```

```

//Balance de energía de las viviendas, con el
//aporte de los radiadores, y las perdidas por las paredes
Tv' *N*Sv*CTv = N*QConsumo - N*KSpared*(Tv-Text) //+Qradiacion

//Contador de calefacción de las viviendas (individual):
Qcont = (Tin-Tout)*(F/N)*rho*Ce
Econt' = Qcont
Econt_mwh = Econt/(1000000*3600)

//Consumo real
Ereal' = QConsumo
Ereal_mwh = Ereal/(1000000*3600)

END COMPONENT

```

El símbolo asociado a las viviendas es el de la figura 4.8.2.

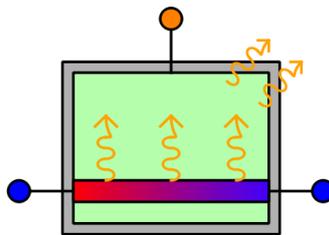


Figura 4.8.2: Símbolo del componente Viviendas

4.8.3. Notas adicionales sobre el modelado del edificio

En el caso del componente «viviendas» hay que hacer un par de comentarios adicionales.

Con un componente de tipo «Viviendas» es posible modelar una única vivienda o varias, en función del parámetro N (número de viviendas), pero todas las viviendas que se modelen juntas en un único componente de este tipo tendrán los mismos parámetros, las mismas propiedades, estarán conectadas exactamente en el mismo punto de la instalación, y evolucionarán de forma exactamente igual (misma temperatura, mismas pérdidas, mismos consumos, etc.). Es decir, no es posible individualizar el comportamiento o las características de cada vivienda dentro de un bloque «Viviendas».

Esto puede ser correcto para realizar una simplificación de la realidad, si lo que nos interesa es sólo ver el comportamiento general del sistema, en su punto de funcionamiento medio, sin entrar en el detalle de los retrasos o diferencias entre viviendas.

Sin embargo, si se desea será posible hacer esta individualización para poder ver el comportamiento vivienda a vivienda y caracterizar cada una con sus datos particulares, y obtener de esta forma un grado de detalle muchísimo mayor del sistema real por medio del **modelado modular del sistema**.

Esto se hará generando nuevos componentes de tipo «**Portal**», que se definirán gráficamente mediante la conexión de varias viviendas y otros elementos para representar de forma similar a la realidad cómo están conectadas en el sistema de verdad. Estos componentes de tipo «Portal» ya no serán «genéricos», en el sentido de que no serán los mismos componentes para cualquier instalación, sino que serán particulares para el sistema real sobre el que trata este trabajo, y habría que hacerlos a medida, de forma distinta para otro edificio u otro sistema.

Dado que estos componentes no son de tipo «genérico», sino que son componentes particulares de esta instalación en concreto, se verá cómo se han realizado en la parte de experimentación en la que se usen, porque es en ese punto cuando será necesario diseñarlos y crearlos a medida según la documentación existente sobre la instalación real.

Del mismo modo, se creará un componente «**Edificio**», también basado en el diseño modular, que recogerá la interconexión real de los distintos portales de viviendas del edificio.

De esta forma, será posible realizar un modelo verdaderamente detallado y exacto del sistema, llegando a poder detallar y observar el comportamiento de cada vivienda individualmente, de todas las viviendas del edificio. Y al mismo tiempo todo estará perfectamente ordenado y organizado, y el modelo será fácilmente accesible a cada uno de los elementos y variables.

4.9. Intercambiadores de ACS

Los intercambiadores de calor son los elementos encargados de transferir energía térmica desde el agua del circuito de las calderas al agua caliente sanitaria, que se almacena en ellos. Se trata de unos intercambiadores con un gran depósito y un serpentín.

Es decir, que en el componente «*Intercambiador*» hay dos circuitos hidráulicos diferentes, entre los que no hay intercambio de materia, pero sí de energía.

El modelo de los intercambiadores de ACS es muy similar al de las viviendas. En este caso, también se decide utilizar el modelo del sistema de parámetros distribuidos, ya que como ya se ha expuesto, presenta muchas ventajas sobre la aproximación de la LMTD.

En este caso, los parámetros que se usan para caracterizar el componente son:

- V_A (m^3): Volumen de agua en el serpentín.
- V_B (m^3): Volumen de agua en el depósito.
- K_{inter} ($W/^\circ C$): Coeficiente de transferencia térmica.
- Tabla H_F : Para las pérdidas de presión en el serpentín.
- K_{perd} ($W/^\circ C$): Coeficiente de pérdidas térmicas.

Como en el modelo de los depósitos, se presupone que en la parte del depósito no hay pérdidas de presión, y que es un depósito cerrado que está siempre lleno (y por tanto los caudales de entrada y de salida son iguales).

Este elemento tiene 4 puertos fluidos (dos de entrada y dos de salida), por tener dos circuitos hidráulicos. Además tiene un puerto salida de señal, para medir la temperatura a la que se encuentra el agua de los depósitos, es decir, el agua caliente sanitaria.

La caída de presión en el circuito primario (el serpentín) se modela en función de una tabla de puntos sacados de la curva proporcionada por el fabricante, igual que se hizo con las curvas de las bombas. Si no se dispusiera de una información tan detallada, se podrían aproximar por unas curvas de pérdidas parabólicas o lineales, según el detalle de la información disponible, con las ecuaciones 4.5.1 o 4.5.2 en la página 36 respectivamente.

El modelo del sistema de parámetros distribuidos del intercambiador es muy similar al de los radiadores de la vivienda:

$$T[i]' = \frac{F_A \cdot (T_A[i-1] - T_A[i])}{V_i} - \frac{Q_A[i]}{(\rho \cdot C_e \cdot V_i)} \quad (4.9.1)$$

$$Q[i] = \frac{K_{inter}}{Segm} \cdot (T_A[i] - T_B) \quad (4.9.2)$$

Como en las calderas o en las viviendas, se incorporan algunas variables y ecuaciones para contar la energía consumida.

El modelo de este componente queda así:

```

COMPONENT Intercambiador
  PORTS
    //CONEXIONES

    //Serpentín (Agua de calderas)
    IN fluid_port INPUT_A
    OUT fluid_port OUTPUT_A

    //Depósito (Agua Caliente Sanitaria)
    IN fluid_port INPUT_B
    OUT fluid_port OUTPUT_B

    OUT analog_signal (n = 1) s_Tout_B "Temperatura de Salida ACS"(5)

  DATA
    //PARÁMETROS
    REAL V_A = 0.05 UNITS "m^3" "Capacidad Serpentín"
    REAL V_B = 1 UNITS "m^3" "Capacidad Depósito"
    //Para la transferencia de calor:
    REAL Kinter = 100 UNITS "W/°C" "Coeficiente de transmisión térmica"
    //Para las pérdidas de carga en el primario:
    TABLE_1D H_F={{0,10,}}, --Q (m^3/h)

```

⁵En este caso, el parámetro «n=1» es un parámetro de construcción del puerto analógico, que nos indica el número de señales de salida que tiene. No tiene que ver con el resto del modelo del componente.

```

    {0,1} --H (valores por defecto)
    REAL Kperd = 2.9 UNITS "W/°C" "Coeficiente de pérdidas térmicas"

```

```
DECLS
```

```

//VARIABLES
REAL Tin_A UNITS "°C" "Temperatura entrada serpentín"
REAL Tout_A UNITS "°C" "Temperatura salida serpentín"
REAL P_A UNITS "N/m^2" "Caída de Presión en serpentín"
REAL F_A UNITS "m^3/s" "Caudal por el serpentín"
REAL Fh_A UNITS "m^3/h" "Caudal por el serpentín"
REAL H_A UNITS "mca" "Caída de Presión en serpentín"

REAL Tin_B UNITS "°C" "Temperatura entrada depósito"
REAL Tout_B UNITS "°C" "Temperatura salida depósito"
REAL T_B UNITS "°C" "Temperatura en el depósito"
REAL P_B UNITS "N/m^2" "Caída de Presión en depósito"
REAL F_B UNITS "m^3/s" "Caudal por el depósito"
REAL Fh_B UNITS "m^3/h" "Caudal por el depósito"

REAL Q_trans UNITS "W" "Potencia transferida"
REAL Q_perd UNITS "W" "Potencia de perdidas"

```

```

REAL Vi
REAL TA[Segm_Interc]
REAL QA[Segm_Interc]
INTEGER i = 0

```

```

REAL E = 0 UNITS "J" "Energía transferida"
REAL Emwh = 0 UNITS "MWh" "Energía transferida"

```

```
INIT
```

```

FOR( i IN 1,Segm_Interc )
    -- Tª inicial del fluido
    TA[i]= T_B
END FOR

```

```
CONTINUOUS
```

```

//Ecuaciones para ligar los puertos
INPUT_A.F = OUTPUT_A.F
//INPUT_A.P = OUTPUT_A.P

```

```

INPUT_B.F = OUTPUT_B.F
//INPUT_B.P = OUTPUT_B.P

```

```

//Ecuaciones para ligar los puertos con el componente
F_A = INPUT_A.F
Tin_A = INPUT_A.T

```

```

Tout_A = OUTPUT_A.T
P_A = INPUT_A.P - OUTPUT_A.P

F_B = INPUT_B.F
Tin_B = INPUT_B.T
Tout_B = OUTPUT_B.T
P_B = INPUT_B.P - OUTPUT_B.P

s_Tout_B.signal[1] = Tout_B

//Ecuaciones del componente
Fh_A = F_A*3600
Fh_B = F_B*3600

Tout_A = T_A
Tout_B = T_B

P_A = rho*g*H_A //Conversión de unidades de presión m <=> Pa
H_A= linearInterp1D(H_F,Fh_A)

P_B = 0 //No hay pérdidas de carga en el depósito

//Variación de temperatura del depósito
T_B' = (((Tin_B-Tout_B)*F_B)/V_B) + ((Q_trans-Q_perd)/(V_B*rho*Ce))

//Potencia de pérdidas al exterior:
Q_perd = (T_B-Text)*Kperd

//Volumen de cada elemento del sistema de parámetros distribuidos:
Vi = V_A/Segm_Interc

//Ecuaciones del primer elemento.
TA[1]' = (F_A*(Tin_A-TA[1]))/Vi - QA[1]/(rho*Ce*Vi)
QA[1] = Kinter/Segm_Interc*(TA[1]-T_B)

//Ecuaciones del resto de elementos.
EXPAND_BLOCK (i IN 2, Segm_Interc)
    TA[i]' = (F_A*(TA[i-1]-TA[i]))/Vi - QA[i]/(rho*Ce*Vi)
    QA[i] = Kinter/Segm_Interc*(TA[i]-T_B)
END EXPAND_BLOCK

//Conexión con la temperatura de salida.
Tout_A = TA[Segm_Interc]

//Contaje de potencia consumida
SEQUENTIAL
    Q_trans=0
    FOR (i = 1 ; i<=Segm_Interc ; i= i+1)

```

```

        Q_trans = Q_trans + QA[i]
    END FOR
END SEQUENTIAL

//Contaje de energía consumida.
E'=Q_trans
Emwh = E/(1000000*3600)

END COMPONENT

```

El símbolo de los intercambiadores puede verse en la figura 4.9.1.

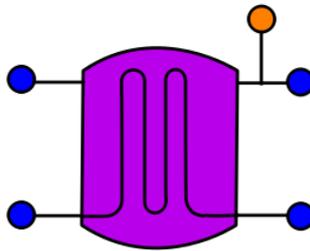


Figura 4.9.1: Símbolo del componente Intercambiador

4.10. Tramo de tubería

El componente *Tubería* pretende modelar un tramo de tubería, que se supone cilíndrico y está caracterizado por su longitud, diámetro y los coeficientes de pérdidas térmicas (en este caso en función de la superficie y la diferencia de temperaturas) y de pérdidas de carga. Además se incorpora un parámetro para indicar la temperatura inicial del volumen contenido en la tubería.

Se trata de un componente con dos puertos fluidos, y un sistema de parámetros distribuidos en su interior.

Las ecuaciones que describen su comportamiento son similares a las de otros sistemas de parámetros distribuidos:

$$T[i]' = \frac{F \cdot (T[i-1] - T[i])}{V_i} - \frac{Q[i]}{(\rho \cdot Ce \cdot Vi)} \quad (4.10.1)$$

$$Q[i] = \frac{K_{perd} \cdot \pi \cdot D \cdot L}{Segm} \cdot (T[i] - T_{ext}) \quad (4.10.2)$$

$$Vi = \pi \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2 \cdot \frac{L}{Segm} \quad (4.10.3)$$

Y para las caídas de presión:

$$F = C_v \cdot P \quad (4.10.4)$$

Como vemos, en este caso las unidades del parámetro K_{perd} son $\frac{W}{\text{m}^2 \cdot \text{°C}}$, y en cada segmento del sistema de parámetros distribuidos, para calcular las pérdidas, se multiplica ese coeficiente por la superficie de la tubería de ese segmento.

Del mismo modo, se utilizan los parámetros de la geometría de la tubería para calcular el volumen de cada segmento, V_i .

Este es su modelo completo:

```

COMPONENT Tuberia
  PORTS
    //CONEXIONES
    IN fluid_port INPUT
    OUT fluid_port OUTPUT

  DATA
    //PARÁMETROS
    REAL L = 1          UNITS "m"          "Longitud"
    REAL D = 0.1        UNITS "m"          "Diámetro"
    REAL Cv = 1
    REAL Kperd = 0      UNITS "W/(m^2·°C)" "Coeficiente de pérdidas térmicas"
    REAL Tinicial = 15 UNITS "°C"         "Tempeartura inicial"

  DECLS
    //VARIABLES
    REAL Tin          UNITS "°C"          "Temperatura"
    REAL Tout         UNITS "°C"          "Temperatura"
    REAL P            UNITS "N/m^2"        "Caida de Presion"
    REAL F            UNITS "m^3/s"        "Caudal"
    REAL Fh           UNITS "m^3/h"        "Caudal"
    REAL Qperd        UNITS "W"           "Pérdidas térmicas totales"

    REAL Vi
    REAL T[Segm_Tuberia]
    REAL Q[Segm_Tuberia]

    INTEGER i=0

  INIT
    FOR( i IN 1,Segm_Tuberia )
      -- Tª inicial del fluido
      T[i]= Tinicial
    END FOR

```

```

CONTINUOUS
//Ecuaciones para ligar los puertos
INPUT.F = OUTPUT.F

//Ecuaciones para ligar los puertos con el componente
P = INPUT.P - OUTPUT.P
F = INPUT.F
Tin = INPUT.T
Tout = OUTPUT.T

//Ecuaciones del componente
F = Cv * P

Fh = F*3600

Vi = pi*(D/2)**2 *L/Segm_Tuberia

//Ecuaciones del primer elemento.
T[1]' = (F*(Tin-T[1]))/Vi - Q[1]/(rho*Ce*Vi)
Q[1] = Kperd*pi*D*L/Segm_Tuberia*(T[1]-Text)

//Ecuaciones del resto de elementos.
EXPAND_BLOCK (i IN 2, Segm_Tuberia)
    T[i]' = (F*(T[i-1]-T[i]))/Vi - Q[i]/(rho*Ce*Vi)
    Q[i] = Kperd*pi*D*L/Segm_Tuberia*(T[i]-Text)
END EXPAND_BLOCK

Tout = T[Segm_Tuberia]

SEQUENTIAL
    Qperd=0
    FOR (i = 1 ; i<=Segm_Tuberia ; i= i+1)
        Qperd = Qperd + Q[i]
    END FOR
END SEQUENTIAL

END COMPONENT

```

El símbolo asociado a un tramo de tubería se muestra en la figura 4.10.1.

4.11. Toma de agua

La toma de agua es un elemento que se usará en las simulaciones para simular el consumo de ACS. Es un elemento con un sólo puerto fluido de salida, y un puerto de señal.

Como único parámetro tiene la temperatura a la que entra el agua a través de este elemento al sistema.



Figura 4.10.1: Símbolo del componente Tubería

El elemento fuerza un caudal de salida por su puerto fluido igual a lo que se indique a través de la señal de control, con la temperatura indicada como parámetro. No añade ninguna restricción o condición sobre la presión.

Su modelo, sencillo, se muestra a continuación:

```

COMPONENT toma_agua
  PORTS
    //CONEXIONES
    OUT fluid_port OUTPUT
    IN analog_signal s_F "Control signal"

  DATA
    //PARÁMETROS
    REAL T=15 UNITS "°C" "Temperatura del agua de la toma"

  DECLS
    //VARIABLES
    REAL P    UNITS "N/m^2"    "Presión"
    REAL F    UNITS "m^3/s"    "Caudal"
    REAL Fh   UNITS "m^3/h"    "Caudal"

  CONTINUOUS
    //Ecuaciones para ligar los puertos

    //Ecuaciones para ligar los puertos con el componente
    P = OUTPUT.P
    T = OUTPUT.T
    F = OUTPUT.F

    //Ecuaciones del componente
    F = s_F.signal[1]
    Fh = F*3600

END COMPONENT

```

El símbolo de la toma de agua se expone en la figura 4.11.1.

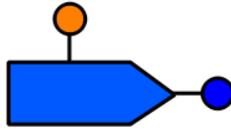


Figura 4.11.1: Símbolo del componente Toma de agua

4.12. Referencia de presión

La referencia de presión es un elemento con un único puerto fluido de entrada.

Tan sólo tiene una condición y es que la presión en su puerto fluido es igual a 0. No añade ninguna restricción o condición sobre la temperatura o el caudal.

Será utilizado en las simulaciones para indicar en referencia a qué punto de la instalación queremos que se muestren las presiones en el resto de nodos. Sirve por tanto para eliminar una condición de contorno que de otra manera nos será solicitada posteriormente al realizar la partición del modelo.

Cumple exactamente la misma función que imponer esa condición de contorno en la partición, para indicar la presión en alguno de los nodos del modelo. Pero de esta forma queda más claro y más visual a partir de qué punto tomamos las medidas de presiones.

Como no impone ninguna restricción sobre el caudal (ni la temperatura), puede ser utilizado como sumidero del ACS para las simulaciones.

Su modelo:

```
COMPONENT ref_presion
  PORTS
    //CONEXIONES
    IN fluid_port INPUT

  DATA
    //PARÁMETROS

  DECLS
    //VARIABLES
    REAL P UNITS "N/m^2" "Presión"

  CONTINUOUS
    //Ecuaciones para ligar los puertos

    //Ecuaciones para ligar los puertos con el componente
    P = INPUT.P

    //Ecuaciones del componente
```

P = 0

END COMPONENT

El símbolo de la toma de presión puede verse en la figura 4.12.1.

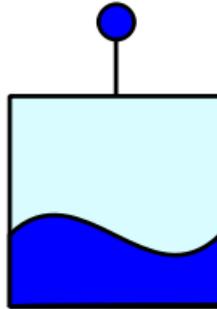


Figura 4.12.1: Símbolo del componente Referencia de presión

4.13. Controlador de calderas

Como en el sistema real existen 4 calderas, de las cuales 3 están en funcionamiento, y de ellas 2 están en modo ON/OFF y la tercera es la que regula la potencia necesaria, se ha diseñado un bloque controlador para regular el funcionamiento de las tres calderas durante las simulaciones.

Se trata de un componente que tiene una única entrada de señal, que podrá tomar un valor entre 0 y 3, y tiene 6 señales de salida. Tres señales de salida irán a las calderas (señales «u»), y las otras tres, a las válvulas que cada caldera tiene asociada en serie (señales «v»).

Los parámetros que utiliza este controlador son los valores máximos y mínimos de las señales de salida para calderas (tipo «u») y de las señales de salida para válvulas (tipo «v»).

El funcionamiento de este bloque es muy sencillo. Básicamente trunca el valor de la señal de control de entrada (que puede ser un valor entre 0 y 3), y en función de eso determina cuántas calderas de las de tipo ON/OFF debe encender, y cuánta señal debe mandar a la caldera que regula.

De este modo, cuando la señal valga menos de 1, toda la señal se pasará a la caldera que regula (que será la salida 1), y las otras calderas estarán apagadas.

Cuando la señal valga entre 1 y 2, encenderá la caldera 2 al máximo, y el resto de la potencia demandada se la encargará a la caldera 1, enviándole una señal igual a la de entrada, menos 1.

Cuando la señal valga entre 2 y 3, las dos calderas ON/OFF estarán encendidas, y el resto se le enviará a la caldera 1 (señal de entrada menos dos).

Para el control de las válvulas, sencillamente hay que decir que las válvulas estarán abiertas cuando la caldera asociada tenga asignada una potencia mayor que 0, y cerradas si están apagadas.

Es un buen ejemplo de elemento discreto, para mostrar la enorme capacidad de EcosimPro a la hora de modelar también sistemas discretos.

El componente queda así:

```
COMPONENT CONTROL
  PORTS
    //CONEXIONES

    IN analog_signal u_in "Input signal(0-3)"

    OUT analog_signal u1_out "Out signal 1"
    OUT analog_signal u2_out "Out signal 2"
    OUT analog_signal u3_out "Out signal 3"

    OUT analog_signal v1_out "Out valve signal 1"
    OUT analog_signal v2_out "Out valve signal 2"
    OUT analog_signal v3_out "Out valve signal 3"

  DATA
    REAL u_min = 0 UNITS "" "Mínimo valor de señales u"
    REAL u_max = 1 UNITS "" "Máximo valor de señales u"
    REAL v_min = 0.0001 UNITS "" "Mínimo valor de señales v"
    REAL v_max = 1 UNITS "" "Máximo valor de señales u"

  CONTINUOUS
  SEQUENTIAL
    IF (u_in.signal[1] < 1) THEN
      u1_out.signal[1] = u_in.signal[1]

      IF (u_in.signal[1] >0) THEN
        v1_out.signal[1] = v_max
      ELSE
        v1_out.signal[1] = v_min
      END IF

      u2_out.signal[1] = u_min
      u3_out.signal[1] = u_min

      v2_out.signal[1] = v_min
      v3_out.signal[1] = v_min

    ELSEIF (u_in.signal[1] >= 1 AND u_in.signal[1] < 2 ) THEN
      u1_out.signal[1] = u_in.signal[1] - 1
      u2_out.signal[1] = u_max
      u3_out.signal[1] = u_min

      v1_out.signal[1] = v_max
      v2_out.signal[1] = v_max
```

```

v3_out.signal[1] = v_min

ELSE
u1_out.signal[1] = u_in.signal[1] - 2
u2_out.signal[1] = u_max
u3_out.signal[1] = u_max

v1_out.signal[1] = v_max
v2_out.signal[1] = v_max
v3_out.signal[1] = v_max

END IF

END SEQUENTIAL

END COMPONENT

```

El símbolo de este controlador de calderas se muestra en la figura 4.13.1.

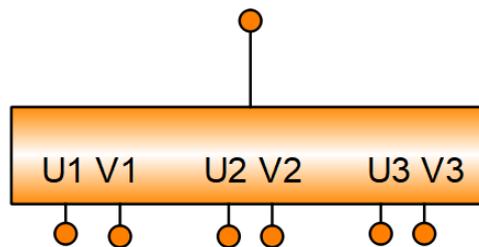


Figura 4.13.1: Símbolo del componente Control

4.14. Sensor de temperatura

En ocasiones es posible que queramos medir la temperatura del agua del circuito en un determinado punto, o tras mezclarse los flujos provenientes de distintos elementos en lugar de la temperatura de esos elementos.

Un ejemplo puede ser en el sistema de control de las calderas, dónde nos interesa medir la temperatura final del agua tras mezclarse el flujo de las tres calderas para el sistema de control de las mismas.

Para esta finalidad, se ha creado un elemento sensor de temperatura, con dos puertos fluidos, de entrada y salida, y un puerto de salida de señal, para la temperatura.

El elemento no tiene más función o ecuaciones que sacar por el puerto de señal la temperatura del agua que circula por él.

El código es el siguiente:

```

COMPONENT SensorTemp
  PORTS
    //CONEXIONES
    IN fluid_port INPUT
    OUT fluid_port OUTPUT

    OUT analog_signal s_temp "Temeprature Signal"

  DATA
    //PARÁMETROS

  DECLS
    //VARIABLES
    REAL T UNITS "°C"          "Temperatura"
    REAL P UNITS "N/m^2"      "Caida de Presion"
    REAL F UNITS "m^3/s"      "Caudal"

  CONTINUOUS
    //Ecuaciones para ligar los puertos
    INPUT.F = OUTPUT.F
    INPUT.T = OUTPUT.T
    INPUT.P = OUTPUT.P

    //Ecuaciones para ligar los puertos con el componente
    P = INPUT.P - OUTPUT.P
    F = INPUT.F
    T = INPUT.T
    T = s_temp.signal[1]

END COMPONENT

```

EL símbolo del sensor de temperatura está en la figura 4.14.1.

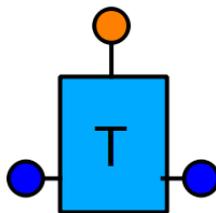


Figura 4.14.1: Símbolo del componente Sensor de temperatura

Capítulo 5

Parametrización del modelo

5.1. Bombas

Como ya se ha mencionado, existen 3 tipos de bombas en la instalación. Todas ellas son del fabricante «*Wilo*», y en su página web se encuentran todas las características técnicas de las mismas, incluyendo detalladas gráficas de las curvas características de los distintos modelos.

De dichas curvas, se obtienen una serie de puntos que se introducirán como parámetro en los modelos de las bombas, para caracterizarlas con las curvas reales con gran precisión, según los datos del fabricante.

Para el modelo *Wilo – TOP – S – 65/13*, se obtienen los siguientes puntos:

Punto	H(mca)	Q(m ³ /h)	Punto	H(mca)	Q(m ³ /h)
1	13.1	0	13	7	35.5
2	12.5	5.5	14	6.5	37.25
3	12	10	15	6	38.5
4	11.5	13.7	16	5.5	40.25
5	11	17.5	17	5	42
6	10.5	21	18	4.5	43
7	10	24	19	4	44.25
8	9.5	26.5	20	3.5	45.5
9	9	29	21	3	47
10	8.5	30.5	22	2.5	48
11	8	32	23	2	49
12	7.5	34	24	0	50

Tabla 5.1: Tabla de puntos de curva característica de la bomba *Wilo TOP-S 65/13*

Para el modelo *Wilo – TOP – S – 50/10*, se obtienen los siguientes puntos:

Punto	H(mca)	Q(m ³ /h)	Punto	H(mca)	Q(m ³ /h)
1	9	0	10	5.5	23
2	9.2	7	11	5	24.5
3	9	10	12	4.5	25.5
4	8.5	13.5	13	4	26.75
5	8	15.35	14	3.5	28
6	7.5	17	15	3	29
7	7	19	16	2.5	30
8	6.5	20.5	17	0	32
9	6	22			

Tabla 5.2: Tabla de puntos de curva característica de la bomba Wilo TOP-S 50/10

Para el modelo *Wilo – TOP – S – 50/4*, se obtienen los siguientes puntos:

Punto	H(mca)	Q(m ³ /h)	Punto	H(mca)	Q(m ³ /h)
1	4.8	0	9	2.75	17.5
2	4.5	7	10	2.5	18.75
3	4.25	9	11	2.25	20
4	4	10.75	12	2	21
5	3.75	12.5	13	1.75	22
6	3.5	13.75	14	1.5	22.75
7	3.25	15	15	0	25
8	3	16.25			

Tabla 5.3: Tabla de puntos de curva característica de la bomba Wilo TOP-S 50/4

Comparando las curvas originales del fabricante, con las gráficas que se obtienen con esos puntos, vemos las similitudes en las figuras 5.1.1, 5.1.2 y 5.1.3.

5.2. Calderas

Para el modelo de las calderas, necesitamos los parámetros de la potencia máxima de la caldera, el rendimiento, y el coeficiente de pérdidas de carga.

Nuestro modelo de caldera es el *DTG 330S-18*, del fabricante *De Dietrich*. Acudiendo a la página del fabricante, encontramos los datos técnicos de los distintos modelos de calderas, de dónde se obtendrán los parámetros que nosotros requerimos.

Podemos ver que la **potencia máxima** de este modelo de calderas es de **340kW**.

Que el **rendimiento** (η) ronda el **92,3 %**.

Y para las pérdidas de carga, nos basamos en los datos que nos da el fabricante para unas determinadas condiciones de funcionamiento para las que nos indica el caudal y pérdida de

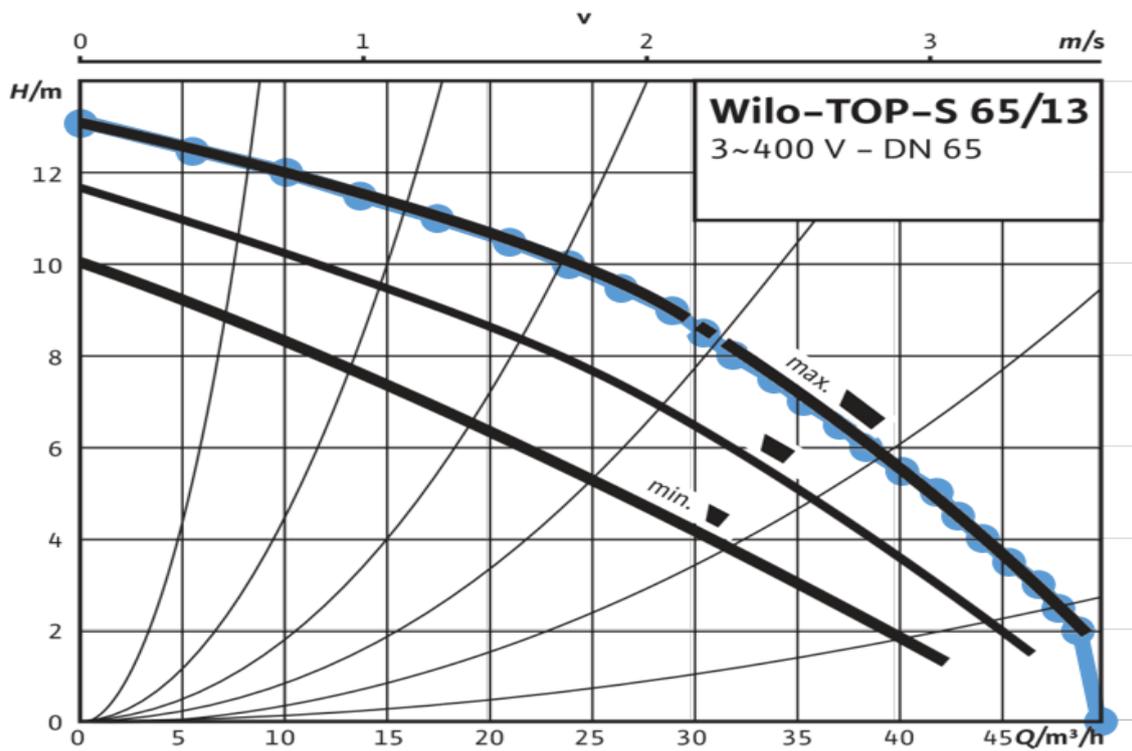


Figura 5.1.1: Superposición de la curva de la bomba Wilo TOP-S-65/13 con los puntos y curva interpolada (en azul)

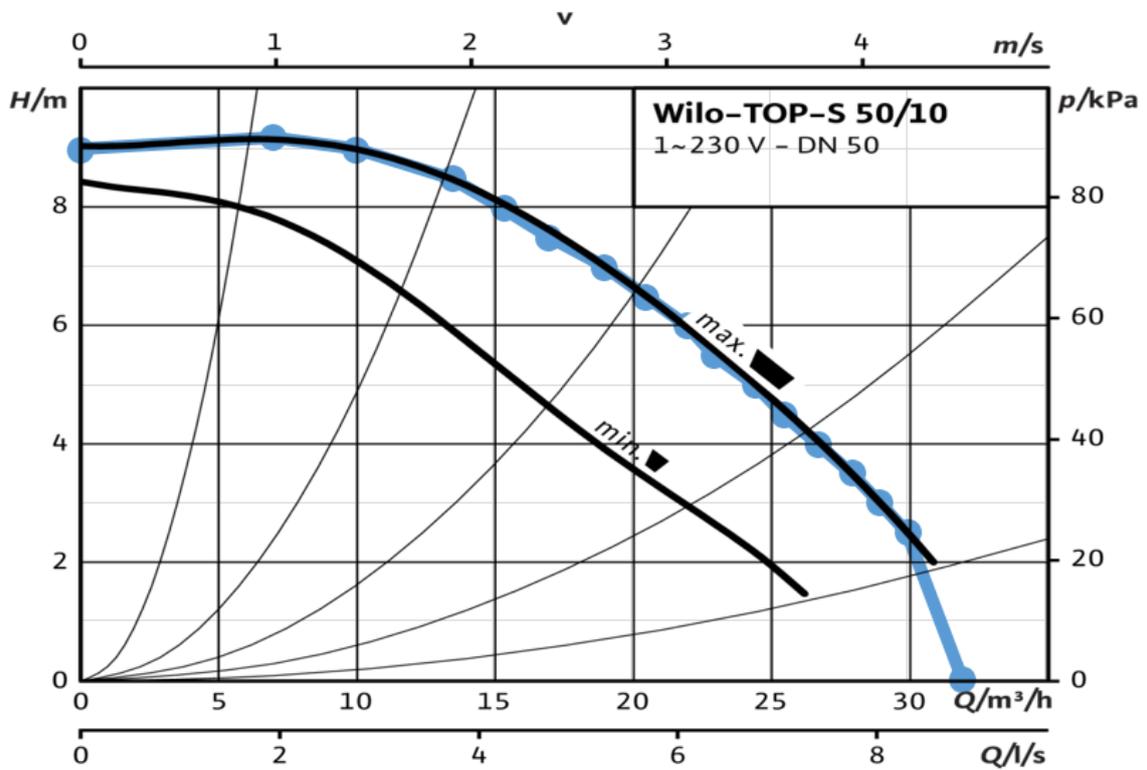


Figura 5.1.2: Superposición de la curva de la bomba Wilo TOP-S-50/10 con los puntos y curva interpolada (en azul)

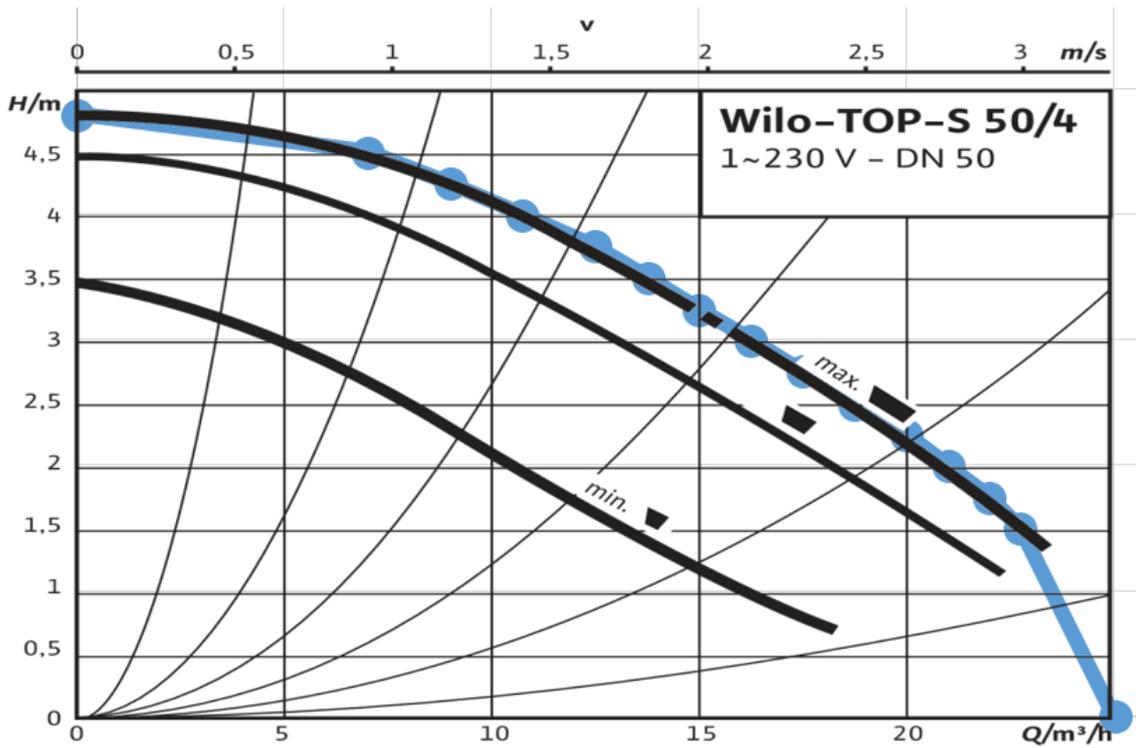


Figura 5.1.3: Superposición de la curva de la bomba Wilo TOP-S-50/4 con los puntos y curva interpolada (en azul)



Figura 5.1.4: Fotografía de una de las bombas del sistema real

⇒ DTG 330 S - Ref. "Certificado CE" : CE 0085BS0023

Caldera tipo		DTG 330... S/	330-8	330-9	330-10	330-11	330-12	330-14	330-16	330-18	330-20
Potencia útil	1ª llama	kW	98	112	126	140	154	182	210	238	266
	2ª llama	kW	140	160	180	200	220	260	300	340	380
Rendimiento en % PCI	100 % Pn a 70°C	%	91,5	91,6	91,7	91,8	91,9	92,0	92,2	92,3	92,4
a carga ... % Pn y	30 % Pn a 50°C	%	90,6	90,7	90,8	90,9	91,0	91,1	91,3	91,4	91,5
temp. media ... °C	30 % Pn a 40°C	%	92,5	92,6	92,7	92,8	92,9	93,0	93,2	93,3	93,4
Caudal nominal de agua a Pn, Δt = 20 K		m³/h	6,020	6,880	7,740	8,600	9,460	11,180	12,900	14,620	16,340
Pérdidas en la parada a Δt = 30 K		W	1120	1190	1260	1330	1400	1540	1680	1775	1960
% Pérdida por las paredes		%	22,3	22,7	23,0	23,3	23,6	24,0	24,4	24,8	25,0
Gama de potencia	1ª llama	kW	83-98	95-112	107-126	119-140	131-154	155-182	179-210	202-238	226-266
(Pn)	2ª llama	kW	119-140	136-160	153-180	170-200	187-220	221-260	255-300	289-340	323-380
Caudal gas a potencia máx. 15°C-1013 mbar	gas natural H	m³/h	1,33-16,19	12,94-18,48	14,54-20,77	16,14-23,05	17,74-25,34	20,93-29,90	24,12-34,45	27,30-39,00	30,48-43,54
Contenido en agua		l	61	68	76	84	91	106	122	137	152
Pérdida de carga	- Δt 15 K	mbar	36	47	59	73	88	123	164	211	263
circuito agua	- Δt 10 K	mbar	80	105	133	164	198	277	369	474	592
a potencia máx.	- Δt 20 K	mbar	20	26	33	41	50	69	92	118	148
Contenido en CO ₂ len gas nat. H) a potencia máx.		%	6,4	7,0	6,3	6,4	6,8	6,5	7,0	7,5	6,5
Caudal másico de humos a potencia máx.		kg/s	0,103	0,118	0,132	0,147	0,161	0,190	0,219	0,248	0,277
Temperatura de humos a potencia máx.		°C	125	133	123	125	130	126	133	140	126
Depresión necesaria en tobera a potencia máx.		Pa	7	7	7	7	7	7	7	7	7
Peso en vacío		kg	575	635	690	750	805	920	1035	1150	1350

Figura 5.2.1: Una de las tablas de datos proporcionadas por el fabricante de las calderas

carga. Nos dice que a máxima potencia, con una ΔT de 20K, la caldera funciona con un caudal de $14,62m^3/h$, y que tiene unas pérdidas de carga de 118mbar (es decir, 11800 Pa). Con esos datos, calculamos que el coeficiente C_v de la caldera, según la ecuación 4.5.2 en la página 36 es de $3,44162x10^{-7}$ (En unidades del SI).

$$F = C_v \cdot P$$

$$C_v = \frac{F}{P} = \frac{14,62m^3/h}{11800Pa} \cdot \frac{1h}{3600s} = 3,44162x10^{-7}$$

Con estos datos, ya tenemos caracterizado el modelo de nuestra caldera real.

5.3. Intercambiadores de calor

Se trata del modelo de intercambiador con acumulador *B-1000-HR* del fabricante *De Dietrich*. En la página del fabricante encontramos toda la información al respecto. Véase [21, 22].

5.3.1. Parámetros generales

Se trata de los parámetros que caracterizan el tamaño del componente, y que se obtienen directamente de las hojas de especificaciones del fabricante. En este caso, nos interesa:

- El volumen de agua en el depósito: **980L**
- El volumen de agua en el serpentín: **33,4L**



Figura 5.2.2: Fotografía de una de las calderas del sistema real

■ CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS Y PRESTACIONES

Temperatura máxima de servicio:
 - primario (intercambiador): 110°C
 - secundario (cuba): 95°C

Presión máxima de servicio:
 - primario (intercambiador): 12 bar
 - secundario (cuba): 7 bar

Modelo		650	800	1000	1500	2000	2500	3000		
Clase de eficiencia en calefacción		C	C	C	C	C	-	-		
Capacidad	l	650	780	980	1500	1730	2500	2750		
Superficie del intercambiador	m ²	4	4	4,4	5,5	5,5	5,5	5,5		
Capacidad del intercambiador	l	30,4	30,4	33,4	41,8	41,8	41,8	41,8		
Coefficiente de pérdidas térmicas (HR)	W/K	2,5	2,8	2,9	3,4	3,8	4,1	4,6		
Coefficiente de pérdidas térmicas (IMO HRI)	W/K	2,7	3,0	3,2	3,8	4,4	4,6	4,8		
⇒ prestaciones acs (ΔT primario 15 K)										
Temperatura primario	°C	70	70	70	70	80	70	80	70	80
Datos con temperatura ida acs 60°C:										
- Potencia intercambiada máx.	kW	65	65	71	89	89	89	130	89	155
- Caudal continuo	m ³ /h	1,2	1,2	1,4	1,7	1,7	1,7	2,5	1,7	3
- Pérdida de carga intercambiador	mca	1,3	1,3	1,6	3,1	3,1	3,1	6	3,1	8,6
Datos con temperatura ida acs 45°C:										
- Potencia intercambiada máx.	kW	95	95	105	130	130	130	170	130	170
- Caudal continuo	m ³ /h	2,3	2,3	2,6	3,2	3,2	3,2	4,2	3,2	4,2
Peso neto	kg	275	290	327	423	460	565	644		

(1) Temp. agua fría sanitaria: 10°C, temp. entrada primario: 80°C

Figura 5.3.1: Una de las tablas proporcionadas por el fabricante sobre los datos de los intercambiadores

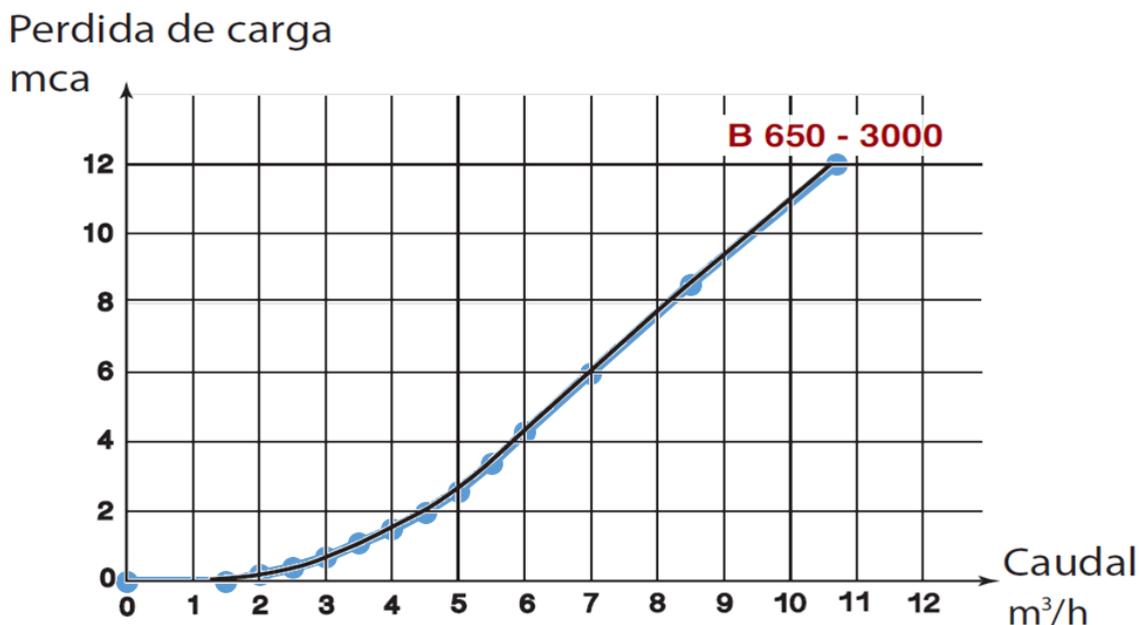


Figura 5.3.2: Superposición de la curva de pérdidas de carga del intercambiador B-1000 con los puntos y curva interpolada (en azul)

5.3.2. Pérdidas de carga

En los intercambiadores de calor, las pérdidas de carga se modelan mediante una tabla de puntos obtenidos de la curva de pérdidas de carga real aportada por el fabricante. Se obtiene la siguiente tabla:

Punto	H(mca)	Q(m³/h)	Punto	H(mca)	Q(m³/h)
1	0	0	8	2	4.5
2	0	1.5	9	2.6	5
3	0.2	2	10	3.4	5.5
4	0.4	2.5	11	4.3	6
5	0.7	3	12	6	7
6	1.1	3.5	13	8.55	8.5
7	1.5	4	14	12	10.7

Tabla 5.4: Tabla de puntos de curva de pérdidas de carga del intercambiador B1000

Comparando la curva proporcionada por el fabricante con la curva que hemos reproducido con los puntos, vemos la precisión en la figura 5.3.2.

5.3.3. Transmisión térmica y pérdidas

También es necesario modelar el coeficiente de transmisión térmica entre el circuito primario (el serpentín) y el depósito, así como las pérdidas térmicas del depósito al exterior.

B 1000

Tomas acs		10 - 55°				10 - 60°				10 - 45°			
Temperatura primario	°C	65,0	70,0	80,0	85,0	65,0	70,0	80,0	85,0	65,0	70,0	80,0	85,0
Caudal primario (ΔT 15K)	m ³	3,6	4,8	7,0	7,7	2,9	4,1	6,0	7,2	4,8	6,0	7,9	8,9
Potencia intercambiada	kW	62,7	83,6	121,2	133,8	50,2	71,1	104,5	125,4	83,6	104,5	137,9	154,7
Perdida de carga de agua primario	mca	1,3	2,3	5,4	6,1	0,9	1,6	3,6	4,9	1,1	1,4	3,0	7,2
Caudal acs continuo	l/min	20,0	26,7	38,7	42,7	16,0	22,7	33,4	40,0	34,3	42,9	56,6	63,5
	l/h	1201	1602	2322	2563	961	1361	2002	2402	2059	2574	3398	3809
	m ³ /h	1,2	1,6	2,3	2,6	1,0	1,4	2,0	2,4	2,1	2,6	3,4	3,8
Tomas acs													
Temperatura primario	°C	65,0	70,0	80,0	85,0	65,0	70,0	80,0	85,0	65,0	70,0	80,0	85,0
Caudal primario (ΔT 25K)	m ³	2,4	3,0	4,7	5,2	1,2	2,0	3,3	3,9	2,3	3,0	4,2	4,9
Potencia intercambiada	kW	70,4	88,0	136,4	149,6	35,2	57,2	96,8	114,4	66,0	88,0	123,2	140,8
Perdida de carga de agua primario	mca	0,6	0,9	2,0	2,3	0,2	0,4	1,0	1,6	0,6	0,9	1,6	2,1
Caudal acs continuo	l/min	22,5	28,1	43,6	47,8	11,2	18,3	30,9	36,5	27,1	36,1	50,6	57,8
	l/h	1349	1686	2613	2866	674	1096	1854	2192	1626	2168	3035	3468
	m ³ /h	1,3	1,7	2,6	2,9	0,7	1,1	1,9	2,2	1,6	2,2	3,0	3,5
Caudal en 10 minutos													
Almacenamiento a 65°C	l/10 min	1088	1091	1097	1099	977	980	985	988	1403	1407	1414	1418
Almacenamiento a 75°C	l/10 min	-	-	1293	1295	-	-	1162	1165	-	-	1666	1670

* Temperatura entrada agua fría sanitaria - salida agua caliente sanitaria

Figura 5.3.3: Una de las tablas proporcionadas por el fabricante sobre los datos de funcionamiento de los intercambiadores

Las pérdidas térmicas al exterior es un parámetro que nos da el fabricante directamente en las hojas de especificaciones, para cada modelo de los disponibles. Tan sólo debemos buscar la celda de la tabla correspondiente a nuestro modelo, el *B-1000-HR*, y nos indica que ese coeficiente, K_{perd} en nuestro modelo, es igual a $2,9W/K$, que es lo mismo que decir $2,9W/°C$.

Para el coeficiente de transmisión térmica, K_{inter} , nos basamos en una serie de datos que nos proporciona el fabricante, que dice que en unas determinadas condiciones de funcionamiento, con una temperatura de primario de $80°C$, y una diferencia de temperaturas en el primario de $15K$, se intercambia una potencia de $104,5kW$. Con eso podemos calcular que K_{inter} valdrá, aproximadamente para nuestras condiciones de funcionamiento, $6966,7W/°C$.

Además nos dice que este modelo de intercambiador tiene una superficie del intercambiador de $4.4m^2$, con lo que podría sacarse el coeficiente en $W/°C \cdot m^2$, aunque en este caso no es necesario.

5.4. Viviendas

Para la medida de los parámetros del modelo de las viviendas, se observarán las condiciones de funcionamiento y se realizarán diversos experimentos para tratar de aproximar dichos valores.

5.4.1. Pérdidas de carga

Mediante la lectura del contador de calefacción, se comprueba que mientras la calefacción está en funcionamiento hay un caudal de aproximadamente $0.437m^3/h$. Con esos datos, se aproxima



Figura 5.3.4: Fotografía de la distribución de circuitos y acumuladores de ACS

mediante experimentación el coeficiente « Cv » necesario para que el caudal se ajuste a ese valor. Se determina que este valor debe ser, aproximadamente, 1060000000.

5.4.2. Volumen del circuito de radiadores

El volumen del circuito de radiadores se estima en base al número de elementos de radiador y el agua a lo largo de las tuberías del circuito. Se estima que cada elemento de radiador contiene aproximadamente $0,4L$ de agua, y se conoce que en la vivienda hay 55 elementos repartidos en 2 circuitos paralelos. Eso hace un total de $11L$ por cada circuito. Teniendo en cuenta los metros aproximados de tubería y su tamaño, se estima que el volumen total de agua por circuito de radiador puede ser de unos **25L**. Estos resultados se verifican también mediante simulación, comprobando el tiempo de calentamiento y enfriamiento del circuito.

5.4.3. Coeficiente de transmisión de los radiadores

Para determinar el coeficiente de transmisión térmica del circuito de radiadores, se observa también el contador de calefacción. Se observa que cuando la temperatura de la vivienda está sobre los 21°C , y con unas temperaturas de entrada al circuito de 75°C y de salida del circuito de unos 50°C , la potencia que aporta el sistema a la vivienda es algo mayor de 12kW . Además se observa que en el arranque (con el circuito a la temperatura de la vivienda) se alcanzan potencias de unos 28kW (según medidas del contador).

Con esos datos, y de nuevo bajo experimentación, se calcula que el coeficiente de transmisión térmica del circuito de radiadores, K_{rad} , es de unos **$300\text{W}/^{\circ}\text{C}$** .

El dato se obtiene mediante experimentación, forzando esas condiciones de 21°C en el interior de la vivienda, y una temperatura de entrada de 75°C, y variando el valor de K_{rad} hasta que se obtienen los resultados esperados.

5.4.4. Pérdidas térmicas de las paredes

Para medir el coeficiente de pérdidas térmicas a través de las paredes, K_{Spared} , que nos permitirá relacionar las pérdidas energéticas con la diferencia entre la temperatura de la vivienda y la temperatura exterior, se realizan varias observaciones experimentales.

El coeficiente K_{Spared} incluye el coeficiente de transmisión térmica de las paredes y la superficie de pared conjuntamente, de modo que nos permite relacionar las pérdidas directamente con la diferencia de temperaturas.

Se observa el coste energético de mantener la vivienda a una temperatura conocida (22°C) durante todo el día, una vez la casa ya se ha calentado hasta esa temperatura. Para ello, se anotan las lecturas del contador cuando la casa ya está caliente (no desde el inicio, pues se estaría incluyendo el coste de calentar la casa, y no sólo de mantenerla caliente), y se anotan de nuevo las lecturas a la noche, cuando se apaga la calefacción. La diferencia será la energía que habrá sido necesario aportar a la vivienda para mantener constante la temperatura, y por tanto, debe ser la misma energía que se ha perdido a través de las paredes. Por ello ese valor es el utilizado para medir las pérdidas térmicas a través de la pared.

Para poder hacer este cálculo, también es necesario conocer cuál ha sido la temperatura exterior media a lo largo del día. Algo que se puede consultar fácilmente en la página web de la AEMET, para obtener medidas de cierta precisión y rigor. Véase [23].

En las medidas experimentales se comprobó que un determinado día, a las 16:00 horas, el contador de calefacción marcaba 90,537MWh de consumo. El mismo día por la noche, cuando se apagó la calefacción a las 22:00 horas, el contador marcaba 90,557MWh. Con esos datos, y sabiendo que la temperatura exterior se mantuvo aproximadamente estable en unos 11°C, se calcula:

$$(90,557 - 90,537)MWh = 0,02MWh = 20kWh$$

$$\frac{20000Wh}{6h \cdot (22 - 11)^{\circ}C} = 303,03W/^{\circ}C$$

Con este experimento, se determina que las pérdidas térmicas a través de las paredes son de, aproximadamente, $300W/^{\circ}C$.

5.4.5. Capacidad térmica de la vivienda

La capacidad térmica de la vivienda se calculará mediante experimentación y observaciones del sistema durante su calentamiento.

Determinar la capacidad térmica de la vivienda es algo complejo, ya que el calentamiento de la casa no es un fenómeno que se pueda aislar fácilmente para ser tenido en cuenta solamente este parámetro. Para poder calcular la capacidad térmica de la vivienda necesitamos conocer previamente las pérdidas térmicas de las paredes, ya que al mismo tiempo que la casa se va calentando (al encender la calefacción), también va perdiendo energía al exterior.

De modo que, dado que no se puede aislar sólo el fenómeno del calentamiento de la casa, sin contar con las pérdidas al exterior, es necesario haber calculado antes cómo serán esas pérdidas, como ya se hizo en el apartado anterior.

Ahora sí, podemos determinar una aproximación de la capacidad térmica de la vivienda.

En el experimento, la temperatura inicial de la vivienda era de 18°C cuando se encendió la calefacción. La temperatura se elevó hasta los 21°C. La temperatura exterior el día del experimento era aproximadamente 0°C. El sistema tardó aproximadamente 50 minutos en pasar de los 18 a los 21°C. Sabemos además que el sistema de calefacción aporta unos 12.1kW de potencia de media (esta potencia va disminuyendo a medida que se calienta la vivienda, y en el momento del apagado del termostato está en torno a 12kW).

Con esos datos, procedemos a realizar los siguientes cálculos.

Lo primero, es estimar cuánto serán la potencia media de pérdidas al exterior. Suponiendo que la temperatura crece uniformemente desde los 18 a los 21°C, la temperatura media durante el proceso de calentamiento será de 19.5°C. Y por tanto, la potencia media de pérdidas sera:

$$Q_{périddas} = 303W/^{\circ}C \cdot 19,5^{\circ}C = 5901,5W$$

Ahora hay que calcular el aporte térmico a la vivienda. Más concretamente, calcularemos la energía que absorbe la vivienda, es decir, descontando las pérdidas al exterior. Para eso, necesitamos conocer esa potencia de pérdidas, la potencia aportada por el sistema de calefacción, y el tiempo de funcionamiento:

$$E_{térmica} = 50min \cdot \frac{60s}{1min} \cdot (12100W - 5901,5W) = 18595500J$$

Y ahora, sabiendo que la diferencia de temperaturas en el proceso de calentamiento fue de 3°C (de 18°C a 21°C), y que la vivienda tiene 114m², calculamos finalmente la capacidad térmica de la vivienda por unidad de superficie, con el fin de que la capacidad térmica del modelo de las viviendas sea escalable a cualquier tamaño de vivienda fácilmente.

$$CT_v = \frac{18595500J}{3^{\circ}C \cdot 114m^2} = 54372,8 \frac{J}{^{\circ}C \cdot m^2}$$

Se calcula que la vivienda tiene una capacidad térmica aproximada de **54372,8J/(°C · m²)**.

Se calcula la capacidad térmica de toda la vivienda de esta forma y no sólo la capacidad térmica del aire de la vivienda (que sería sencillo calcularlo analíticamente con los datos del volumen de la vivienda, la densidad del aire y su calor específico) porque en la vivienda no sólo se calienta el

aire, sino que se calienta todo el contenido de la vivienda, e incluso las paredes, techos y suelos. Si se calculara solo la capacidad térmica del aire, nos saldría un valor de: $3099.25 J / (^{\circ}C \cdot m^2)$. Un valor notablemente inferior al experimental (casi la mitad).

La capacidad térmica del aire de la vivienda, teniendo en cuenta que el volumen de aire de la vivienda es de $114m^2 \times 2.5m$ de altura media de los techos, se calcularía como:

$$C_{e_{aire}} \cdot \rho_{aire} \cdot \frac{V_{aire}}{S_{vivienda}} = 1012 \frac{J}{kg \cdot ^{\circ}C} \cdot 1,225 \frac{kg}{m^3} \cdot 2,5m = 3099,25 \frac{J}{^{\circ}C \cdot m^2}$$

Además, se calcula esa capacidad térmica de la vivienda en relación a la superficie de la misma para poder adaptar la simulación a otros tamaños de vivienda sin tener que re-calcular necesariamente en cada caso ese valor de forma experimental. Se presupone que en todas las viviendas habrá aproximadamente la misma relación de capacidad térmica por unidad de superficie.

5.5. Válvulas

Para medir la constante Cv de las distintas válvulas que se usan en los modelos, ha sido necesario en cada caso estudiar cuáles eran las condiciones de caudales y/o presiones requeridas en la regulación del sistema. Cada válvula se ha calculado por separado según su posición y función en el sistema. No hay, por tanto, ninguna clave general para su determinación precisa. En las válvulas de control se ha presupuesto una pérdida de carga baja en condiciones normales (con la válvula completamente abierta), pues el verdadero encargado de regular el flujo será la señal de control de la válvula. Como no se tienen datos reales y precisos sobre los modelos de válvulas utilizadas, desconoce los datos reales que pudiera aportar el fabricante de las mismas, como se hizo con otros elementos.

Capítulo 6

Experimentación con el sistema

En este capítulo se van a realizar una serie de experimentos con distinto grado de detalle del sistema, que servirán para validar el modelo de los componentes, así como las medidas tomadas para los parámetros de los mismos.

También se van a realizar demostraciones del distinto grado de detalle que se puede obtener en los modelos y la utilidad que puede tener cada uno, presentando que no es necesario obtener un grado de detalle totalmente exacto para tomar cualquier medida, y que los modelos simplificados también pueden tener utilidad. Con eso se pretende demostrar el concepto del compromiso entre la complejidad de una simulación y las observaciones o detalles que se quieran observar en la misma.

Finalmente se realizan algunos análisis comparativos entre alternativas de control, o detalles del control de las 3 calderas del sistema real.

Mientras no se indique lo contrario, las unidades de tiempo de todas las gráficas serán segundos y las unidades de temperatura serán °C.

6.1. Simulaciones de sistemas

En las simulaciones de los sistemas, se realizarán distintos experimentos para mostrar el distinto grado de detalle que se puede llegar a alcanzar al realizar un esquema complejo de la instalación.

6.1.1. Modelo de calefacción de una vivienda

En este experimento, se realiza el esquema simplificado del modelo de calefacción de una sola vivienda, como se puede ver en la figura 6.1.1.

La caldera tiene su propio controlador PID para regular su punto de funcionamiento. Los parámetros de caracterización de la caldera son los que se muestran en la figura 6.1.2. Se pone una potencia máxima de 1020kW, que sería el equivalente a tener en realidad 3 calderas de

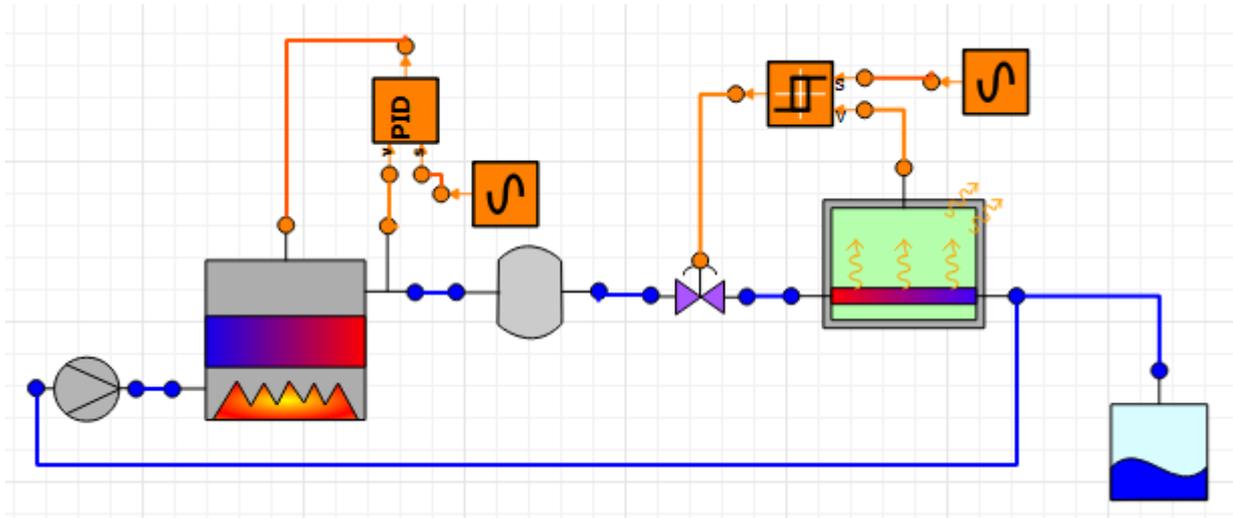


Figura 6.1.1: Esquema del modelo simplificado de calefacción de una vivienda

340kW cada una. El rendimiento se configura en 0.923, es decir, un 92.3 %, según los datos del fabricante. La señal de la temperatura de referencia que entra a controlados PID es de 75°C.

El edificio tiene un control ON/OFF, de relé con histéresis. Esto simula el funcionamiento del termostato de la vivienda. La configuración de la histéresis es la que se muestra en la figura 6.1.3 en la página siguiente. La temperatura de referencia que entra al bloque de histéresis es de 20°C (temperatura de configuración del termostato). Destaca el punto de que el valor de apagado de este control no es 0, sino 0.00001. Esto se debe a que el modelo no soporta un valor de control 0 en las válvulas. Por ello hay que poner un valor muy pequeño, aunque no sea exactamente 0. De lo contrario, el programa no es capaz de resolver el lazo algebraico, y se mostrará el siguiente mensaje de error cuando se cierre la válvula:

```
[TIME: 3170.0337680488065] *** WARNING level 1 (code ESI:7:288:32:98)
*** Cannot solve internal algebraic box number 1.
Reason: Convergence not reached: The step reduction that would be
applied is too small (No further improvement is possible).)
(internal error code: 4)
```

La bomba está configurada con la curva de característica de las bombas Wilo TOP-S-65/13, como se ve en la figura 6.1.4 en la página 80.

Por último, y más importante, la configuración del elemento «Viviendas», que en este experimento representa a una sola vivienda, se muestra en la figura 6.1.5 en la página 80. Podemos ver que el parámetro «N», el número de viviendas, vale 1. El resto de parámetros tienen los valores que se obtuvieron mediante experimentación, según lo expuesto en el apartado 5.4 en la página 72.

El depósito, configurado con una capacidad de 100L (0.1m³), tiene el fin de simular un pequeño retraso en la dinámica del sistema por las conducciones y la capacidad térmica del resto del circuito hidráulico, que pueden afectar también a este sistema.

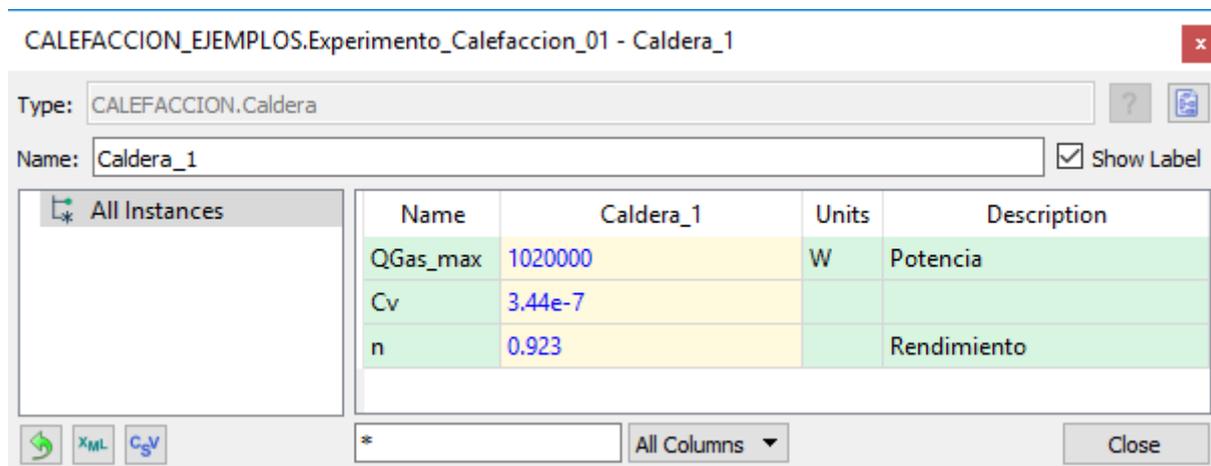


Figura 6.1.2: Parámetros de la caldera

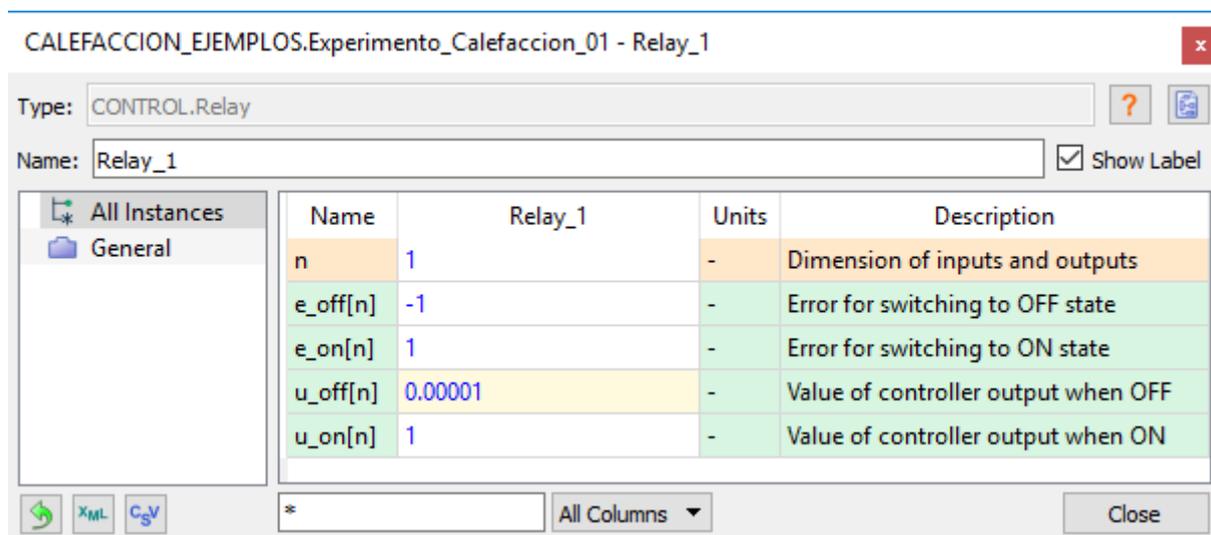


Figura 6.1.3: Configuración del relé con histéresis

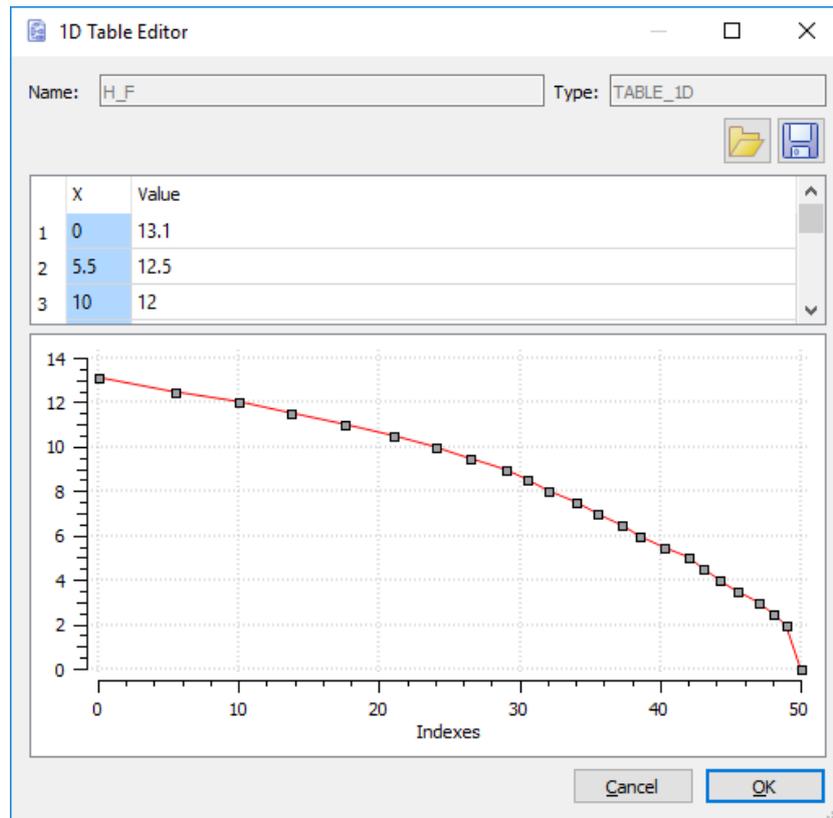


Figura 6.1.4: Configuración de la bomba

CALEFACCION_EJEMPLOS.Experimento_Calefaccion_01 - Edificio_1

Type: CALEFACCION.Edificio

Name: Edificio_1 Show Label

Name	Edificio_1	Units	Description
Cv	1060000000		
KSpared	303	W/°C	Pérdidas térmicas de las paredes de la vivienda
Krad	300	W/°C	Constante de transmisión de calor de los radiadores
N	1	uds	Numero de Viviendas
Sv	114	m ²	Superficie útil por vivienda
CTv	54372.8	J/(°C·m ²)	Capacidad térmica de la viviendas por m ²
Vr	0.025	m ³	Volumen de agua en los radiadores

* All Columns Close

Figura 6.1.5: Configuración del edificio (Componente tipo «Viviendas»)

Con este modelo, procedemos a crear la partición para su simulación. Debemos indicar una variable de contorno (*Boundary*), que es la temperatura exterior, Text, y el valor inicial de una variable algebraica para resolver un lazo algebraico en el circuito hidráulico. Si además no hubiéramos puesto la referencia de presión en el esquema, el asistente nos indicaría que deberíamos definir el valor de la presión en alguno de los nodos del esquema.

Tras esto, procedemos a crear un experimento transitorio. EcosimPro genera un fichero de extensión *.exp*, y nos coloca automáticamente una serie de definiciones y toda la configuración que ha considerado mejor para el experimento por defecto.

Es labor del usuario terminar de configurar el experimento de forma detallada a lo deseado. En este caso, vamos a realizar las siguientes configuraciones:

- **En el apartado de inicialización de variables de estado:** Indicaremos que la temperatura inicial de la vivienda es de 18°C (en lugar de los 22°C que ha puesto EcosimPro por defecto según los datos del componente), que la temperatura de salida del depósito (que es la misma que la de su contenido) es de 75°C (esto supone simular que el sistema de calderas ya estaba en funcionamiento, no arranca ahora).
- **En la parte de valor inicial de variables algebraicas:** indicaremos un caudal inicial por la bomba (que será el mismo para todos los elementos en este caso), de 0.43 m³/h. Es un valor que sabemos que es próximo al valor real que obtendremos. Si ponemos valores muy alejados o dejamos el valor de 0 que había por defecto, podría haber problemas a la hora de arrancar la simulación.
- **En la parte de variables de contorno:** indicamos que la temperatura exterior será de 0°C.

El resto de valores, pueden quedarse los que salen por defecto.

En cuanto a la configuración de la simulación, se va a configurar con unos intervalos de comunicación de 0.1s (tal y como viene por defecto), y un tiempo total de simulación de 15s de momento (posteriormente se puede aumentar):

```
TSTOP = 15
CINT = 0.1
```

El resto de la configuración, puede quedar igual que estaba, con los valores por defecto.

Para analizar los resultados, vamos a mostrar una serie de gráficas de distintas variables de interés. Realizaremos varias ampliaciones del tiempo de simulación, para capturar el estado del sistema en distintos instantes de tiempo.

Vamos a ver en este caso los siguientes gráficos:

1. El caudal que circula por el edificio: Figura 6.1.6
2. La evolución de las temperaturas de entrada y salida de la caldera y el edificio, así como la temperatura de la vivienda y del primer y último segmento del sistema de parámetros distribuidos del circuito de radiadores: Figura 6.1.7

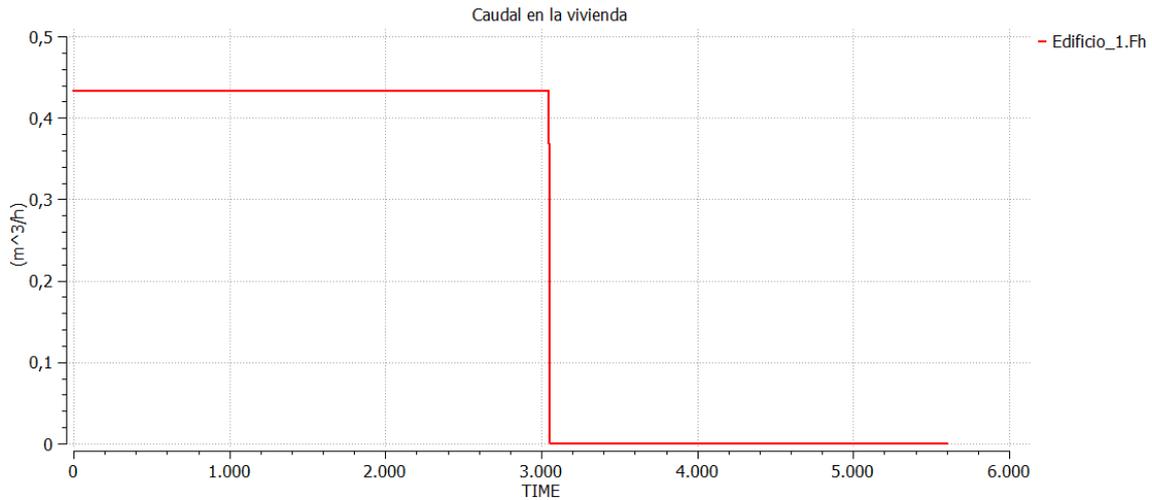


Figura 6.1.6: Caudal a lo largo del tiempo

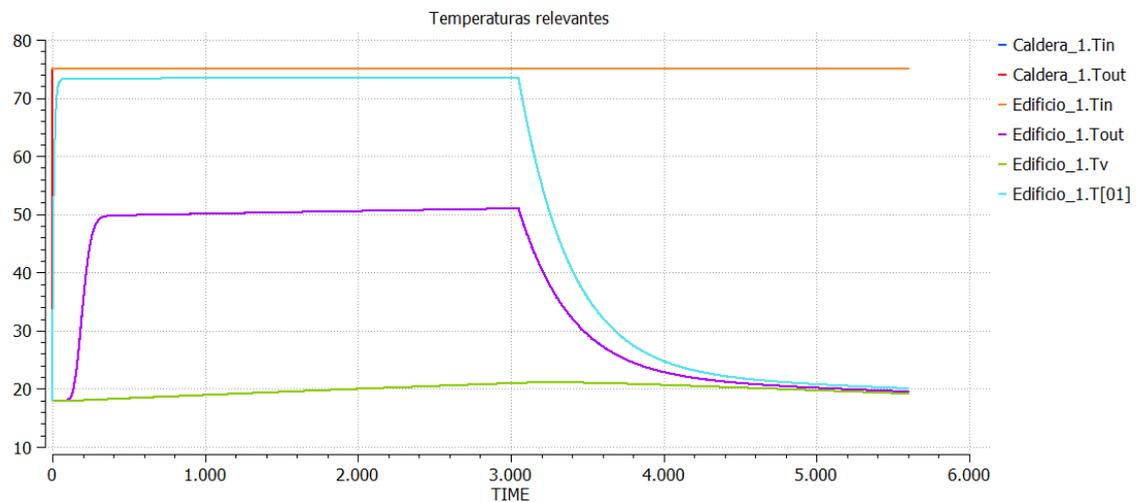


Figura 6.1.7: Temperaturas de interés del sistema a lo largo del tiempo

3. Detalle de la evolución de la temperatura de la vivienda: Figura 6.1.8
4. La evolución de la señal de control de la caldera: Figura 6.1.9
5. La evolución de la potencia de la caldera y de la potencia consumida en el edificio (aporte de los radiadores): Figura 6.1.10
6. La evolución de la temperatura del agua a lo largo del circuito de radiadores de la vivienda en distintos instantes de tiempo: Figura 6.1.11
7. Comparación de la energía consumida en la vivienda según el contador, y la energía real aportada por los radiadores: Figura 6.1.12

Análisis de resultados

En este experimento tratamos de comprobar el funcionamiento del modelo para simular el comportamiento de la calefacción en una sola vivienda.

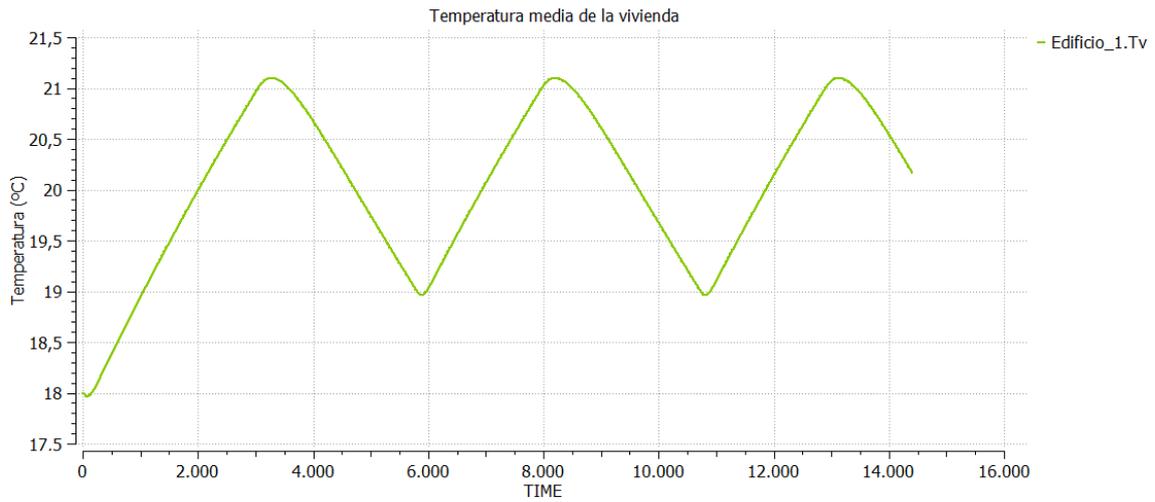


Figura 6.1.8: Detalle de la evolución de la temperatura media de la vivienda (tiempo extendido)



Figura 6.1.9: Señal de control de la caldera

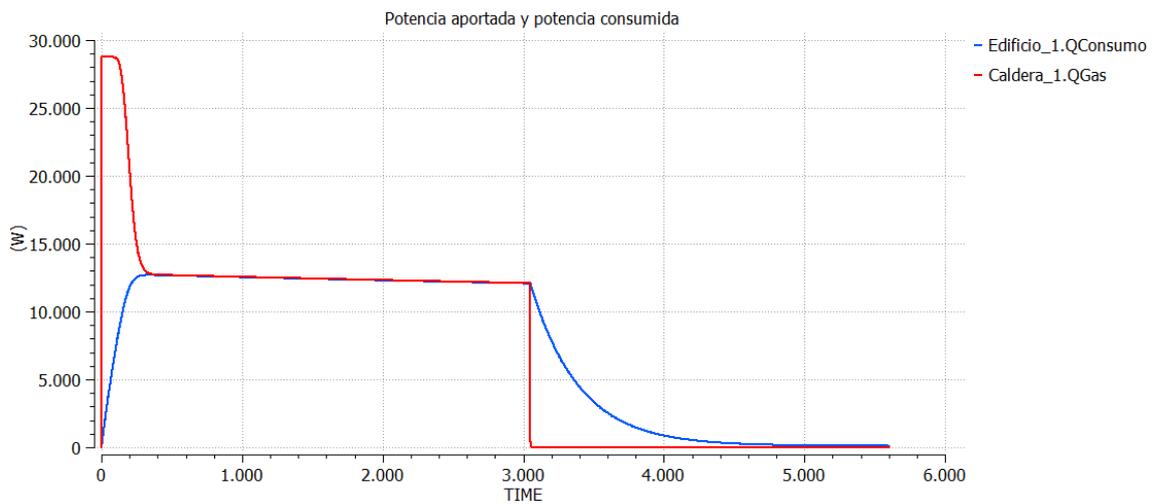


Figura 6.1.10: Potencia de la caldera y potencia consumida en el edificio

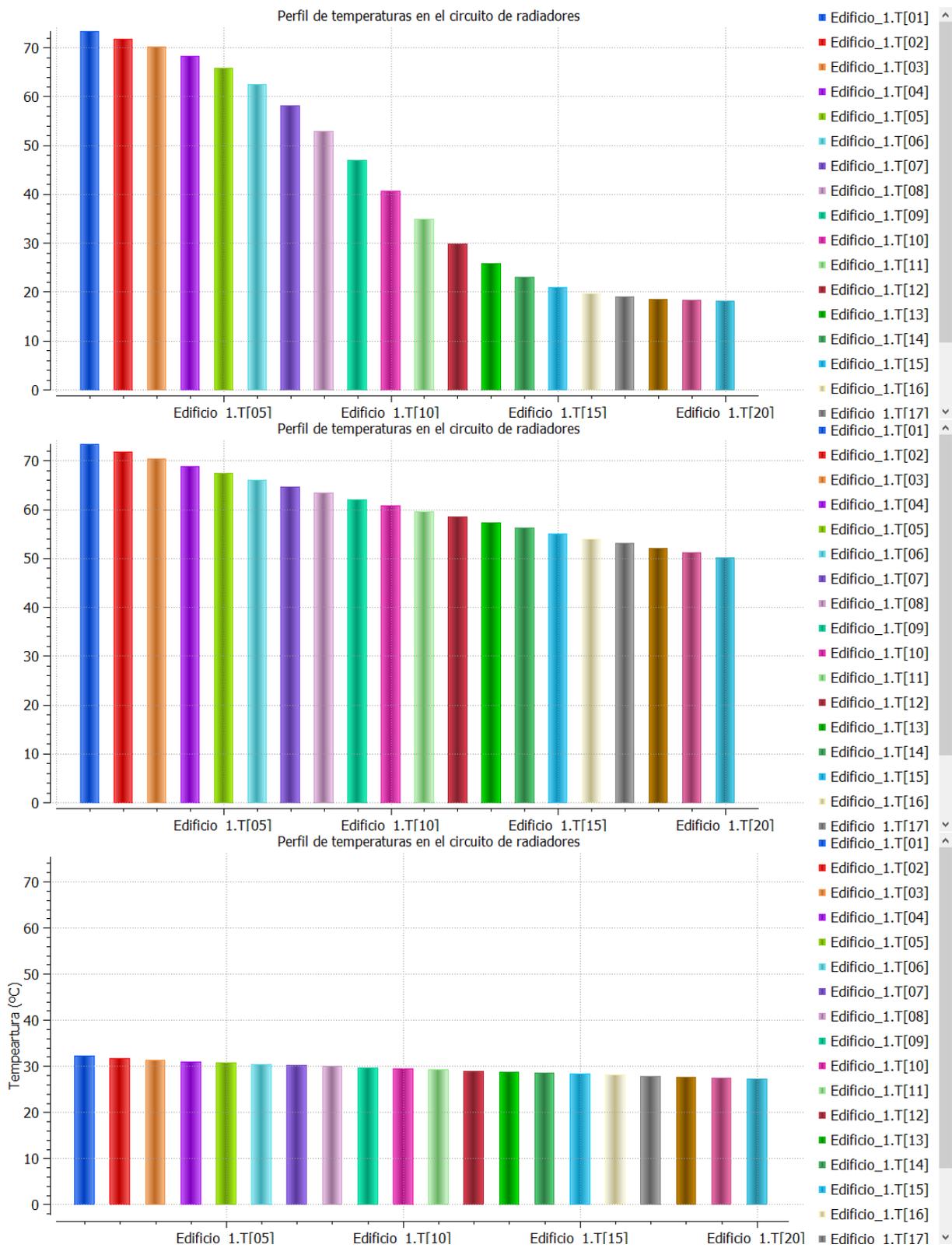


Figura 6.1.11: Evolución de la temperatura del agua a lo largo del circuito de radiadores en para 100s, 1000s, y 3600s

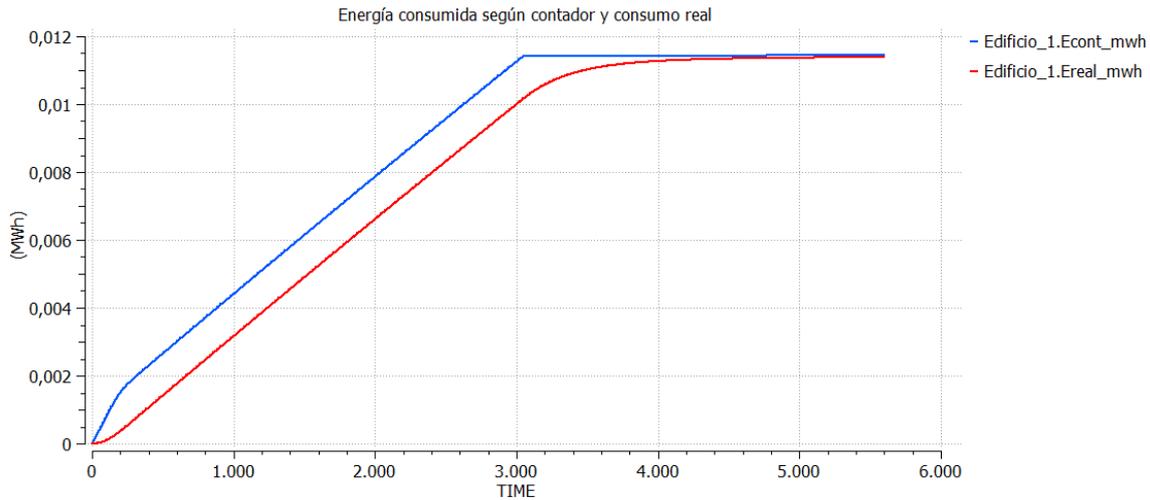


Figura 6.1.12: Energía consumida según el contador y consumo real

Para ello, se ha simulado todo el conjunto de la instalación de calefacción comunitaria como una única caldera con una potencia equivalente a las tres que hay realmente, y un depósito para simular los retrasos e inercias térmicas del resto de la planta. El depósito se configura con una temperatura inicial de 75°C .

En el bloque edificio, se configura que sólo haya una vivienda (N), y en la definición del experimento se configura para que la temperatura inicial de las viviendas sea de 18°C .

Se han obtenido multitud de gráficas pues, aunque es uno de los experimentos más simples que hay en este trabajo, es uno de los que más información podemos obtener en relación al sistema real, por ser el entorno en que hemos podido experimentar con el sistema real, y tomar múltiples medidas.

La temperatura exterior, configurada a 0°C , también es el dato real aproximado que se obtuvo el día del experimento.

La condición inicial de la temperatura de la vivienda a 18°C no es aleatorio. Es el valor real que se midió en la vivienda por la mañana antes de encender la calefacción en el experimento que se utilizó para medir la capacidad térmica de la vivienda.

En el experimento real, la calefacción permaneció en funcionamiento (tras su primer encendido) durante aproximadamente 50 minutos. En el experimento, permanece encendida hasta algo más de los 3000 segundos, es decir 50 minutos. Tras su apagado, los radiadores tardaron en enfriarse hasta una temperatura cercana a la ambiente cerca de media hora. En la simulación este tiempo es de aproximadamente 1500s, es decir, 25 minutos.

Además, la potencia que indicaba el contador de calefacción nada más encenderse la calefacción era de unos 28kW durante unos instantes. Se trata de un dato muy alto, pero con lógica, ya que el contador observa que está entrando agua a 75°C a la vivienda, y está saliendo agua a los 18°C a los que estaba la vivienda. Se observa que también sucede en la simulación, hasta que se reemplaza todo el agua fría que había en los radiadores.

Se observó que en el sistema real, todo el circuito de radiadores de la casa tardó en calentarse unos 5 minutos (medido en el último radiador del circuito, que fue el último en calentarse). Algo

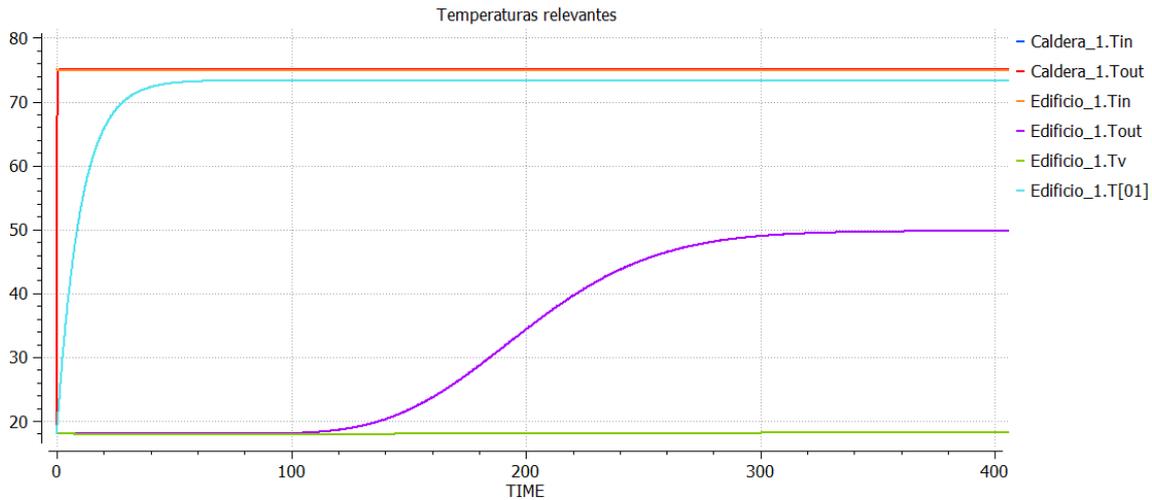


Figura 6.1.13: Detalle del calentamiento de los radiadores

que también se observa en la simulación anterior, aunque se puede ver con más detalle en la figura 6.1.13. Se observa por la temperatura del agua de salida del circuito, cuando alcanza un valor estable, en torno a los 50°C en este caso. Se observa que en la simulación eso le lleva unos 300 segundos, es decir 5 minutos.

Como decimos, la temperatura del agua de salida se estabiliza durante el funcionamiento pseudoestacionario en unos 50°C, algo que se corresponde totalmente con la realidad. También a partir de ese momento, la potencia que se consume se estabiliza en torno a los 12kW (al principio un poco más, unos 1,6kW, porque la vivienda aún está más fría y luego va decreciendo lentamente hasta cerca de 12kW). Algo que también se corresponde con mucha exactitud con el comportamiento real.

Además, en ese intervalo de tiempo, la potencia aportada por la caldera (que es la misma que lee el contador), y la potencia realmente aportada por el circuito de radiadores a la vivienda coincide. Antes de ese punto, la potencia que observaba el contador era mayor que la aportada a la vivienda, como se observa en la figura 6.1.10, dado que el contador está viendo que hay una gran diferencia de temperatura entre el agua que entra y el agua que sale de la vivienda, pero como el circuito de radiadores en realidad aún no está caliente, aún no está aportando toda la potencia que aportará en ese pseudoestacionario.

Por contra, cuando el termostato ordena el cierre de la electroválvula (cuando la casa ya está caliente), el contador deja de aumentar el consumo que mide, ya que se detiene el caudal que entra a la vivienda. Sin embargo, el circuito de radiadores sigue caliente, y sigue aportando energía a la vivienda hasta que se igualan las temperaturas. Este fenómeno se puede observar tanto en la figura 6.1.10, dónde se muestran las potencias que mide el contador y la potencia real que aportan los radiadores, como en la figura 6.1.12, dónde se observa cómo aunque el contador lleva un cierto adelanto en cuanto a la medida de energía consumida, cuando el sistema se calienta, la diferencia deja de aumentar y ambas medidas (la del contador y la real) van paralelas, y finalmente, cuando el termostato apaga la calefacción de la vivienda, el contador deja de aumentar su medida de consumo, pero la energía que aportan los radiadores realmente sigue aumentando hasta que se iguala a lo que había medido el contador, mientras se enfría el circuito.

Conclusiones de este experimento

Como se ha podido ver, en este experimento se observa una gran coincidencia entre los datos medidos del sistema real y los resultados obtenidos en la simulación. Esto tiene todo el sentido del mundo, ya que nos hemos basado en distintos experimentos con el sistema real, en distintos días y condiciones, para calcular los parámetros que caracterizan el modelo, como se explicó en el apartado 5.4. Por tanto, lo lógico es que en las simulaciones (si el modelo matemático es correcto), coincidan con gran exactitud los resultados.

En este sentido, con este experimento hemos podido comprobar que el modelo matemático y las medidas de los parámetros que se tienen de las viviendas es muy preciso, gracias a la experimentación con el sistema.

También podemos observar la dinámica de la temperatura media en la vivienda (figura 6.1.8), que vemos que oscila algo más de los 2°C de histéresis que tiene el termostato configurados (en base al termostato real). Esto se debe a que desde que se enciende la calefacción (cuando la temperatura baja de 19°C) hasta que empiezan a calentar los radiadores pasa un poco de tiempo, en los que la casa se sigue enfriando levemente por debajo de los 19°C. Por otra parte, cuando se apaga la calefacción (cuando se sobrepasan los 21°C), los radiadores siguen calientes y siguen aportando energía a la vivienda hasta que se enfrían. Por tanto se produce un pequeño sobrepaso de los 21°C.

6.1.2. Modelo simplificado del edificio

En este caso, se va a realizar un modelo muy simplificado de lo que sería el conjunto del sistema de calefacción y agua caliente sanitaria de todo el edificio. Se utilizará un único componente «Viviendas», que representará las 136 viviendas que hay en el sistema real, y un único componente «Intercambiador», que representará a los dos intercambiadores de calor que hay conectados en paralelo en la instalación real para el abastecimientos de ACS. También habrá una única caldera, con la potencia equivalente de las 3 que puede haber en funcionamiento.

El esquema del modelo simplificado del edificio se muestra en la figura 6.1.14 en la página siguiente.

Para caracterizar las viviendas, tan sólo hay que cambiar respecto del experimento anterior el parámetro N, que indica el número de viviendas. En este caso, se supondrá que hay 136 viviendas, como es el caso del sistema real. Ver figura 6.1.16 en la página 90.

En el caso del intercambiador de calor, para caracterizarlo, indicaremos que tiene el doble de capacidad en el depósito que uno solo (que tiene 980L), que tiene una constante de transmisión térmica del intercambiador del serpentín del doble, igual que la constante de pérdidas, y las pérdidas de carga se reducirán a la mitad de la curva normal, descrita en la tabla 5.4 en la página 71. Así obtenemos una simplificación del sistema real, poniendo los dos intercambiadores reales como si fueran un único elemento en la simulación. Ver figuras 6.1.17 en la página 91 y 6.1.18 en la página 91.

En el modelo también se van a incorporar 3 bombas. La bomba correspondiente a la caldera, la bomba del circuito primario de los intercambiadores de ACS y la bomba del circuito de calefacción. Como en el caso de los intercambiadores, hay que modificar sus parámetros, ya que

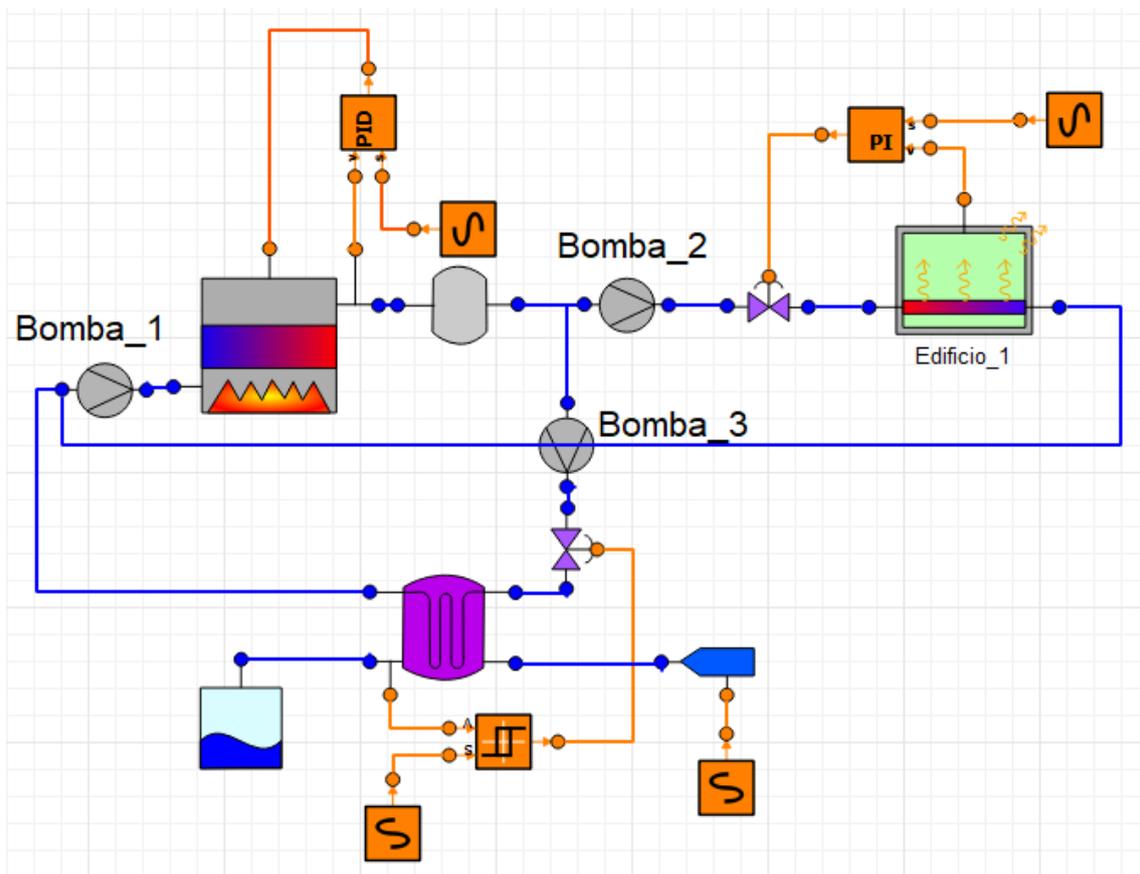


Figura 6.1.14: Esquema del modelo simplificado del edificio

estamos representando varios equipos en realidad. Cada caldera tiene su bomba. Como estamos simplificando el modelo para poner sólo una caldera de la misma potencia equivalente, pondremos también sólo una bomba, pero con una curva característica equivalente a las bombas de las 3 calderas (modelo Wilo TOP-S-50/4) en paralelo, es decir, sumando sus curvas características «en horizontal», sumando caudales, no presiones. Lo mismo ocurre con el circuito de calefacción. En realidad existen dos circuitos distintos en el edificio (uno par las viviendas con orientación norte y otro para las viviendas con orientación sur). Por eso, debemos poner una bomba con una curva equivalente a la de dos bombas reales Wilo TOP-S-65/13 en paralelo.

Para el caso de los intercambiadores de calor no hay ningún problema, pues sólo hay una bomba modelo Wilo TOP-S-50/10 que alimenta a ambos intercambiadores en paralelo.

En el esquema se puede ver, además de los elementos mencionados anteriormente, los distintos lazos de control existentes en el sistema. Cabe destacar en este aspecto, que existen 3 lazos de control: el control de la temperatura de salida de las calderas, el control de la temperatura del ACS en los depósitos, y el control de la temperatura de las viviendas.

La temperatura de control de las calderas es de 75°C .

La temperatura de control la del intercambiador es de 50°C , pero tiene un control de relé con histéresis al que se ha configurado con una histéresis de $\pm 2.5^{\circ}\text{C}$ (5°C de histéresis en total). No se conoce el dato real de este control, pero sí se ha observado en el funcionamiento real del sistema que en unas ocasiones el agua caliente sale del grifo a una temperatura notablemente superior a otras.

En el caso del control de la temperatura de las viviendas, se ha sustituido el control de relé del experimento de una sola vivienda por un controlador proporcional integral (PI), ya que al ser un modelo que engloba a todas las viviendas simultáneamente, se obtendrán los valores medios del funcionamiento normal. Si hubiera un control de relé, sería como indicar al sistema en ese esquema que todas las viviendas comienzan a demandar calefacción a la vez, en el mismo instante de tiempo. Como si todos los termostatos de las 136 viviendas conmutaran a la vez, siempre, para encender o para apagar. Y eso sería un funcionamiento completamente irreal.

Lo normal es pensar que, aunque todas las viviendas tendrán temperaturas similares, cada una estará a una temperatura concreta, y cada una tendrá su temperatura objetivo fijada en un punto. Pero en esta simulación no entramos en detalle de cada vivienda individualmente, y se pondrá como temperatura deseada la que sería la temperatura media deseada de todas las viviendas (en este caso, 20°C). De este modo, y gracias a ese controlador PI, que ajustará la demanda de calefacción de forma continua en todo el intervalo de apertura de la válvula de control, podremos obtener una visión aproximada del funcionamiento global medio de todo el sistema. Es decir, si el controlador PI saca una señal de control para la válvula de 0.1, en realidad no hay ninguna válvula abierta un 10% (recordemos que las válvulas del sistema real son de tipo ON/OFF), sino que un 10% de las válvulas del sistema están abiertas, y el resto cerradas, en ese instante. En el sistema real, habría pequeñas conmutaciones discretas por la apertura o cierre de las válvulas de las viviendas, pero dado que el número de viviendas es lo suficientemente elevado, se puede aproximar bastante bien con el control continuo que se ha incorporado. De lo contrario, cada vivienda supondría una variación discreta de la señal de control de magnitud igual a $1/136$.

La configuración del bloque del controlador PI se muestra en la figura 6.1.15 en la página siguiente.

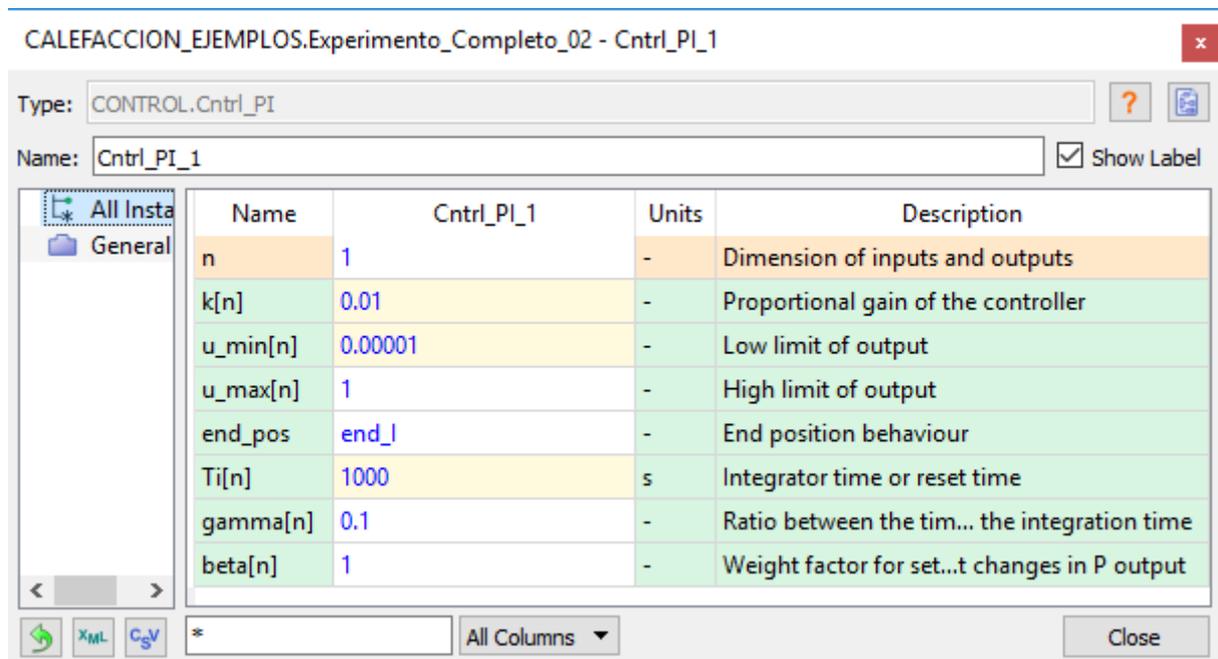


Figura 6.1.15: Configuración del controlador PI

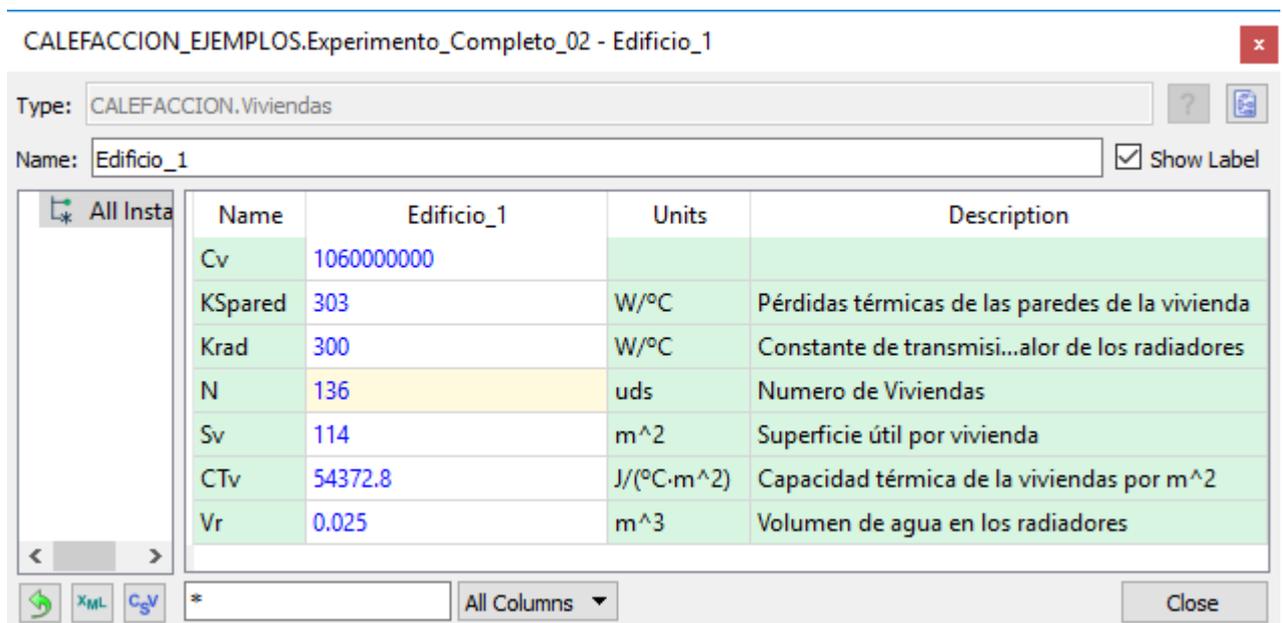


Figura 6.1.16: Configuración del edificio

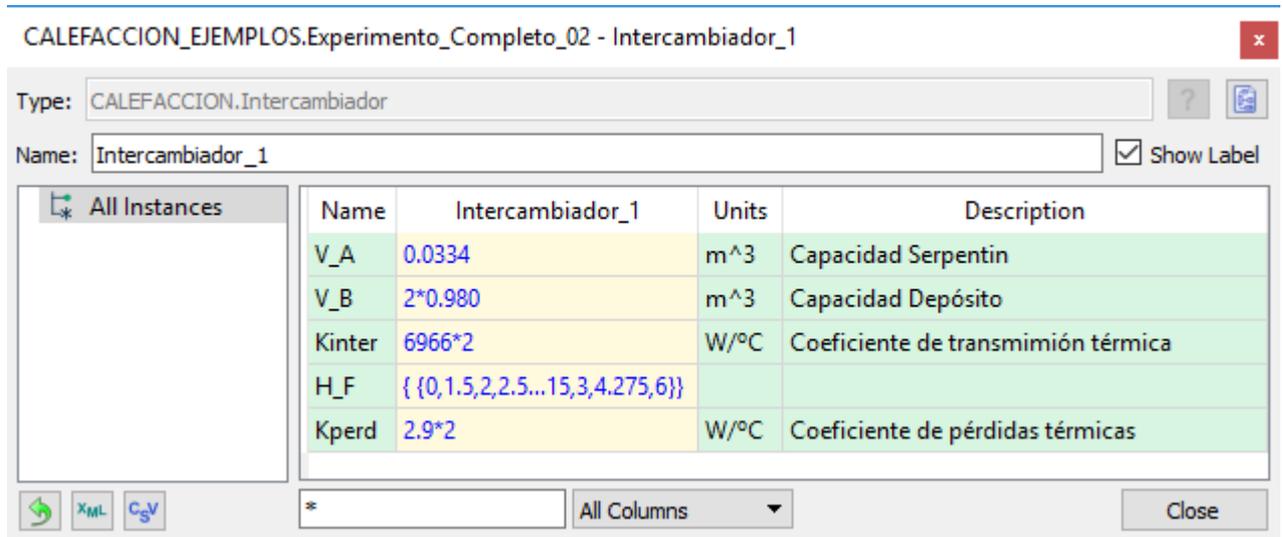


Figura 6.1.17: Configuración del intercambiador

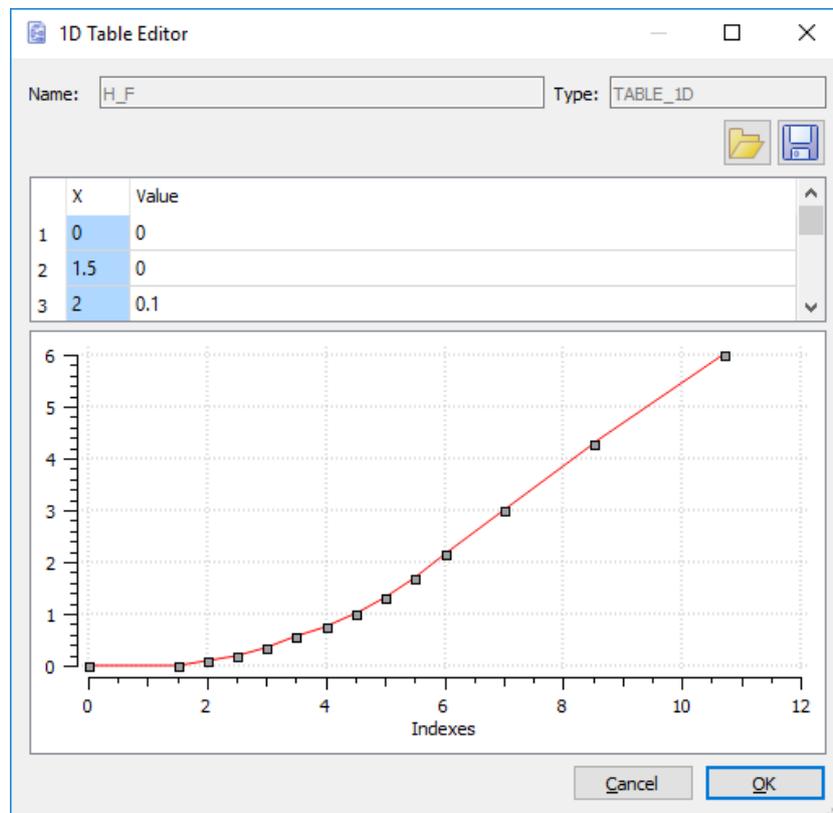


Figura 6.1.18: Curva de pérdidas de carga equivalente

Además, es necesario estimar el consumo de agua caliente sanitaria del edificio.

Para ello, acudo a las facturas de agua caliente de mi vivienda, y observo en una de ellas que se han consumido 13m^3 de ACS en un periodo de 3 meses. Teniendo en cuenta además que la mayor parte del consumo de agua se concentra en un intervalo real de unas 12 horas diarias (no necesariamente consecutivas), y extrapolando ese dato al conjunto de las 136 viviendas del edificio, se obtiene lo siguiente:

$$13\text{m}^3/3\text{meses} = \frac{13}{3} \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{mes}} \cdot \frac{1\text{mes}}{30\text{días}} \cdot \frac{1\text{día}}{12\text{h}} = 0,012037 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \quad (6.1.1)$$

$$0,012037 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \cdot 136\text{viviendas} = 1,6 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \quad (6.1.2)$$

Por lo que para simular el estado normal de funcionamiento de todo el sistema, se incorporará ese dato de caudal continuo en la toma de agua conectada al intercambiador de ACS. Además, la temperatura del agua de entrada al sistema será de 10°C .

Con esos datos, procedemos a crear la partición del modelo, dónde nos solicitará dos condiciones de contorno: la temperatura exterior y la presión en uno de los nodos del circuito (dado que en este caso no hemos puesto ninguna referencia de presión en el circuito de las calderas). Indicaremos la presión a la entrada de la bomba 1, por ejemplo.

También nos solicita datos iniciales para resolver los lazos algebraicos del circuito hidráulico del modelo. En este caso nos solicita dos datos, dado que tenemos dos ramas.

Tras finalizar la creación de la partición con éxito, creamos un experimento transitorio.

Como siempre, EcosimPro rellena los valores iniciales de las variables que considera oportuno con unos valores por defecto, que van a ser ajustados de cara a la realización del experimento que realmente queremos.

En este caso, indicaremos que la temperatura inicial de las viviendas es de 19.5°C (para generar un pequeño transitorio inicial que permita comprobar el funcionamiento del control PI), que la temperatura del depósito es de 75°C , que la temperatura del intercambiador de ACS es de 50°C . Además, se configuran las válvulas de control como inicialmente cerradas.

Para el lazo algebraico, hemos seleccionado las variables de los caudales que circulan por las bombas 2 y 3. Pondremos valores cualesquiera distintos de 0 y distintos entre sí, ya que así el sistema logrará calcular los valores reales, pero de lo contrario, no logrará comenzar la simulación. En este caso, se ha elegido un caudal de $1.5\text{m}^3/\text{h}$ para la bomba 2 y $0.5\text{m}^3/\text{h}$ para la bomba 3.

```
-- initial values for algebraics
Bomba_2.Fh = 1.5
Bomba_3.Fh = 0.5
```

En cuanto a las condiciones de contorno, la presión en la entrada de la bomba 1 se fija a un valor 0 (para que todas las demás presiones que se quieran medir vayan en relación a esta), y la temperatura exterior a 11°C , por ejemplo.

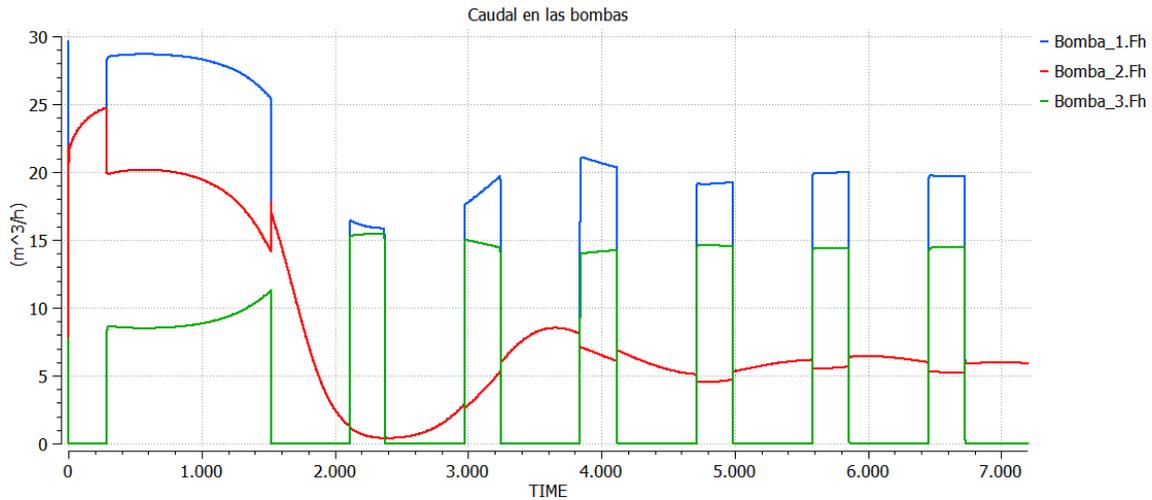


Figura 6.1.19: Caudales en las ramas del sistema

```

BOUNDS
-- Set equations for boundaries: boundVar = f(TIME;...)
Bomba_1.INPUT.P = 0
CALEFACCION.Text = 11

```

Con esos datos, procedemos a simular.

Vamos a obtener distintas gráficas de interés que mostrarán el comportamiento del sistema en las condiciones para las que se ha preparado la simulación, tanto en el modelo como en el experimento:

1. Caudales en las bombas 1, 2 y 3: Figura 6.1.19.
2. Temperaturas de interés sobre la calefacción: Figura 6.1.20 en la página siguiente.
3. Temperaturas de interés sobre el intercambiador de ACS: Figura 6.1.21 en la página siguiente.
4. Detalle de la temperatura de las viviendas: Figura 6.1.22 en la página siguiente.
5. Detalle de la temperatura del ACS en el intercambiador: Figura 6.1.23 en la página 95.
6. Señal de control de la caldera: Figura 6.1.24 en la página 95.
7. Potencia de la caldera y consumos del edificio y el intercambiador: Figura 6.1.25 en la página 95.

Análisis de resultados

En la parte relativa a la calefacción observamos que, tras un periodo transitorio, la temperatura de las viviendas se estabiliza por completo en los 20°C que habíamos puesto de referencia

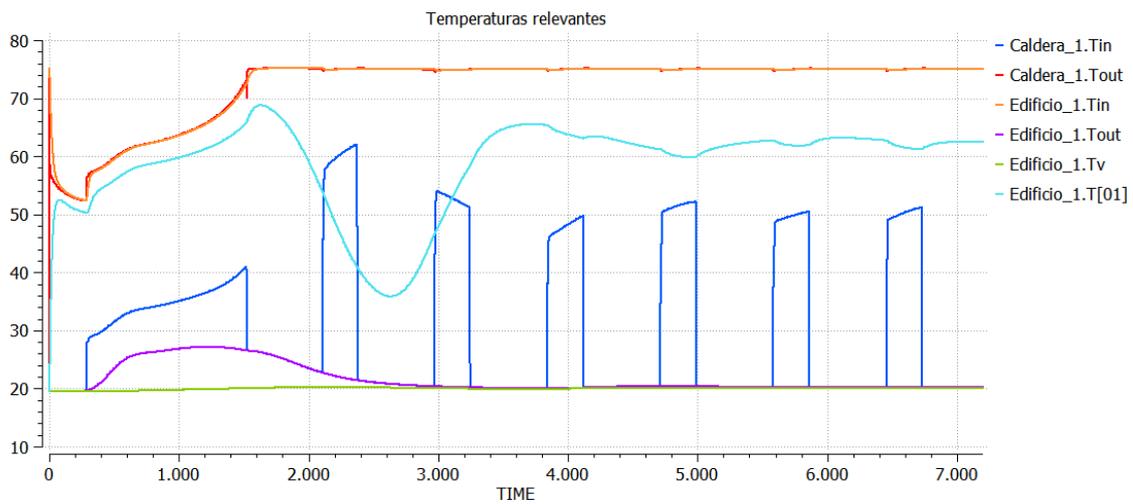


Figura 6.1.20: Temperaturas de interés en la calefacción

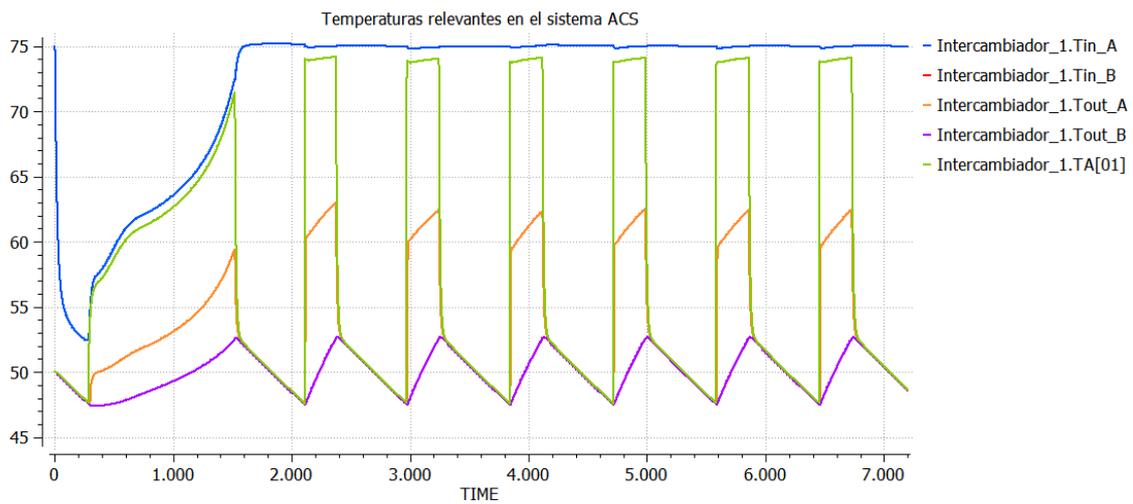


Figura 6.1.21: Temperaturas de interés en el sistema de ACS

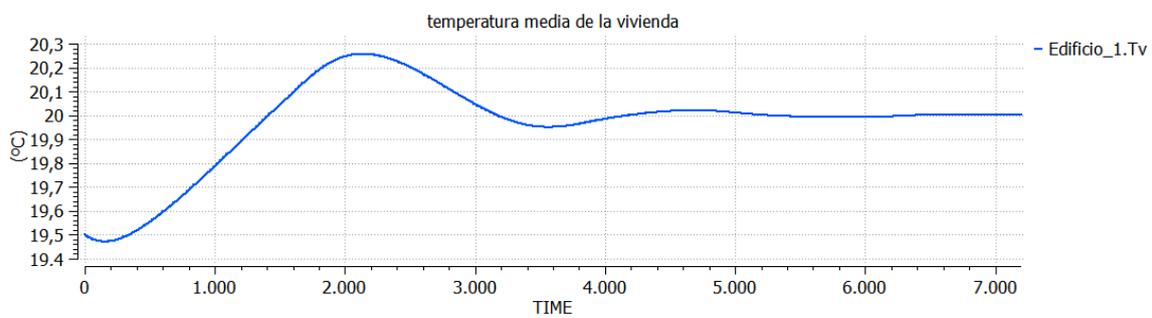


Figura 6.1.22: Detalle de la evolución de la temperatura en las viviendas

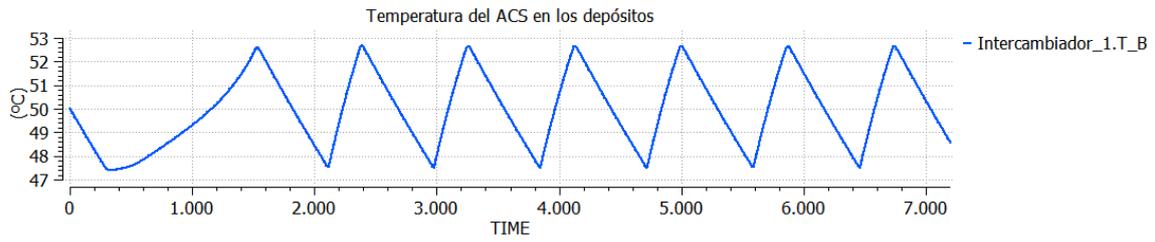


Figura 6.1.23: Detalle de la evolución de la temperatura del ACS

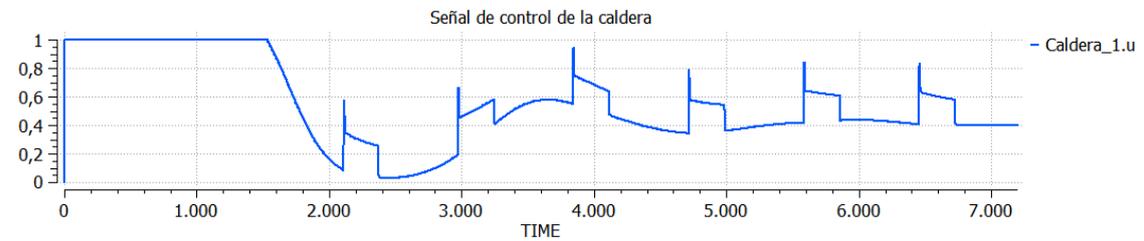


Figura 6.1.24: Señal de control de las calderas

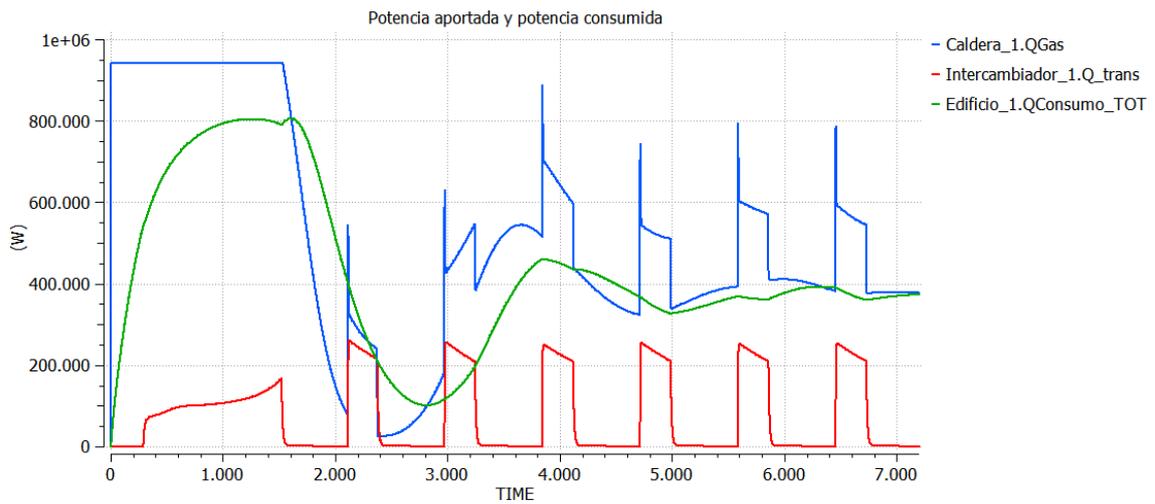


Figura 6.1.25: Potencia aportada por la caldera y consumos de calefacción y ACS

(figura 6.1.22 en la página 94). Se observa también el pequeño sobrepico de la temperatura durante ese transitorio inicial, mucho menor que la histéresis del experimento con el relé ($\pm 1^\circ\text{C}$). También puede llegar a observarse el pequeño efecto de la perturbación que supone el arranque o la parada de la bomba del circuito primario de los intercambiadores de ACS pues apenas se observa perturbación en la temperatura de las viviendas.

Se observa en la figura 6.1.23 en la página anterior que la evolución de la temperatura del ACS oscila entre los valores de histéresis del controlador de tipo relé que tiene su sistema. Se aprecia cómo se activa y se desactiva periódicamente a lo largo del tiempo. Durante los tiempos que está activo, como puede verse en la gráfica 6.1.25 en la página anterior, la potencia que se aporta al fluido comienza en unos 250kW y va disminuyendo un poco a medida que crece la temperatura del secundario del intercambiador. Algo que cuadra con los datos que da el fabricante para condiciones de funcionamiento similares, teniendo en cuenta que se están modelando dos intercambiadores a la vez.

También se puede observar que el punto de funcionamiento estacionario de las calderas para estas condiciones de experimentación ronda el 60 % cuando está activo el sistema de ACS, y el 40 % solo con la calefacción, como se aprecia en la figura 6.1.24 en la página anterior. Eso significa que, en condiciones normales, y para este grado de detalle, sería suficiente (aunque al límite) con la potencia que pueden aportar 2 calderas (ya que se demanda menos del 66.67 % del total, y hay 3 calderas modeladas en el experimento). Pero aún se tiene mucho margen para momentos en los que la demanda sea mayor y para picos transitorios, como se ve en las figuras.

Conclusiones del experimento

Con este experimento de modelado de bajo grado de detalle no podemos obtener información sobre el estado real detallado del edificio. Tan sólo podemos obtener una aproximación del punto de funcionamiento medio de todas las viviendas, y de los consumos y potencias medias. Tampoco obtenemos información detallada sobre las pérdidas de carga a lo largo del circuito distribuidor a lo largo de todo el edificio, ni de las pérdidas energéticas a lo largo del mismo, aunque ambas deberían ser muy inferiores a las pérdidas de carga y a los consumos energéticos en las propias viviendas.

Sin embargo el experimento es suficiente para obtener una medida aproximada del punto medio de funcionamiento, y de las potencias aproximadas que se consumirían en estacionario para la calefacción y para el ACS. Del mismo modo, nos permite validar el dimensionamiento de la instalación y ver si es suficiente con las bombas que hay instaladas y con el número de calderas en funcionamiento.

Se trata de la mayor simplificación posible del conjunto del edificio, pero aún así nos puede llegar a aportar información útil, como puede verse. Como ya se ha comentado, es importante llegar a un compromiso entre el nivel de detalle de los modelos y los experimentos y la precisión o las medidas que se quieren obtener. En función de lo que busquemos, este experimento podría ser suficiente, pero si queremos más detalle, habrá que refinar más el modelo, como se verá en experimentos posteriores.

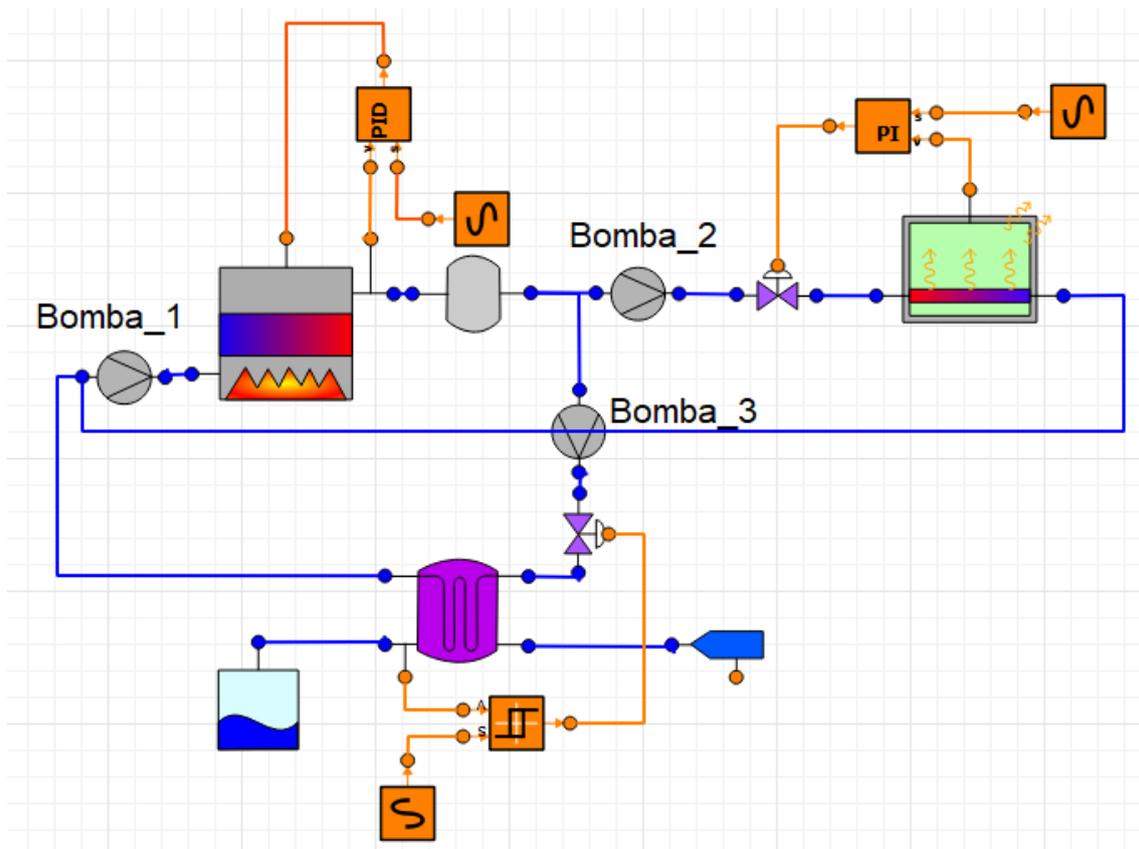


Figura 6.1.26: Esquema para la simulación de funcionamiento a lo largo del día

6.1.3. Modelo de funcionamiento diario del edificio

En este experimento se toma el mismo modelo, con el mismo grado de detalle que en caso anterior, pero vamos a realizar modificaciones en el experimento, para observar de forma detallada la evolución del sistema a lo largo del día.

El esquema que se construye en esta ocasión se muestra en la figura 6.1.26, y es muy parecido al del experimento anterior.

Sin embargo, a la hora de realizar el experimento, vamos a cambiar las entradas al sistema a lo largo del tiempo. Concretamente, vamos a modificar el caudal consumido de ACS, y el número de viviendas que demandan calefacción a lo largo del día.

Para ello, generamos en el fichero del experimento dos tablas de puntos, que serán los que usaremos para definir el valor de esas entradas al sistema.

La tabla de puntos que definirá la demanda de ACS se muestra en la siguiente tabla:

Tiempo (s)	Tiempo (h)	Q(m ³ /h)	Tiempo (s)	Tiempo (h)	Q(m ³ /h)
0	0	0.1	50400	14	1.5
7200	2	0	57600	16	0.5
14400	4	0.1	64800	18	0.25
21600	6	1	72000	20	1.25
28800	8	3	79200	22	1
36000	10	0.5	86400	24	0.1
43200	12	1			

Tabla 6.1: Tabla de puntos de de las estimaciones de consumo de ACS a lo largo de un día

Además estos puntos se relacionarán por medio de una interpolación de spline.

El perfil de consumo de ACS a lo largo del día se ha realizado en base a la experiencia propia sobre el consumo de agua caliente en mi vivienda particular, y tratando de cuadrar que el total de consumo en el día sea aproximadamente 20m³, ya que se ha calculado que ese debe ser el consumo medio diario de todo el edificio.

Este dato de ha obtenido de una factura de agua caliente particular, dónde se contabilizó un consumo de 13m³ de agua caliente en 3 meses en una vivienda. A partir de ese dato:

$$13 \cdot \frac{m^3}{3meses} \cdot \frac{1mes}{30días} \cdot 136viviendas = 19,64m^3/día \quad (6.1.3)$$

Se trata de un cálculo realizado extrapolando el consumo de una sola vivienda a todo el edificio, y no deja de ser una aproximación de lo que puede ser un consumo real.

También se muestran los puntos que se usarán para definir el número de viviendas que se encuentran demandando calefacción a lo largo del día (N)¹:

Tiempo (s)	Tiempo (h)	N	Tiempo (s)	Tiempo (h)	N
0	0	1	50400	14	136
7200	2	1	57600	16	136
14400	4	1	64800	18	136
21600	6	1	72000	20	136
28800	8	1	79200	22	80
36000	10	20	82800	23	1
43200	12	100	86400	24	1

Tabla 6.2: Tabla de puntos de de las estimaciones de viviendas consumiendo calefacción a lo largo de un día

¹El parámetro N, que es el que dimensiona en el componente «Viviendas» el número de viviendas que se están modelando conjuntamente en ese bloque, no puede hacerse 0, debido a los cálculos que se realizan en el modelo del componente (en algunos cálculos se encuentra en un denominador), pero no es un gran problema indicar un número mínimo de viviendas de 1, o incluso un número racional, como 0.1, para indicar que no hay ninguna vivienda. La diferencia en la demanda será pequeña, y se puede tratar de ver también así la dinámica del circuito real (por el volumen de agua de los circuitos) y las pérdidas a lo largo de todo el sistema.

En este caso usaremos una interpolación lineal.

Para realizar estas interpolaciones, se han usado las siguientes sentencias en el apartado de variables de contorno (*BOUNDS*) del fichero del experimento:

```
toma_agua_1.Fh = splineInterp1D(Fh_t,TIME)
Edificio_1.N = linearInterp1D(N_t, TIME)
```

Dónde *Fh_t* y *N_t* son las tablas de puntos anteriormente descritas para indicar los consumos de caudal de ACS y viviendas demandando calefacción, respectivamente.

Se va a realizar la simulación durante un tiempo de 86400 segundos, es decir, 24 horas. Supondremos además que la simulación dará comienzo a las 00:00h de un día cualquiera. Es decir, vamos a simular la evolución del sistema a lo largo de un día completo cualquiera.

En esta ocasión, sólo en este experimento, y con el fin de observar mejor los datos en los gráficos, se va a mostrar en tiempo en horas en el eje horizontal de los gráficos, en lugar de en segundos, como en todos los demás casos. De esta forma será más sencillo apreciar la evolución del sistema según pasan las horas del día.

La temperatura del ACS se ha configurado a un valor medio de 50°C, pero con una histéresis de +/- 5°C. No se conoce cuál es el dato real de histéresis en este control, pero sí se ha observado que en ocasiones el agua caliente sale de los grifos a una temperatura notablemente superior que en otros momentos. Poner unos valores de histéresis menores en el control (como se hizo en el experimento anterior) implicarán una mayor frecuencia de activación del control, pero el funcionamiento del sistema no debería verse comprometido. Se decide por tanto dejar el valor en +/- 5°C, para poder apreciar mejor las variaciones en la frecuencia de activación de ese control y su efecto y perturbaciones en el resto del sistema, ya que si se pone un valor de histéresis más pequeño, la frecuencia será mayor y será más difícil apreciarlo en los gráficos.

La temperatura exterior está configurada a 11°C

Vamos a observar primeramente los perfiles que hemos elegido para los consumos de ACS (figura 6.1.27) y calefacción (figura 6.1.28), y posteriormente prestaremos atención a la evolución de la temperatura de servicio del ACS (figura 6.1.29), la temperatura de las viviendas que están consumiendo calefacción (figura 6.1.30), la potencia aportada por las calderas (figura 6.1.31), y el caudal que circula por las bombas (figura 6.1.32).

Se trata de una simplificación del funcionamiento del sistema real, en la que se pretende observar principalmente la distinta demanda de energía que debe soportar el sistema a lo largo de las horas del día. El funcionamiento real del sistema es algo más complejo, ya que las calderas realmente se apagan por la noche (a las 23:00h) y no vuelven a encenderse hasta por la mañana a las 8:00h, y el sistema tarda un tiempo en enfriarse y en volverse a calentar, ya que hay un gran volumen de agua distribuido a lo largo de toda la instalación. Sin embargo, como en este modelo, con un grado de detalle aún algo simplificado, esas dinámicas no se tienen en cuenta, porque no se consideran relevantes para los objetivos de la simulación, no se tiene en cuenta tampoco ese efecto del apagado de calderas y enfriamiento de todo el sistema por la noche. Se busca tan sólo observar los distintos grados de carga de trabajo a los que se somete al conjunto de la instalación y a las calderas a lo largo del día.

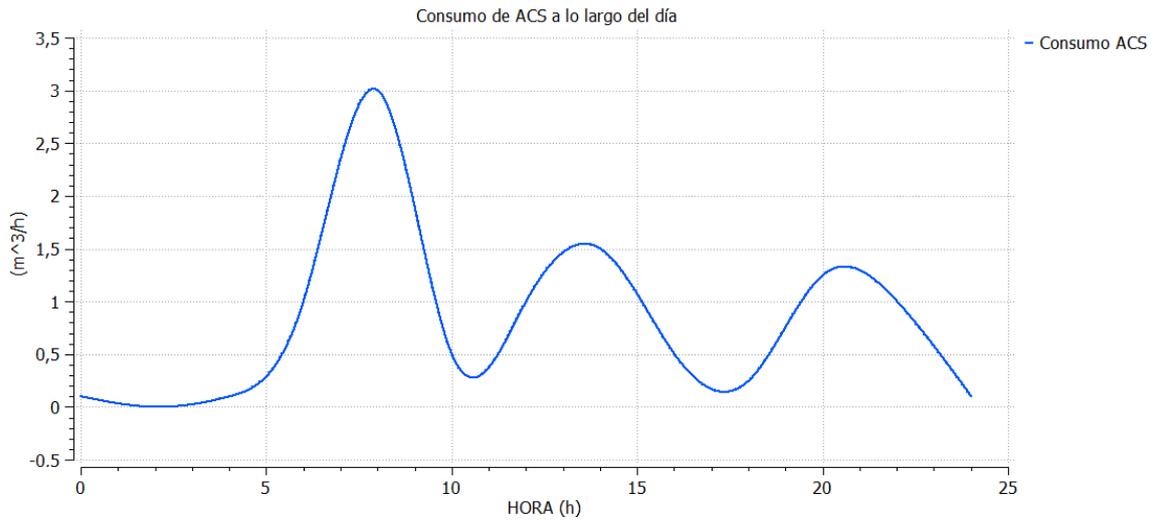


Figura 6.1.27: Perfil de consumo de ACS a lo largo del día

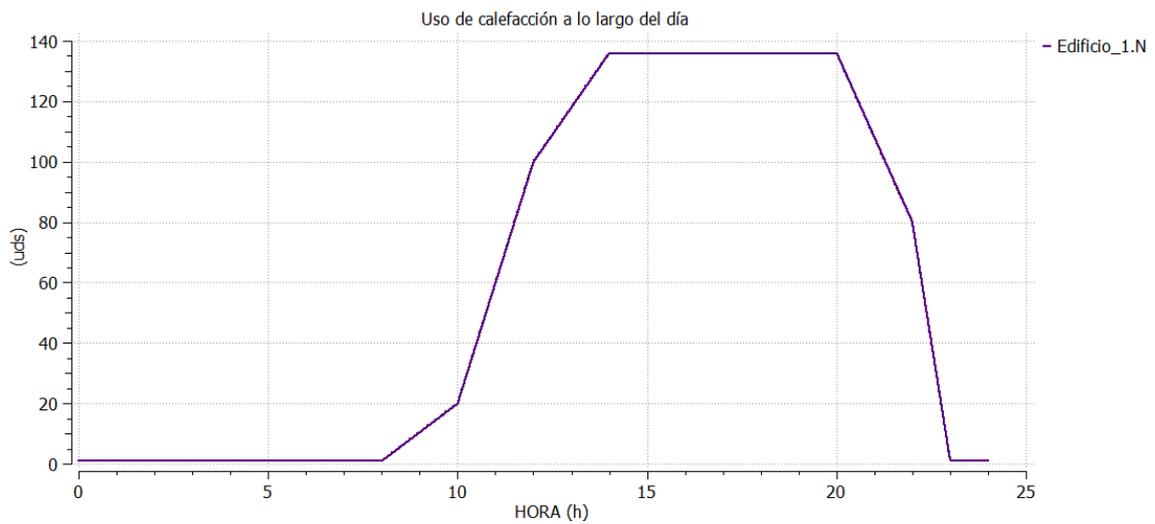


Figura 6.1.28: Perfil de viviendas utilizando calefacción a lo largo del día

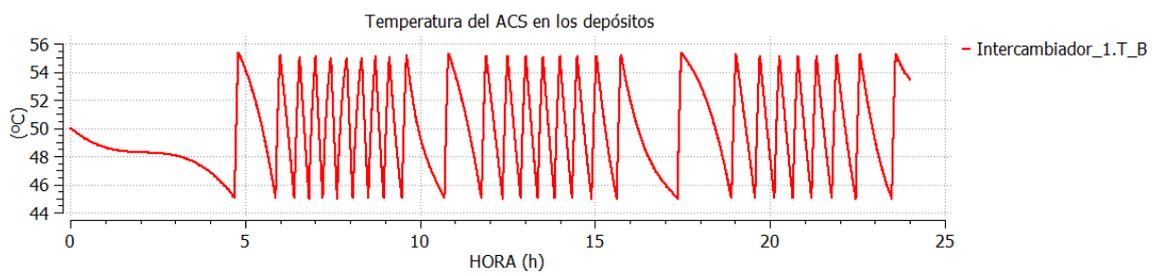


Figura 6.1.29: Evolución de la temperatura de ACS



Figura 6.1.30: Evolución de la temperatura media de las viviendas que tienen la calefacción activa

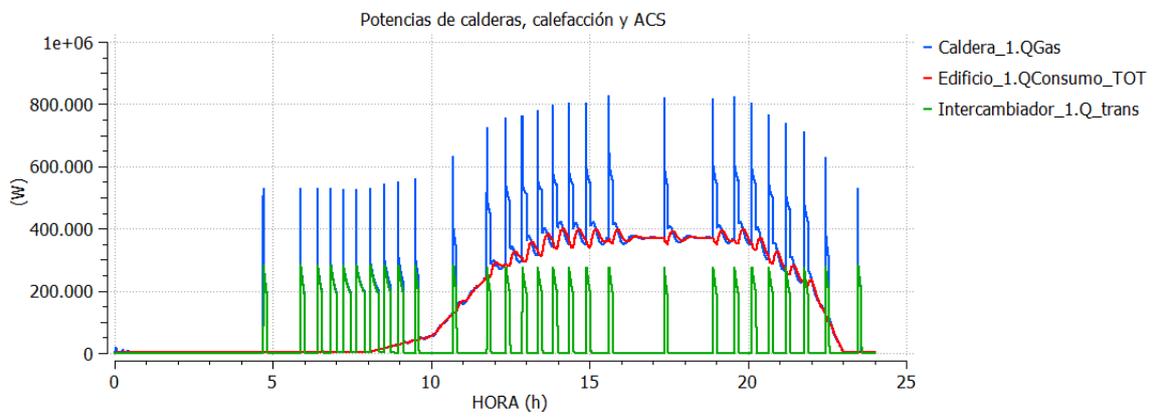


Figura 6.1.31: Evolución de la potencia aportada por las calderas, y los consumos de calefacción y ACS

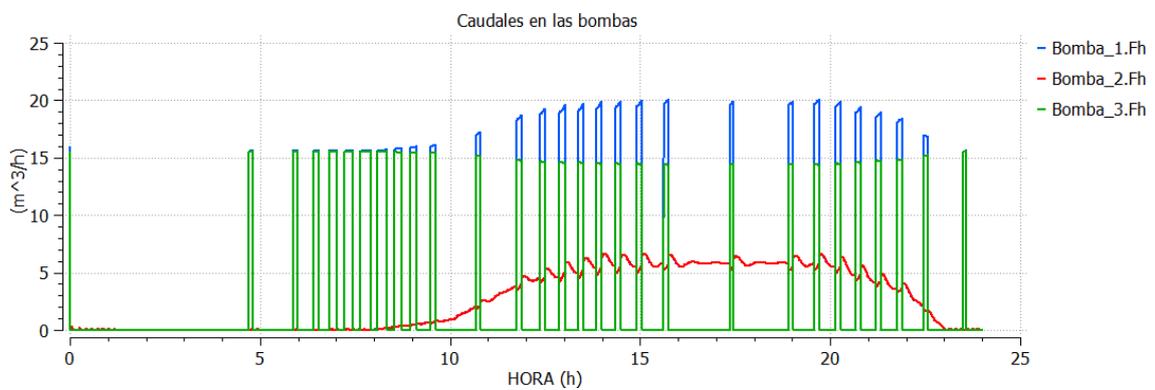


Figura 6.1.32: Caudales por los distintos circuitos

Análisis de resultados

Como puede observarse, el comportamiento del sistema es aparentemente perfectamente correcto.

La potencia que aportan las calderas se ajusta perfectamente a la suma de las potencias consumidas por el sistema de calefacción y por el sistema de calentamiento de los depósitos de ACS cuando se activa.

Se puede ver cómo la frecuencia con la que se activa el control de relé para mantener el ACS dentro del intervalo de temperaturas deseadas aumenta cuando el consumo de ACS es mayor, ya que se enfría más rápido.

También se puede observar toda la perturbación que la activación y desactivación del sistema de calentamiento de los depósitos de ACS tiene sobre la temperatura de las viviendas. Sin embargo, es una perturbación muy pequeña, que no llega a afectar a la temperatura de las viviendas ni en una décima de grado.

Se aprecia un pico de potencia muy breve en el funcionamiento de las calderas en los instantes en los que entra en funcionamiento el sistema de ACS, debido a que llega de golpe a la caldera agua más fría procedente del contenido del serpentín del primario de los intercambiadores, y el controlador de las calderas lo compensa de esa forma.

Conclusiones del experimento

Se puede observar en este experimento el funcionamiento general a lo largo de las horas del día del sistema completo de calefacción y ACS comunitario. Se han supuesto unos perfiles de consumo de ACS y calefacción determinados, aunque podría hacerse un experimento con cualquier perfil que se deseara comprobar.

Se ha podido verificar mediante este experimento el correcto dimensionamiento y funcionamiento de la instalación, ya que el sistema es capaz de mantener la temperatura de las viviendas estable, sin apenas perturbaciones, y de suplir perfectamente las demandas de ACS dentro del intervalo de temperaturas programado.

Este experimento es muy útil para comprobar el distinto punto de funcionamiento de la instalación a lo largo del día y que el sistema es capaz de suplir todas las necesidades requeridas.

Modificando las entradas al sistema, las tablas usadas para indicar la demanda de calefacción y ACS, podría comprobarse si la instalación soportará la carga de trabajo a la que se podría someter en determinadas circunstancias que se quisieran investigar.

6.1.4. Modelo detallado de calefacción de un portal

En esta ocasión va a realizarse un modelo de gran precisión del sistema de calefacción de uno de los portales del edificio.

Para ello, se va a realizar un modelado modular del sistema, por lo que se ha creado un componente llamado «Portal_5_2», que se describe a partir de los componentes ya existentes anteriormente en el fichero «Componentes.el». Se describirá de forma gráfica, realizando el esquema con los símbolos de esos componentes ya existentes.

La nomenclatura «Portal_5_2» hace referencia a que se trata de un portal dónde hay 5 pisos y 2 viviendas por piso. En el edificio hay más tipos de portales, con otras distribuciones, pero se hablará de ello más adelante. Vamos a modelar con detalle este portal en concreto por ser el más pequeño, debido al problema del límite de ecuaciones de la versión de la que se dispone.

Cada portal tiene dos circuitos de calefacción: uno para las viviendas con orientación norte, y otro para las viviendas con orientación sur. Estos circuitos de calefacción se alimentan de dos ramas de distribución principales (Norte y Sur) que parten de la sala de calderas y viajan en paralelo a lo largo del edificio abasteciendo a todo el sistema.

En este experimento toda esa información será tenida en cuenta, así como las distancias de tubería entre elementos del portal (la altura entre los pisos), y el control individual por medio de termostatos (control de tipo relé) de cada vivienda.

Con este experimento se pretende dar otra visión del grado de precisión y detalle que se puede alcanzar con la biblioteca de componentes creada en este trabajo y del gran detalle del modelo matemático para los fines que se persiguen en el mismo.

En este experimento sería posible incluso caracterizar cada vivienda con sus datos y parámetros reales, ya que lo normal es que exista alguna diferencia entre viviendas, aunque sean similares. Por ejemplo, las viviendas del último piso tendrán mayor coeficiente de pérdidas térmicas, ya que también perderán energía hacia el exterior por el techo. Las viviendas con orientación norte son más frías. Podría darse el caso de que el número de elementos de radiadores fuera distinto en unas viviendas y en otras. También podría cambiar la superficie de las viviendas. Etc. Y todo ello podría llegar a caracterizarse individualmente vivienda a vivienda si se conocieran con precisión todos esos datos y se considerara necesario para los objetivos de la simulación que se quisiera realizar.

Primeramente se verá cómo se ha descrito el componente «Portal_5_2».

Como se puede ver en la figura 6.1.33 en la página siguiente, el modelo del portal se ha construido a partir de los componentes ya existentes en la biblioteca «Componentes». Se han introducido 10 viviendas, cada una con su válvula, su relé y su diferencia de temperatura. En este caso, todas las viviendas y todas las referencias de temperatura se han caracterizado de la misma forma, para suponer que son todas iguales y observar únicamente el efecto de la distribución por pisos y los retrasos en la distribución de calefacción que se producen. Las viviendas se han caracterizado como en la figura 6.1.5 en la página 80. La referencia de temperatura de todas las viviendas es 20°C.

En cuanto a los tramos de tubería, se han caracterizado con sus parámetros reales, con una longitud de 3m, y los diámetros correspondientes, según el plano de la instalación. Esto es: diámetros de 1" (0,02545m) para los tres primeros pisos, y 3/4" (0,0190875m) para los dos últimos. Además se ha configurado que la temperatura inicial del agua en si interior sera de 20°C, igual que la temperatura inicial de las viviendas (que se configurará en el experimento). De este modo podremos observar el proceso de calentamiento de la instalación a lo largo de las viviendas de este portal.

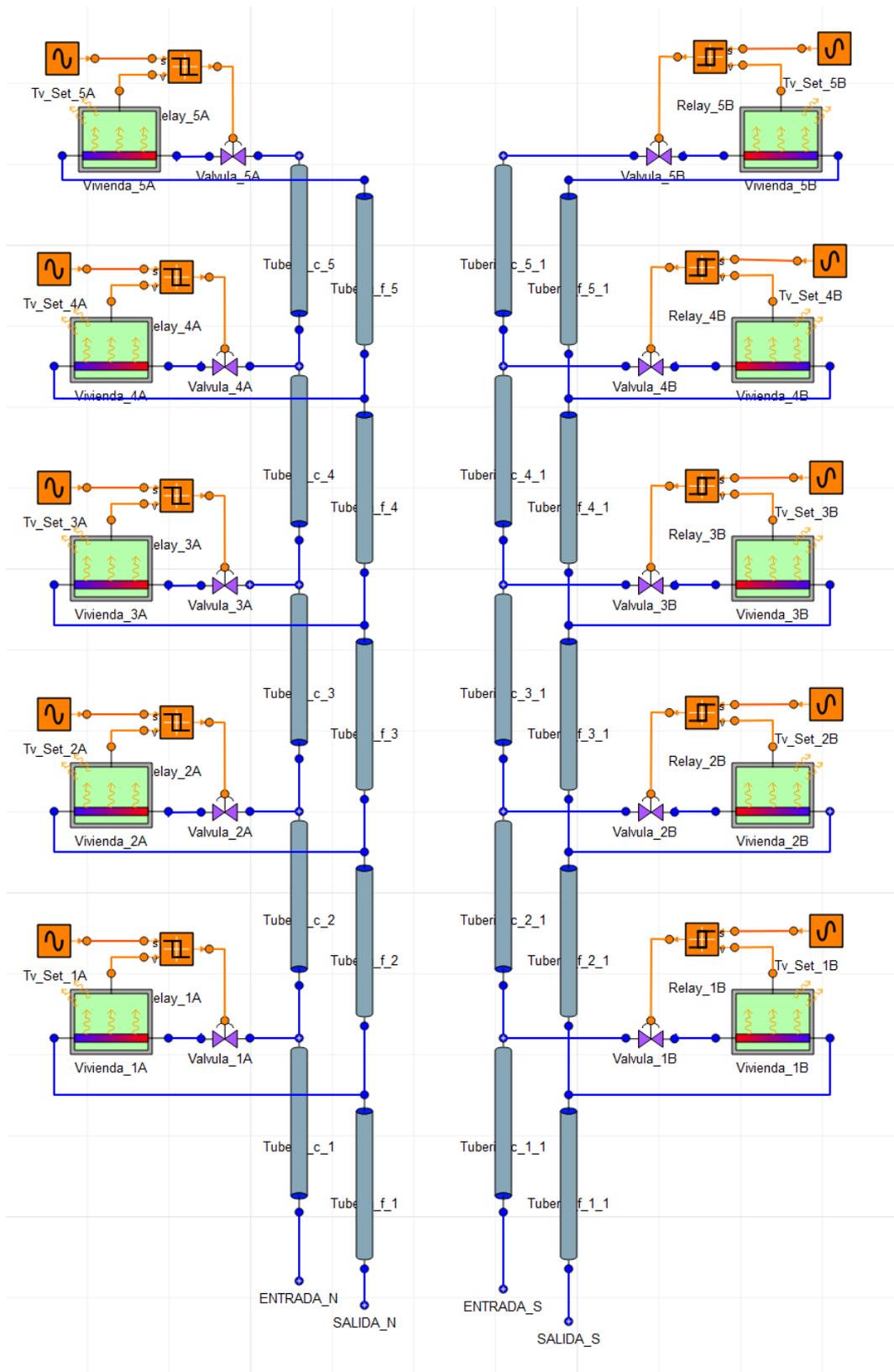


Figura 6.1.33: Descripción del portal de 5 plantas y 2 viviendas por planta

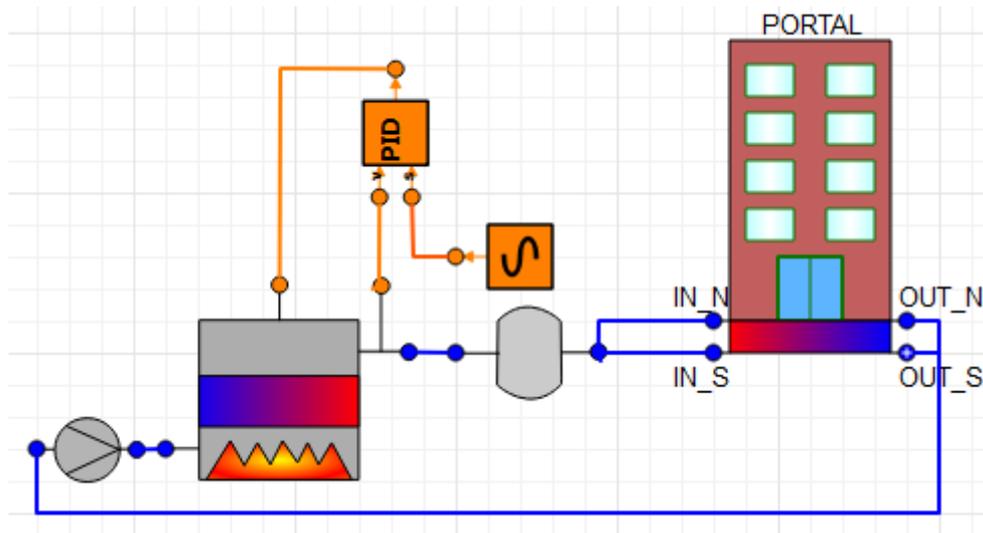


Figura 6.1.34: Esquema de calefacción de un portal

Se pueden apreciar claramente los dos circuitos de calefacción (norte y sur), con sus circuitos de impulsión y retorno. Cada circuito tiene sus puertos de entrada y salida.

Como todas las viviendas se han supuesto iguales y en las mismas condiciones iniciales, y como el circuito norte es igual que el circuito sur, las dos viviendas de una misma planta evolucionarán de forma exactamente igual, y en los mismos instantes de tiempo.

El esquema de la instalación global se puede ver en la figura 6.1.34. Se ha puesto una única caldera, con características equivalentes a las 3 realmente existentes. Se puede observar también el símbolo que se ha diseñado para representar el modelo del portal descrito anteriormente.

Se puede ver cómo gracias a la descripción modular del sistema se ha podido representar de forma sencilla, ordenada y cómoda el sistema de un portal con todo grado de detalle.

No obstante hay que resaltar que debido al gran número de ecuaciones de este modelo, ha sido necesario cambiar el número de segmentos de los modelos de parámetros distribuidos del sistema de los 20 que se estaban usando hasta ahora a 15. De lo contrario, excedíamos el límite de 1500 ecuaciones que tiene la versión de la licencia con la que trabajo.

Ahora se verán algunos resultados de esta simulación, en la que pretendemos comprobar cómo afecta la distribución de viviendas y las distancias entre ellas al servicio de calefacción.

Vamos a mostrar las señales de control de los relés de uno de los circuitos (en este caso el Norte, pero el circuito Sur evoluciona exactamente igual) -figura (6.1.35)-, la evolución del caudal por la bomba del esquema -figura (6.1.36)-, el caudal que circula por cada tramo de tubería de las distintas plantas -figura (6.1.37)- y la temperatura del primer elemento de calefacción de cada vivienda -figura (6.1.38)-. De cada gráfica se han introducido capturas de detalle de los intervalos de tiempo de mayor interés.

Análisis de resultados

Como se puede ver, todas las viviendas evolucionan de la misma forma, pero se produce un pequeño retraso con cada planta del portal.

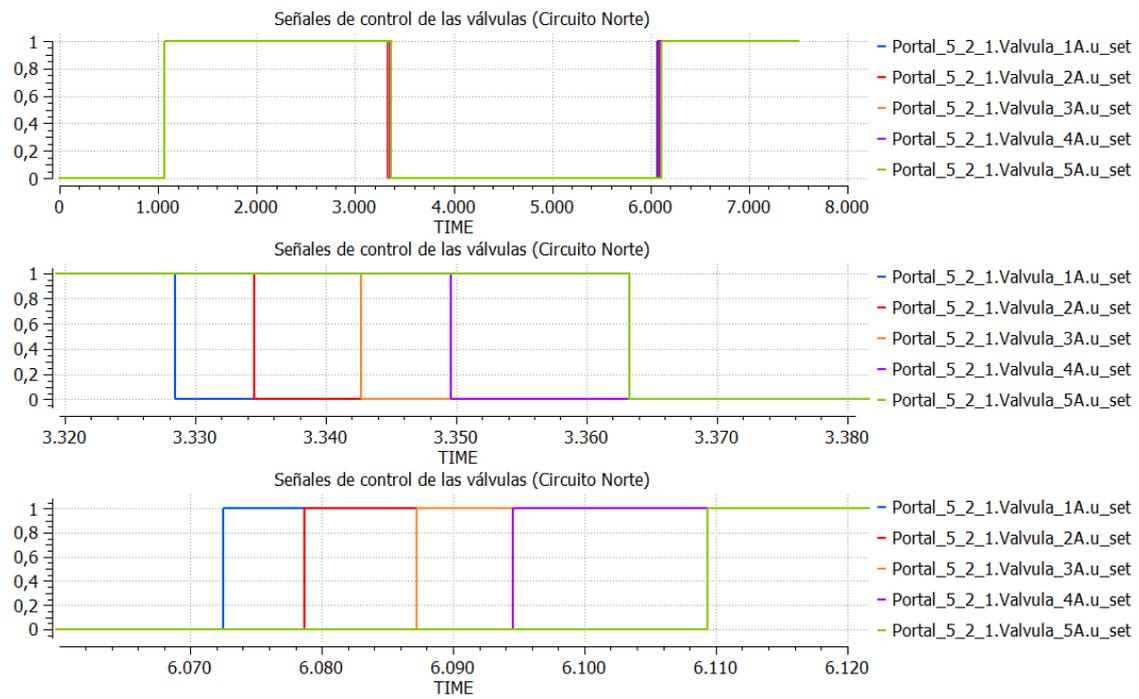


Figura 6.1.35: Señales de control de las válvulas y detalles de los momentos de cierre y apertura

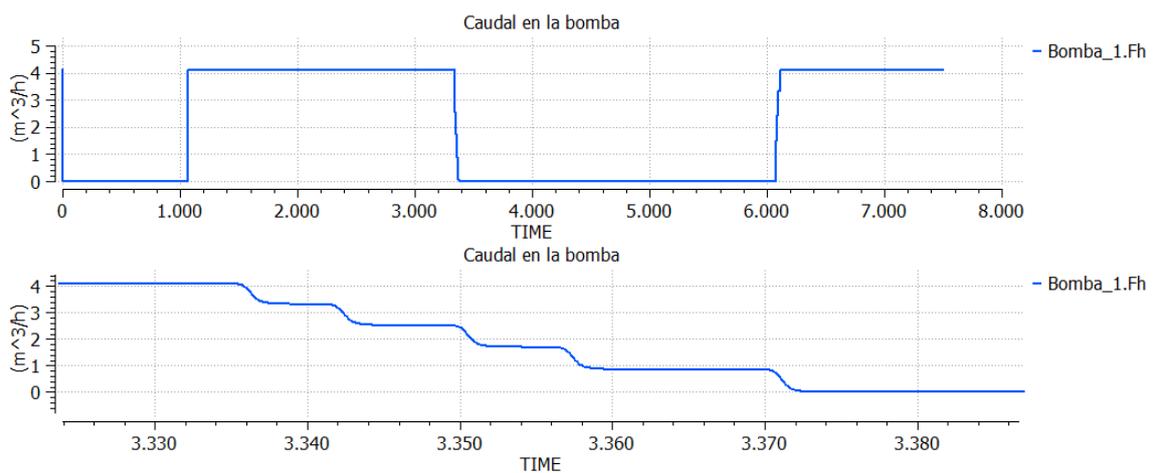


Figura 6.1.36: Caudal en la bomba y detalle en los instantes de cierre

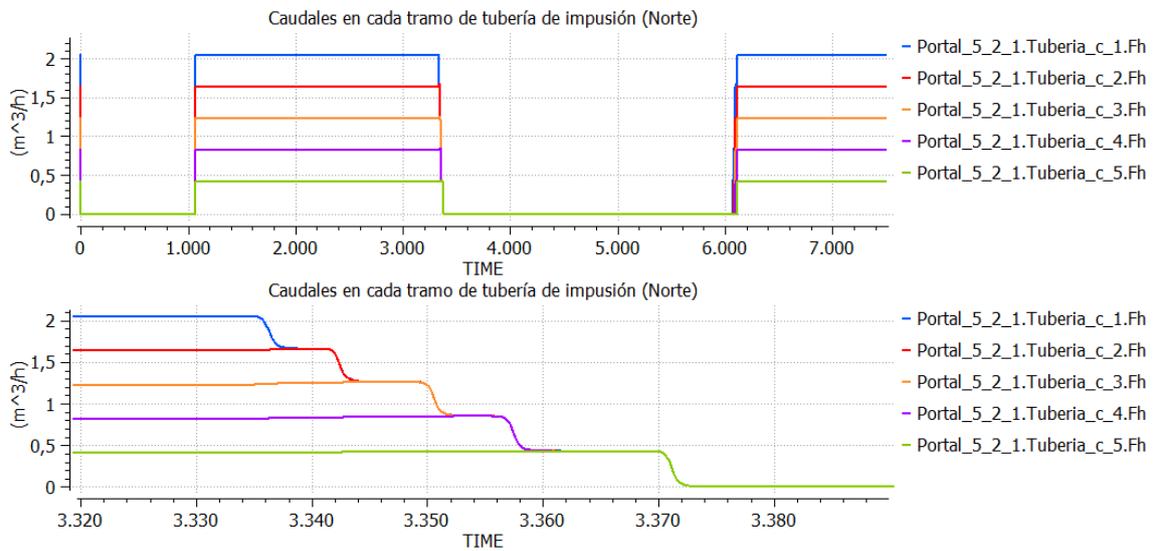


Figura 6.1.37: Caudal en cada tramo de tubería (Norte) y detalle en los instantes de cierre

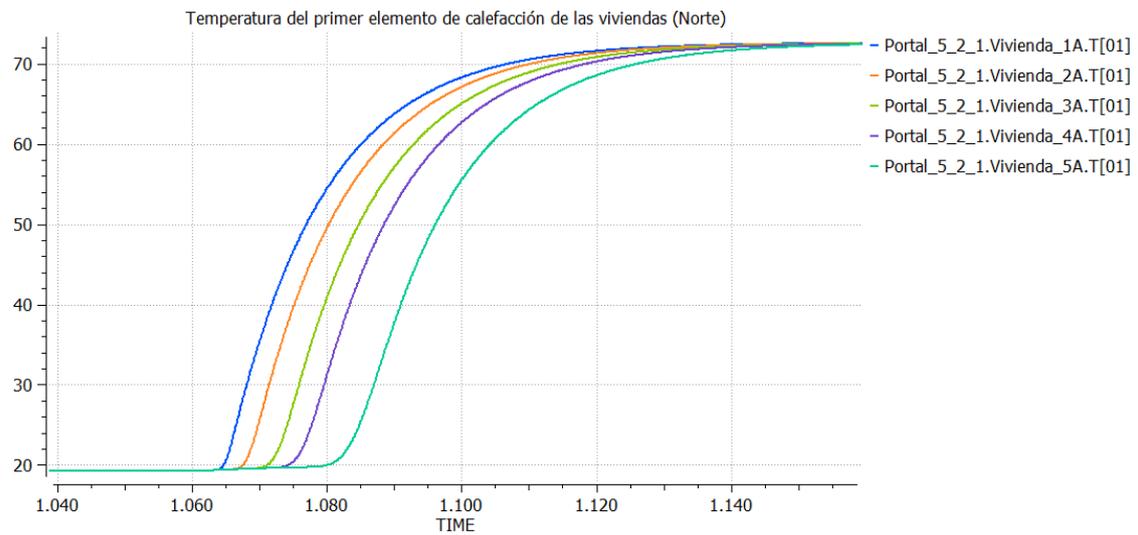


Figura 6.1.38: Temperatura del primer elemento de calefacción de cada vivienda en el momento del primer encendido (Norte)

Inicialmente todas las viviendas se encuentran en el mismo estado, a 20°C y con la calefacción apagada. Como todas están caracterizadas de forma idéntica, se van enfriando de igual forma, y comienzan a demandar calefacción todas a la vez (en torno al instante 1060s). En ese momento el caudal crece hasta el punto de máxima demanda. Sin embargo, como se ve en la figura (6.1.38), existe un retardo entre las viviendas de las distintas plantas, que aumenta con cada piso que subimos. Esto se debe a que el agua caliente del circuito de calefacción debe ascender toda la columna hasta cada piso, de modo que la primera planta es la primera en recibir el agua caliente a la entrada de sus viviendas, y la quinta planta es la última.

Se observa en la figura (6.1.37) como el primer elemento lleva el caudal resultante de sumar los caudales de consumo de todas las plantas, mientras que a medida que subimos el tramo de tubería, el caudal que transporta disminuye, porque sólo tiene que alimentar a las viviendas que le quedan aún por encima, que van disminuyendo, lógicamente.

Por eso se produce ese retraso en el calentamiento de las viviendas, y con ello el desfase en el momento de cierre de las válvulas de cada vivienda, como se observa en la figura (6.1.35). Y a partir de ahí, las nuevas aperturas ya tampoco serán a la vez, como la primera apertura.

Conclusiones del experimento

Se ha demostrado con este experimento que es posible obtener modelos muy detallados del sistema de forma muy sencilla y rápida con los elementos diseñados en la biblioteca de componentes, siguiendo un diseño modular. Además esto facilita mucho el orden de cara a la presentación gráfica de los esquemas.

En el experimento se ha observado en concreto el retardo que existe entre una planta y otra en la alimentación de calefacción, debido a la distinta distancia de tramo de tubería hasta cada una de ellas. Sin embargo en un portal el efecto es muy pequeño, como se observa en las figuras, suponiendo tan solo unos segundos de retraso entre una planta y otra, lo cual, dada la lenta dinámica del sistema, es casi insignificante.

Pero aún siendo una dinámica aparentemente insignificante, ha servido para demostrar el gran nivel de detalle en cuando a las dinámicas del sistema complejo que se pueden llegar a observar con el modelado actual de los elementos.

6.1.5. Modelo detallado de calefacción del edificio

Como en el experimento anterior, con este experimento se trata de mostrar el extremo grado de precisión en el modelado del sistema real que es posible alcanzar gracias a la biblioteca de componentes desarrollada en este trabajo.

En este caso se va a realizar un modelo del edificio completo, de forma modular, para mostrar que es posible llegar a representar cada vivienda del sistema con gran exactitud si fuera necesario.

Sin embargo, dado que la licencia de EcosimPro de la que dispongo tiene un límite de 1500 ecuaciones que vamos a sobrepasar con el modelo de este experimento, no podré realizar la simulación del mismo. No obstante, con una licencia profesional de EcosimPro que no tuviera límite de ecuaciones, no habría ningún problema a la hora de realizar la simulación, si bien es

cierto que debido al gran detalle de la simulación y a la gran magnitud del modelo, con numerosos elementos y variables será una simulación exigente en cuanto a recursos del ordenador y será mucho más lenta que las realizadas hasta ahora. Pero más allá de eso, EcosimPro no debería tener ningún problema para trabajar con ello.

Para realizar el modelo completo y detallado del sistema, debemos dividirlo en partes y agruparlas, para realizar un diseño modular que facilite el modelado del sistema, el orden, la visualización, y la gestión de la simulación. En EcosimPro es muy sencillo trabajar con diseños modulares, gracias a su lenguaje orientado a objetos.

Vamos a comenzar por enumerar los bloques que necesitaremos:

1. Se diseñará un bloque correspondiente al sistema de ACS, con una entrada y una salida de agua del circuito de calderas, una entrada de agua fría (de la acometida del edificio) y una salida del agua caliente.
2. Se diseñará otro bloque correspondiente al sistema de calefacción de todo el edificio. A su vez, en su interior, el diseño estará segmentado por portales, y en la descripción del bloque edificio se describirá el conexionado entre portales y los circuitos principales.
3. Se diseñarán los distintos bloques portal, que serán de los tres tipos de portales que hay en la comunidad: portal de 5 plantas y 2 viviendas por planta (Portal_5_2 este modelo ya se hizo y se muestra en la figura 6.1.33 en la página 104), portal de 5 plantas y 4 viviendas por planta (Portal_5_4), y portal de 5 plantas y 4 viviendas por planta mas dos viviendas en la planta baja (Portal_5_4_2). Cada portal tendrá dos circuitos (norte y sur), cada uno con su entrada y salida.
4. También se diseñará un bloque para mostrar el conjunto del grupo de calderas, con una entrada de señal de la referencia de temperatura, y una entrada y una salida para el circuito del agua de calderas.

El resultado del diseño de cada elemento es el que muestra en las figuras:

1. Sistema de ACS: figura 6.1.39.
2. Sistema de calefacción:
 - a) Portal_5_2: figura 6.1.40.
 - b) Portal_5_4: figura 6.1.41.
 - c) Portal_5_4_2: figura 6.1.42.
 - d) Esquema del edificio: figura 6.1.43.
3. Grupo de calderas: figura 6.1.44.
4. Esquema general de la instalación: figura 6.1.45.

Como vemos se trata de un sistema muy complejo, pero si fuera necesario, sería perfectamente posible representarlo y simularlo en EcosimPro sin gran dificultad, y con un altísimo grado de detalle. Gracias al diseño modular es muy sencillo encontrar y configurar los elementos. Además será muy sencillo e intuitivo buscar y representar las variables de interés en la simulación.

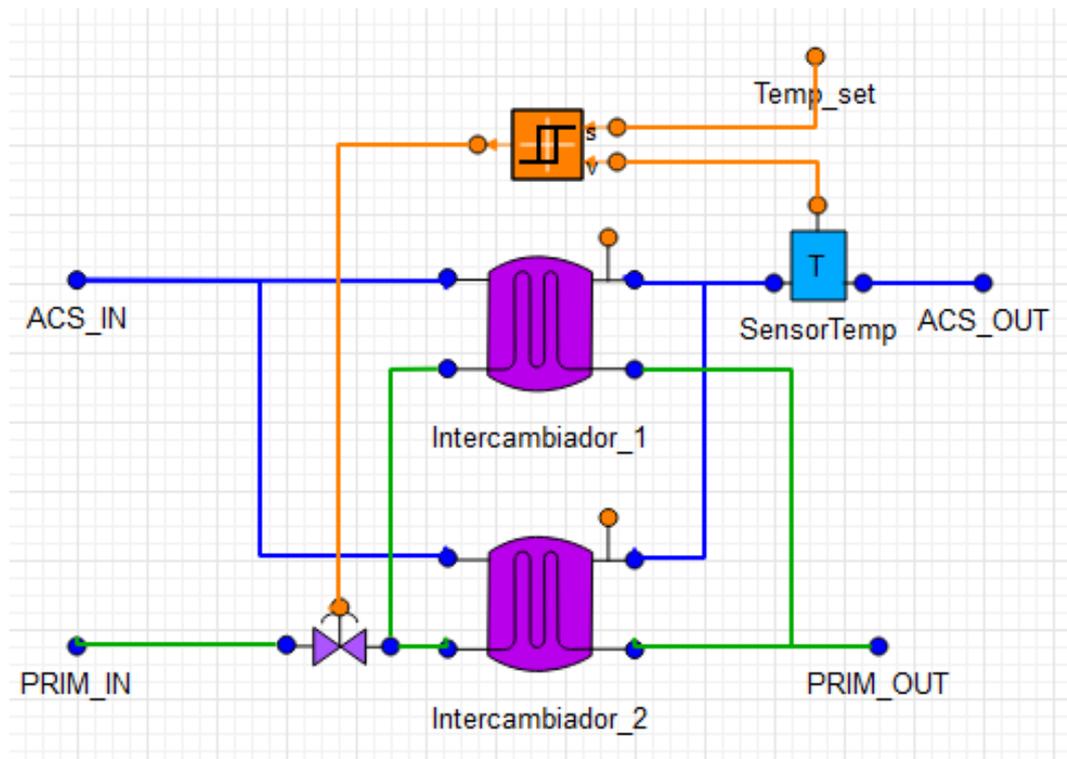


Figura 6.1.39: Subsistema de ACS

Con este experimento se pretende demostrar que es posible representar el sistema con toda su complejidad de una forma relativamente sencilla en EcosimPro, gracias a la biblioteca desarrollada en este trabajo.

Sin embargo, si se intenta crear la partición de este modelo con la licencia disponible, se obtiene el mensaje de error de la figura 6.1.46, avisándonos de que sobrepasamos el límite de ecuaciones. Con una versión profesional de EcosimPro, sin límite de ecuaciones, podría simularse perfectamente, aunque fuera una tarea pesada para el PC.

6.2. Análisis comparativo de funcionamiento de la calefacción en una vivienda con control ON/OFF vs control continuo.

En este apartado se va a realizar un análisis comparativo entre dos alternativas de control del sistema de calefacción de una vivienda. Por una parte el tradicional termostato (relé con histéresis), frente a un controlador PI con una válvula de regulación continua.

Se pretende observar el comportamiento del sistema con un control o con otro, y determinar mediante simulaciones cuál sería mejor de cara a la instalación en una vivienda particular.

El esquema del circuito de una sola vivienda con control de tipo relé ya se hizo anteriormente, por lo que no se repetirá el proceso. Se reutilizarán los resultados obtenidos en ese momento.

Por contra, vamos a crear un nuevo modelo para el control proporcional-integral, basado en el anterior, pero cambiando el tipo de controlador de un relé a un controlador PI.

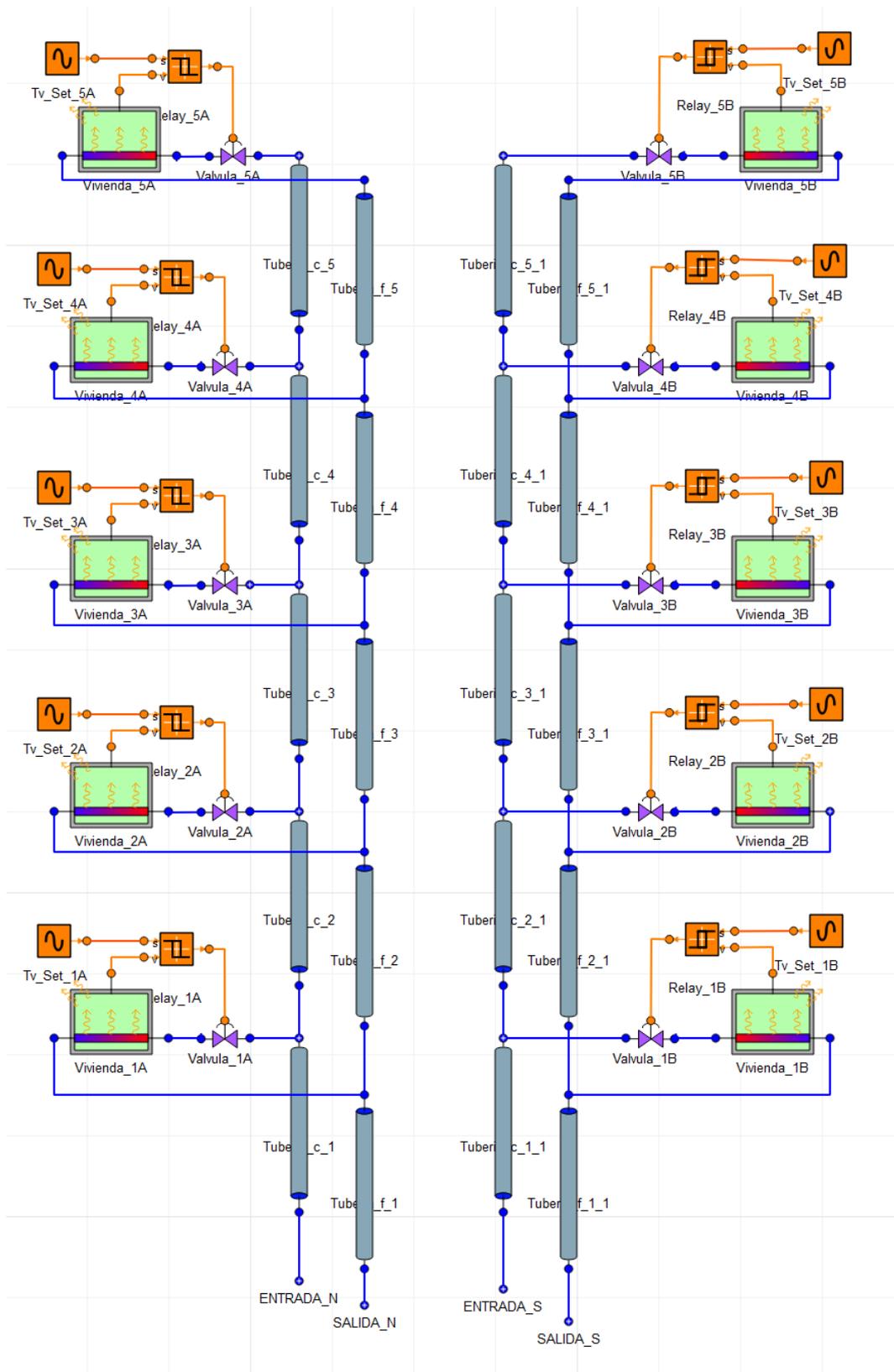


Figura 6.1.40: Descripción del portal de 5 plantas y 2 viviendas por planta

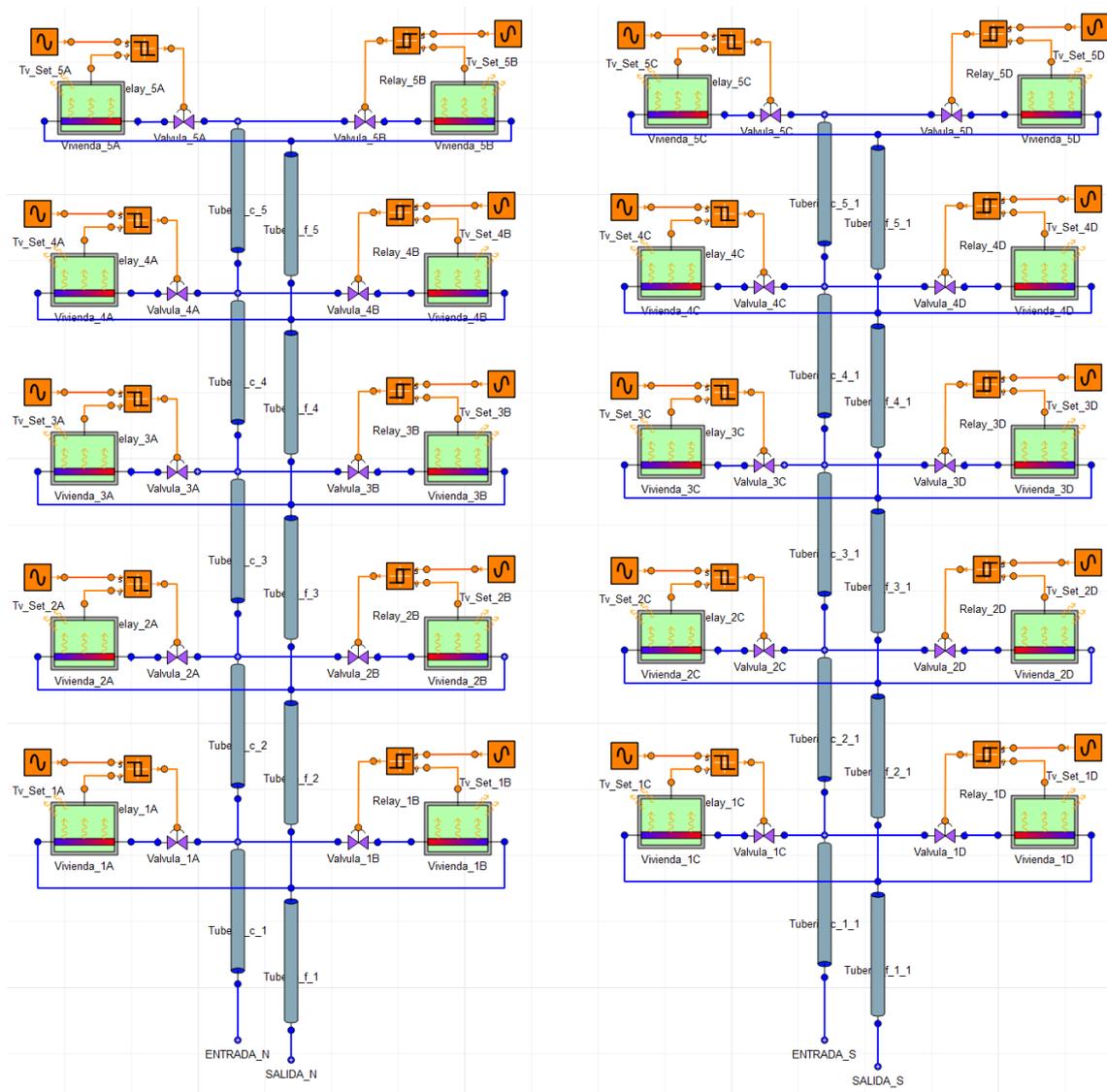


Figura 6.1.41: Descripción del portal de 5 plantas y 4 viviendas por planta

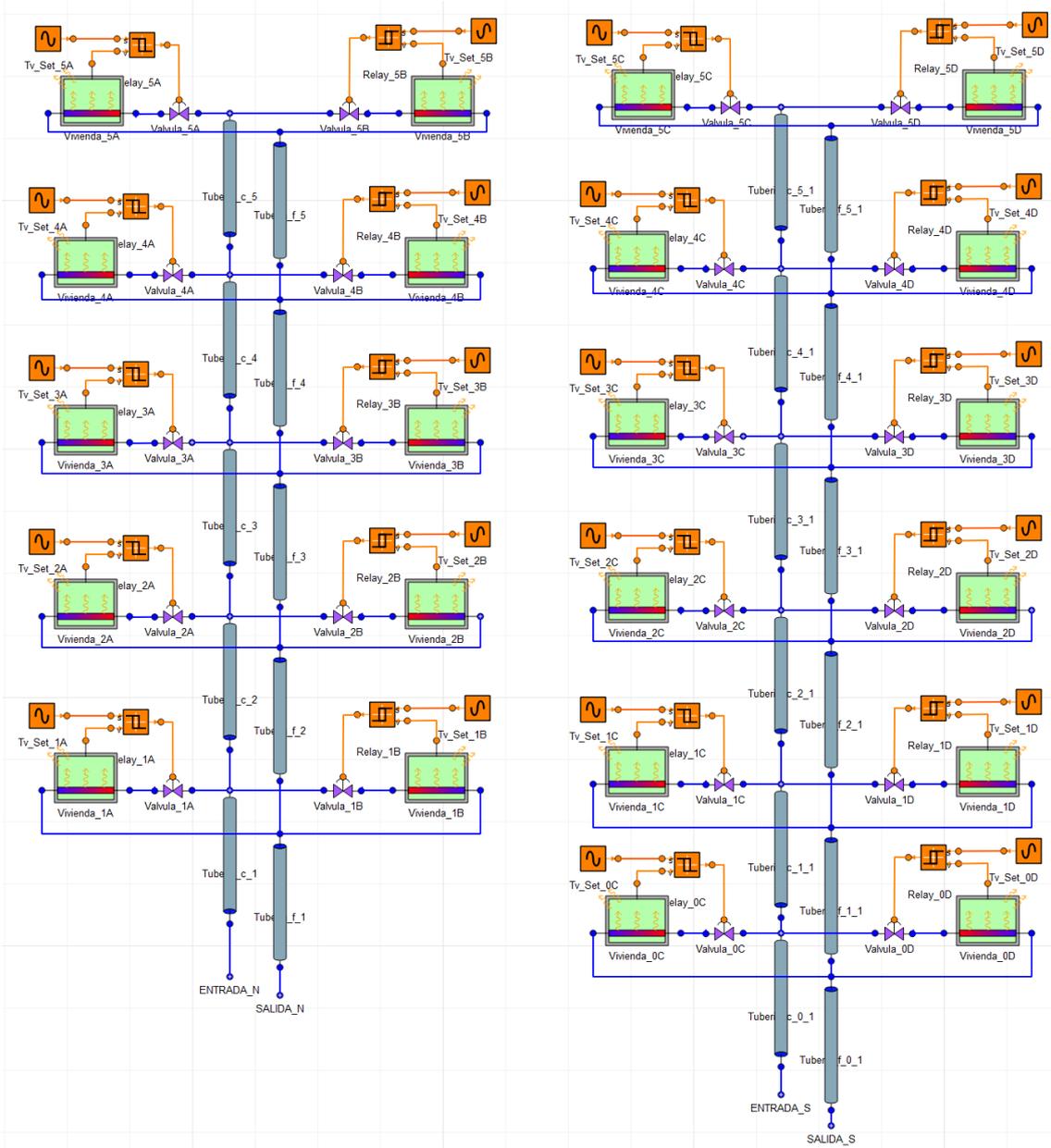


Figura 6.1.42: Descripción del portal de 5 plantas y 4 viviendas por planta, con 2 viviendas en la planta baja

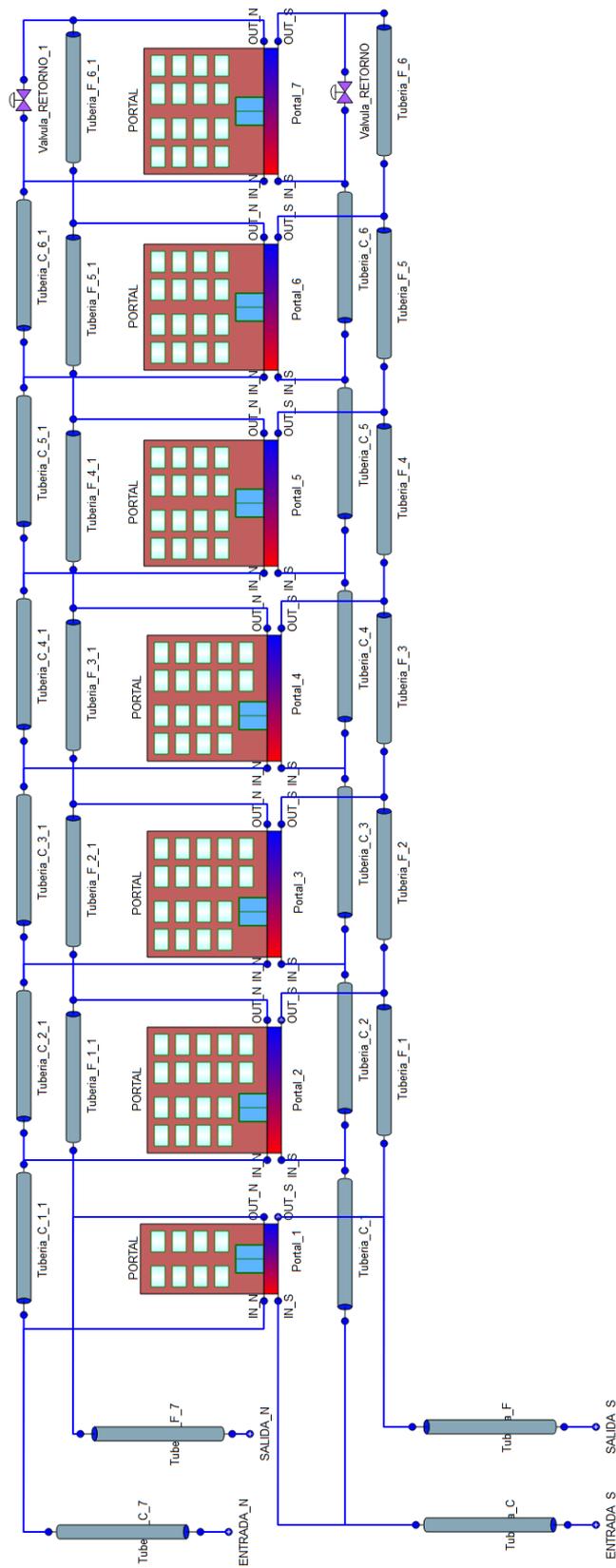


Figura 6.1.43: Descripción del sistema de calefacción del edificio

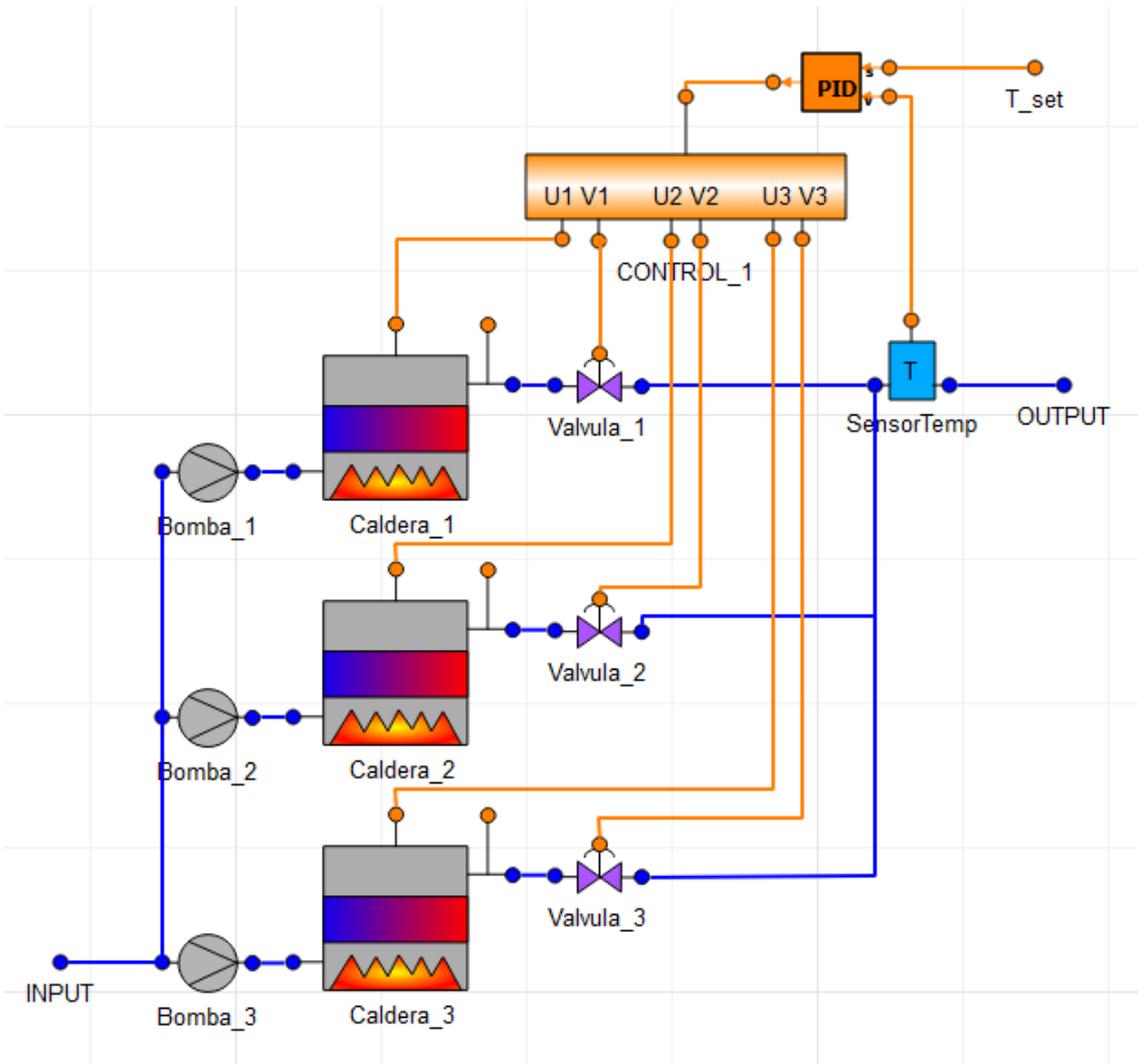


Figura 6.1.44: Grupo de calderas

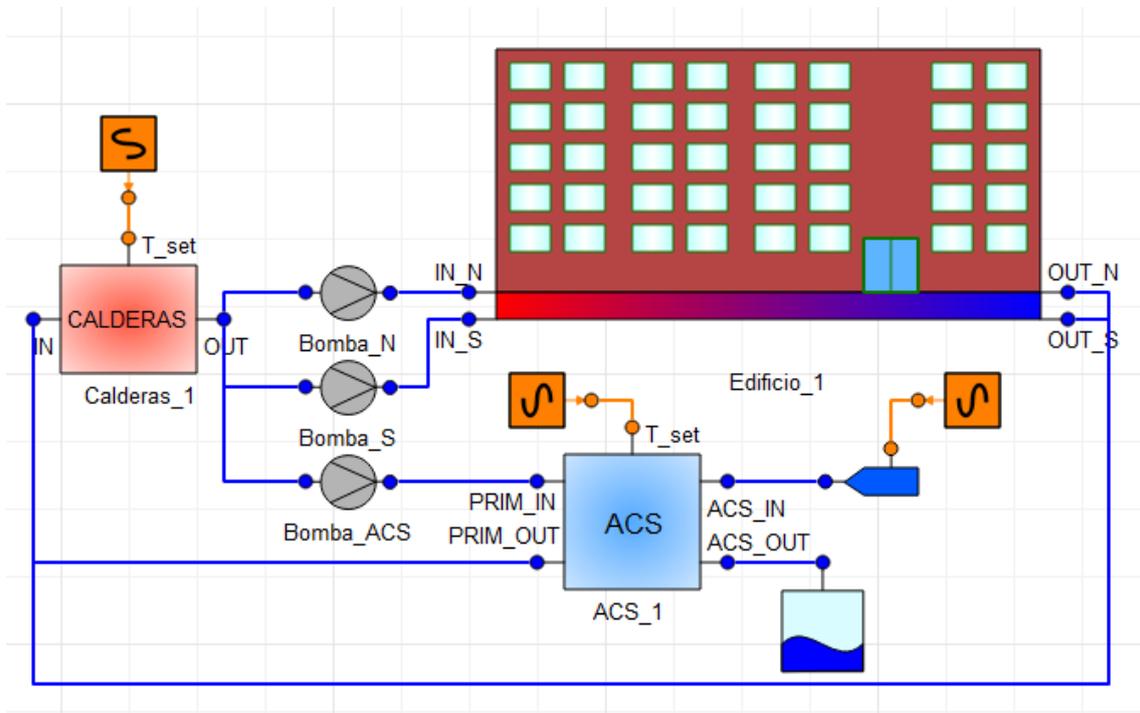


Figura 6.1.45: Esquema de la instalación completa

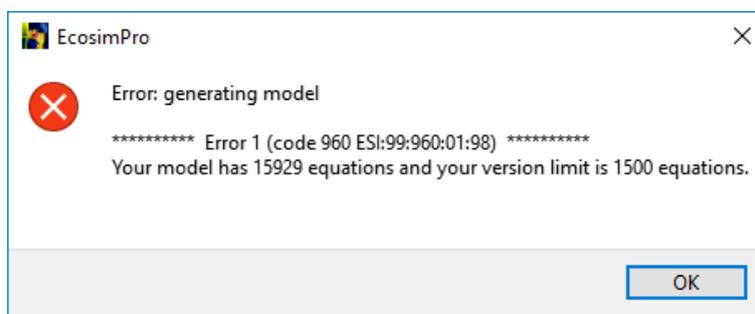


Figura 6.1.46: Error al crear partición por exceder el número de ecuaciones de la licencia

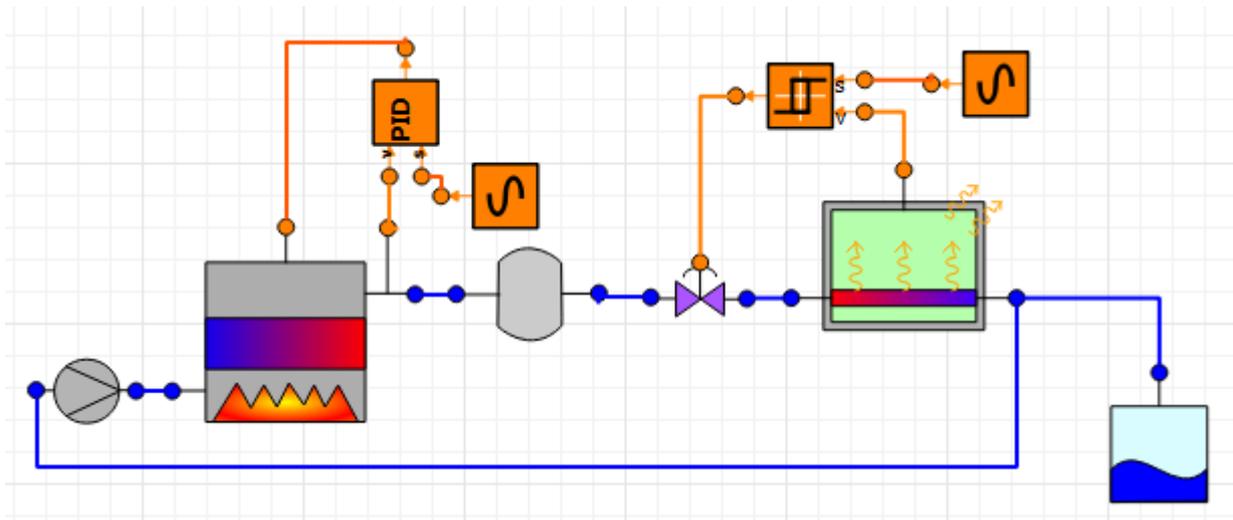


Figura 6.2.1: Esquema del modelo simplificado de calefacción de una vivienda

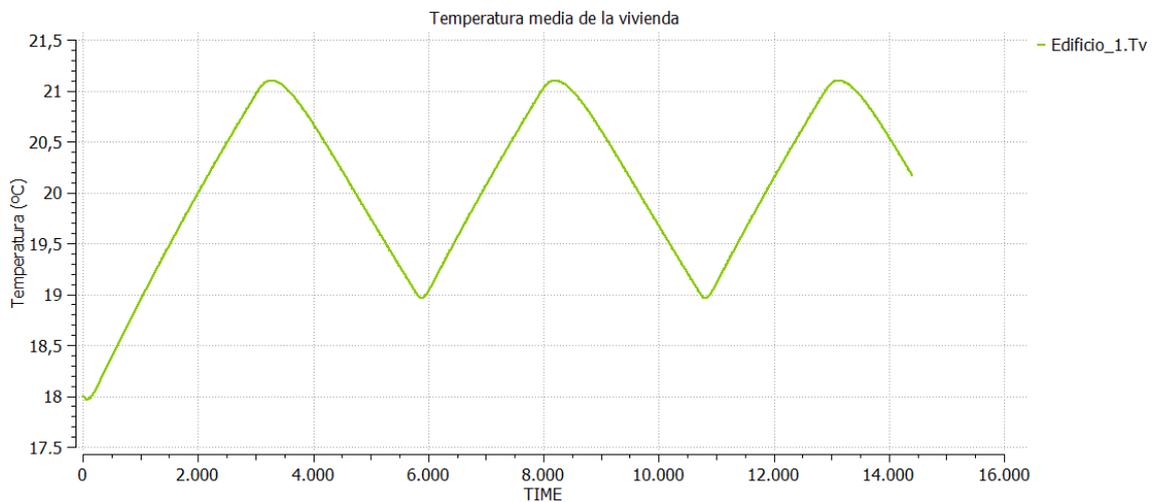


Figura 6.2.2: Detalle de la evolución de la temperatura media de la vivienda

El esquema del control por relé era el que se vuelve a mostrar en la figura 6.2.1.

La evolución de la temperatura de la vivienda con este control se muestra en la figura 6.2.2. Y el perfil de temperaturas del circuito de los radiadores durante el funcionamiento en el estacionario era el de la figura 6.2.3.

El nuevo modelo, con el control PI tiene se muestra en la figura 6.2.4. Se puede ver que el único cambio es el relé por un controlador PI, cuya configuración se muestra en la figura 6.2.5. El resto de elementos se mantienen igual.

En este caso, la evolución de la temperatura en la vivienda es la que se muestra en la figura 6.2.6, la señal de control de la válvula corresponde a la figura 6.2.7 y el perfil de temperaturas del circuito de radiadores se muestra en la figura 6.2.8.

Como puede verse, la temperatura de la vivienda se estabiliza perfectamente en la temperatura especificada tras un transitorio inicial. La temperatura ya no oscila, se mantiene perfectamente

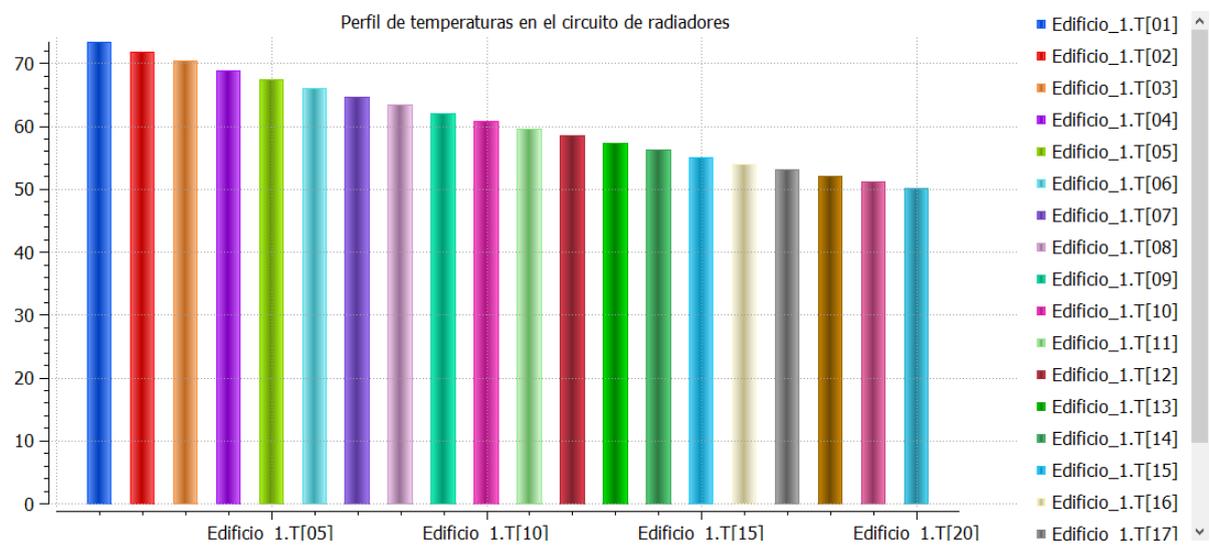


Figura 6.2.3: Evolución de la temperatura del agua a lo largo del circuito de radiadores en para 100s, 1000s, y 3600s

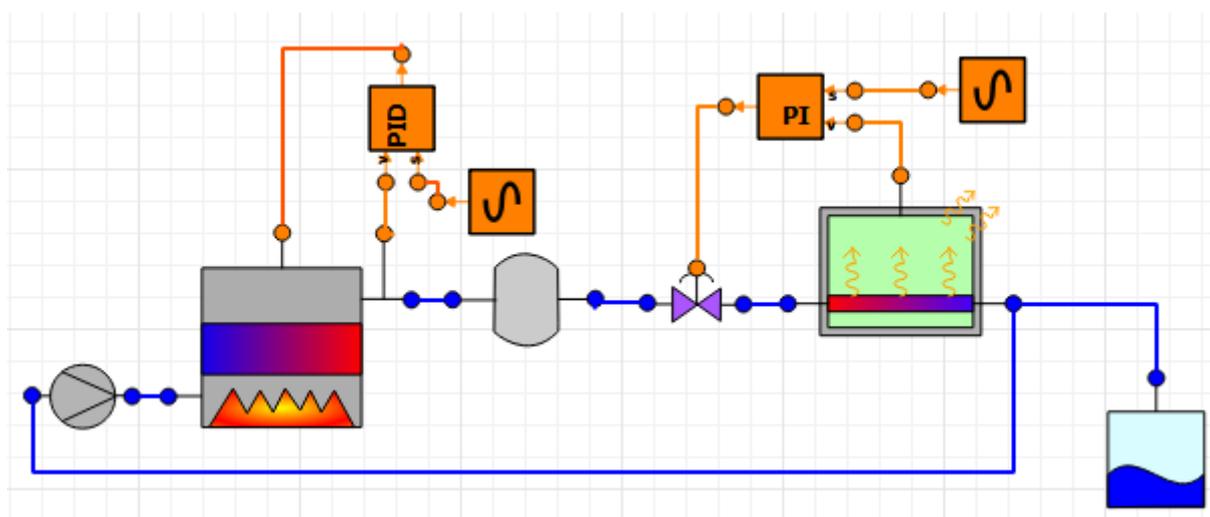


Figura 6.2.4: Esquema de calefacción de una vivienda con control PI

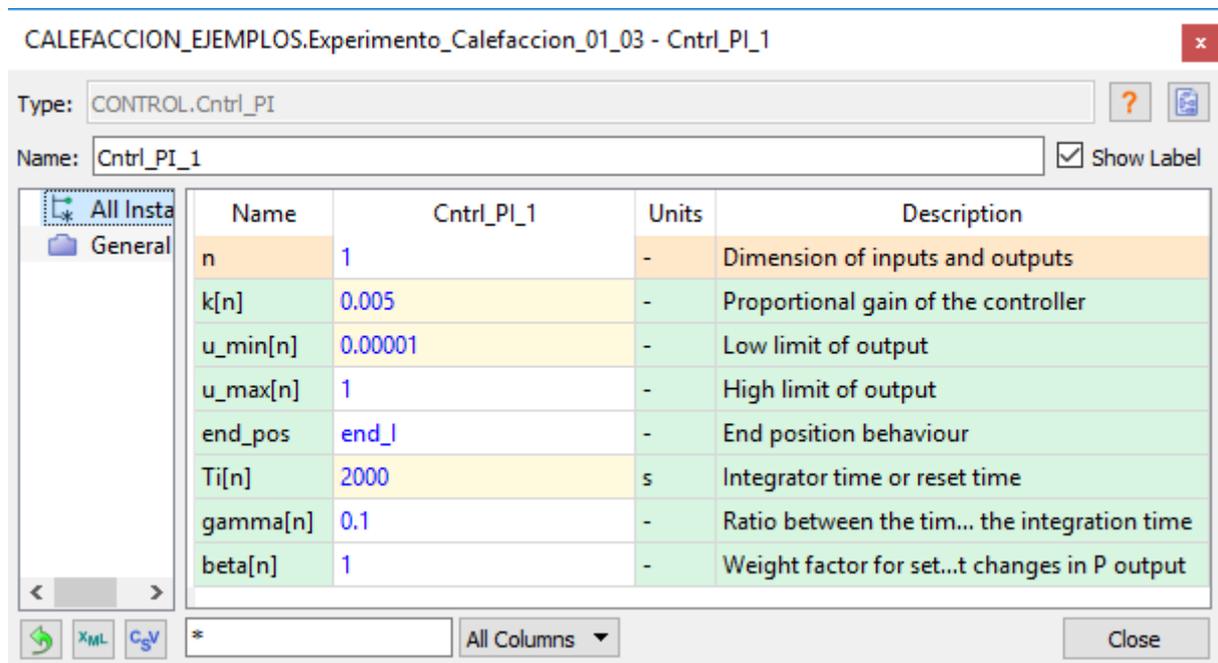


Figura 6.2.5: Configuración del controlador PI

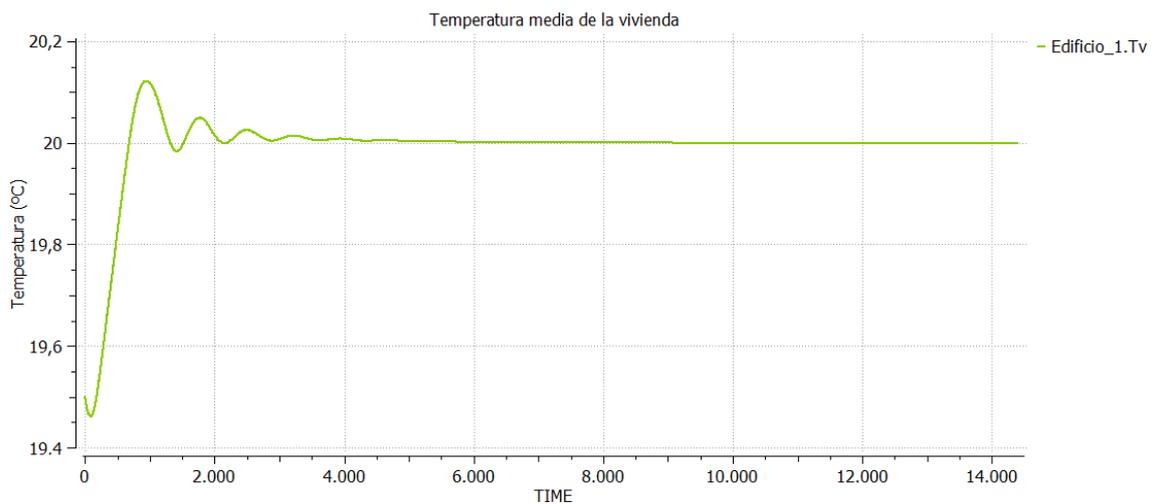


Figura 6.2.6: Evolución de la temperatura de la vivienda con e control PI

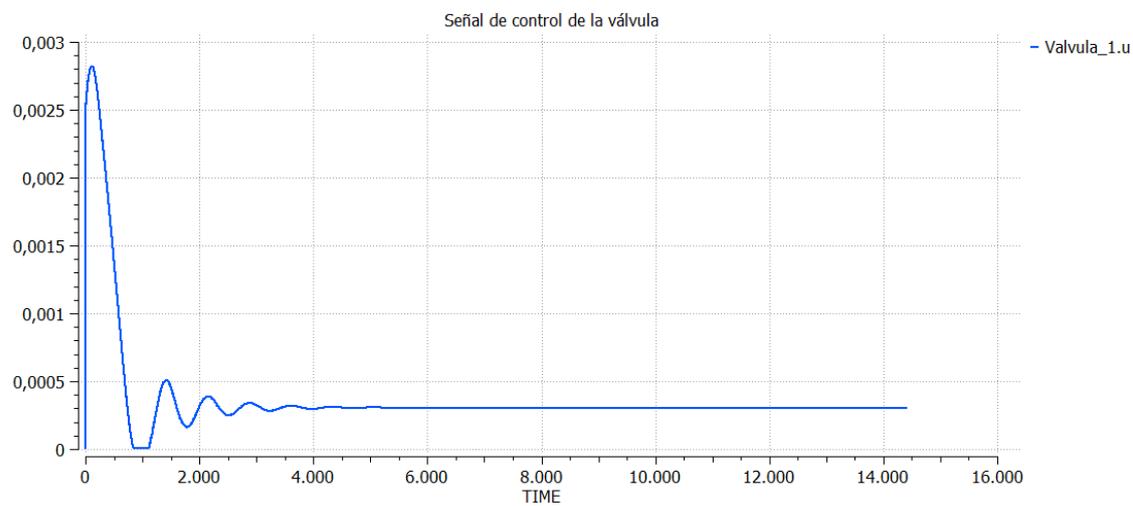


Figura 6.2.7: Señal de control de la válvula

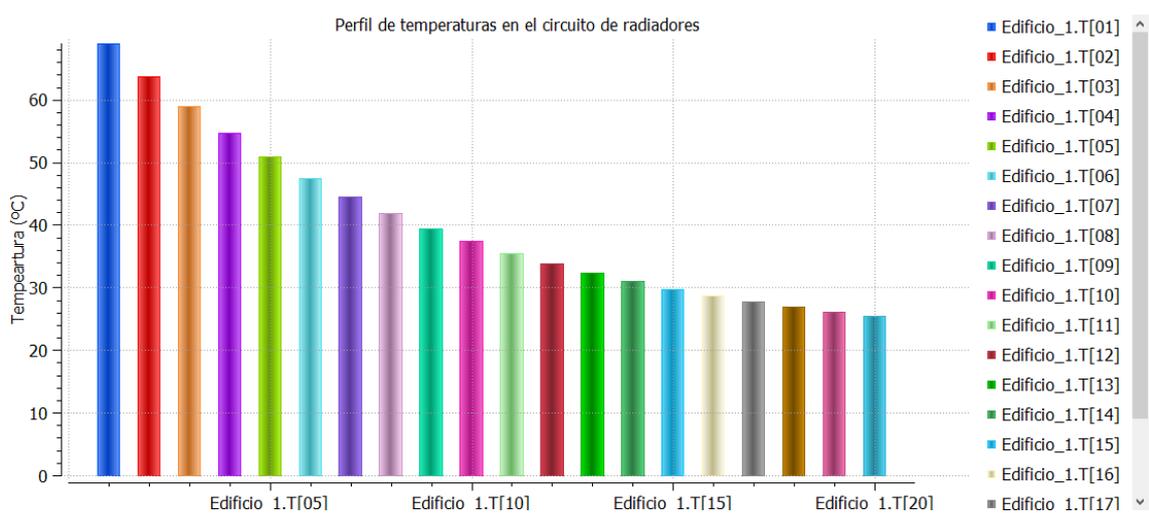


Figura 6.2.8: Perfil de temperatura del circuito con control PI

constante en el valor deseado, a diferencia del control de relé, donde la temperatura oscilaba todo el rango de histéresis del controlador, y un poco más debido a la lenta respuesta dinámica del sistema. Con el controlador PI, se llega a compensar por completo esos efectos.

La señal de control de la válvula también se puede observar que tiene una dinámica muy suave, lo que alargará la vida del dispositivo, y también se estabiliza perfectamente en un punto de funcionamiento. Con el control de relé, la válvula se abría o se cerraba por completo bruscamente cada vez que conmutaba el termostato.

Aparentemente el sistema funciona perfectamente bien, es mucho más estable, y eso seguramente aporte una mayor sensación de confort en la vivienda, ya que la temperatura no está oscilando continuamente. Además el control de la válvula es muy suave y llega a estacionarse en un punto, lo que evita esfuerzos o actuaciones bruscas, alargando la vida del dispositivo y de la red de tuberías (evitando los «golpes de ariete» provocados por el cierre brusco de una válvula.²). De modo que parece que esta alternativa es mucho mejor.

Sin embargo, si se observa con un poco más de detalle el estado de funcionamiento del sistema, y especialmente los perfiles de temperaturas del circuito de radiadores con relé y con control PI (figuras 6.2.3 y 6.2.8), observamos que son distintos.

En el control por relé, cuando está encendido, la temperatura va disminuyendo suavemente a lo largo del circuito de radiadores desde los 75°C de la entrada hasta unos 50°C que hay todavía a la salida. Esto significa que los elementos del último radiador aún están a una temperatura algo superior a 50°C. Suponiendo que la vivienda se encuentra a una temperatura de unos 20°C (como es el caso), ese último radiador aún tiene 30°C de diferencia de temperatura, y por tanto aún tiene una importante capacidad de aporte térmico.

Por contra, en el control PI, para mantener constante y estable la temperatura de la vivienda el controlador ajusta la válvula para introducir un caudal muy pequeño en la vivienda (según los resultados del experimento 0.10514598 m³/h), frente a los 0.43m³/h que entran con el control de relé cuando se enciende. Esto hace que el agua, que entra a 75°C, se enfríe rápidamente en los primeros elementos de calefacción del circuito, llegando ya casi fría al resto de radiadores. De este modo, el último radiador del circuito apenas tiene diferencia de temperatura con la vivienda (apenas 5°C), y por ello casi no tiene capacidad de aportar energía.

Esto es importante, porque aunque según el modelo la temperatura media de la vivienda se mantiene perfectamente constante, en una vivienda real esto no tiene por qué ser así. Si el radiador de una estancia está a 70°C, aportará mucha energía a esa estancia. Pero si hay otro radiador en otra habitación que está sólo a 25°C, apenas va a calentar esa habitación. Eso significa que con el perfil de temperaturas que genera el control PI a lo largo del circuito, habrá unas habitaciones mucho más calientes que otras. Cada una tendrá una temperatura, y por ese mismo motivo, la temperatura media de la vivienda dependerá además de en qué punto de la casa se encuentre el sensor de temperatura del sistema de control.

El problema reside, en definitiva, en que en el modelo de las viviendas se está suponiendo que el aire de la vivienda es perfectamente homogéneo, a la misma temperatura en todos los puntos,

²El «golpe de ariete» es un fenómeno debido a que el fluido es ligeramente elástico y se origina habitualmente cuando se produce el cierre brusco de una válvula por la que estaba circulando un fluido. Toda la energía cinética que posee el fluido se transforma y origina una sobrepresión, que puede ser de gran magnitud y que se desplaza por la tubería a una velocidad que puede superar la velocidad del sonido en el fluido. Es una de las principales causas de roturas, deterioro y averías de tuberías y sistemas hidráulicos. [24]

y eso no es del todo cierto. Según ese modelo, es completamente indistinto en qué punto del «intercambiador» (el circuito de calefacción al fin y al cabo es un intercambiador de calor entre el agua de calderas y el aire de la vivienda) se aporte la energía, porque luego ésta se distribuirá de forma perfectamente homogénea por todo el medio. Este modelo es válido para un depósito de agua o los intercambiadores de calor del sistema de ACS que se han modelado en este trabajo también, pero para observar en detalle el interior de la vivienda tiene poco detalle.

Para hacer un modelo detallado de una vivienda, sería necesario tener en cuenta cuál es la distribución real de las estancias de la misma, y del circuito de calefacción en ella. Habría que considerar que el calor, dentro de la vivienda, se transmitirá de un punto a otro por conducción y también por convección. En ese sentido habría que realizar algún tipo de modelo sobre las corrientes convectivas que se generarían, y cómo influirían unas sobre otras. Además habría que detallar cómo se transmitiría el calor de unas habitaciones a otras, etc. Se trata de un modelado extremadamente complejo.

Como ya se ha dicho en numerosas ocasiones, es necesario llegar a un compromiso entre la complejidad del modelo y la finalidad del mismo. Por eso, en este trabajo no se ha considerado necesario profundizar más en el modelo interno de las viviendas, ya que no se iban a realizar experimentos de una complejidad tal que requirieran unos resultados tan exactos y detallados, ni se iba a tratar de observar el comportamiento detallado del interior de la vivienda. Bastaba con una temperatura media, y por eso se supuso un medio homogéneo. Es una simplificación de la realidad (como todas las simulaciones), pero era más que suficiente para cubrir los objetivos de este trabajo.

En cuanto al problema que se genera con un perfil de temperaturas de ese tipo, como ya se ha dicho, consiste en que es posible que unas habitaciones se calienten más que otras, y que la temperatura media dependerá de la localización del termostato dentro de la vivienda.

Aunque no se ha realizado un estudio detallado del fenómeno por requerirse un modelo extremadamente complejo y detallado, se propone como una posible alternativa que solucione ese problema realizar un cambio en el planteamiento de la instalación, poniendo todos los radiadores en paralelo dentro del sistema. De este modo, el perfil de temperaturas será el mismo en todos los radiadores y todos tendrán la misma capacidad de aporte térmico. De hecho, muchos sistemas de calefacción usan esa topología, siguiendo esquemas de instalaciones bitubulares. En este aspecto, existen tres tipos principales de topología, como se explicó en el apartado 2.1 en la página 11 : monotubular (el modelado en este sistema), con todos los radiadores en serie; bitubular simple, con un circuito de ida y otro de retorno y los radiadores en paralelo; y bitubular en anillo de Tichelmann, con circuito de ida y de retorno recorriendo los radiadores (conectados en paralelo) en sentido contrario para compensar las pérdidas de carga.

6.3. Análisis del sistema de control de las calderas

En este apartado se va a realizar una descripción más profunda sobre el sistema de control de las calderas que hay en el sistema real.

Como ya se ha comentado anteriormente, en el sistema real existen 4 calderas, de las cuales 3 están en funcionamiento y la cuarta queda en reserva por si falla alguna de las otras. De las 3 calderas que están en funcionamiento, 2 de ellas funcionan con un control ON/OFF, es decir, o

se ponen al 100 % o se apagan por completo, y la tercera tiene un control continuo para ajustar la potencia a las necesidades exactas de la instalación.

Además, cada caldera tiene una válvula del circuito hidráulico en serie, para cerrarse cuando está apagada, y una bomba, para forzar el caudal de agua necesario a través de la caldera cuando está en funcionamiento. Es el esquema que se mostró en la figura 6.1.44 en la página 115, en el modelo detallado del edificio.

Se ha diseñado un bloque de control para simular el funcionamiento de este sistema de regulación, aunque no se ha llegado a utilizar porque en las simulación simplificadas no tiene sentido detallar tanto, y en las simulaciones detalladas había problemas con el número de ecuaciones que permite la licencia. Por eso se va a mostrar su funcionamiento en simulación en este apartado.

Además de todo esto, existe una sonda de temperatura exterior en el sistema de control de calderas, que se encarga de modificar la temperatura objetivo del mismo, para tratar de ajustarse mejor a la demanda previsible en días más menos fríos. Como no se tienen detalles reales sobre la influencia de este factor, no se ha simulado. Además todos los experimentos se han realizado suponiendo una temperatura exterior constante, por lo que no habría afectado a la simulación más que poner directamente la referencia de temperatura deseada en el esquema (que ha sido siempre de 75°C).

El funcionamiento de esta utilidad consiste en algún tipo de ecuación o tabla que modifica el setpoint de la temperatura de las calderas, aumentándolo cuando la temperatura exterior es muy baja, o disminuyéndolo cuando hace menos frío. Eso podría modelarse de forma muy sencilla con un componente que tuviera a su entrada la señal de la sonda de temperatura exterior y aplicara la ecuación correspondiente (si se conociera), o una tabla de puntos, como se ha hecho con otros elementos de la biblioteca. Como no se tienen datos reales sobre el funcionamiento detallado de este sistema, se describe aquí su funcionamiento teórico, pero no ha sido posible simularlo.

Sobre el control de la potencia de las calderas, se usa el elemento CONTROL para modelarlo. Este elemento tiene una entrada, que será una señal de control de valor entre 0 y 3, y 6 salidas, agrupadas en 3 bloques. En cada bloque, hay una salida de señal para el control de la potencia de la caldera correspondiente, y otra señal para el control de su válvula asociada.

Para mostrar su funcionamiento, se va a realizar un sencillo experimento en que se introducirá una señal sinusoidal que variará entre 0 y 3 a la entrada del controlador, y se analizará el comportamiento de sus salidas. Los resultados se muestran en la figura 6.3.1 en la página siguiente.

Puede verse como cuando la señal de entrada es menor de 1, sale la misma señal que entra por la salida de control de la primera caldera. Además, la válvula de la primera caldera es la única abierta.

Cuando se llega a 1, se enciende la segunda caldera y se abre su válvula. La señal de la primera caldera vuelve a 0, pero su válvula permanece abierta.

A medida que la entrada sigue creciendo entre 1 y 2, la señal de control de la segunda caldera sigue creciendo, de modo que la suma de las señales de la primera y la segunda caldera suman lo mismo que la señal de entrada.

Cuando la entrada llega a 2, se enciende la tercera caldera. La segunda se mantiene a 1, y la primera baja de nuevo a 0. Se abre la válvula de al tercera caldera, y se mantienen abiertas el resto.

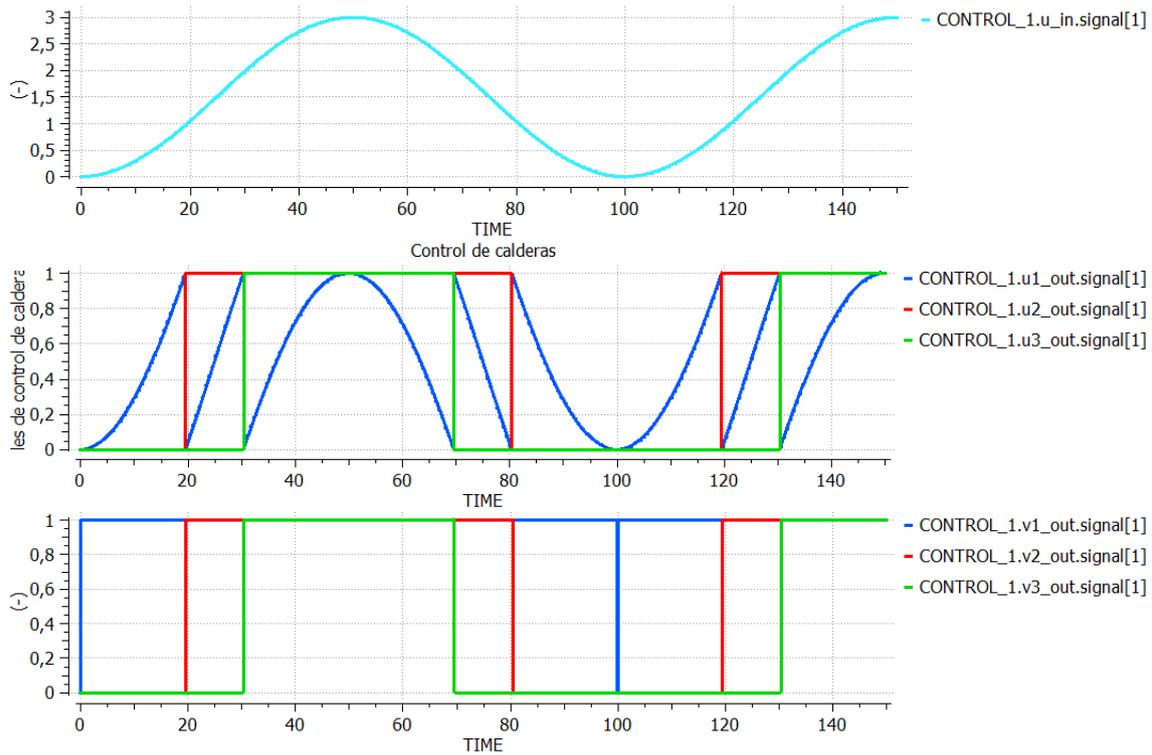


Figura 6.3.1: Experimento con el controlador de calderas

A medida que la entrada sigue aumentando, la primera caldera se regula la señal de la primera caldera para que las tres salidas de calderas sumen lo mismo que la entrada.

Lo contrario ocurre cuando la señal decrece. Primero se apaga la tercera caldera y la primera se pone al máximo. Va decreciendo, hasta que toca apagar la segunda caldera, y vuelve al máximo, y de nuevo va decreciendo hasta hacerse 0. Todas las válvulas de las calderas se van cerrando cuando se apaga la caldera. En el caso de la primera caldera, su válvula sólo se cierra puntualmente cuando la señal de entrada se hace 0, cosa que en este experimento sólo se da en un punto.

Así es como el sistema regularía el funcionamiento de las 3 calderas en realidad, aunque en los experimentos se haya supuesto que había una única caldera con la potencia equivalente de las 3.

6.4. Análisis de relación coste/confort de calefacción en una vivienda

En este experimento se va a realizar un análisis comparativo de los efectos que tiene variar la temperatura deseada en la vivienda. Se van a realizar varias simulaciones superpuestas en las mismas gráficas para ver cómo cambia el funcionamiento del sistema cambiando la configuración.

Se usa el montaje de la figura 6.4.1.

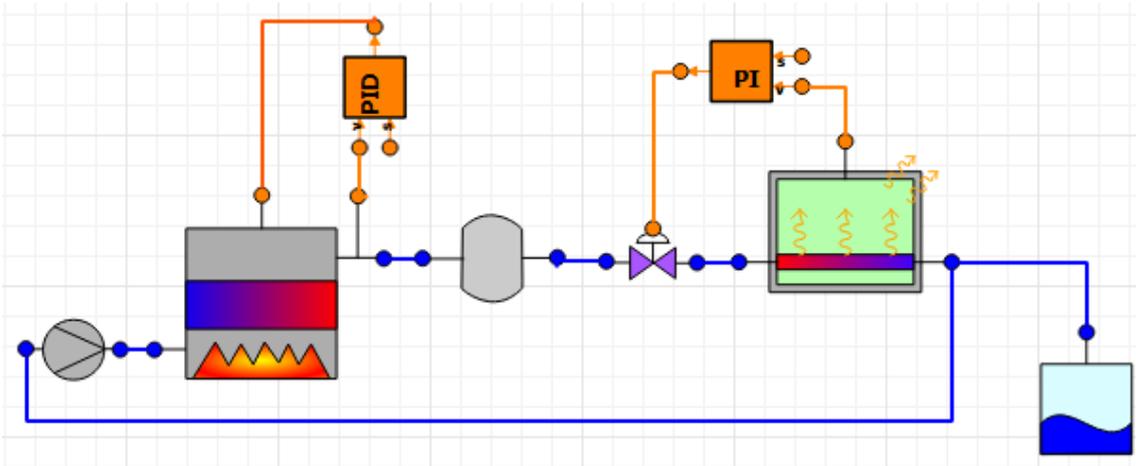


Figura 6.4.1: Esquema para la simulación variando las referencias de los controladores

Se va a suponer una sola vivienda en el sistema, para ver el efecto que se produce por vivienda. Además se va a utilizar un control PI, ya que se ha observado que en general es mejor tipo de controlador que el relé con histéresis, y porque nos interesa especialmente de este experimento saber qué ocurre en el estacionario. La configuración del controlador PI se muestra en la figura 6.4.2.

CALEFACCION_EJEMPLOS.Experimento_Calefaccion_01_04 - PI_vivienda

Type: CONTROL.Cntrl_PI

Name: PI_vivienda Show Label

Name	PI_vivienda	Units	Description
n	1	-	Dimension of inputs and outputs
k[n]	0.00025	-	Proportional gain of the controller
u_min[n]	0.00001	-	Low limit of output
u_max[n]	1	-	High limit of output
end_pos	end_l	-	End position behaviour
Ti[n]	3000	s	Integrator time or reset time
gamma[n]	0.1	-	Ratio between the time constant for the antiwindup and the integration time
beta[n]	1	-	Weight factor for set point changes in P output

* All Columns Close

Figura 6.4.2: Configuración del control PI

Se va a realizar el análisis para las temperaturas objetivo del sistema de 20, 20.5, 21, 21.5 y 22 °C. La temperatura del agua de calderas se mantiene a 75°C en todos los experimentos. La temperatura exterior se configura a 0°C.

Vamos a obtener tres gráficas principales, que van a mostrar:

- La evolución de la temperatura en la vivienda a lo largo del tiempo para las distintas configuraciones de temperatura. Figura 6.4.3.
- El caudal demandado por la vivienda a lo largo del tiempo para las distintas configuraciones, y detalle del estacionario. Figura 6.4.4.
- La potencia aportada por las calderas al sistema para las distintas configuraciones y detalle del estacionario. Figura 6.4.5.

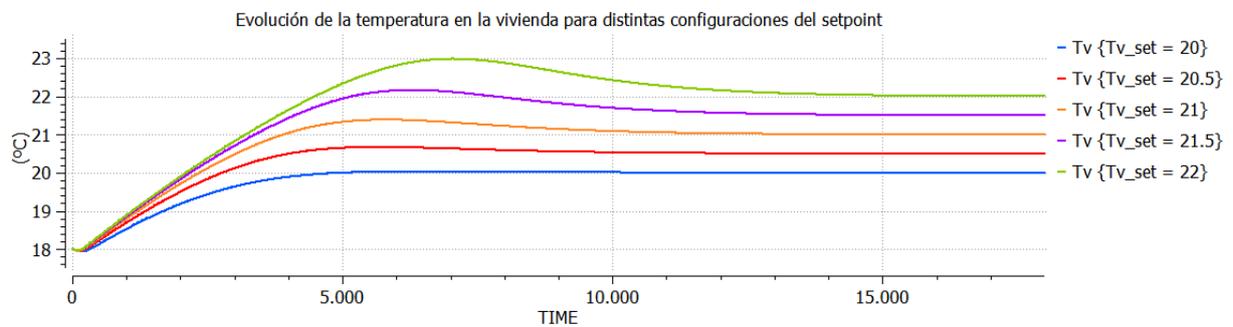


Figura 6.4.3: Evolución de la temperatura de la vivienda según la configuración del sistema

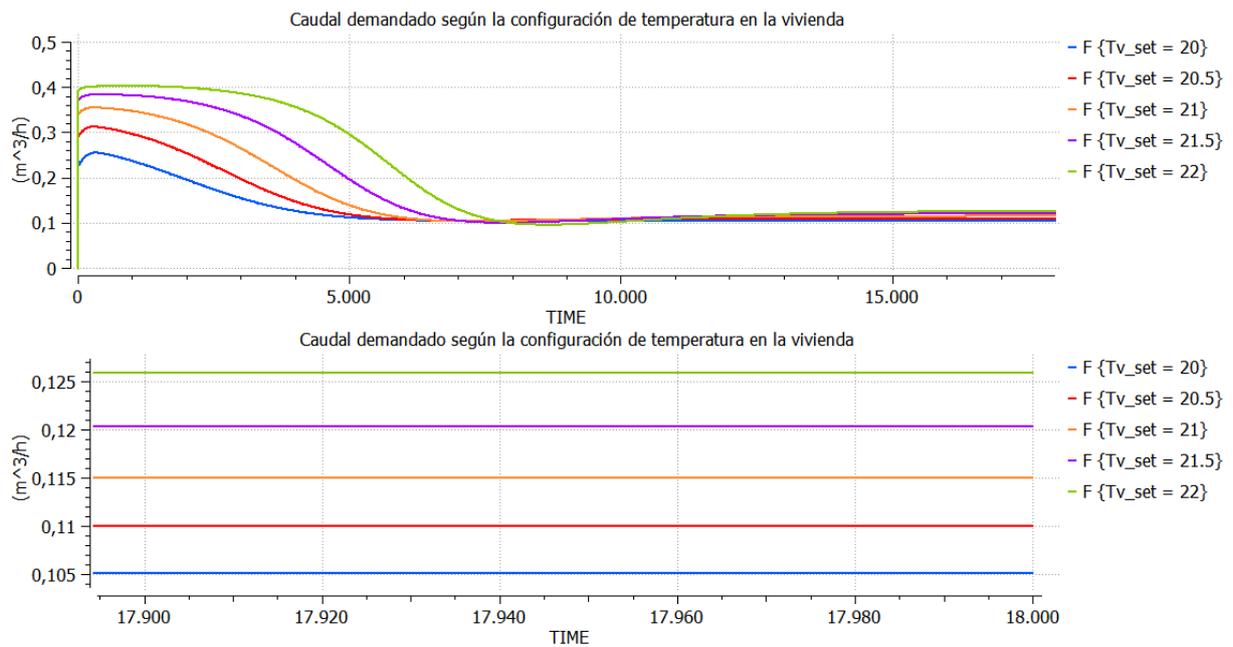


Figura 6.4.4: Evolución del caudal de calefacción demandado según la configuración y detalle ampliado del estacionario

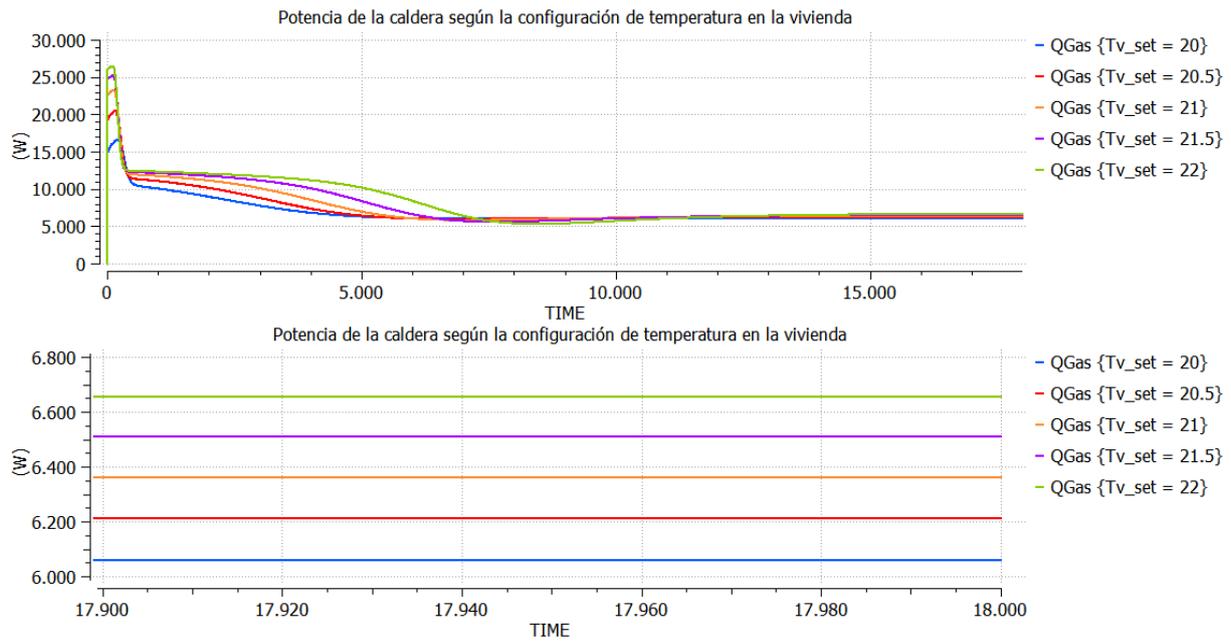


Figura 6.4.5: Evolución de potencia de la caldera según la configuración y detalle del estacionario

Análisis de resultados

En la figura 6.4.3 vemos que en todos los casos se alcanza la temperatura deseada de forma perfectamente estable, aunque cuanto mayor es la diferencia entre la temperatura inicial y la deseada, mayor es el sobrepico que se presenta durante el transitorio. En ningún caso supone un gran problema, y siempre se puede tratar de afinar más el controlador del sistema.

En la figura 6.4.4 se aprecia cómo cuanto mayor es la temperatura deseada en la vivienda, mayor es el caudal requerido en el estacionario para mantenerla estable, debido a que las pérdidas al exterior son mayores, por haber una mayor diferencia de temperaturas. Es el mismo fenómeno por el que se usa una sonda de temperatura exterior para ajustar la temperatura de las calderas (Ver: Curva de calefacción, [10]), para ajustar el caudal que se demandará al sistema, ya que cuando menor sea la temperatura exterior, mayor será la demanda de calefacción (mayores pérdidas por las paredes). Se observa también en el siguiente experimento, donde se varía la temperatura de las calderas.

En la figura 6.4.5 se observa la potencia que aporta la caldera al sistema. Es de especial interés ver que en el estacionario, a mayor temperatura, mayor potencia se demanda, para compensar las mayores pérdidas térmicas al exterior. Se puede comprobar que por cada medio grado de temperatura, la potencia aumenta unos 150W, lo cual está en perfecta consonancia con el factor de pérdidas al exterior, que era de 303W/°C.

Conclusiones del experimento

Se observa claramente que para una misma temperatura del agua de calderas, cuanto mayor es la temperatura deseada en la vivienda, mayor es el consumo energético, que se logra por medio de una mayor demanda de caudal al sistema.

El sistema es estable en todos los casos y alcanza la temperatura objetivo perfectamente. Además se estabiliza perfectamente en ese valor. Sin embargo, cuanto mayor es el salto de temperatura que tiene que dar el sistema, mayor es el sobrepico que se produce al principio, aunque este es lo suficientemente pequeño para mantener la sensación de confort en la vivienda. En cualquier caso, se puede tratar de mejorar realizando otros ajustes en el controlador.

6.5. Análisis de funcionamiento para distintas temperaturas de caldera

En este experimento se va a realizar un análisis comparativo de los efectos que tiene variar la temperatura de configuración de las calderas, manteniendo constante la temperatura demandada en las viviendas. Se van a realizar varias simulaciones superpuestas en las mismas gráficas para ver cómo cambia el funcionamiento del sistema cambiando la configuración.

Se usa el mismo del experimento anterior, mostrado en la figura 6.4.1 en la página 125.

Se va a suponer una sola vivienda en el sistema, para ver el efecto que se produce por vivienda. Además se va a utilizar un control PI, ya que se ha observado que en general es mejor tipo de controlador que el relé con histéresis, y porque nos interesa especialmente de este experimento saber qué ocurre en el estacionario, como ocurría en el anterior experimento.

Se va a realizar el análisis para las temperaturas de caldera (T_{cal}) de 65, 70, 75, 80 y 85 °C. La temperatura de configuración de la vivienda es de 20°C en todos los casos. La temperatura exterior se configura a 0°C.

Vamos a obtener tres gráficas principales, que van a mostrar:

- La evolución de la temperatura en la vivienda a lo largo del tiempo para las distintas configuraciones de temperatura. Figura 6.5.1.
- El caudal demandado por la vivienda a lo largo del tiempo para las distintas configuraciones, y detalle del estacionario. Figura 6.5.2.
- La potencia aportada por las calderas al sistema para las distintas configuraciones y detalle del estacionario. Figura 6.5.3.

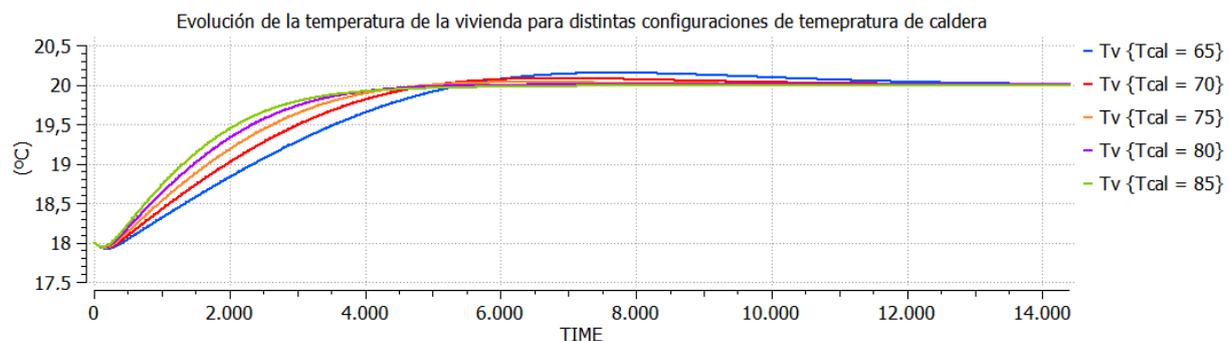


Figura 6.5.1: Evolución de la temperatura de la vivienda según la configuración del sistema

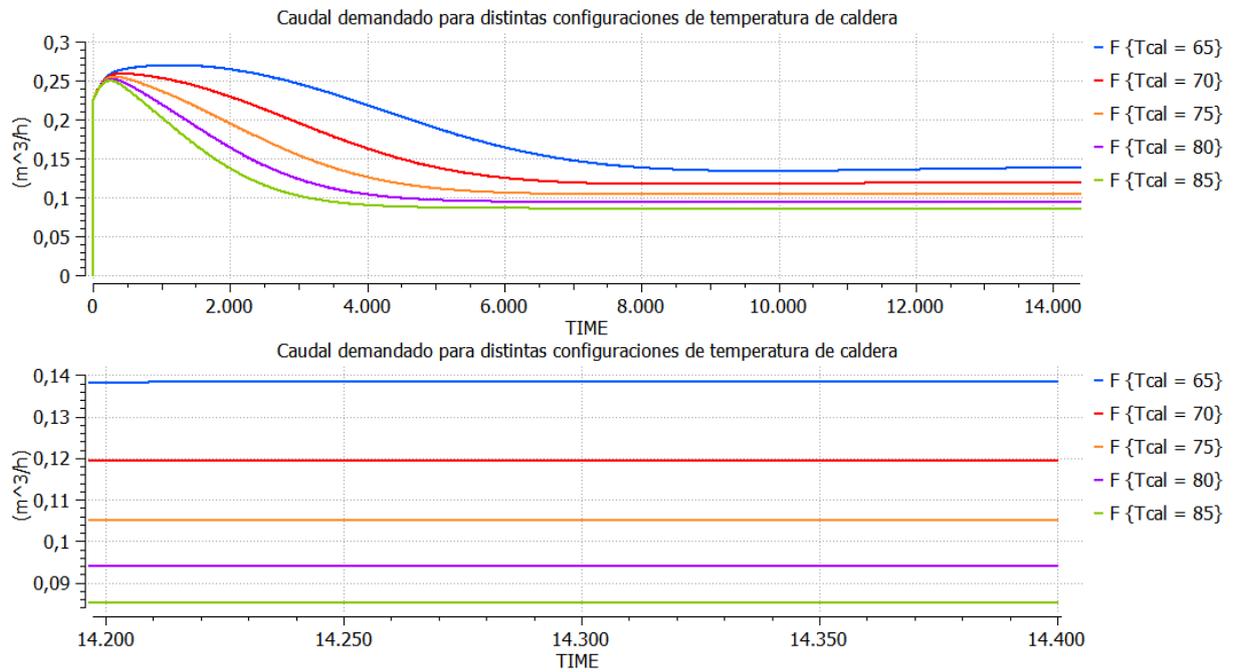


Figura 6.5.2: Evolución del caudal de calefacción demandado según la configuración y detalle ampliado del estacionario

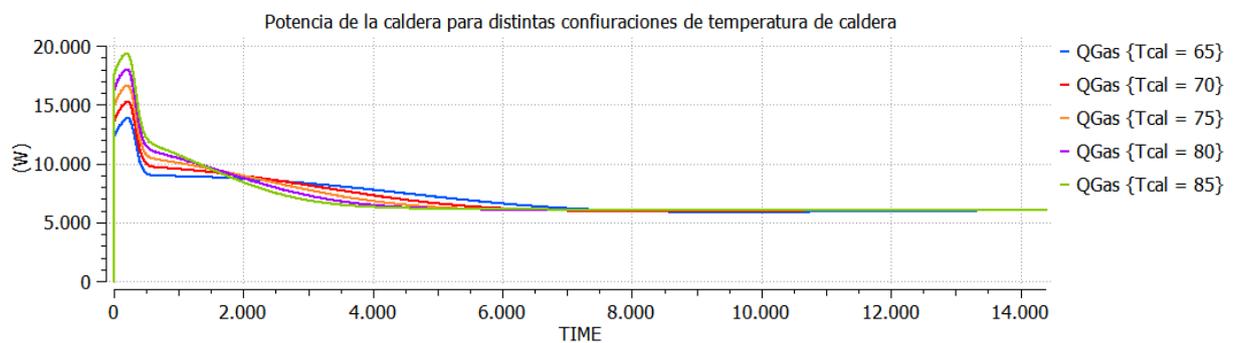


Figura 6.5.3: Evolución de potencia de la caldera según la configuración

Análisis de resultados

En la figura 6.5.1 vemos que en todos los casos se alcanza la temperatura deseada de 20°C de forma perfectamente estable, aunque cuanto mayor es la temperatura del agua de calderas, más rápidamente se alcanza el objetivo, y menor es el sobrepico. Funciona bien con cualquiera de las configuraciones.

En la figura 6.5.2 se aprecia cómo cuanto mayor es la temperatura del agua de calderas, menor es el caudal requerido en el estacionario para mantener la temperatura de la vivienda, debido a que el fluido transporta una mayor densidad energética, y la demanda de potencia es la misma en todos los casos. Es el motivo por el que se usa una sonda de temperatura exterior para ajustar la temperatura de las calderas (Ver: Curva de calefacción, [10]), para ajustar el caudal que demandará al sistema, ya que cuanto menor sea la temperatura exterior, mayor será la demanda de calefacción (mayores pérdidas por las paredes), pero si elevamos la temperatura del agua de calderas, lo compensamos.

En la figura 6.5.3 se observa la potencia que aporta la caldera al sistema. Como vemos, en todas las configuraciones de temperatura de calderas se llega al mismo estacionario, porque éste depende de la demanda que hace la vivienda, y como en todos los casos la vivienda está a la misma temperatura (20°C), tiene las mismas pérdidas y demanda la misma potencia para compensarlo.

Conclusiones del experimento

Se observa claramente que para una misma temperatura objetivo de la vivienda, cuanto mayor es la temperatura del agua de calderas, menor es la demanda de caudal al sistema, ya que se requiere de la misma potencia, pero el fluido es capaz de transportar más energía.

El sistema es estable en todos los casos y alcanza la temperatura objetivo perfectamente. Además se estabiliza perfectamente en ese valor deseado en la vivienda.

Entre entre este experimento y el anterior se ha logrado mostrar el funcionamiento de la curva de calefacción, que usa la sonda de temperatura exterior para cambiar la temperatura de funcionamiento de las calderas. El objetivo es compensar las mayores demandas de calefacción esperadas (por haber mayores pérdidas térmicas) con una mayor temperatura de impulsión de calefacción, con el fin de que el caudal demandado permanezca aproximadamente constante (para garantizar el correcto servicio de la instalación).

6.6. Análisis de funcionamiento para distintas temperaturas de ACS

En este experimento se realizará un análisis del funcionamiento diario del sistema de ACS variando la temperatura de referencia de su control de relé con histéresis. Se pretende observar el distinto comportamiento del sistema y las variaciones en el consumo de ACS para distintos valores de temperatura.

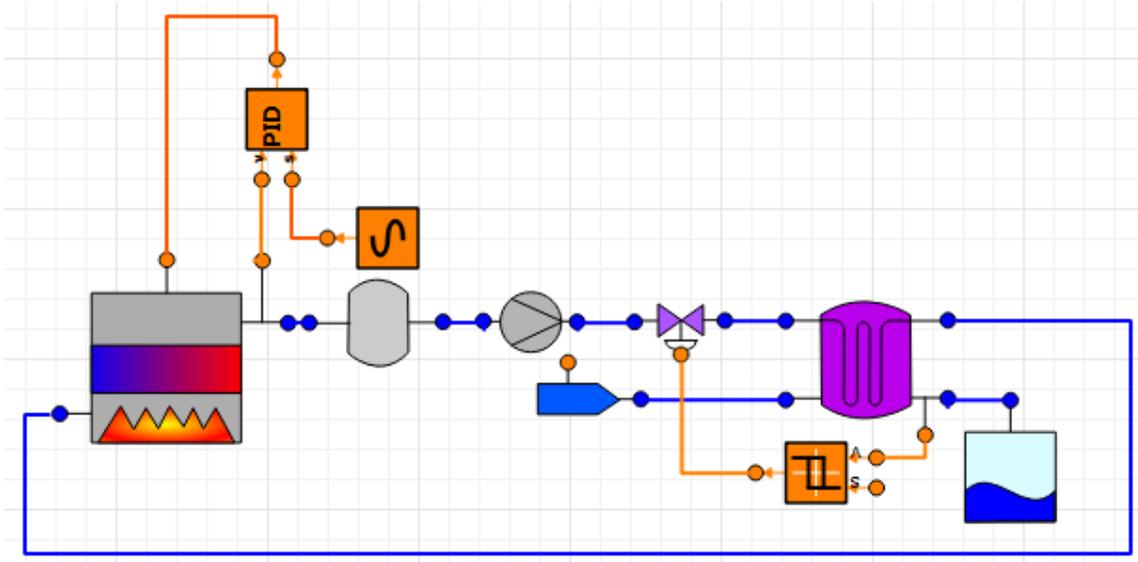


Figura 6.6.1: Esquema del experimento de distintas temperaturas de ACS

El esquema que se utilizará para este experimento se muestra en la figura 6.6.1.

La histéresis del relé del control de temperatura del ACS se fija en un valor de $\pm 2.5^{\circ}\text{C}$. Se va a realizar el experimento con los valores de referencia para este control de 40, 45, 50, 55, 60 y 65°C . La temperatura exterior será de 0°C .

El consumo de agua caliente se modelará con la misma tabla de puntos que en el experimento del apartado 6.1.3 en la página 97, pero en esta ocasión deberemos tener en cuenta un factor extra a la hora de calcular ese consumo.

El consumo de ACS de un sistema para viviendas se basa en realidad en obtener un determinado caudal a una determinada temperatura en el grifo de la vivienda. Es decir, se consume una determinada cantidad de energía, y no un determinado nivel de volumen. Por ello, al cambiar la temperatura del ACS, cambiará también el caudal demandado, ya que si aumenta la temperatura del ACS, para una temperatura de suministro de la red de agua potable constante, será necesaria menos cantidad de agua caliente en la mezcla para obtener la misma temperatura.

En este sentido, el caudal de ACS que se consuma a una determinada temperatura se podrá calcular teniendo en cuenta que el caudal total de la mezcla (de ACS y agua fría) será la misma en todos los casos, y que la temperatura final de la mezcla, también será la misma (misma energía consumida).

$$W_{ACS(1)} \cdot T_{ACS(1)} + (W_T - W_{ACS(1)}) \cdot T_F = W_{ACS(2)} \cdot T_{ACS(2)} + (W_T - W_{ACS(2)}) \cdot T_F \quad (6.6.1)$$

$$W_{ACS(1)} \cdot T_{ACS(1)} - W_{ACS(1)} \cdot T_F = W_{ACS(2)} \cdot T_{ACS(2)} - W_{ACS(2)} \cdot T_F \quad (6.6.2)$$

$$W_{ACS(2)} = W_{ACS(1)} \cdot \left(\frac{T_{ACS(1)} - T_F}{T_{ACS(2)} - T_F} \right) \quad (6.6.3)$$

Dónde $W_{ACS}(1)$ es el gasto másico de ACS a la temperatura $T_{ACS}(1)$, $W_{ACS}(2)$ es el gasto másico de ACS a la temperatura $T_{ACS}(2)$, T_F es la temperatura del agua fría (en este caso, 10°C) y W_T es el gasto másico de agua total (caliente más fría).

Así, y suponiendo que la densidad del agua es perfectamente constante, podemos expresar estas relaciones como:

$$F_{ACS}(2) = F_{ACS}(1) \cdot \left(\frac{T_{ACS}(1) - T_F}{T_{ACS}(2) - T_F} \right) \quad (6.6.4)$$

Dónde ahora se hace referencia a caudales, en lugar de gasto másico.

Con esta última ecuación, podemos calcular el caudal de ACS que se consumirá para cualquier temperatura de ACS, conociendo el caudal que se demanda para otra temperatura conocida.

Como nosotros utilizamos la tabla de puntos 6.1 en la página 98 para una temperatura de ACS de 50°C, utilizando la ecuación 6.6.4 podemos calcular el caudal que se demandará para cualquier otra temperatura.

Vamos por tanto a realizar el experimento, y obtendremos las siguientes gráficas:

- Caudal de ACS consumido para distintas temperaturas de referencia. Figura 6.6.2.
- Evolución de la temperatura del ACS a lo largo del tiempo para distintas temperaturas de referencia. Figura 6.6.3.
- Energía aportada por la caldera al sistema para las distintas temperaturas de referencia. Figura 6.6.4.

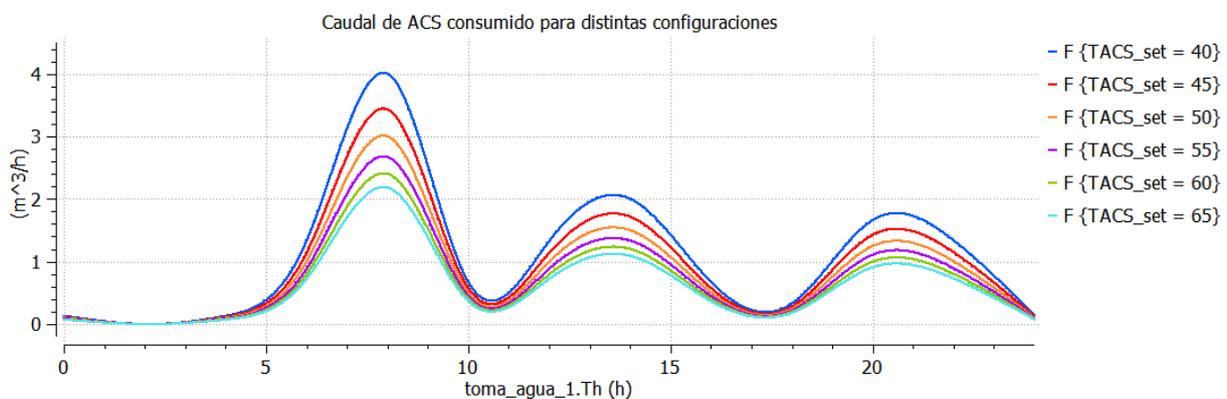


Figura 6.6.2: Consumo de ACS según la configuración de temperatura a lo largo del día

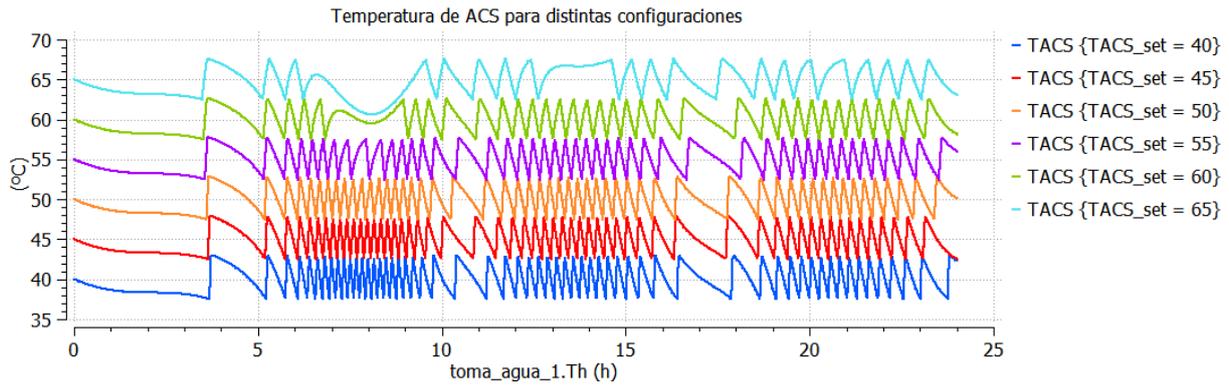


Figura 6.6.3: Evolución de la temperatura del ACS según la configuración del sistema

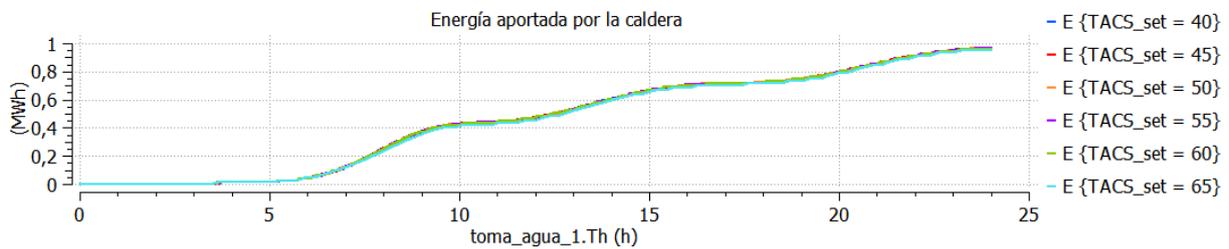


Figura 6.6.4: Energía aportada por la caldera según la configuración del sistema

Análisis de resultados

En la figura 6.6.2 se observa con claridad que cuanto mayor es la temperatura de ACS, menor es el caudal consumido. Esto es lo que conseguimos precisamente con la ecuación 6.6.4 en la página anterior. De este modo, el caudal de agua total consumido en los grifos de las viviendas, y la temperatura a la que sale la mezcla es independiente de la temperatura del ACS.

En la figura 6.6.3 se ve cómo evoluciona la temperatura del ACS en los intercambiadores a lo largo del tiempo. Se observa al histéresis de $\pm 2.5^{\circ}\text{C}$, y se aprecia cómo cambia la frecuencia de conmutación del control acorde al consumo de ACS que haya.

También se aprecia en esa figura un comportamiento curioso y de interés. Puede verse en las líneas de TACS_set de 60 y 65°C que en los momentos de mayor consumo de caudal, el intercambiador es incapaz de calentar lo suficiente el agua de los depósitos, disminuyendo la temperatura o sin lograr llegar hasta el nivel superior de la histéresis hasta que se reduce ese caudal demandado. Es algo curioso porque precisamente con las temperaturas de ACS más altas es con las que se tiene el menor consumo de caudal, sin embargo con las únicas que presentan este problema.

Este comportamiento se debe a que, aunque es cierto que cuanto más alta sea la temperatura del ACS menor caudal se demanda, también es cierto que el aporte térmico al sistema de ACS a través de los intercambiadores depende de la diferencia de temperatura entre el ACS y el agua de calderas (a 75°C). De este modo, a partir de cierta temperatura del ACS la diferencia de temperatura con el agua de calderas se reduce tanto que se reduce significativamente la potencia que es capaz de intercambiar el sistema, y es por ello que se produce ese fenómeno de potencia insuficiente en los momentos de máxima demanda.

En la figura 6.6.4 se aprecia que en todos los casos el consumo energético es casi exactamente el mismo. De hecho, las pequeñas diferencias que se puedan apreciar al final del día se deben a que si el agua de los depósitos estaba más caliente, se han producido más pérdidas térmicas que la caldera ha tenido que compensar también, pero éstas son tan pequeñas que no se pueden apreciar sin realizar una ampliación. Se pueden considerar despreciables en comparación a la energía gastada en calentar el ACS que se ha consumido.

Conclusiones del experimento

Con este experimento se ha podido comprobar que el funcionamiento del sistema de ACS puede funcionar correctamente a una amplia variedad de temperaturas.

Se observa que, en general, cuanto mayor es la temperatura del ACS, menor es el caudal demandado, ya que lo que es constante en el funcionamiento es la demanda de energía, no de caudal de ACS.

Sin embargo se han encontrado algunos indicios de un funcionamiento incorrecto por una potencia intercambiada insuficiente cuando la temperatura del ACS se fijaba en valores altos, de 60 y 65°C. Es un comportamiento algo curioso y no muy intuitivo, ya que cuanto mayor es la temperatura del ACS menor es la demanda de caudal, es fácil pensar que el sistema soportará esa demanda y esas condiciones mucho mejor.

Sin embargo la realidad es que la potencia que obtiene el ACS en el intercambiador depende de la diferencia de temperatura entre el ACS y el agua de las calderas. Cuanto mayor sea la temperatura del ACS, menor es esa diferencia. Y como se ha comprobado, a partir de cierto punto pesa más en el sistema esa disminución de la diferencia de temperaturas que la disminución de la demanda de caudal, haciendo que el sistema no sea capaz de mantener la temperatura en el rango o con el funcionamiento esperado.

En cuanto a la energía total consumida, se observa que en todos los casos es prácticamente la misma, con tan sólo mínimas diferencias debidas a las mayores pérdidas térmicas cuanto mayor sea la temperatura del ACS, aunque sigue siendo un factor mínimo en comparación a la energía consumida en el ACS.

Capítulo 7

Conclusiones

7.1. Grado de cumplimiento de los objetivos

En este proyecto se ha logrado una plena satisfacción de los objetivos propuestos para el mismo. Se ha logrado desarrollar una completa y detallada biblioteca de componentes básicos sobre sistemas de calefacción y ACS, que tiene un carácter general y con la que es posible modelar una amplia variedad de sistemas tanto comunitarios como individuales.

Se ha logrado simular con éxito el sistema real con distintos niveles de detalle o partes del mismo, y se han llegado incluso a modelar de forma detallada los portales con las características y distribuciones reales del edificio real. Se ha logrado elaborar un modelo perfectamente detallado de todo el conjunto de la comunidad de vecinos, con sus 136 viviendas. Aunque este último modelo no se ha podido simular por exceder el límite de ecuaciones de la licencia disponible, sí se ha podido simular uno de los portales por separado, comprobando que el modelo es perfectamente válido.

A nivel personal he adquirido muchos conocimientos sobre el modelado y la simulación de sistemas continuos, sobre el modelado de sistemas reales, sobre la simulación dinámica, sobre la metodología y los procedimientos de análisis y formulación de modelos, y sobre el uso de lenguajes de simulación orientados a objetos.

Además, he podido profundizar más en los conocimientos sobre ingeniería fluidomecánica e ingeniería térmica, especialmente en lo relativo al funcionamiento y comportamiento de intercambiadores de calor.

Se ha realizado un análisis comparativo entre dos técnicas de control de la temperatura de una vivienda, el relé con histéresis frente a un controlador PI con regulación continua, llegando a obtener por medio de simulaciones como resultado que el control PI es aparentemente mucho mejor, pero que puede haber problemas si la topología del sistema es que los radiadores están conectados en serie.

También se han realizado tres análisis paramétricos cambiando la referencia de los principales sistemas de control para observar su influencia en distintas partes del sistema. Se ha cambiado la temperatura objetivo de las viviendas, manteniendo constante la temperatura de las calderas, se ha cambiado la temperatura de las calderas, manteniendo constante la temperatura de referencia

de las viviendas, y se ha cambiado la temperatura media del ACS, manteniendo la temperatura de las calderas.

Por medio de estos análisis se ha podido observar con más detalle las variaciones en el funcionamiento de la instalación según la configuración que se elija, sus pros y sus contras. Además se ha podido ver la justificación y el funcionamiento de algunos métodos de variar el punto de funcionamiento de las calderas, como la curva de calefacción. también se han observado los límites que se pueden alcanzar en el ACS, y el efecto sobre el consumo que tiene cambiar su temperatura.

En general, se han logrado todos los objetivos que se proponían al principio del trabajo, y en algunos casos incluso con más precisión y más detalles de los esperados. Este trabajo ha sido un buen complemento a la formación curricular de la carrera, permitiéndome profundizar más en esos temas y complementar mi formación.

7.2. Conocimientos adquiridos en los estudios del Grado utilizados

Este trabajo no se podría haber desarrollado sin los conocimientos adquiridos durante los estudios del Grado en Ingeniería en Electrónica Industrial y Automática.

Han sido de especial interés los conocimientos relativos a las asignaturas de Modelado y Simulación de Sistemas (de tercer curso), dónde de adquirieron todos los conocimientos previos a este trabajo sobre modelado matemático de sistemas, manipulación del modelo, problemas que pueden surgir en los modelos (problemas de índice superior, lazos algebraicos, etc.), metodología y procedimientos de simulación, tipos de sistemas, etc.

También han sido muy importantes los conocimientos adquiridos sobre programación, en asignaturas como Fundamentos de Informática (de primer curso) o Informática Industrial (de tercer curso), dónde se expusieron los conocimientos básicos sobre programación en general y conocimientos mucho más en detalle sobre los lenguajes de programación general C y C++, en los que se basan multitud de aplicaciones (como el propio EcosimPro) e incluso otros lenguajes de programación. El lenguaje de simulación de EcosimPro, EL, es muy similar en algunos puntos a C++, como por ejemplo en el factor de que ambos son lenguajes orientados a objetos, y hacen un tratamiento de los mismos muy similar. Además la lógica de programación y de funcionamiento es muy similar en todos los lenguajes.

Gracias a los conocimientos adquiridos en las asignaturas relacionadas con la automática, como Fundamentos de Automática (de segundo curso), se han podido realizar unas configuraciones adecuadas de los distintos controladores PID o PI usados en los experimentos, así como lograr entender el comportamiento del sistema y corregirlo cuando ha sido necesario durante el proceso de desarrollo.

También han sido muy influyentes en este trabajo los conocimientos adquiridos en las asignaturas de Ingeniería Fluidomecánica y Termodinámica Técnica y Transmisión de Calor (ambas de segundo curso), de cara al modelado y comprensión de los elementos y circuitos hidráulicos y al comportamiento térmico de los sistemas. Aunque ha sido necesario profundizar mucho más de lo programado en esas asignaturas en determinados puntos, como los intercambiadores de calor y las ecuaciones que rigen su comportamiento.

7.3. Líneas de desarrollo futuro

Aunque la biblioteca desarrollada es muy completa y funciona muy bien, aún quedan aspectos que se pueden perfeccionar o sobre los que se puede profundizar más.

Un ejemplo es realizar un análisis exhaustivo sobre el origen del problema que surge cuando en las válvulas de control se pone una señal de control de 0 (y que nos obligaba a poner un valor muy pequeño, pero distinto de 0 cuando queríamos cerrar la válvula), analizando el comportamiento de todos los elementos del sistema en esas condiciones, e incluso la manipulación matemática que realiza EcosimPro del modelo, para tratar de encontrar dónde se puede producir un fallo al introducir esa señal.

Otro de los aspectos que se pueden intentar mejorar es el modelo de algunos elementos como las calderas, sobre los que se tiene muy poca información de su comportamiento interior o su dinámica. El fabricante no aporta información al respecto, por lo que habría que buscar otras formas de obtenerla, como experimentación con el sistema. No obstante eso no fue posible para el caso de este trabajo, como ya se ha expuesto a lo largo del mismo.

También se podría tratar de obtener algo más de información sobre el modelado y la influencia de la radiación solar sobre el sistema. Aunque puede ser un análisis algo complicado, especialmente de cara a determinar los niveles e incidencia de radiación solar, sería interesante para caracterizar de forma distinta, en base a esta influencia, las viviendas con orientación Norte de las que tienen orientación Sur, y observar mejor en los experimentos su efecto.

Para algunos componentes se han propuesto varias alternativas de modelado. Una futura mejora podría ser también diseñar los componentes con la posibilidad de seleccionar cualquiera de esos posibles modelos cuando se instancien los componentes en un modelo de simulación. De esta forma no habría que modificar ningún código para comentar o descomentar líneas según el modelo que se quiera usar.

También podrían ser de gran interés el modelado de sistemas de obtención de energías renovables, como calentadores solares, y la simulación de sistemas mixtos en los que se incluyan esos elementos. Se podrían realizar distintos tipos de instalaciones y dimensionamientos y obtener el comportamiento del sistema en cada uno, pudiendo comparar la eficiencia energética y el ahorro de combustible de las calderas.

Índice de figuras

2.1.1.A la izquierda, calefacción por columna, a la derecha, calefacción por anillos . . .	14
2.1.2.Esquema de un circuito de calefacción monotubular	14
2.1.3.Esquema de un circuito de calefacción bitubular simple	15
2.1.4.Esquema de un circuito de calefacción bitubular de retorno invertido	15
2.2.1.Esquema de distribución de calefacción en viviendas	16
2.2.2.Esquema de la instalación de la sala de calderas	17
2.2.3.Vista general de la sala de calderas del sistema real	18
2.2.4.Fotografía de las cuatro calderas del sistema	18
2.2.5.Esquema de ejemplo proporcionado por el fabricante de las calderas, <i>De Dietrich</i>	19
2.2.6.Esquema de ejemplo proporcionado por el fabricante de los acumuladores de ACS, <i>De Dietrich</i>	20
4.4.1.Símbolo del componente bomba	36
4.5.1.Símbolos de las válvulas	39
4.6.1.Símbolo de las calderas	42
4.7.1.Símbolo del componente depósito	44
4.8.1.Cuatro tipos de perfiles de temperatura en un intercambiador de calor	46
4.8.2.Símbolo del componente Viviendas	51
4.9.1.Símbolo del componente Intercambiador	56
4.10.1 Símbolo del componente Tubería	59
4.11.1 Símbolo del componente Toma de agua	60
4.12.1 Símbolo del componente Referencia de presión	61

4.13.1 Símbolo del componente Control	63
4.14.1 Símbolo del componente Sensor de temperatura	64
5.1.1. Superposición de la curva de la bomba Wilo TOP-S-65/13 con los puntos y curva interpolada (en azul)	67
5.1.2. Superposición de la curva de la bomba Wilo TOP-S-50/10 con los puntos y curva interpolada (en azul)	67
5.1.3. Superposición de la curva de la bomba Wilo TOP-S-50/4 con los puntos y curva interpolada (en azul)	68
5.1.4. Fotografía de una de las bombas del sistema real	68
5.2.1. Una de las tablas de datos proporcionadas por el fabricante de las calderas	69
5.2.2. Fotografía de una de las calderas del sistema real	70
5.3.1. Una de las tablas proporcionadas por el fabricante sobre los datos de los intercambiadores	70
5.3.2. Superposición de la curva de pérdidas de carga del intercambiador B-1000 con los puntos y curva interpolada (en azul)	71
5.3.3. Una de las tablas proporcionadas por el fabricante sobre los datos de funcionamiento de los intercambiadores	72
5.3.4. Fotografía de la distribución de circuitos y acumuladores de ACS	73
6.1.1. Esquema del modelo simplificado de calefacción de una vivienda	78
6.1.2. Parámetros de la caldera	79
6.1.3. Configuración del relé con histéresis	79
6.1.4. Configuración de la bomba	80
6.1.5. Configuración del edificio (Componente tipo «Viviendas»)	80
6.1.6. Caudal a lo largo del tiempo	82
6.1.7. Temperaturas de interés del sistema a lo largo del tiempo	82
6.1.8. Detalle de la evolución de la temperatura media de la vivienda (tiempo extendido)	83
6.1.9. Señal de control de la caldera	83
6.1.10. Potencia de la caldera y potencia consumida en el edificio	83
6.1.11. Evolución de la temperatura del agua a lo largo del circuito de radiadores en para 100s, 1000s, y 3600s	84

6.1.12	Energía consumida según el contador y consumo real	85
6.1.13	Detalle del calentamiento de los radiadores	86
6.1.14	Esquema del modelo simplificado del edificio	88
6.1.15	Configuración del controlador PI	90
6.1.16	Configuración del edificio	90
6.1.17	Configuración del intercambiador	91
6.1.18	Curva de pérdidas de carga equivalente	91
6.1.19	Caudales en las ramas del sistema	93
6.1.20	Temperaturas de interés en la calefacción	94
6.1.21	Temperaturas de interés en el sistema de ACS	94
6.1.22	Detalle de la evolución de la temperatura en las viviendas	94
6.1.23	Detalle de la evolución de la temperatura del ACS	95
6.1.24	Señal de control de las calderas	95
6.1.25	Potencia aportada por la caldera y consumos de calefacción y ACS	95
6.1.26	Esquema para la simulación de funcionamiento a lo largo del día	97
6.1.27	Perfil de consumo de ACS a lo largo del día	100
6.1.28	Perfil de viviendas utilizando calefacción a lo largo del día	100
6.1.29	Evolución de la temperatura de ACS	100
6.1.30	Evolución de la temperatura media de las viviendas que tienen la calefacción activa	101
6.1.31	Evolución de la potencia aportada por las calderas, y los consumos de calefacción y ACS.	101
6.1.32	Caudales por los distintos circuitos	101
6.1.33	Descripción del portal de 5 plantas y 2 viviendas por planta	104
6.1.34	Esquema de calefacción de un portal	105
6.1.35	Señales de control de las válvulas y detalles de los momentos de cierre y apertura	106
6.1.36	Caudal en la bomba y detalle en los instantes de cierre	106
6.1.37	Caudal en cada tramo de tubería (Norte) y detalle en los instantes de cierre . . .	107

6.1.38	Temperatura del primer elemento de calefacción de cada vivienda en el momento del primer encendido (Norte)	107
6.1.39	Subsistema de ACS	110
6.1.40	Descripción del portal de 5 plantas y 2 viviendas por planta	111
6.1.41	Descripción del portal de 5 plantas y 4 viviendas por planta	112
6.1.42	Descripción del portal de 5 plantas y 4 viviendas por planta, con 2 viviendas en la planta baja	113
6.1.43	Descripción del sistema de calefacción del edificio.	114
6.1.44	Grupo de calderas	115
6.1.45	Esquema de la instalación completa	116
6.1.46	Error al crear partición por exceder el número de ecuaciones de la licencia.	116
6.2.1.	Esquema del modelo simplificado de calefacción de una vivienda	117
6.2.2.	Detalle de la evolución de la temperatura media de la vivienda	117
6.2.3.	Evolución de la temperatura del agua a lo largo del circuito de radiadores en para 100s, 1000s, y 3600s	118
6.2.4.	Esquema de calefacción de una vivienda con control PI	118
6.2.5.	Configuración del controlador PI	119
6.2.6.	Evolución de la temperatura de la vivienda con e control PI	119
6.2.7.	Señal de control de la válvula	120
6.2.8.	Perfil de temperatura del circuito con control PI	120
6.3.1.	Experimento con el controlador de calderas	124
6.4.1.	Esquema para la simulación variando las referencias de los controladores	125
6.4.2.	Configuración del control PI	125
6.4.3.	Evolución de la temperatura de la vivienda según la configuración del sistema	126
6.4.4.	Evolución del caudal de calefacción demandado según la configuración y detalle ampliado del estacionario	126
6.4.5.	Evolución de potencia de la caldera según la configuración y detalle del estacionario	127
6.5.1.	Evolución de la temperatura de la vivienda según la configuración del sistema	128
6.5.2.	Evolución del caudal de calefacción demandado según la configuración y detalle ampliado del estacionario	129

6.5.3.Evolución de potencia de la caldera según la configuración	129
6.6.1.Esquema del experimento de distintas temperaturas de ACS	131
6.6.2.Consumo de ACS según la configuración de temperatura a lo largo del día	132
6.6.3.Evolución de la temperatura del ACS según la configuración del sistema	133
6.6.4.Energía aportada por la caldera según la configuración del sistema	133

Índice de tablas

5.1. Tabla de puntos de curva característica de la bomba Wilo TOP-S 65/13	65
5.2. Tabla de puntos de curva característica de la bomba Wilo TOP-S 50/10	66
5.3. Tabla de puntos de curva característica de la bomba Wilo TOP-S 50/4	66
5.4. Tabla de puntos de curva de pérdidas de carga del intercambiador <i>B1000</i>	71
6.1. Tabla de puntos de de las estimaciones de consumo de ACS a lo largo de un día .	98
6.2. Tabla de puntos de de las estimaciones de viviendas consumiendo calefacción a lo largo de un día	98

Bibliografía

- [1] Ventajas e inconvenientes de los principales tipos de calefacción
<https://rointe.com/tipos-de-calefaccion/>
- [2] Gasoil para calefacción "Gasóleo C" - <https://propanogas.com/faq/gasoleo-c>
- [3] Tipos de Gasóleo
<http://www.gasoilalmejorprecio.com/tipos-de-gasoleo-diferencias-entre-el-gasoleo-a/>
- [4] Pellet de madera - Wikipedia
https://es.wikipedia.org/wiki/Pellet_de_madera
- [5] Mercado de biocombustibles sólidos para calefacción
http://biomasudplus.eu/es_ES/2017/11/10/residential-heating-solid-biofuels-market-state-of-the-art-task-2-1/
- [6] Tipos de calefacción
<https://www.rankia.com/blog/luz-y-gas/2552235-tipos-calefaccion-gas-electrica-radiante-bomba-calor>
- [7] Tipos de circuito de calefacción - Openclima
<https://blog.openclima.com/circuito-de-calefaccion-tipos/>
- [8] Radiador (calefacción)
Wikipedia - [https://es.wikipedia.org/wiki/Radiador_\(calefacci%C3%B3n\)](https://es.wikipedia.org/wiki/Radiador_(calefacci%C3%B3n))
- [9] Guía práctica sobre instalaciones centralizadas de calefacción y agua caliente sanitaria (ACS) en edificios de viviendas - IDAE
<http://www.idae.es/file/10587/download?token=4crGRwH2>
- [10] Curva de Calefacción
Wikipedia - https://es.wikipedia.org/wiki/Curva_de_calefacci%C3%B3n
- [11] Software de Atecyr - <http://www.calculaconatecyr.com/>
- [12] Flow-3D - <https://www.flow3d.com/>
- [13] OpenCFD - <https://www.openfoam.com/>
- [14] ANSYS Fluent - <https://www.ansys.com/products/fluids/ansys-fluent>
- [15] HAP- Hourly Analysis Program
<https://www.carrier.com/commercial/en/us/software/hvac-system-design/hourly-analysis-program/>
- [16] EcosimPro - <https://www.ecosimpro.com/products/ecosimpro/>
- [17] Introduction to modelling and Simulation with EcosimPro - Francisco Vázquez, Jorge Jiménez, Juan Garrido, Antonio Belmonte - Editorial: PEARSON

- [18] Válvulas de Control ¿Qué es el Cv de una válvula?
<http://instintologico.com/valvulas-de-control-que-es-el-cv-de-una-valvula/>
- [19] ¿Qué es coeficiente de la válvula “cv”?
https://www.editores-srl.com.ar/sites/default/files/aa4_di_ciancia_coeficiente_valvula.pdf
- [20] Diferencia de temperatura media logarítmica (LMTD)
<http://www.cie.unam.mx/~ojs/pub/HeatExchanger/node18.html>
- [21] Acumuladores independientes de agua caliente sanitaria - De Dietrich
http://www.dedietrich-calefaccion.es/productos/gama_de_productos/agua_caliente_sanitaria/acumuladores_independientes_bpb_blc_b
- [22] Folleto técnico acumuladores - De Dietrich -
<http://www.dedietrich-calefaccion.es/download/file?file=var/ddth/storage/original/application/e2ee4a678409479c7315b97439c9cdc8.pdf&filename=BPB-BLC-BEPC300-B....pdf>
- [23] AEMET - Hoy y últimos días. Valladolid
<http://www.aemet.es/es/eltiempo/observacion/ultimosdatos?k=cle&l=2422&w=0&datos=img&x=h24&f=temperatura>
- [24] Golpe de Ariete - Wikipedia - https://es.wikipedia.org/wiki/Golpe_de_ariete