

# Módulo 5

## Sistemas avanzados de calefacción y refrigeración urbanas

Parte del paquete educativo SHaKE sobre sistemas de calefacción y refrigeración urbanísticos

## Guía

Recurso didáctico reutilizable para la educación superior y la formación profesional

Versión: 1.0  
Fecha: marzo de 2026

<https://www.shakeproject-dhc.eu/>



## Proyecto

Compartir calor y conocimientos sobre comunidades energéticas (SHaKE)  
Erasmus+ KA220-HED: Asociaciones de cooperación en la educación superior  
N.º de proyecto: 2023-1-HU01-KA220-HED-000160219

## Autores

Dr. Antoine Fabre, Dr. Pascal Stabat (Mines Paris – PSL)

## Editores

Eva Szalma, Dr. Antoine Fabre, Dr. Pascal Stabat, Ghad Alarnaot Alarnaout

## Agradecimiento por la financiación de la UE y exención de responsabilidad

Financiado por la Unión Europea. No obstante, las opiniones y puntos de vista expresados son exclusivamente de los autores y no reflejan necesariamente los de la Unión Europea ni los de la Fundación Pública Tempus. Ni la Unión Europea ni la autoridad que concede la subvención pueden considerarse responsables de los mismos.

## Coordinador

Universidad de Tecnología y Economía de Budapest, Hungría

## Instituciones asociadas

Universidad Jaume I de Castellón, España  
Mines Paris – PSL, Francia

## Agradecimientos

Esta publicación se ha elaborado en el marco del proyecto SHaKE. El consorcio desea expresar su agradecimiento a todos los docentes, investigadores, profesionales y partes interesadas que han contribuido al desarrollo, la revisión y la mejora de los materiales educativos.

## Licencia

Salvo que se indique lo contrario, este material está sujeto a una licencia Creative Commons Reconocimiento 4.0 Internacional (CC BY 4.0). Los usuarios pueden compartir y adaptar el material, siempre que se mencione debidamente al proyecto SHaKE y a los autores, se incluya un enlace a la licencia y se indiquen los cambios realizados.

Cita recomendada:

Mines Paris – PSL. Módulo 5: Sistemas avanzados de calefacción y refrigeración urbanísticas. Proyecto SHaKE, 2026.

<https://www.shakeproject-dhc.eu/>



## Guía de uso del Módulo 5

Este módulo forma parte del paquete educativo SHaKE, desarrollado para apoyar la enseñanza de los sistemas de calefacción y refrigeración urbanas (DHC) en contextos de educación superior y formación profesional.

El módulo 5 se centra en enfoques avanzados para mejorar el rendimiento de las redes de DHC. Presenta los retos operativos de las redes existentes y expone métodos para mejorar la eficiencia, la fiabilidad y la sostenibilidad. Se presta especial atención a la reducción de las temperaturas de retorno, al papel de los sistemas hidráulicos de los edificios, al diagnóstico de averías y al uso de datos operativos para apoyar la optimización de la red.

El módulo analiza las causas habituales de un funcionamiento subóptimo, entre las que se incluyen fugas, averías en el lado secundario, problemas con las válvulas de control y los actuadores, fallos en los sistemas de control y averías en los intercambiadores de calor. También aborda el impacto que tienen las decisiones de diseño del lado secundario, las configuraciones del agua caliente sanitaria y los modelos de tarifas térmicas en el rendimiento global de la red de DHC.

Además, el módulo presenta herramientas e indicadores utilizados para detectar anomalías y averías en las subestaciones y redes de calefacción y agua caliente centralizadas. Los materiales didácticos facilitan tanto la comprensión conceptual como el trabajo de ingeniería aplicada a través de estudios de casos, ejercicios técnicos y actividades de modelización numérica.

La guía está concebida principalmente como un recurso didáctico reutilizable para educadores, profesores y formadores. Puede utilizarse como apoyo en clases magistrales, actividades de aprendizaje mixto, debates en el aula, trabajos prácticos, estudios de casos y formación para el desarrollo profesional continuo. Las diapositivas de presentación adjuntas, el banco de preguntas, el cuestionario de autoevaluación y los ejercicios prácticos están diseñados para ayudar a los educadores a adaptar el contenido a su propio contexto docente.

Los estudiantes y los profesionales también pueden utilizar el módulo para el estudio autónomo, especialmente si ya cuentan con conocimientos básicos sobre sistemas de calefacción y refrigeración urbanos, subestaciones, sistemas hidráulicos, intercambiadores de calor y análisis básico de datos.

## Principales temas tratados en el módulo

- Situación actual de la calefacción y la refrigeración urbanas en Europa
- Políticas de las redes DHC, tendencias de desarrollo e integración de las energías renovables
- Mejora del rendimiento de las redes de calefacción y refrigeración centralizadas
- Reducción de las temperaturas de retorno y su efecto en la eficiencia de la red
- Averías y fallos habituales en las redes de calefacción y refrigeración centralizadas
- Fugas, averías en el lado secundario, problemas con las válvulas de control y los actuadores
- Averías en el sistema de control y en el intercambiador de calor
- Sistemas hidráulicos de los edificios y su impacto en el rendimiento de la red de calefacción y agua caliente sanitaria
- Configuraciones de agua caliente sanitaria y su influencia en la temperatura de retorno



- Modelos de tarifas térmicas e incentivos para mejorar el rendimiento en el lado del cliente
- Métodos de detección de anomalías y averías
- Indicadores prácticos utilizados por los operadores de sistemas de calefacción y refrigeración centralizados
- Uso de datos operativos para facilitar la detección de averías
- Modelización y análisis sencillos del rendimiento de la red de calefacción y refrigeración centralizadas
- Métodos de control y enfoques de optimización para la explotación avanzada de la red de calefacción y refrigeración centralizada

## Resultados de aprendizaje del Módulo 5

El módulo está diseñado para favorecer el desarrollo de las siguientes habilidades y competencias.

Al finalizar este módulo, los alumnos deberán ser capaces de:

- Explicar por qué la mejora del rendimiento de la red de cogeneración es importante para la descarbonización y la integración de las energías renovables
- Definir las consecuencias de un funcionamiento no óptimo de la red de cogeneración y calefacción
- Identificar las principales causas del bajo rendimiento y el mal funcionamiento de las redes de calefacción y refrigeración centralizadas
- Reconocer las averías más comunes relacionadas con fugas, sistemas secundarios, válvulas de control, actuadores, controladores e intercambiadores de calor
- Explicar cómo los sistemas hidráulicos del lado secundario influyen en la temperatura de retorno de la red primaria
- Comparar soluciones técnicas para mejorar el rendimiento tanto en los edificios como en las subestaciones
- Identificar medidas operativas y de diseño adecuadas para mejorar el rendimiento de las redes de calefacción y refrigeración centralizadas
- Explicar el papel de los modelos de tarifas térmicas a la hora de fomentar mejoras en el rendimiento por parte de los clientes
- Distinguir entre los enfoques de detección de anomalías y de detección de averías
- Aplicar indicadores sencillos de detección de averías a problemas seleccionados del funcionamiento de la red de calefacción y refrigeración centralizada
- Interpretar datos operativos básicos relacionados con las subestaciones y redes de DHC
- Crear o interpretar un modelo sencillo de DHC en el contexto del análisis o la optimización del rendimiento



## Carga de trabajo estimada

Este módulo supone aproximadamente 9,5 horas de aprendizaje, incluyendo clases magistrales, casos prácticos, estudio autónomo y evaluación.

Los docentes pueden adaptar la carga de trabajo en función del nivel del curso, los materiales seleccionados y el formato de enseñanza. El módulo puede utilizarse como:

- una unidad didáctica completa,
- un conjunto de materiales de clase seleccionados,
- un componente de aprendizaje mixto,
- un paquete de ejercicios prácticos,
- un conjunto de casos prácticos,
- o un recurso complementario para cursos ya existentes.

## Actividades y horas de aprendizaje

| <b>Tipo actividad</b> | <b>de</b> | <b>Tiempo asignado (horas)</b> | <b>Descripción</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|-----------------------|-----------|--------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Clases magistrales    |           | 5 h                            | <p>Secuencia 1: Descripción de la situación actual de la calefacción y el refrigeración distritales (DHC) en la UE y de las políticas en materia de DHC</p> <p>Secuencia 2: Descripción de las posibilidades para mejorar el rendimiento de la calefacción y refrigeración distribuidas</p> <p>Secuencia 3: Descripción de las formas de mejorar el rendimiento a través de los sistemas hidrónicos de los edificios</p> <p>Secuencia 4: Descripción de las herramientas e indicadores para detectar fallos de funcionamiento</p> <p>Secuencia 5: Metodología para modelar redes de calefacción y refrigeración distritales y datos relacionados con ellas</p> <p>Secuencia 6: Descripción de los métodos de control y los enfoques alternativos de optimización</p> |
| Casos prácticos       |           | 2 h                            | <p>Secuencia 2: Análisis de diferentes métodos de control de las redes de calefacción urbana (DHN) y del impacto de los fallos de funcionamiento a partir de un modelo numérico</p> <p>Secuencia 3: Análisis de diferentes arquitecturas de redes de calefacción distribuida (DHN) basado en un modelo numérico</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |



|                                      |        |                                                                 |
|--------------------------------------|--------|-----------------------------------------------------------------|
| Estudio autónomo                     | 2 h    | Preparación para la evaluación e investigación para el proyecto |
| Evaluación                           | 30 min | Cuestionario, proyecto                                          |
| <b>Total de horas de aprendizaje</b> |        | 9 h 30                                                          |

## Destinatarios

Esta guía está dirigida principalmente a educadores, profesores y formadores que deseen utilizar o adaptar los materiales de SHaKE en sus propias actividades docentes o formativas.

Los principales destinatarios son:

- profesores de educación superior en ingeniería, instalaciones técnicas de edificios, sistemas energéticos y campos afines,
- formadores que participan en la formación profesional o continua sobre calefacción y refrigeración urbanizadas,
- educadores que desarrollen actividades de aprendizaje mixtas, modulares u orientadas a la práctica,
- personal académico que busque recursos didácticos reutilizables sobre sistemas energéticos urbanos sostenibles,
- formadores y profesores que trabajen en temas relacionados con el funcionamiento, la optimización, las subestaciones y la eficiencia energética de los sistemas de calefacción y refrigeración urbanos

Los materiales también pueden ser utilizados por estudiantes, profesionales y personas que estudian por su cuenta y deseen profundizar en temas específicos de forma individual. Para su uso autónomo, se recomienda contar con conocimientos previos básicos en los campos de ingeniería pertinentes.

## Uso recomendado para educadores y formadores

El módulo 5 puede utilizarse de forma flexible como unidad didáctica completa o como conjunto de recursos didácticos seleccionados. Los docentes pueden combinar los materiales en función del nivel del curso, el tiempo lectivo disponible y los resultados de aprendizaje previstos.



## **Necesidades docentes**

### **Recurso recomendado para el módulo 5**

|                                                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
|--------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Introducción al tema                             | Utilice la descripción general del módulo y las diapositivas introductorias para presentar la relevancia de los sistemas avanzados de calefacción por agua caliente sanitaria (DHC), la mejora del rendimiento de la red y el papel de las bajas temperaturas de retorno.                    |
| Preparación de los alumnos antes de la clase     | Asigne secciones seleccionadas de la guía como lectura previa para actividades de aula invertida o de aprendizaje mixto.                                                                                                                                                                     |
| Apoyo a las clases magistrales o seminarios      | Utilice las diapositivas de la presentación para explicar los retos de rendimiento de los sistemas de calefacción y refrigeración centralizados (DHC), los sistemas hidrónicos del lado secundario, los tipos de averías, los métodos de detección de fallos y los enfoques de optimización. |
| Comprobación de la comprensión                   | Utilice preguntas seleccionadas del banco de preguntas para debates, breves comprobaciones en clase, evaluación formativa o cuestionarios en la plataforma de gestión del aprendizaje (LMS).                                                                                                 |
| Desarrollo de habilidades de ingeniería aplicada | Utilice los ejercicios prácticos y los casos de estudio para el trabajo en grupo, los deberes, el aprendizaje basado en proyectos, el análisis numérico o las sesiones de modelización guiadas.                                                                                              |
| Fomentar el debate basado en datos               | Utilice las secciones sobre detección de anomalías, indicadores de detección de fallos y datos operativos para iniciar debates en el aula sobre la monitorización y el diagnóstico en redes DHC.                                                                                             |
| Fomentar la revisión independiente               | Indique a los alumnos que realicen el cuestionario de autoevaluación del módulo una vez que hayan estudiado los materiales pertinentes.                                                                                                                                                      |
| Adaptación a los contextos docentes locales      | Seleccione, combine o modifique las secciones de la guía, las diapositivas, las preguntas y los ejercicios de acuerdo con el plan de estudios, el nivel de los participantes y el contexto profesional.                                                                                      |

### **Itinerario recomendado para estudiantes autónomos**

Los estudiantes y profesionales que utilicen el módulo de forma autónoma pueden seguir la secuencia que se indica a continuación.

#### **Paso**

#### **Actividad sugerida**

|                                      |                                                                                          |
|--------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|
| Repasa la presentación introductoria | Familiarízate con los conceptos principales, la terminología y la estructura del módulo. |
|--------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|



| Paso                                      | Actividad sugerida                                                                                                                                                     |
|-------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Estudia los materiales de la guía         | Lee las explicaciones detalladas, los principios de ingeniería y los conceptos operativos que se presentan en la guía.                                                 |
| Mira el vídeo del módulo                  | Utiliza el vídeo del módulo y las preguntas de evaluación adjuntas para profundizar en un tema, concepto o aspecto práctico concreto del módulo.                       |
| Realiza el cuestionario de autoevaluación | Comprueba tu comprensión de los conceptos clave y los principios técnicos tratados en el módulo.                                                                       |
| Realiza el ejercicio práctico             | Aplica los conocimientos adquiridos mediante análisis de carácter ingenieril, modelización o tareas basadas en casos relacionados con el rendimiento de las redes DHC. |
| Revisa el banco de preguntas              | Utiliza las preguntas para repasar, debatir o prepararte para la evaluación.                                                                                           |

### Materiales de apoyo disponibles

Los recursos de aprendizaje y materiales de evaluación disponibles incluyen:

- diapositivas de presentación de los subtemas del módulo,
- un banco de preguntas reutilizable,
- un cuestionario de autoevaluación a nivel de módulo,
- un vídeo del módulo con preguntas de evaluación adjuntas,
- un paquete de ejercicios prácticos descargable, que incluye archivos de Python y Jupyter Notebook, así como las carpetas necesarias de datos de entrada, modelos, imágenes y resultados,
- tareas de estudio de casos y miniproyectos basadas en el análisis numérico del rendimiento de la DHC a nivel de subestación y de red, que pueden utilizarse para trabajos en grupo, tareas para casa, informes técnicos breves o presentaciones orales.



## Índice

|                                                                                             |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Proyecto .....                                                                              | 2  |
| Autores .....                                                                               | 2  |
| Editores.....                                                                               | 2  |
| Agradecimiento por la financiación de la UE y exención de responsabilidad.....              | 2  |
| Coordinador.....                                                                            | 2  |
| Instituciones asociadas.....                                                                | 2  |
| Agradecimientos.....                                                                        | 2  |
| Licencia .....                                                                              | 2  |
| 1. Mejora del rendimiento de las redes DHC .....                                            | 10 |
| 1.1. Resumen de las averías en las redes de calefacción y refrigeración centralizadas ..... | 10 |
| 1.1.1. Fugas.....                                                                           | 11 |
| 1.1.2. Fallos en el sistema secundario.....                                                 | 12 |
| 1.1.3. Válvulas de control y actuadores .....                                               | 13 |
| 1.1.4. Sistemas de control y controladores.....                                             | 14 |
| 1.1.5. Intercambiador de calor .....                                                        | 15 |
| 1.1.6. Conclusión .....                                                                     | 15 |
| 1.2. Diseño de los sistemas hidráulicos del lado secundario.....                            | 16 |
| 1.2.1. Influencia del tipo de emisores y del control del caudal secundario .....            | 20 |
| 1.2.2. Repercusión de la configuración hidráulica del agua caliente sanitaria .....         | 24 |
| 1.2.3. Conclusión sobre la mejor configuración hidráulica .....                             | 25 |
| 1.2.4. Modelos de tarifas de calefacción.....                                               | 26 |
| 1.3. Detección de averías.....                                                              | 28 |
| 1.3.1. Retos en la detección de averías.....                                                | 28 |
| 1.3.2. ¿Qué es la detección de fallos de funcionamiento? .....                              | 29 |
| 1.3.3. Detección de anomalías .....                                                         | 30 |
| 1.3.3.1. Visualización y análisis manual.....                                               | 30 |
| 1.3.3.2. Umbrales .....                                                                     | 31 |
| 1.3.3.3. Regresión.....                                                                     | 32 |
| 1.3.3.4. Clasificación.....                                                                 | 33 |
| 1.3.3.5. Agrupación .....                                                                   | 34 |
| 1.3.4. Indicadores habituales utilizados por los operadores del DHC.....                    | 35 |
| 1.3.5. Detección de fallos .....                                                            | 38 |
| Referencias .....                                                                           | 45 |



## 1. Mejora del rendimiento de las redes de calefacción y refrigeración urbanas

Para cumplir el objetivo europeo relativo a las redes de calefacción y refrigeración urbanas (DHC), es necesario mejorar el rendimiento de las redes existentes. En el caso de las redes de calefacción, mejorar el rendimiento significa, ante todo, aumentar la proporción de energías renovables en la combinación energética. En la práctica, esto suele implicar reducir la temperatura de retorno global de la red, lo que permite aumentar el uso de fuentes de energía renovables de baja temperatura, como la energía geotérmica y el calor residual, al tiempo que se reducen las pérdidas de calor en las tuberías y el consumo energético de las bombas primarias.

Por lo tanto, los operadores de redes de calefacción y refrigeración centralizadas (DHC) tienen como objetivo alcanzar la temperatura de retorno global más baja posible. Alcanzar este objetivo requiere un conocimiento detallado del funcionamiento de la red. Los operadores de DHC se encargan principalmente de gestionar las plantas de generación de calor, la red primaria y el lado primario de las subestaciones. Dada la complejidad de una red DHC y las estrategias de control relativamente sencillas, que suelen basarse en conocimientos especializados, sigue existiendo un importante potencial de optimización

Sin embargo, dado que el suministro de calor en las redes de calefacción y refrigeración centralizadas depende de numerosos componentes de control, mecánicos e hidráulicos, pueden producirse fallos de funcionamiento. Un equipo inadecuado o defectuoso en cualquier punto de la red puede afectar negativamente a la temperatura de retorno global. Por lo tanto, antes de plantearse la optimización del control, es esencial asegurarse de que la red funcione correctamente. Sin embargo, según [1], en un estudio realizado en dos redes suecas, solo el 26 % de las subestaciones funcionaban correctamente. Los fallos en las subestaciones no interrumpen necesariamente el suministro de calor, pero pueden afectar significativamente al rendimiento general de la red de calefacción y refrigeración centralizadas. Por lo tanto, es esencial conocer los fallos más comunes y aquellos que tienen mayor impacto en el rendimiento.

### 1.1. Panorama general de las averías en las redes de calefacción y refrigeración centralizadas

Debido a la complejidad del funcionamiento de la red de calefacción y refrigeración centralizada (DHC), las causas de las averías pueden ser muy diversas. Un estudio sobre varias redes suecas realizado por [2] ha identificado las diversas causas posibles de las averías en la red y su recurrencia (véase Figura 1)

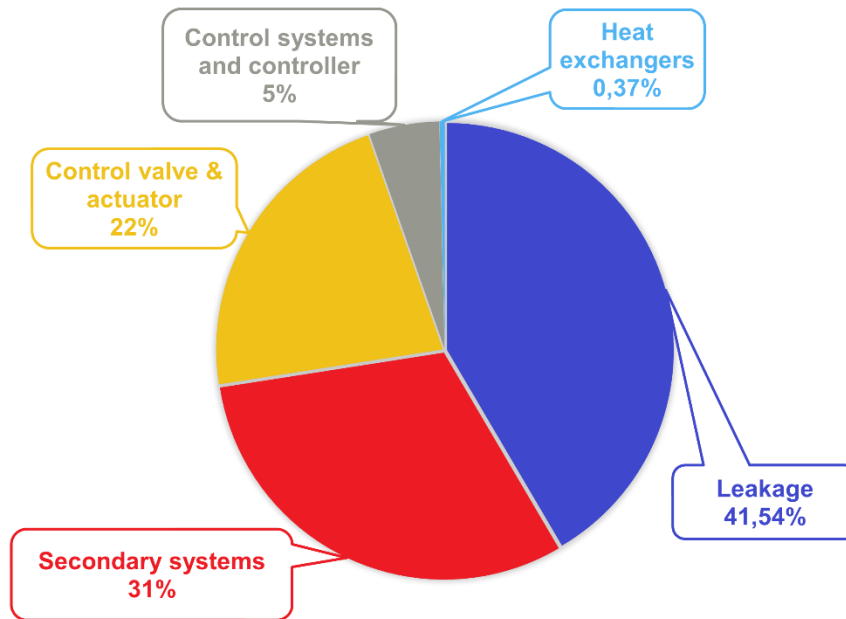


Figura1 Origen y recurrencia de los fallos en las redes de calefacción y refrigeración centralizadas (adaptado de[2] )

Las averías se dividen en cinco categorías en función de su localización o del tipo de avería: fugas, fallos en los sistemas secundarios (instalación del cliente), fallos debidos a la válvula de control y al actuador de la subestación, fallos en los sistemas de control y en los controladores, y fallos en el intercambiador de calor. Parece que las dos principales fuentes de averías son las fugas y los problemas con los sistemas hidráulicos de los clientes. La localización de las distintas averías identificadas se muestra enFigura2 . En las siguientes secciones se describe y explica cada categoría de avería.

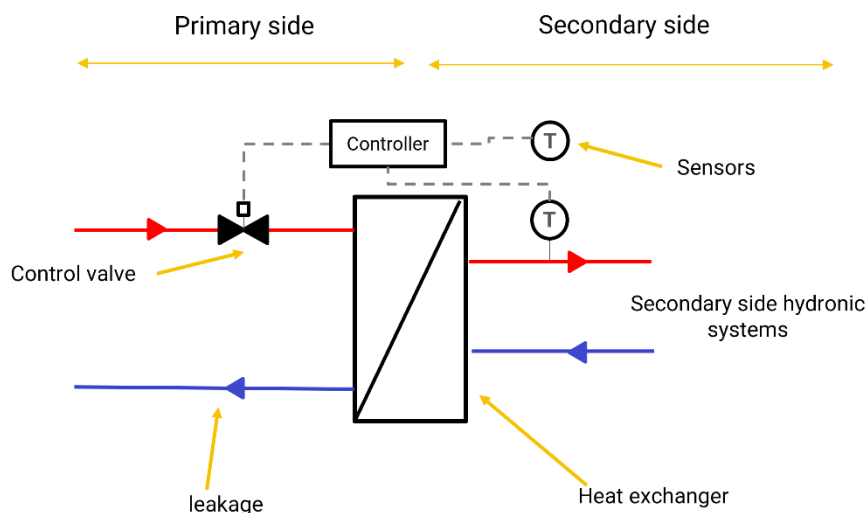


Figura2 Localización de averías

#### 1.1.1.1. Fugas

Las fugas representan el 42 % de las averías en las redes de calefacción urbana. Se localizan principalmente en la red primaria, pero también en el intercambiador de calor y en las válvulas de control. Las fugas pueden clasificarse en dos categorías[3] :

- Pérdidas de calor debidas al deterioro del aislamiento de las tuberías o a defectos de instalación o diseño



- Fugas de agua debidas al envejecimiento de los materiales, a daños accidentales (por ejemplo, obras públicas cerca de la red) o a defectos de instalación o diseño.

Algunas redes de calefacción y refrigeración centralizadas pueden presentar índices de fuga significativos que superan el 10 % del volumen total de agua distribuida, especialmente en las redes más antiguas.

Las fugas tienen consecuencias directas e indirectas para el rendimiento energético, económico y medioambiental de una red de calefacción y refrigeración centralizada:

- Consumo excesivo de energía para mantener la temperatura y la presión de la red
- Elevados costes de explotación y mantenimiento
- Riesgos para la salud y el medio ambiente (contaminación del suelo y de las aguas subterráneas)

#### 1.1.2. Averías en el sistema secundario

La categoría «fallos en el sistema secundario» incluye todos los problemas detectados en los sistemas de calefacción internos de los clientes. El gran número de problemas en esta categoría se debe a que los operadores de las redes de calefacción y refrigeración (DHC) no suelen tener control ni acceso a los datos de esta parte de las redes. EnFigura3 según [2].

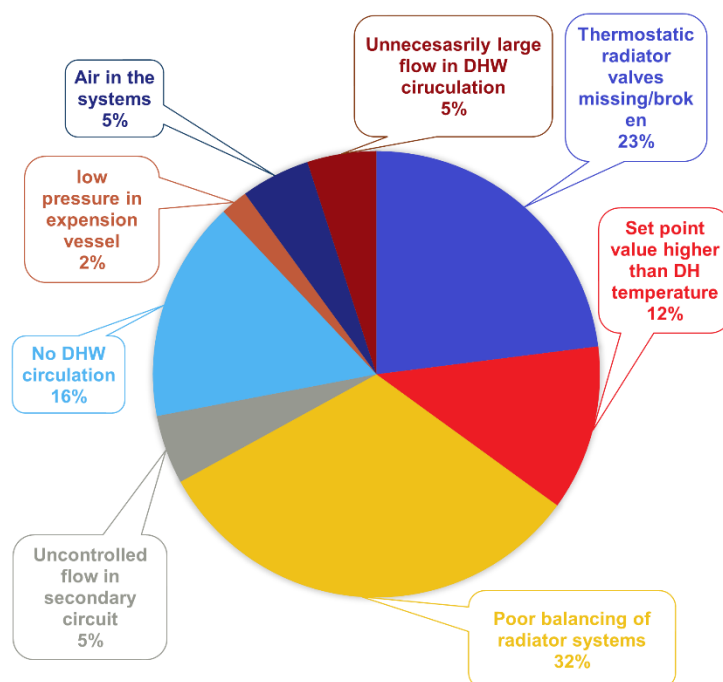


Figura3 Distribución de averías en el sistema hidrónico de los clientes (adaptado de [2])

El problema más habitual es el desequilibrio de la red secundaria (32 %). Tal y como se expuso en el Módulo 2, este fallo de funcionamiento puede provocar incomodidad térmica a los clientes debido a la falta de caudal en algunos emisores. Dado que los operadores de sistemas de calefacción y refrigeración centralizados (DHC) no suelen poder intervenir en los sistemas secundarios, suelen aumentar la temperatura de



suministro secundaria, lo que da lugar a un consumo excesivo y a una temperatura de retorno más elevada.

El segundo problema más frecuente es la ausencia o avería de las válvulas termostáticas de los emisores (23 %). Este problema puede ir acompañado de un caudal incontrolado en los sistemas secundarios (5 %). De hecho, las válvulas termostáticas averiadas o ausentes provocan un caudal incontrolado en los sistemas secundarios, lo que da lugar a un consumo excesivo o a altas temperaturas de retorno y a un posible malestar térmico para los clientes.

Otro fallo frecuente se refiere al suministro de agua caliente sanitaria (ACS), ya sea por la ausencia de recirculación de ACS (16 %) o por una recirculación excesiva de ACS (5 %). En los sistemas de ACS, la recirculación se refiere al caudal utilizado para mantener una temperatura mínima en el circuito hidráulico de ACS ( $> 55^{\circ}\text{C}$ ) con el fin de evitar la proliferación de legionela cuando no se consume agua caliente. Estos dos problemas provocan altas temperaturas de retorno; sin embargo, suelen ser más bien el resultado de decisiones de diseño inadecuadas que de auténticas averías.

El último fallo habitual es un problema de control: una temperatura de consigna del suministro secundario superior a la temperatura de suministro primario de la red de calefacción central. Este fallo se produce principalmente durante el verano, cuando solo se necesita agua caliente sanitaria, lo que permite reducir la temperatura de la red de suministro, mientras que algunos clientes mantienen la misma temperatura de consigna durante todo el año. Esto da lugar a caudales innecesariamente elevados en las redes de calefacción y agua caliente central, lo que provoca un aumento de la temperatura de retorno.

Los problemas identificados por los operadores de redes de calefacción y agua caliente son una combinación de averías y sistemas inadecuados en los sistemas hidráulicos de los clientes. La solución para abordar estas cuestiones se analiza en la sección 1.3.

#### 1.1.3. Válvulas de control y actuadores

Esta categoría de fallos incluye los problemas mecánicos en las válvulas de control y en los dispositivos que ajustan la apertura de las válvulas, denominados actuadores. La distribución de esta categoría de fallos se muestra en Figura 4.

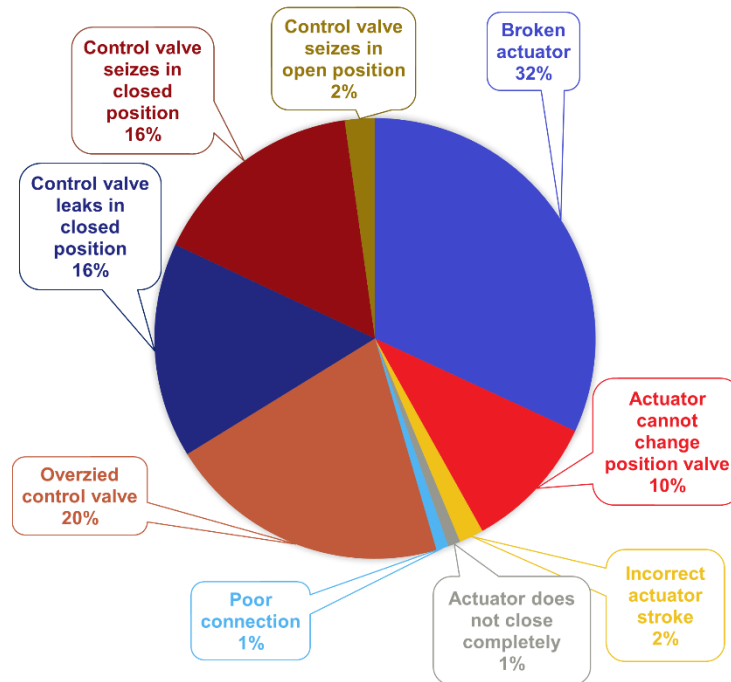


Figura4 Distribución de averías relacionadas con válvulas de control y actuadores (adaptada de [2])

Los problemas más habituales con las válvulas de control y los actuadores (por ejemplo, actuador averiado, actuador incapaz de cambiar la posición de la válvula, válvula de control atascada en una posición fija) provocan que la válvula no pueda abrirse o cerrarse correctamente, lo que impide el control adecuado del caudal primario. Este mal funcionamiento representa alrededor del 76 % de los problemas detectados relacionados con las válvulas de control y los actuadores. La falta de control del caudal primario puede tener diferentes repercusiones para el cliente o la red, dependiendo de la posición en la que se haya atascado la válvula. Puede causar molestias al cliente y/o un aumento de la temperatura de retorno del circuito primario. El otro problema habitual es el sobredimensionamiento de las válvulas (20 %). Si una válvula está sobredimensionada, funcionará principalmente en una posición muy parcialmente abierta, en la que la característica de control no es muy precisa. Por lo tanto, provoca variaciones rápidas y bruscas en el caudal, así como oscilaciones de temperatura y presión. En última instancia, puede dar lugar a un mayor consumo de la bomba y a un desgaste prematuro.

#### 1.1.4. Sistemas de control y regulador

La categoría «sistemas de control y regulador» incluye los problemas que afectan a todos los dispositivos utilizados para enviar órdenes de apertura o cierre a las válvulas, tales como los sensores, el punto de consigna de la temperatura de suministro secundario y el regulador. La distribución de esta categoría de fallos se muestra en Figura5 .

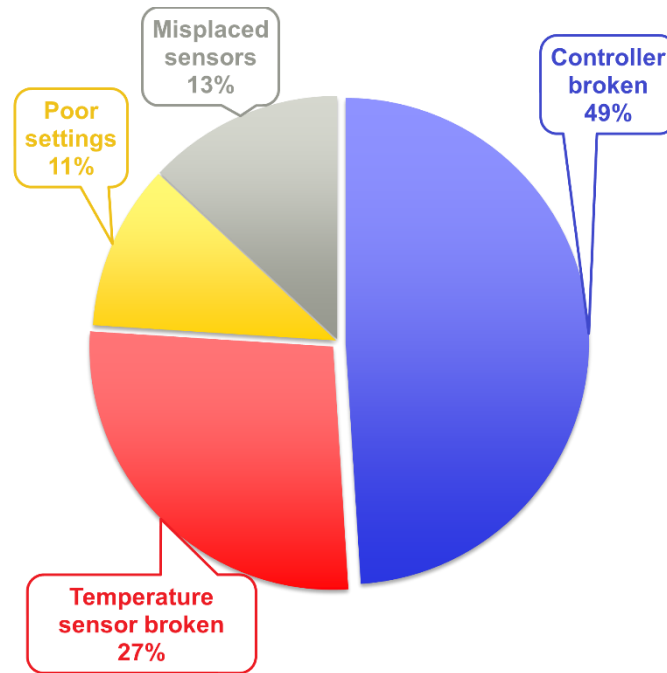


Figura5 Distribución de averías en sistemas de control y problemas con los reguladores (adaptado de [2])

Las averías más comunes se refieren a fallos de dispositivos, controladores o sensores (76 %). El operador también constató que la ubicación incorrecta de los sensores es un problema frecuente (13 %). Todas estas averías provocan un control deficiente que da lugar a niveles de temperatura anormales. La última avería la causan los propios clientes, que modifican manualmente los valores del punto de consigna de la temperatura de suministro secundario.

#### 1.1.5. de los intercambiadores de calor

La última categoría se refiere a problemas relacionados con los intercambiadores de calor. Por lo general, el operador del sistema de calefacción y refrigeración centralizada supervisa adecuadamente los intercambiadores de calor. Sin embargo, la calidad del agua de la red puede provocar en ocasiones la acumulación de sedimentos en los intercambiadores de calor, lo que da lugar a una disminución de su eficiencia.

#### 1.1.6. Conclusión

Este resumen de las averías más comunes en las redes de calefacción y refrigeración centralizadas (DHC) muestra que prácticamente todas las averías afectan al confort térmico del cliente y/o a la temperatura de retorno del circuito primario. Por lo tanto, es esencial corregir estos problemas. Además, se producen averías en aproximadamente el 75 % de las subestaciones, lo que hace que cualquier optimización resulte inútil hasta que se resuelvan estos problemas. Aunque se conocen los problemas más comunes y de mayor impacto, identificar sus causas fundamentales sigue siendo un reto. De hecho, los operadores de DHC solo gestionan el lado primario del sistema (incluidos el intercambiador de calor y el sensor de temperatura de suministro secundario) y, por lo tanto, tienen una visibilidad limitada del lado del cliente o del edificio. Además, a efectos de facturación, solo se exige legalmente el registro de los datos de potencia intercambiada. Estos datos se miden mediante un contador de energía (véase el módulo 2), que puede proporcionar información sobre el caudal primario y las temperaturas de suministro y retorno primarias. Por lo tanto, esta falta de datos dificulta especialmente la detección de



averías. Este reto se ve agravado por el hecho de que las averías no afectan necesariamente al confort de los ocupantes.

En conclusión, para mejorar el rendimiento de las redes de calefacción y refrigeración centralizadas (DHC) es necesario, en primer lugar, identificar los sistemas hidráulicos más adecuados para el lado del edificio, así como detectar las averías de forma precisa y rápida.

## 1.2. Diseño de los sistemas hidráulicos del lado secundario

La mayoría de los sistemas de calefacción urbana se han conectado a edificios ya existentes que cuentan con sus propios sistemas internos de distribución de calefacción, los cuales, por lo general, no están optimizados para reducir las temperaturas de retorno. En el apartado anterior se ha mostrado que el 31 % de los fallos de funcionamiento o de rendimiento insuficiente se deben a factores relacionados con los usuarios.

Por lo tanto, existe un gran potencial para mejorar el rendimiento de las redes de calefacción urbana, tanto las existentes como las nuevas. Un mejor funcionamiento de las subestaciones reduce las temperaturas de retorno en la red de calefacción urbana y, en consecuencia, mejora la eficiencia del sistema. Sin embargo, a menudo resulta difícil para los operadores de calefacción urbana aplicar medidas de mejora del rendimiento en las instalaciones de los clientes, ya que, por lo general, no se encargan de su funcionamiento ni de su mantenimiento.

El objetivo de esta sección es presentar algunas recomendaciones para mejorar el diseño y el funcionamiento de los sistemas de calefacción secundarios con el fin de reducir las temperaturas del agua de retorno. Las recomendaciones proceden de un informe de la AIE del Anexo XIII [4].

A partir de la revisión bibliográfica [4], se han seleccionado varios tipos de arquitectura hidráulica del lado secundario. Las medidas de rehabilitación estudiadas pueden aplicarse a cuatro componentes del lado secundario:

- La arquitectura de la subestación

Las arquitecturas de la subestación tienen un impacto notable en el rendimiento de la red de calefacción urbana. Como se muestra en el módulo 2, la configuración en paralelo parece ser la mejor arquitectura de subestación en términos de rendimiento y control. Sin embargo, este estudio no compara todas las arquitecturas más comunes, especialmente una que sigue siendo muy habitual en Francia con un intercambiador de calor global (véase la figura 6).

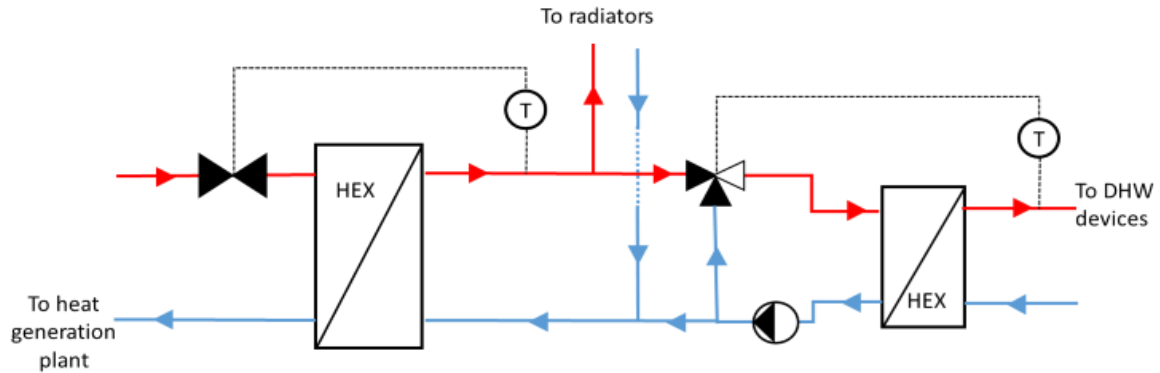


Figura6 : Subestación con un intercambiador de calor global [4]

A diferencia de la configuración en paralelo, solo se utiliza un intercambiador de calor (HEX) entre el lado primario y el secundario para suministrar calefacción y agua caliente sanitaria (ACS). El caudal primario se controla de la misma forma que en la configuración anterior. Además, para suministrar agua caliente sanitaria, se utiliza un intercambiador de calor global en la red secundaria, donde el caudal que pasa por el intercambiador es proporcionado por una bomba de caudal constante y el control de la temperatura se garantiza mediante una válvula de tres vías en la que una parte del caudal de salida se mezcla con el de entrada.

- El control del caudal secundario

Los sistemas de control se instalan para regular el caudal que pasa por los emisores. En este caso, de entre todos los emisores existentes, solo se tienen en cuenta los radiadores. Por lo tanto, se han seleccionado los tres controles de caudal más habituales. Se utilizan dos tecnologías de válvulas: las válvulas de tres vías (V3V) y las válvulas de dos vías (V2V), tal y como se muestra en la figura 7. Hoy en día, lo habitual es utilizar la V2V, ya que se considera más eficiente. Sin embargo, en edificios antiguos y en algunos edificios nuevos, todavía se utiliza la V3V porque resulta más fácil lograr un equilibrio hidráulico que con la V2V. La V3V puede funcionar de dos maneras: bien regulando el caudal hacia los radiadores desviando una parte del caudal de entrada (control de caudal), bien mezclando una parte del caudal de salida con el de entrada (control de temperatura). Por lo general, en los sistemas secundarios, la V3V se utiliza para el control de caudal. La V3V en el control de temperatura se utiliza predominantemente con un HEX que suministra agua caliente sanitaria en una configuración global de HEX (véase la figura 6).

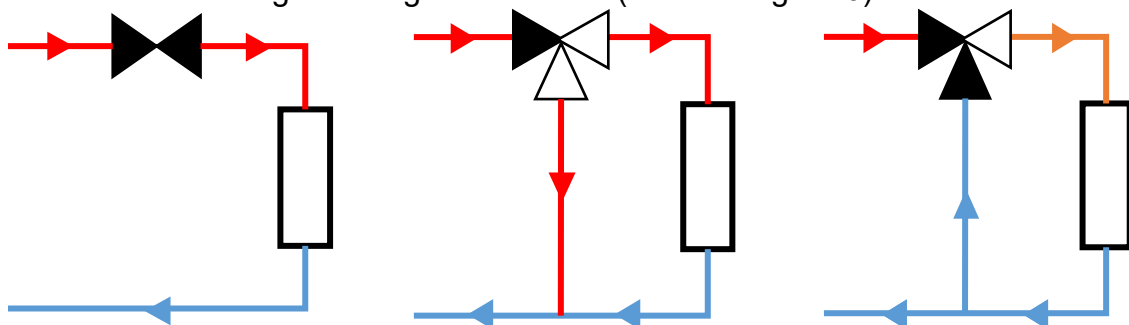


Figura7 . Válvula de control secundaria: válvula de dos vías, válvula de tres vías en el control de caudal y válvula de tres vías en el control de temperatura [4]



Además, el control del caudal secundario para el SH depende no solo de la válvula, sino también de la tecnología de la bomba. Existen tres tecnologías de bombas ampliamente utilizadas: la bomba de caudal constante, la bomba de caudal variable y la bomba de velocidad variable. Las diferentes características de cada tecnología se presentan en la figura 8. Por lo general, no se utiliza una bomba de velocidad variable en la red secundaria, pero sí es habitual en la red primaria. Por lo tanto, a continuación solo se presentarán la bomba de caudal constante y la bomba de caudal variable.

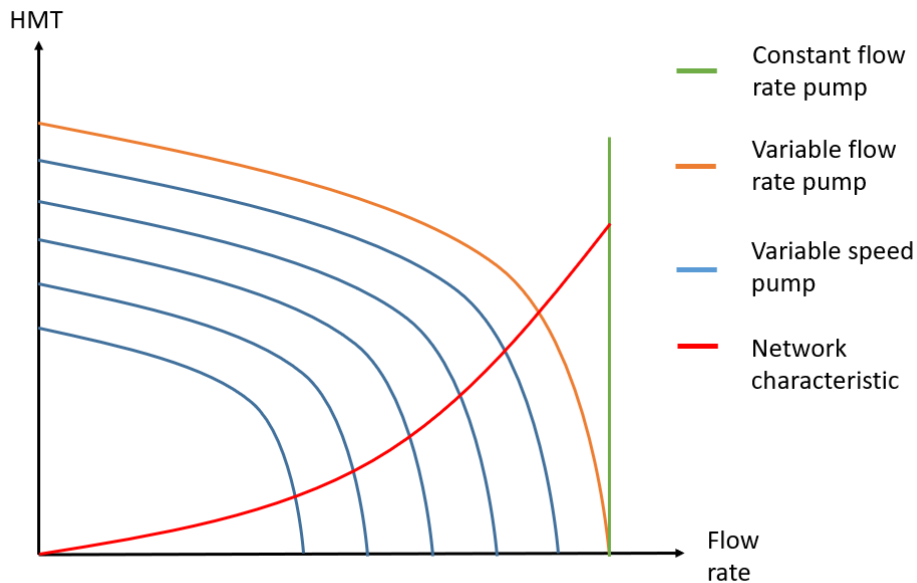


Figura8 : Características de la bomba y la red [4]

Las válvulas y la bomba deben considerarse conjuntamente. De hecho, la elección de la válvula depende del régimen de caudal impulsado por la bomba. Por ejemplo, en nuestro caso, no se puede utilizar una bomba de caudal constante con una V2V, ya que el exceso de caudal suministrado por la bomba no se puede gestionar sin un bypass. Así pues, se consideran tres tipos de control del caudal secundario: la combinación entre una bomba de caudal constante y una V3V, y la combinación entre una bomba de caudal variable y una V3V o una V2V.

- El régimen de temperatura de los radiadores

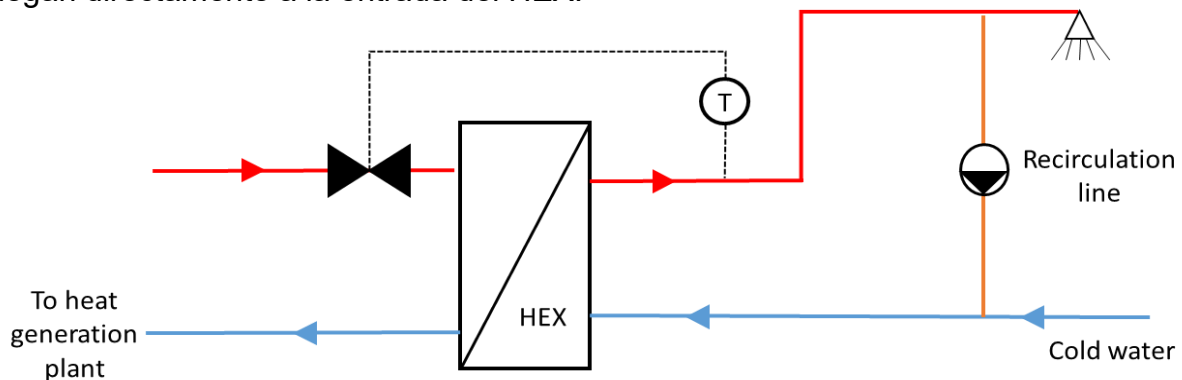
Como se muestra en el módulo 2, se utilizan diferentes regímenes de temperatura de los radiadores. Los radiadores están diseñados para suministrar una determinada potencia calorífica para temperaturas específicas de entrada y salida a la temperatura exterior de diseño (es decir,  $-7^{\circ}\text{C}$  en el norte de Francia). Se ha optado por comparar dos regímenes de temperatura de los radiadores muy utilizados: el régimen de alta temperatura de  $80/60^{\circ}\text{C}$  (HT) y el régimen de baja temperatura de  $55/45^{\circ}\text{C}$  (LT).

- La arquitectura de suministro de agua caliente sanitaria

Como se ha mostrado anteriormente (véase el módulo 2), para el suministro de agua caliente sanitaria (ACS) se utilizan ampliamente varios métodos, con o sin depósito de almacenamiento. Por lo tanto, la primera arquitectura habitual es la instantánea (véase Figura 9), en la que la red secundaria de ACS está conectada directamente al HEX de la subestación sin depósito de almacenamiento. En este caso, el caudal

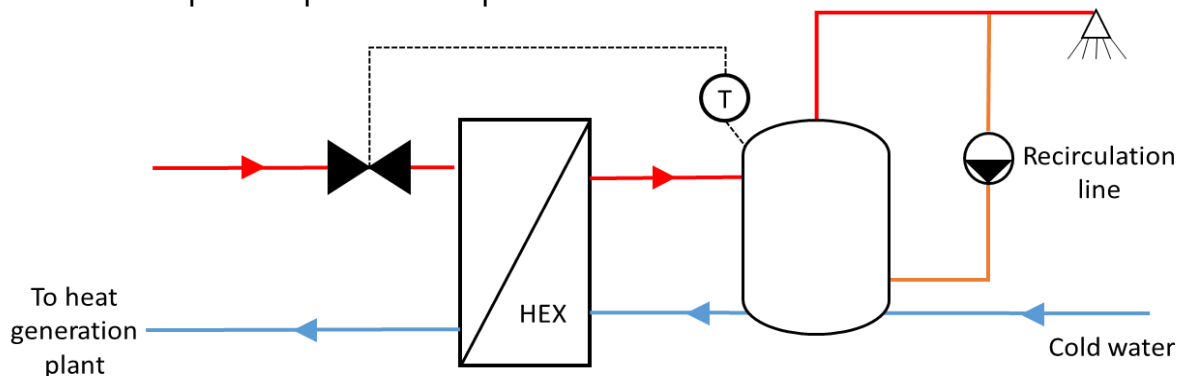


primario se controla para alcanzar la temperatura de consigna de suministro secundario, igual a 60 °C. Los caudales de agua fría y de recirculación se mezclan y llegan directamente a la entrada del HEX.



*Figura9 Subestación de suministro de agua caliente sanitaria, arquitectura instantánea [4]*

El segundo diseño habitual es la arquitectura con depósito de agua caliente, en la que se coloca un depósito de almacenamiento entre el HEX de la subestación y los puntos de consumo (véaseFigura10 ). En esta configuración, el caudal primario se controla para garantizar una temperatura superior a 60 °C en el depósito. Durante una demanda de agua caliente sanitaria, el agua del grifo llega directamente al fondo del depósito y se mezcla con el agua caliente, mientras que el usuario extrae el agua caliente de la parte superior del depósito.



*Figura10 : Subestación de suministro de agua caliente sanitaria, arquitectura del depósito de almacenamiento [4]*

Además de la configuración anterior, se presenta una tercera arquitectura denominada «depósito de agua caliente sanitaria con derivación». Esta configuración es un término medio entre las otras dos. El objetivo es evitar retornos calientes en el lado secundario del intercambiador de calor. Para ello, cuando no hay demanda de agua caliente sanitaria, el caudal de recirculación debe desviarse. Dado que la temperatura de recirculación es de al menos 55 °C, se coloca un sensor justo después de la mezcla del agua fría y la de recirculación. Si la temperatura medida por el sensor es superior a 55 °C, las válvulas cierran el acceso al intercambiador y el caudal se dirige al depósito. De este modo, el depósito de almacenamiento se utiliza principalmente para garantizar una temperatura suficiente para la recirculación. Cuando hay demanda de agua caliente sanitaria, la mezcla de agua fría y recirculación no pasa por el depósito y se dirige directamente al intercambiador de calor. De hecho, la idea es calentar únicamente el depósito y evitar consumir agua caliente del mismo durante una demanda, así como, cuando no se necesita agua caliente sanitaria, utilizar el depósito para alimentar la línea de recirculación y, de este modo, evitar conectar la línea de



recirculación con agua caliente a la subestación HEX y evitar así que haya agua caliente en la entrada de la subestación (véase Figura 11).

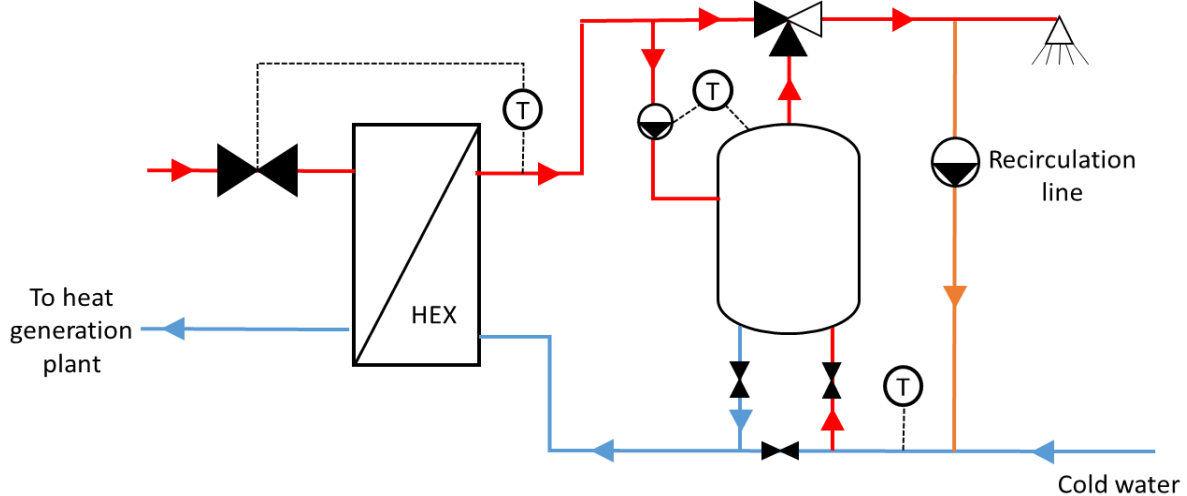


Figura 11 Subestación que suministra agua caliente sanitaria, configuración con depósito derivado [4]

Por último, al combinar todas estas diferentes medidas de rehabilitación, se pueden dar 36 casos posibles. A continuación, se analizan y comparan todas estas combinaciones.

#### 1.2.1. Impacto del tipo de emisores y del control del caudal secundario

Aquí se presenta la comparación de todas las combinaciones para una arquitectura HEX global, es decir, 18 casos. Figura 12 presenta la diferencia de temperatura primaria media de cada caso estudiado.

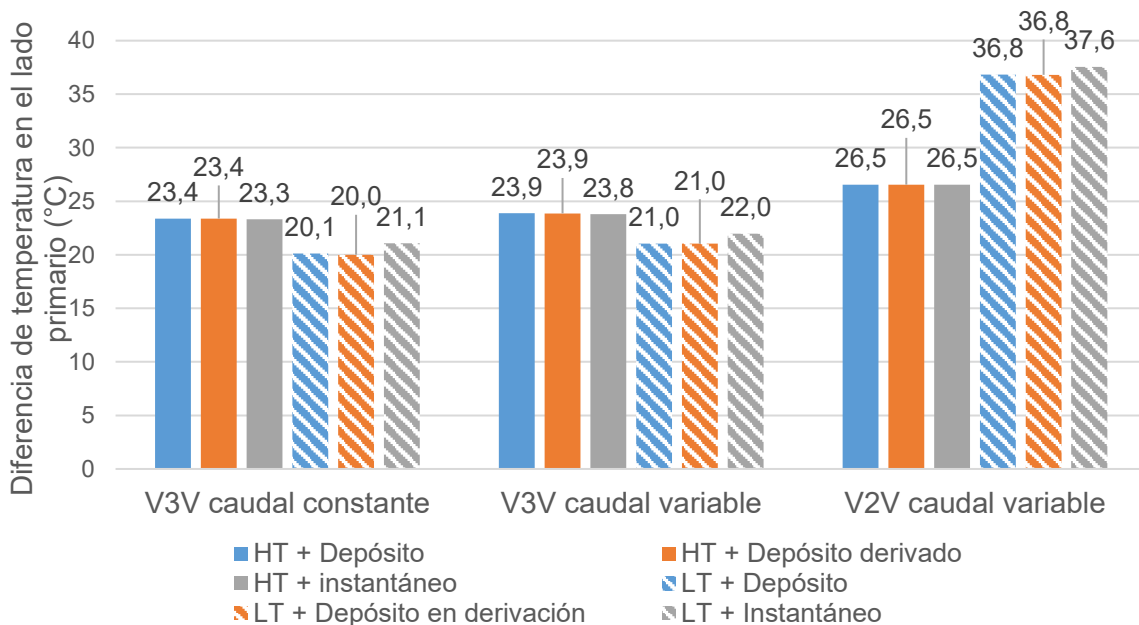


Figura 12 Comparación de las diferencias de temperatura primaria para todas las configuraciones hidráulicas en el caso de una subestación térmica global [4]

Según estos resultados, la estrategia de control que utiliza una bomba secundaria de caudal variable acoplada a un V2V alcanza un mejor rendimiento en comparación con



los otros dos tipos de control, especialmente cuando se utilizan radiadores de baja temperatura (LT). De hecho, el aumento de la diferencia de temperatura oscila entre 3,1 °C y 16 °C. En realidad, con el V3V y una bomba de caudal constante, el caudal suministrado por la bomba se ajusta para cubrir la demanda máxima de calefacción de espacios (SH). Por lo tanto, cuando la demanda dista mucho del máximo, el caudal másico requerido por los radiadores es considerablemente inferior al caudal de la bomba. En consecuencia, una gran parte del caudal se desvía a través del V3V (véase la figura 13) y se mezcla con el caudal enfriado por el radiador. Por ello, la temperatura de retorno secundario es bastante elevada y, por lo tanto, la temperatura de retorno primario no puede reducirse de forma significativa. Por el contrario, con una bomba de caudal variable y un V2V, el caudal se ajusta constantemente a la demanda térmica del radiador y, por lo tanto, la temperatura de retorno secundario es mucho más baja, al igual que la temperatura de retorno primario. Del mismo modo, el rendimiento de la bomba de caudal variable y el control V3V es inferior al del control V2V. Sin embargo, en este caso, el caudal suministrado por la bomba no siempre es igual al caudal máximo necesario. En consecuencia, en comparación con la bomba de caudal constante y el control V3V, se desvía un caudal ligeramente menor y, por tanto, la temperatura de retorno primario es más baja.

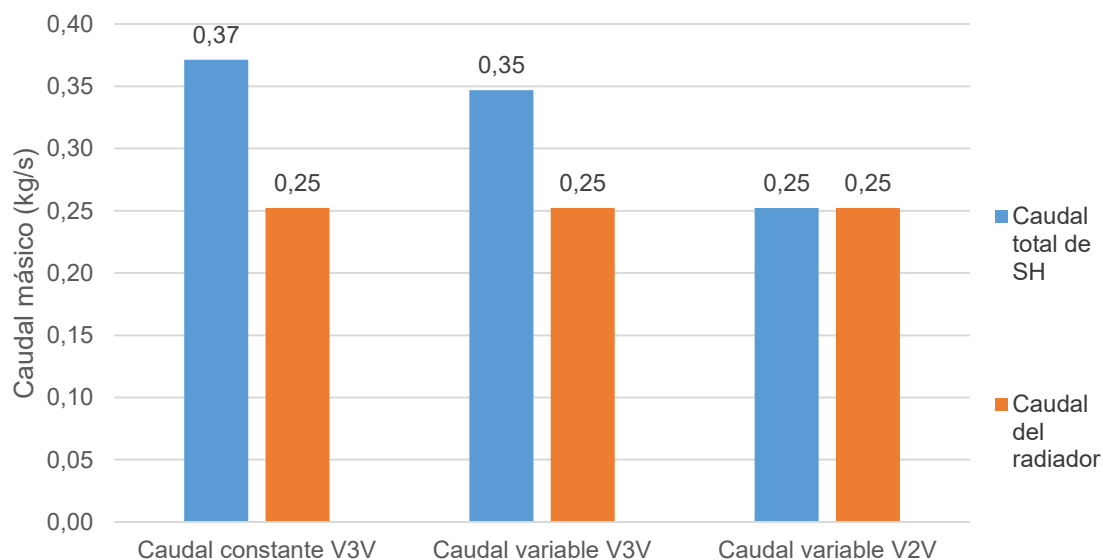


Figura13 : Comparación entre el caudal másico que pasa por los radiadores y por la entrada de la válvula [4]

La elección del tipo de radiador puede tener un impacto importante en el rendimiento. Se pueden distinguir dos casos. El primer caso es cuando se emplean sistemas V3V (ya sea con bomba de caudal constante o de caudal variable). Aunque pueda parecer sorprendente, la temperatura media de retorno primario es más alta con los radiadores de baja temperatura (LT) que con los de alta temperatura (HT). Esto se explica por las respectivas leyes de agua de los radiadores. De hecho, la ley de agua del radiador HT varía entre 80 °C y 60 °C, mientras que la del radiador LT se mantiene constante a 60 °C independientemente de la temperatura exterior, debido a la restricción de temperatura en el suministro de agua caliente sanitaria (Figura14 ).

La elección del tipo de radiador puede tener un impacto importante en el rendimiento. Se pueden distinguir dos casos. El primer caso es cuando se emplean sistemas V3V (ya sea con bomba de caudal constante o de caudal variable). En este caso, el caudal total utilizado para la calefacción de espacios es ligeramente inferior con los radiadores LT que con los radiadores HT. Además, la temperatura de alimentación



secundaria difiere ligeramente: cuando se utilizan radiadores de alta temperatura (HT), la temperatura varía entre 80 °C y 60 °C (en función de la temperatura exterior), mientras que, en nuestro estudio de caso, cuando se emplean radiadores de baja temperatura (LT), la temperatura se mantiene constante en 60 °C debido a la restricción en la temperatura de alimentación para el agua caliente sanitaria (ACS) (véaseFigura14Hiba! A hivatkozási forrás nem található. ).

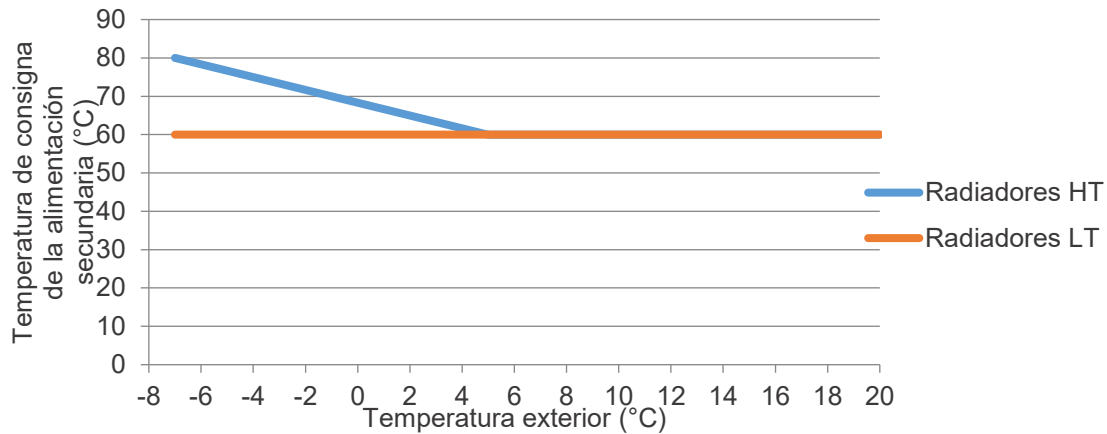


Figura14 Control de reajuste de la temperatura de suministro secundaria [4]

Además, la diferencia de temperatura nominal en los radiadores LT es de 10 °C, frente a los 20 °C de los radiadores HT. En consecuencia, como se puede observar enFigura15 , la diferencia de temperatura entre entrada y salida en los radiadores LT es mucho menor que en los radiadores HT. Por lo tanto, cuando la temperatura exterior es superior a 6 °C, la temperatura de retorno en el circuito secundario es más baja con un radiador HT que con un radiador LT.

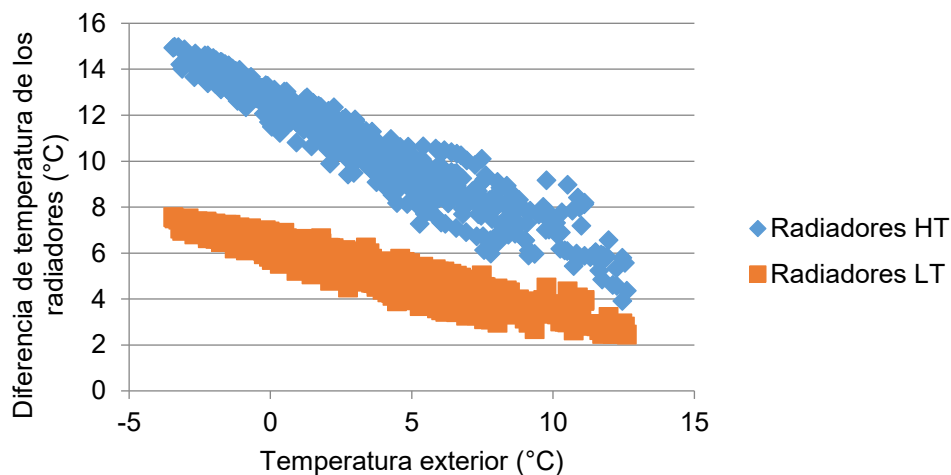


Figura15 Evolución de la diferencia de temperatura del radiador en función de la temperatura exterior [4]

Por lo tanto, para una misma temperatura de impulsión y el mismo intercambio de calor, la temperatura de retorno es más alta cuando se utilizan radiadores de baja temperatura.

El segundo caso se refiere al uso de una estrategia de control V2V, en la que no hay caudal de derivación. Como resultado, la temperatura de retorno en el circuito secundario es más baja con los radiadores de baja temperatura que con los de alta temperatura.



El siguiente análisis aborda la comparación entre todas las combinaciones para una subestación de arquitectura paralela. La Figura 16 presenta las diferencias de temperatura primarias medias de cada caso estudiado.

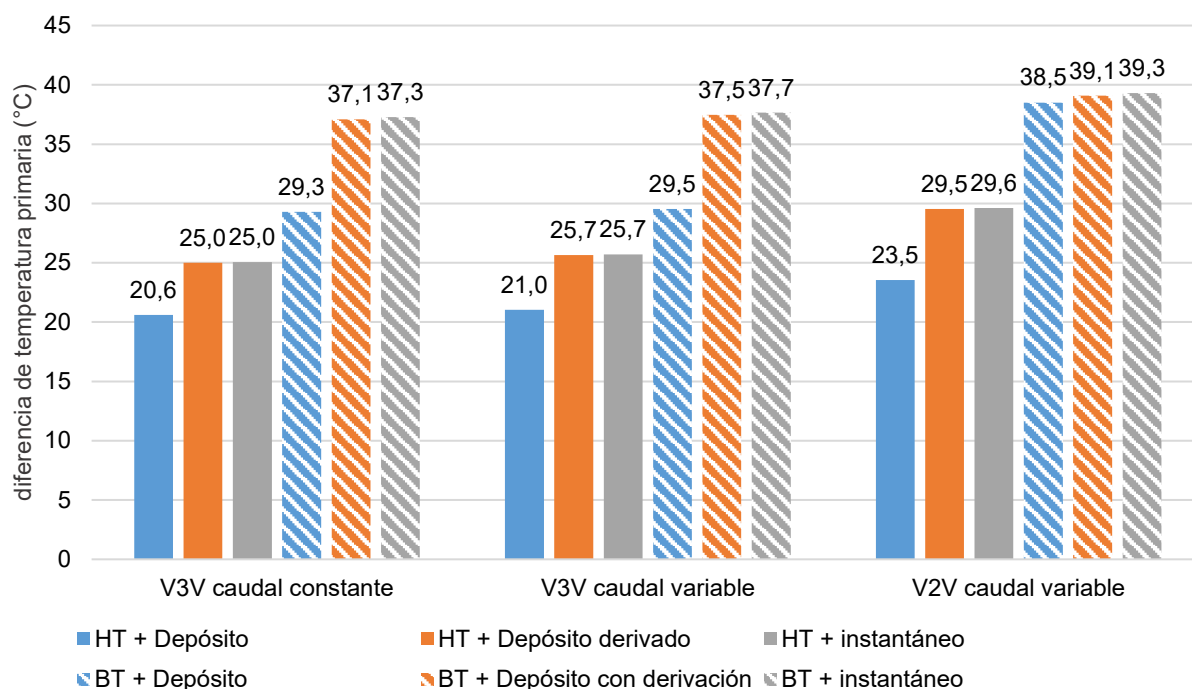


Figura 16 Comparación de las diferencias de temperatura primaria para todas las configuraciones hidráulicas en el caso de una subestación en paralelo [4]

En cuanto al impacto de la estrategia de control, el análisis es el mismo que el explicado en la parte anterior. La elección de una estrategia de control con una bomba de caudal variable y un V2V permite obtener los mejores rendimientos; las mejoras con respecto a las otras dos soluciones oscilan entre 2 °C y 9,2 °C.

Por otra parte, el uso de radiadores de baja temperatura (LT) permite aumentar la « $\Delta T$ » en el lado primario. De hecho, un radiador de baja temperatura (LT) implica una temperatura de retorno y de impulsión, así como una diferencia de temperatura en el lado secundario, menores que las de un radiador de alta temperatura (HT). Esto da lugar a un caudal mayor en el lado secundario, tal y como se muestra en Figura 17 (para la misma potencia intercambiada). En consecuencia, para las mismas características del HEX, el caudal primario es menor cuando se utilizan radiadores LT. Por lo tanto, la temperatura de retorno primaria es menor para una temperatura de impulsión primaria similar.

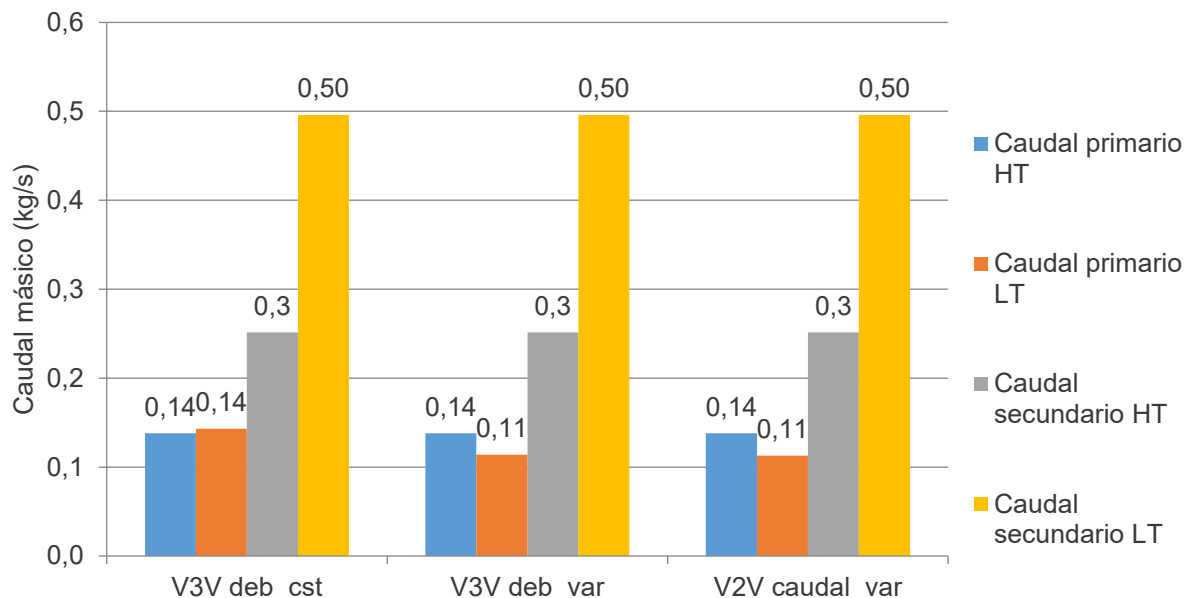


Figura17 Comparación de los caudales máxicos primario y secundario entre todos los controles de radiadores en el caso de una subestación en paralelo [4]

El siguiente punto es la comparación entre las dos arquitecturas de subestación. Independientemente del tipo de radiadores que se utilicen, la arquitectura en paralelo es mucho mejor. De hecho, en este caso, el suministro de agua caliente sanitaria (ACS) y de calefacción (SH) depende de dos HEX independientes. Por consiguiente, para proporcionar calefacción ambiental, la temperatura de impulsión secundaria puede ser inferior a 60 °C. Como resultado, el caudal secundario puede ser mayor que el caudal primario, lo que hace que la temperatura de retorno primario sea menor.

#### 1.2.2. Repercusión de la configuración hidráulica del agua caliente sanitaria

Dependiendo de los edificios, el impacto de la arquitectura de suministro de agua caliente sanitaria varía, ya que el peso del consumo de agua caliente sanitaria en el consumo total no es el mismo. De hecho, el agua caliente sanitaria representa el 10 % y el 30 % del consumo global, respectivamente, en edificios antiguos y edificios residenciales renovados. En cuanto a los edificios antiguos, si se utiliza un HEX global, la elección de la arquitectura de suministro de agua caliente sanitaria no tiene ningún impacto en el rendimiento global. Además, si se utiliza una subestación en paralelo, la arquitectura con depósito de almacenamiento presenta el peor rendimiento. De hecho, con el depósito, la entrada del HEX en el lado secundario no está conectada directamente al suministro de agua fría, a diferencia de las otras dos arquitecturas. Por lo tanto, la temperatura de retorno del lado secundario se sitúa cerca de los 55 °C, es decir, el límite inferior de la temperatura del depósito, mientras que en las demás configuraciones la temperatura suele estar cercana a la de la red de agua fría (véase Figura18 ).

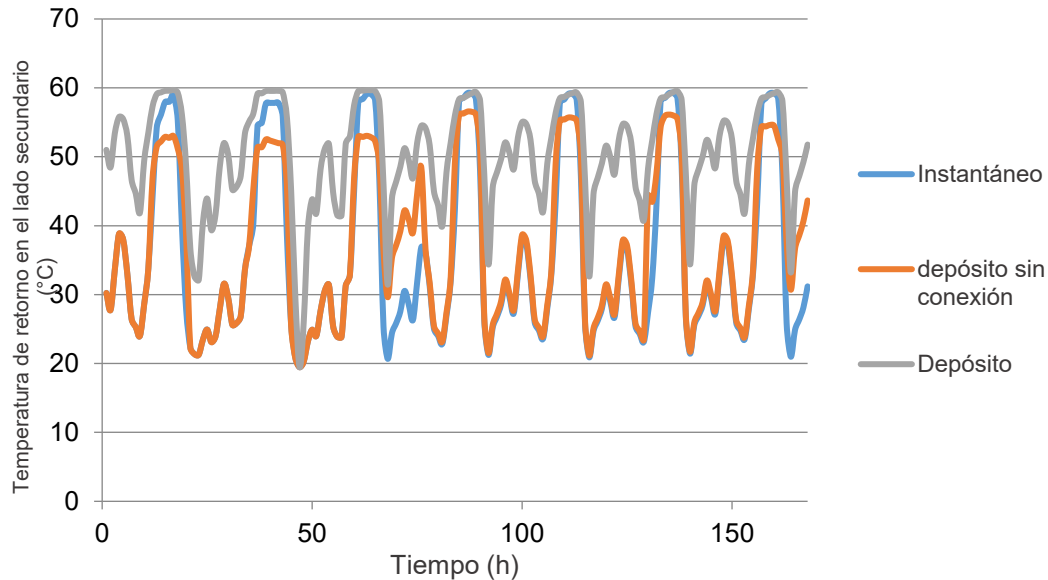


Figura18 Evolución temporal de la temperatura de retorno para todas las arquitecturas de suministro de agua caliente sanitaria [4]

En cuanto a los edificios renovados, el análisis sigue siendo el mismo. Sin embargo, la mejora en la temperatura global de retorno de la red primaria debida a una arquitectura de suministro de agua caliente sanitaria más adecuada es mayor, ya que el consumo de agua caliente sanitaria representa una mayor proporción del consumo total.

### 1.2.3. Conclusión sobre la mejor configuración hidráulica

Para concluir, todos los resultados se resumen en un árbol de decisión (véase Figura19 ;Figura20 ; yFigura21 ). Este se divide en cuatro niveles que representan los cuatro tipos de medidas de rehabilitación. En cada nivel hay varias opciones posibles. Las mejores opciones se representan con una línea verde, mientras que las peores se representan con una línea roja. Las mejores opciones son aquellas que permiten reducir la temperatura de retorno de la subestación en el lado primario. Las flechas punteadas negras representan las mejoras (en la temperatura de retorno) que se pueden obtener al cambiar de una combinación a otra.

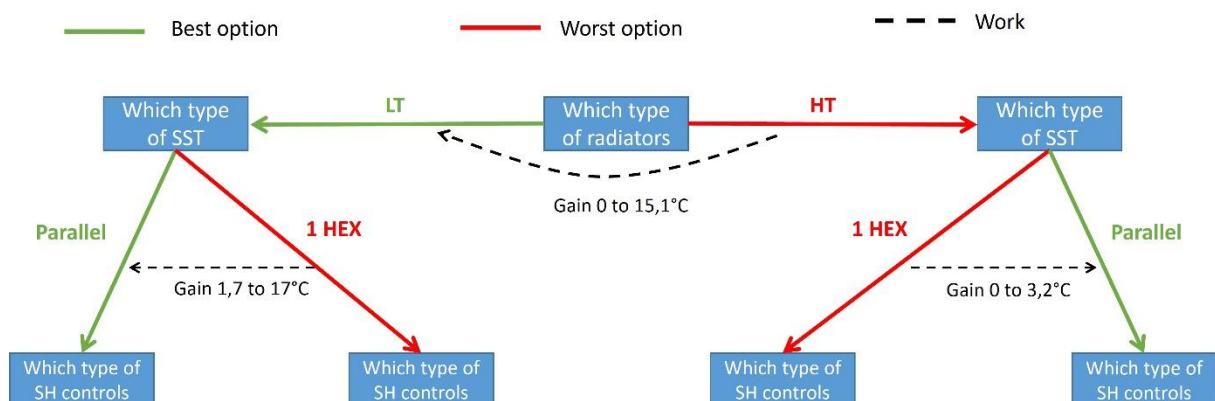


Figura19 Árbol de decisión que resume los resultados numéricos, parte 1 [4]

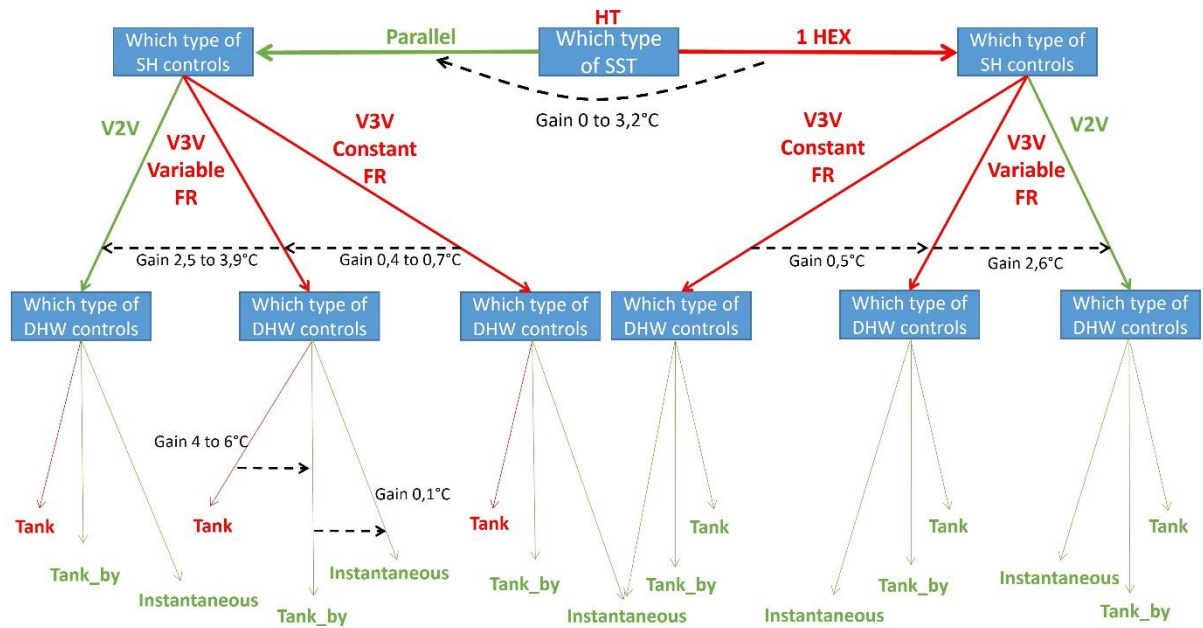


Figura20 Árbol de decisión que resume los resultados numéricos en el caso de los radiadores de alta temperatura [4]

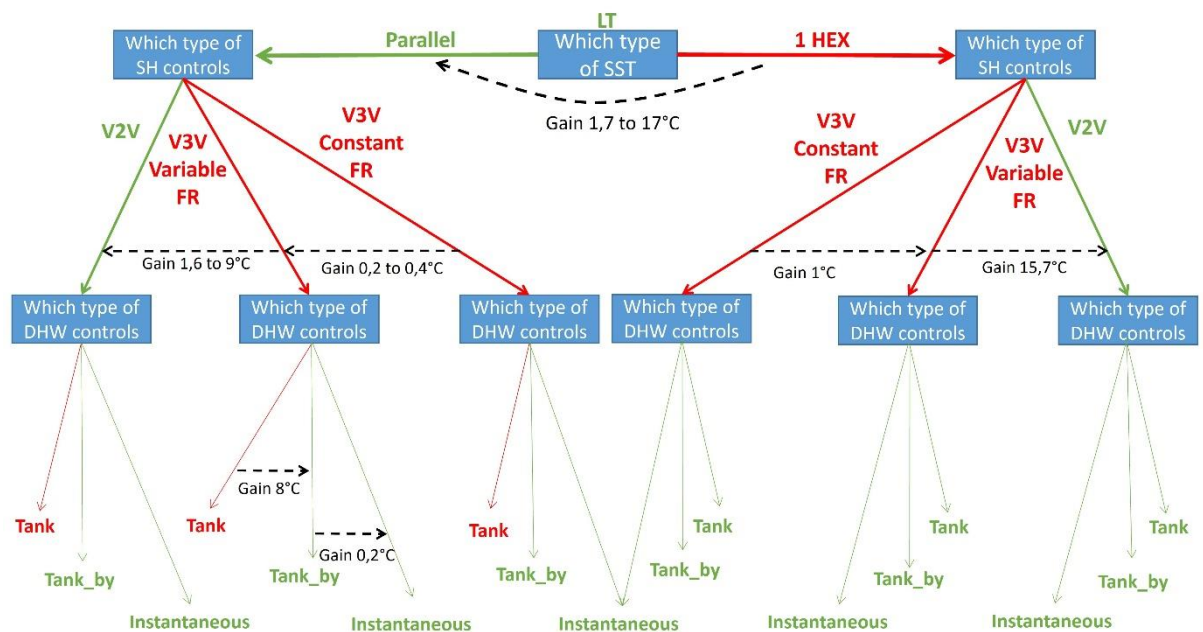


Figura21 Árbol de decisión que resume los resultados numéricos en el caso de los radiadores de baja temperatura [4]

#### 1.2.4. Modelos de tarifas de calefacción

A partir de los resultados, la disminución de la temperatura de retorno gracias a las medidas de rehabilitación se ha traducido en ahorros energéticos anuales para la red de calefacción urbana. Esto, junto con el coste de las medidas de rehabilitación, nos ha permitido evaluar los plazos de amortización de una medida (o combinación de medidas) y el ahorro económico derivado de la menor demanda de gas que dicha medida permite. En la Figura22, se muestra el plazo de amortización de la mejor combinación de medidas para una, dos, tres y cuatro medidas. Tal y como indican los resultados, una situación con precios del gas natural en niveles altos da lugar a un plazo de amortización significativamente menor para las medidas, que oscila entre 0,9



y 1,3 años, mientras que los precios del gas a niveles más bajos dan lugar a plazos de amortización de entre 6 y 9 años aproximadamente. Suponiendo que la reducción de costes se transfiera íntegramente al cliente, todas estas combinaciones de medidas podrían considerarse buenas oportunidades de inversión.

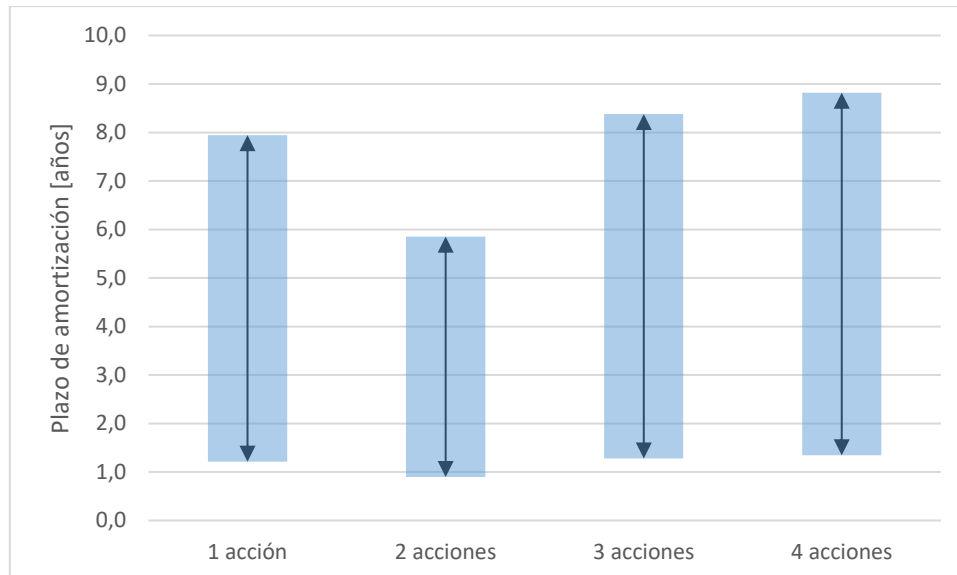


Figura22 : Plazo de amortización de la mejor combinación de medidas para un precio del gas bajo (20 EUR/MWh) y alto (130 EUR/MWh). Las medidas representadas son 2V (para 1 medida), 2V+LT (para 2 medidas), 2V+LT+paralelo (para 3 medidas) y 2V+LT+paralelo+instantáneo (para 4 medidas) [4]

La cuestión que se plantea es cómo ayudar a los clientes de calefacción a modernizar los sistemas de calefacción de sus edificios para mejorar el rendimiento de la red de calefacción urbana. De hecho, los operadores de la red de calefacción y refrigeración urbana no tienen el control ni los conocimientos necesarios sobre la parte hidráulica de los edificios. Una medida de modernización del sistema del edificio no modificará el consumo de los clientes, pero contribuirá a aumentar el uso de energías renovables en toda la red. Por lo tanto, los clientes solo tienen un interés indirecto en actualizar sus sistemas.

Se han estudiado las tarifas de calefacción incentivadoras como solución para animar a los propietarios de edificios a modernizar sus sistemas de baja eficiencia. Por lo general, la tarifa se divide en dos componentes: la cuota de abono, que corresponde a una tarifa fija en función de la potencia máxima de la subestación, y una tarifa variable correspondiente al coste del consumo energético.

A partir de una revisión bibliográfica, se han elaborado algunas recomendaciones. Un buen modelo de precios de la calefacción urbana desde la perspectiva del cliente se describió como fácil de entender y «justo». Además, es esencial entablar un diálogo estrecho con los clientes para explicar cómo las tarifas incentivadoras pueden generar una solución beneficiosa para ambas partes, tanto para el cliente como para la empresa energética.

Los factores más importantes a tener en cuenta para las tarifas motivacionales, basados en las prácticas de tarifas motivacionales de mercados de calor maduros identificadas en la bibliografía, se resumen en la Tabla 1.

Tabla 1. Resumen de las tarifas incentivadoras en uso y los componentes que se miden [4]

| Tarifa en uso      | Componente medido   |
|--------------------|---------------------|
| Caudal/Bonus-Malus | m <sup>3</sup> /MWh |



|              |                                                                                                                                |
|--------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Bonus-malus  | La temperatura de retorno puede incluir una medición independiente del rendimiento de refrigeración a través de la subestación |
| Descuento    | Clientes que utilizan el calor de la línea de retorno                                                                          |
| Compensación | Tarifa de alimentación por el suministro de calor residual                                                                     |

Los modelos de tarifas térmicas propuestos se basan en la estructura tarifaria clásica e introducen componentes adicionales, como la fijación de precios basada en el consumo de agua por unidad de energía, una tarifa incentivadora para reducir las temperaturas de retorno primarias y una recompensa por utilizar el calor residual en el circuito secundario. Deben mantenerse los incentivos existentes en los mercados maduros, como las tarifas basadas en el caudal y las tasas relacionadas con la capacidad instalada, mientras que deben incorporarse a los futuros modelos de tarificación nuevos factores, como la reducción de las temperaturas en las subestaciones y el aprovechamiento del calor residual del circuito secundario. Una vez que el lado secundario utilice el equipo adecuado, el siguiente paso es centrarse en la detección de averías para garantizar el correcto funcionamiento del DHC.

### 1.3. Detección de averías

Detectar la causa de los fallos de funcionamiento en una red de calefacción supone un gran reto para los operadores y gestores de estas infraestructuras. Las redes de calefacción, al ser sistemas térmicos complejos y extensos, están sujetas a numerosas incertidumbres relacionadas con las condiciones de funcionamiento, la variabilidad de las cargas térmicas, el estado de los equipos y la interacción entre las subestaciones y la red principal. La literatura científica destaca que estos sistemas se caracterizan por un fuerte acoplamiento hidráulico y térmico, lo que dificulta el análisis independiente de cada componente[3] y[6] .

#### 1.3.1. Retos en la detección de averías

Las perturbaciones observadas, como caídas de temperatura, pérdidas de presión o un consumo excesivo de energía, pueden deberse a una multitud de causas: fugas, válvulas atascadas, un mal equilibrado hidráulico, sensores defectuosos o incluso errores de control. Sin embargo, estos síntomas pueden ser similares independientemente de la causa real, lo que hace que la identificación precisa del origen de la avería resulte especialmente compleja. Además, la ausencia o la baja resolución de los datos en tiempo real en algunas redes más antiguas sigue limitando las capacidades de diagnóstico automatizado. Por otra parte, cada red de calefacción tiene una configuración específica, con una amplia variedad de equipos, subestaciones, perfiles de consumo y tecnologías utilizadas. Esta heterogeneidad dificulta la estandarización de los enfoques de detección de fallos y limita su transferibilidad de una red a otra[7] .

Por lo tanto, se está haciendo necesario utilizar enfoques híbridos que combinen la modelización física, el análisis de datos y las técnicas de aprendizaje automático para mejorar la localización y la comprensión de las anomalías. Sin embargo, incluso estos enfoques innovadores siguen dependiendo de la calidad de los datos disponibles y de un conocimiento detallado de la red objeto de estudio[8] .



De hecho, solo unos pocos datos son obligatorios por ley y suelen estar disponibles a nivel de subestación (véase Figura 23):

- Temperaturas de alimentación y retorno primarias
- Temperatura de suministro secundaria
- Potencia intercambiada en la subestación
- Caudal primario

Sin embargo, para comprender mejor el comportamiento de la subestación, son muy necesarios otros datos, como la temperatura de retorno secundaria y el caudal másico secundario. Además, la temperatura de retorno en cada emisor podría resultar muy útil.

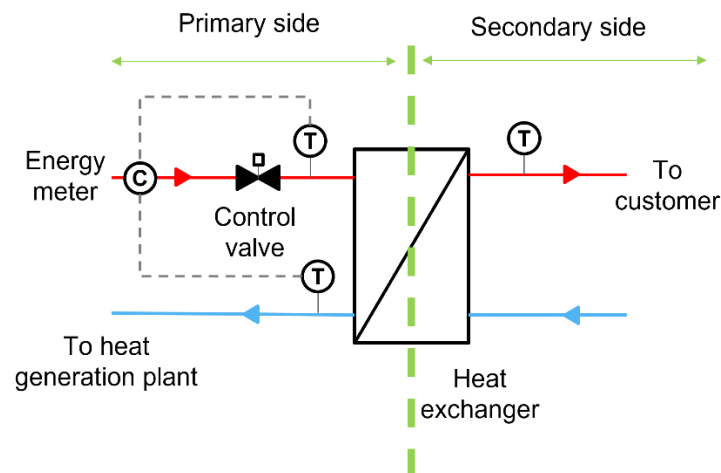


Figura 23 : Esquema de la subestación

### 1.3.2. ¿Qué es la detección de averías?

Ya se trate de las herramientas utilizadas por los operadores o de las propuestas en la bibliografía especializada, se observan dos tendencias principales: la detección de anomalías y la detección de fallos. La detección de anomalías tiene como objetivo encontrar patrones en los datos que no se ajusten a una noción previamente definida de «comportamiento esperado» y «normal». Este tipo de detección permite identificar valores atípicos y desviaciones en los datos medidos, así como comportamientos atípicos y patrones anormales. Sin embargo, no es posible determinar directamente el origen de la anomalía y, por lo tanto, corregir el sistema. Además, para llevar a cabo la detección de anomalías, es necesario definir un comportamiento normal, lo cual puede resultar complejo. La segunda tendencia se refiere a la detección efectiva de fallos, cuyo objetivo es identificar los cambios que se producen en el sistema y que impiden que este siga funcionando correctamente. Este tipo de detección permite encontrar la causa del fallo y, por lo tanto, corregirlo. Sin embargo, es más difícil de llevar a cabo.

La detección de fallos, ya se trate de una anomalía o de un fallo, se lleva a cabo mediante cinco métodos[8]:

- Visualización y análisis manual
- Umbrales
- Regresión
- Clasificación
- Agrupación



Cada método puede utilizarse por separado o en combinación. Estos cinco métodos se detallan y se ilustran mediante herramientas utilizadas para la detección de anomalías.

### 1.3.3. Detección de anomalías

#### 1.3.3.1. Visualización y análisis manual

La visualización y el análisis manual son los métodos más sencillos y antiguos para detectar anomalías. El análisis manual consiste en que expertos revisen las mediciones de las subestaciones o los indicadores derivados, a menudo con el apoyo de herramientas de visualización. Este enfoque ofrece una gran flexibilidad gracias al criterio de los expertos, pero es intrínsecamente subjetivo. En la práctica, el análisis manual puede utilizarse para detectar anomalías y fallos, o para llevar a cabo una investigación más exhaustiva de problemas que ya hayan sido identificados mediante otros métodos.

Por ejemplo, el método propuesto por[1] pretende comparar el comportamiento de una subestación de referencia (que se considera que funciona sin problemas importantes) con el de otras. En se propone comparar la evolución de la potencia demandada en función de la temperatura exterior y el caudal medio horario a lo largo de la semana según las cuatro estaciones del año (véaseFigura24 ).

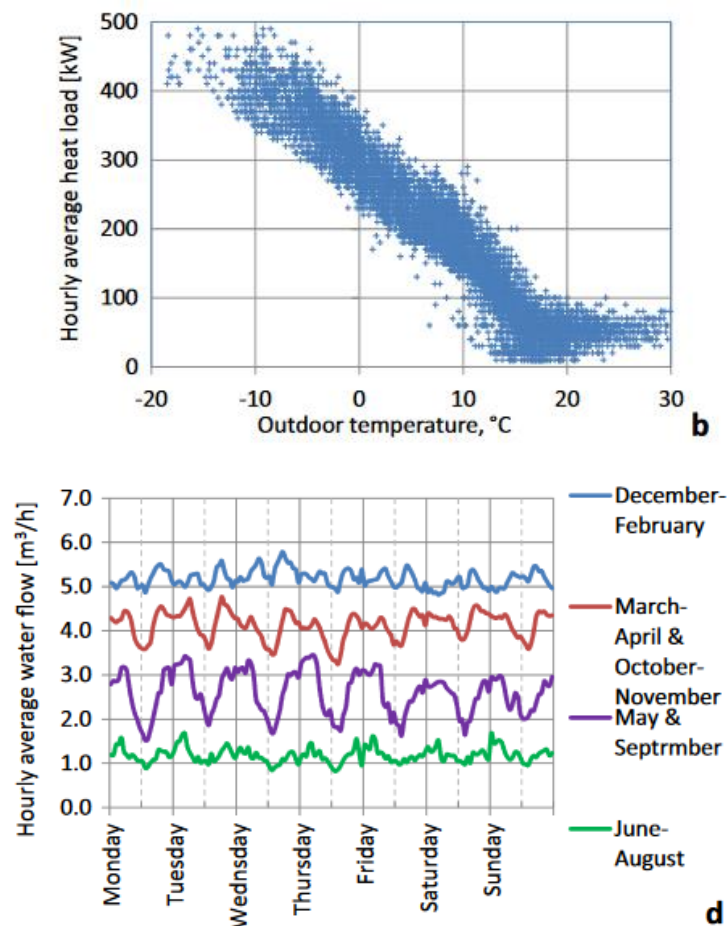


Figura24 Comportamiento correcto de una subestación [1]

Se supone que la carga térmica media por hora es lineal en función de la temperatura exterior (termosensibilidad de la calefacción del espacio) y se mantiene constante con respecto a la temperatura exterior tan pronto como esta es lo suficientemente alta



como para que ya no sea necesaria la calefacción del espacio. Se supone que el caudal medio de agua por hora es estable y mayor en las estaciones frías.

La figuraFigura25 ) muestra los mismos datos, pero correspondientes a una subestación defectuosa. La carga térmica media por hora es menos lineal de lo esperado y el caudal de agua es inestable, lo que indica la existencia de un problema.

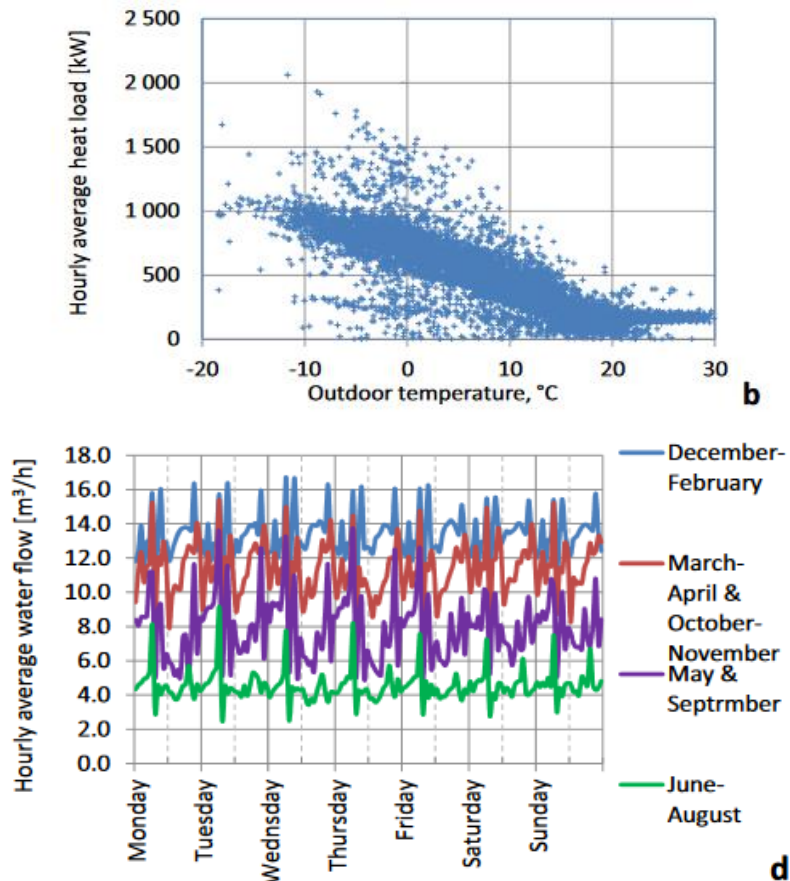


Figura25 Comportamiento anómalo de una subestación [1]

#### 1.3.3.2. Umbrales

Los métodos basados en umbrales determinan el estado operativo de un sistema de calefacción urbana comparando las mediciones con límites predefinidos. Estos umbrales pueden ser establecidos manualmente por expertos basándose en supuestos sobre tasas de error aceptables (por ejemplo, un margen de error del 5 %), o pueden determinarse mediante análisis estadístico, como por ejemplo utilizando tres desviaciones estándar respecto a la media.

Por ejemplo, el indicador creado por[9] compara la apertura de la válvula de control medida in situ con la calculada por un modelo de aprendizaje automático sin fallos de funcionamiento (véaseFigura26 ).

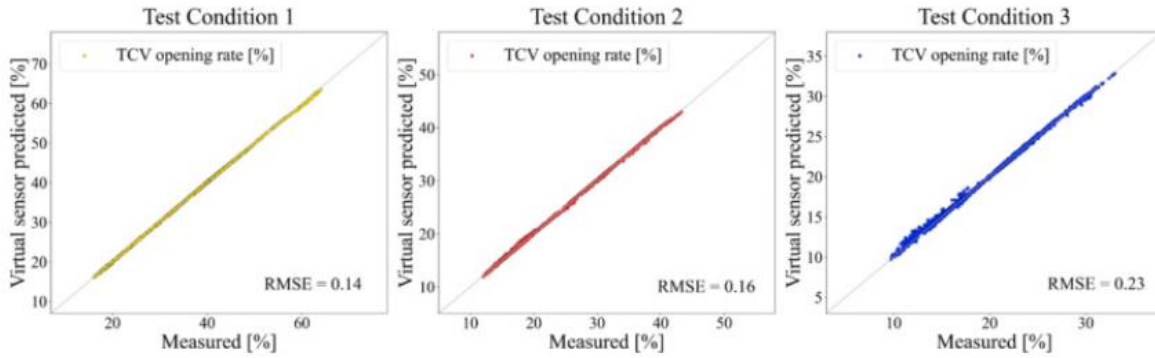


Figura26 Correlación entre la apertura de la válvula medida y la simulada [9]

A continuación, se calcula el residuo normalizado entre los valores simulados y los medidos. Se detecta una anomalía cuando el residuo es superior al 3 %, lo que corresponde a la tasa de falsas alarmas (véase la figura 27). Este método se utiliza para detectar incrustaciones en un intercambiador de calor de una subestación.

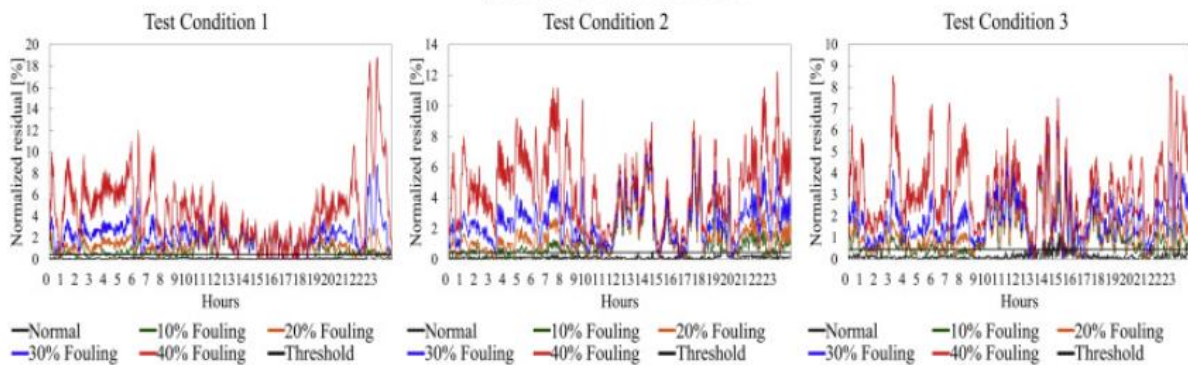


Figura27 Residuo normalizado en función del tiempo y de la tasa de ensuciamiento [9]

Según los resultados de[9] , este indicador basado en un umbral es capaz de detectar la acumulación de sedimentos, pero no se ha probado con otros tipos de averías.

### 1.3.3.3. Regresión

La regresión es un método utilizado para estimar la relación entre una o más variables independientes y una variable dependiente dentro de un conjunto de datos. Al tomar las variables independientes como entrada, un modelo de regresión genera una predicción de valor real para las variables dependientes. En el contexto de los sistemas de calefacción urbana (DHS), la regresión se emplea habitualmente para pronosticar variables específicas y para evaluar la discrepancia entre los valores predichos y los valores reales medidos.

Por ejemplo, el indicador definido por[10] tiene como objetivo detectar la acumulación de sedimentos en un intercambiador de calor de una subestación. Para un intercambiador de calor, existe una regresión lineal entre la potencia intercambiada  $\dot{Q}$  (W) y el coeficiente global de transferencia de calor  $UA$  (W/K):

$$UA = \frac{1}{LMTD} * \phi = a * \phi$$

Donde  $LMTD$  es la diferencia de temperatura media logarítmica en K. La incrustación en un intercambiador de calor modifica el  $UA$  y, por lo tanto, la pendiente  $a$  de la regresión lineal (véase Figura28 ).

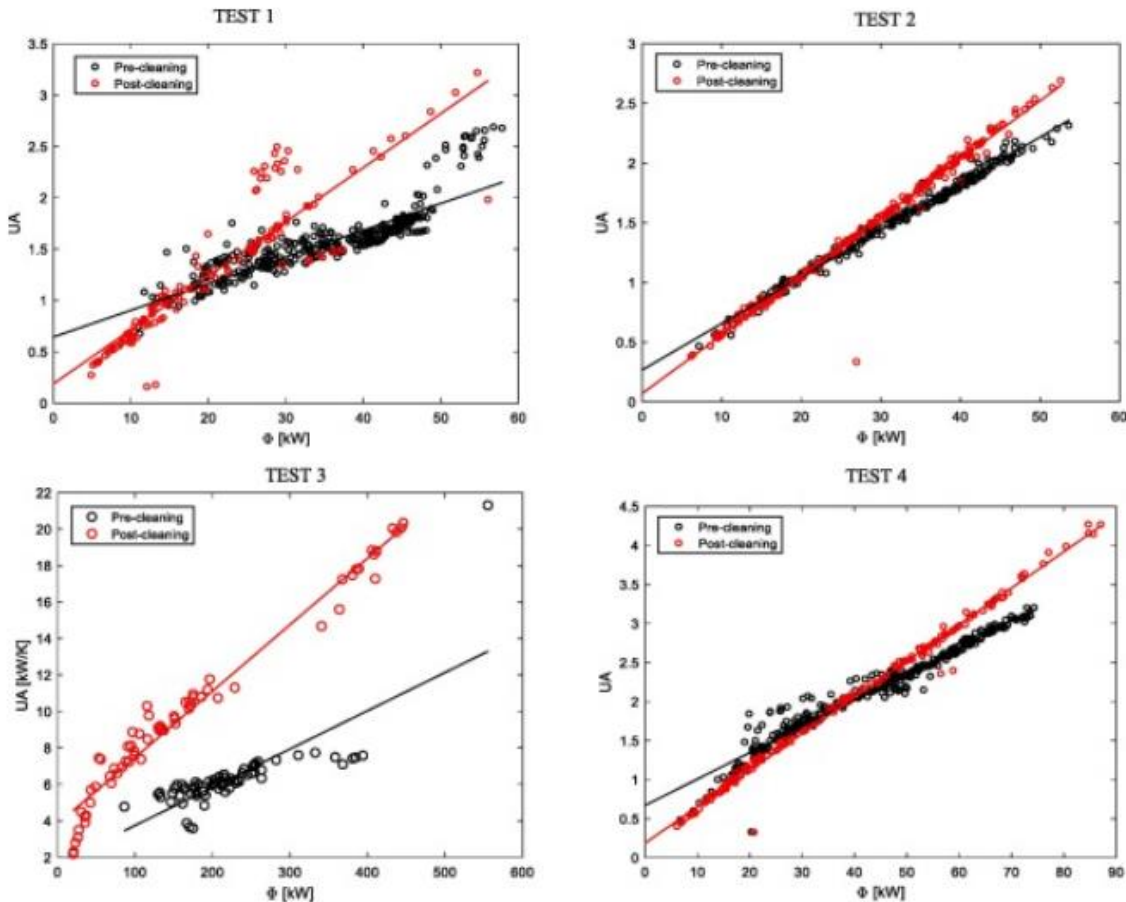


Figura28 : Regresión lineal entre la transferencia de calor global y la potencia intercambiada en un intercambiador de calor con y sin incrustaciones [10]

Con el fin de mejorar el indicador, se definen tres umbrales en la variación de la pendiente para estimar el nivel de incrustaciones:

- Si la variación de la pendiente es inferior al 15 %, se considera que el intercambiador de calor está limpio
- Si la variación de la pendiente está entre el 15 % y el 25 %, se considera que el intercambiador de calor está parcialmente ensuciado
- Si la variación de la pendiente es superior al 25 %, se considera que el intercambiador de calor está ensuciado.

#### 1.3.3.4. Clasificación

La clasificación es una tarea de aprendizaje automático que consiste en asignar una instancia a una de varias categorías predefinidas. Aunque existen diversas técnicas que pueden servir para este fin, esta categoría se refiere específicamente a los métodos que utilizan algoritmos de clasificación para identificar directamente si se ha producido un fallo y, en caso afirmativo, de qué tipo. A diferencia de los modelos de regresión, que producen resultados numéricos continuos, los clasificadores asignan las entradas a clases discretas, representadas normalmente por etiquetas enteras. A diferencia del agrupamiento por clústeres, que opera con datos sin etiquetar, la clasificación se basa en ejemplos etiquetados de fallos conocidos para el



entrenamiento. Entre los algoritmos de clasificación más comunes se encuentran las redes neuronales, los árboles de decisión y las máquinas de vectores de soporte. Por ejemplo, Zimmerman et al.[11] utilizaron una red bayesiana para describir de forma probabilística las relaciones de causa y efecto de magnitudes conocidas con el fin de detectar fallos de forma automática. Utilizaron este método para clasificar la evolución temporal de la presión y el caudal másico en tuberías. Según esta evolución, el algoritmo clasifica el patrón entre un comportamiento normal, un comportamiento anómalo debido a una fuga (véaseFigura29 ) o un fallo del sensor (véaseFigura30 ).

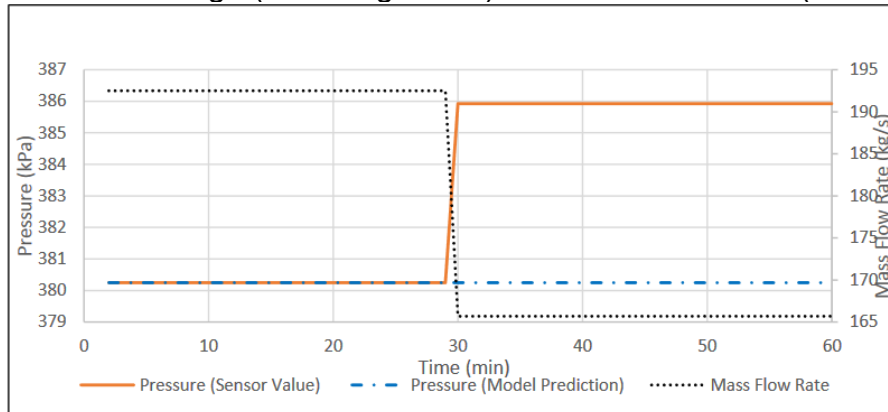


Figura29 Evolución a lo largo del tiempo de la presión en una tubería con y sin fuga [11]

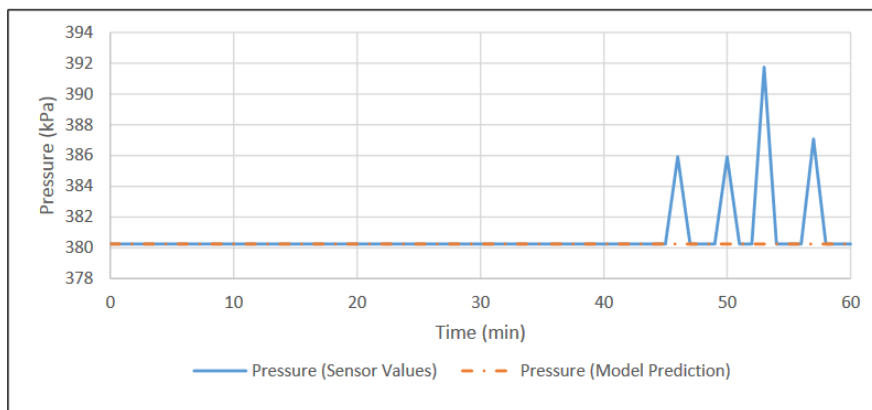


Figura30 Evolución a lo largo del tiempo de la presión en una tubería con y sin fallo del sensor [11]

En este momento, este método permite detectar fallos evidentes y sus causas, y parece prometedor.

#### 1.3.3.5. Agrupación por clústeres

Al igual que la clasificación, la agrupación por clústeres también consiste en asignar elementos a grupos, o clústeres, pero, a diferencia de la clasificación, no se basa en datos etiquetados. En su lugar, los algoritmos de agrupación por clústeres agrupan los elementos en función de su similitud, garantizando que los elementos de un mismo clúster sean más parecidos entre sí que los de clústeres diferentes. Este enfoque no supervisado se utiliza a menudo para categorizar las subestaciones de calefacción urbana (DHS) en función de indicadores de rendimiento o patrones de consumo. Una vez formados los clústeres, se pueden detectar los valores atípicos o los grupos marginales y examinarlos con más detalle. Entre los algoritmos de agrupación más comunes se encuentran k-means, k-shape y k-nearest neighbors.

Por ejemplo, según[12] , el análisis de agrupamiento permite identificar los patrones de funcionamiento estacionales y diarios. Se identificaron diferentes patrones en función de distintas estrategias de control, tales como (véaseFigura31 ):



- Una relación entre la diferencia de temperatura primaria y el intercambio de calor
- Una relación entre el caudal másico secundario y el calor intercambiado
- Una relación entre el caudal másico secundario y la diferencia de presión en el lado secundario
- Una relación entre el calor intercambiado en los lados secundario y primario

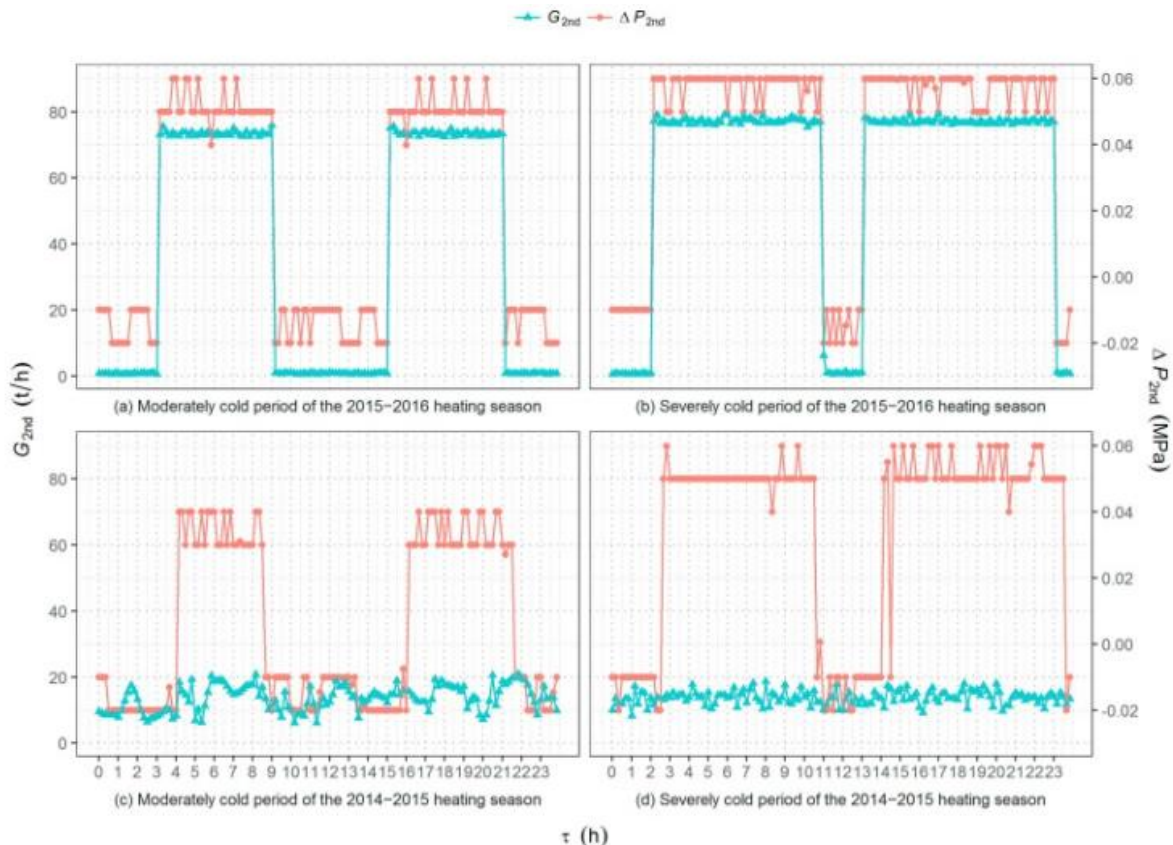


Figura31 Definición de patrón normal y grupo [12]

Se detecta una anomalía cuando uno de los patrones no se corresponde con un grupo existente. En este punto, este método puede detectar anomalías evidentes y parece prometedor.

#### 1.3.4. Indicadores habituales utilizados por los operadores de redes de calefacción y refrigeración (DHC)

Dado que las averías pueden provocar un rendimiento insuficiente de las redes de calefacción y refrigeración centralizadas (DHC) o incomodidades para el cliente, los operadores de DHC ya han implementado métodos para detectar anomalías. Suelen utilizar métodos sencillos basados en la visualización de datos, la regresión y los umbrales. Comprueban los datos mensuales de facturación de los clientes para detectar un consumo excesivo, así como el índice de calidad basado en el rendimiento de la instalación, como el nivel de temperatura de retorno o el caudal másico de la subestación. En la bibliografía se proponen algunos indicadores sencillos, como el método del caudal excesivo y la firma térmica.

El método del caudal excesivo[13] permite, mediante mediciones de la caída de temperatura en el circuito primario y del consumo de cada SST, establecer un orden



de prioridad para la inspección de las subestaciones de la red basándose en el cálculo de un volumen de agua en exceso. De hecho, una subestación defectuosa presenta una caída de temperatura inferior a la esperada, lo que da lugar a un aumento del volumen de agua consumido. El volumen ideal de agua consumido por la SST se calcula a partir del consumo anual de calor de la SST y de una caída de temperatura de referencia. A continuación, se calcula el volumen real de agua consumido a partir del consumo anual de la subestación y de la caída de temperatura media, y luego se comparan los volúmenes de agua real e ideal para determinar el volumen excedente. Así, cuanto mayor sea el volumen excedente, más degradará la SST el rendimiento global de la red (véase Figura 32).

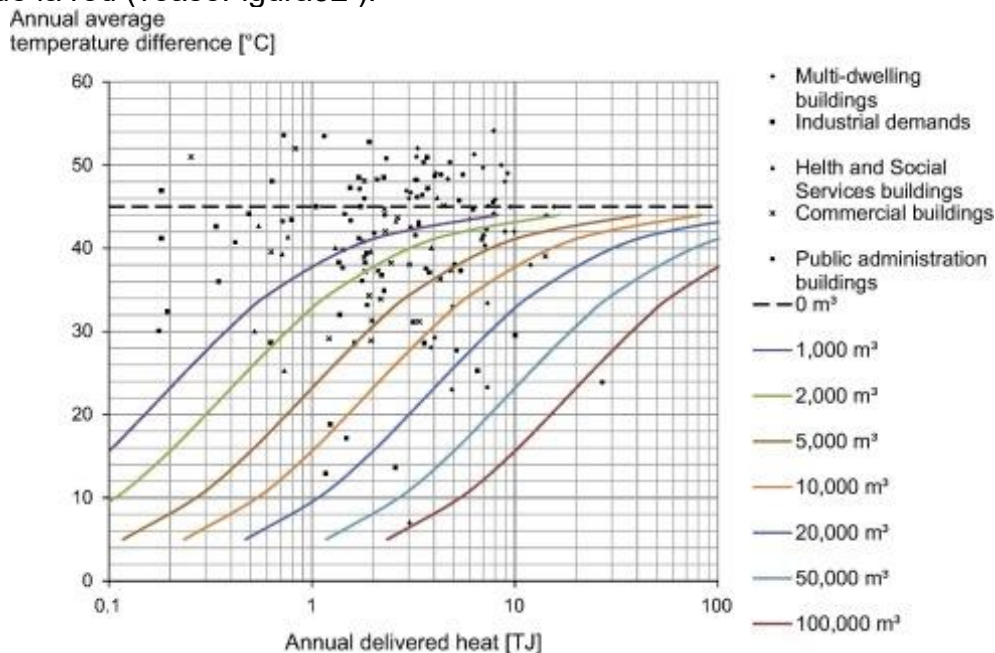


Figura 32 Indicador del método del caudal excedente [13]

Sin embargo, este método tiene limitaciones: solo permite un mantenimiento correctivo, ya que se necesitan datos recopilados durante un largo período de tiempo. Además, la determinación de una caída de temperatura de referencia complica la aplicación del método. De hecho, resulta difícil proponer la misma referencia para todos los SST, ya que tienen diferentes usos (calefacción a alta o baja temperatura, agua caliente sanitaria) y configuraciones que influyen en la caída de temperatura máxima que pueden alcanzar. Para determinar esta diferencia de temperatura de referencia, se puede recurrir a la simulación numérica. La diferencia de temperatura media medida, representativa del sistema, también es cuestionable.

Para lograr una detección más precisa y rápida de las averías, se pueden considerar indicadores de mantenimiento predictivo, lo cual puede realizarse mediante el método de la firma térmica [13]. A partir de la medición de la temperatura exterior y de la caída de temperatura en el circuito primario de cada SST, se supervisa diariamente el rendimiento del SST. Las mediciones se comparan con una referencia que corresponde al funcionamiento ideal del SST. A partir de esta referencia y de los datos históricos de los SST, se determina un umbral de intervención que corresponde a  $\pm 3$  veces la desviación estándar entre la referencia y los datos históricos (véase Figura 33).

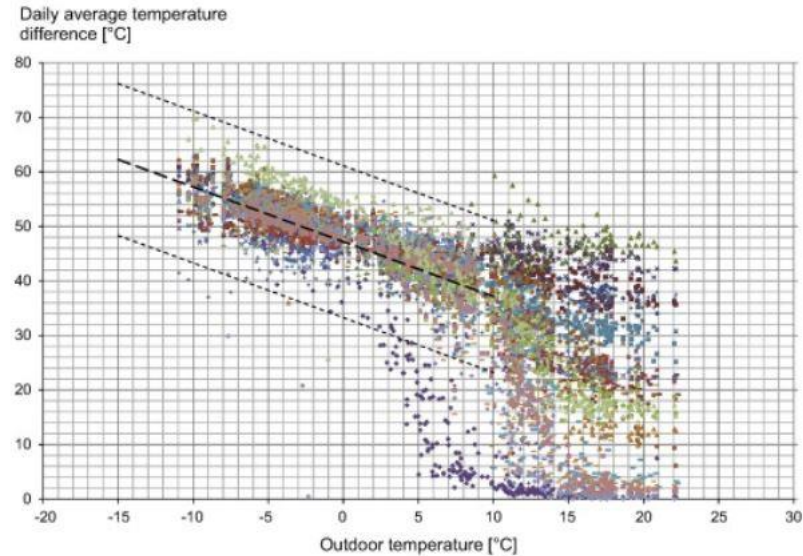


Figura33 Indicador de firma térmica [13]

Al igual que antes, este indicador requiere el establecimiento de una referencia que puede determinarse mediante la simulación de una red real. Además, este método no funciona con temperaturas exteriores elevadas, tal y como se muestra en Figura33 , ya que a partir del umbral de 10 °C, el consumo energético de las redes de calefacción urbana proviene principalmente del agua caliente sanitaria, que no es muy termosensible. Por lo tanto, este método solo puede utilizarse en sistemas de suministro de calor (SST) que proporcionan calor para calefacción. Este método ha sido mejorado por [14] y [15] utilizando la energía intercambiada o el «pinch» del intercambiador de calor en lugar de la diferencia de temperatura primaria. El uso de estos datos permite ampliar el método de la firma térmica a las subestaciones de agua caliente sanitaria (ACS). Para obtener un indicador más preciso, Manson et al. [14] propusieron además crear una regresión lineal por tramos y un umbral (véase Figura34 ).

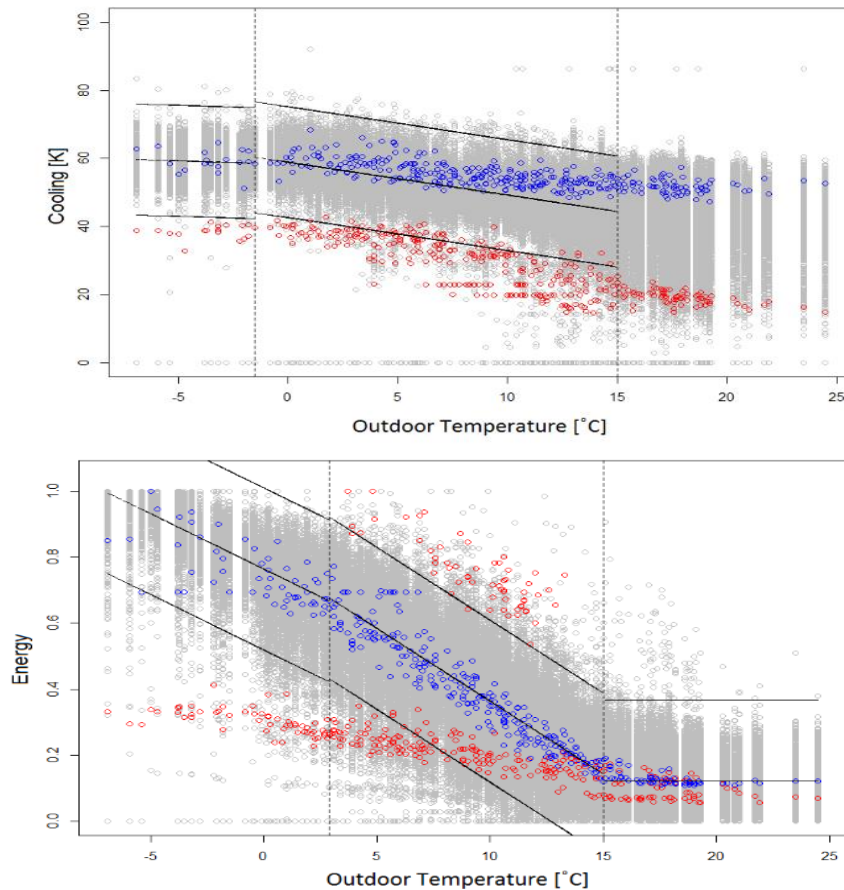


Figura34 Método de la firma térmica mejorado por[14] (en azul, un comportamiento normal; en rojo, un comportamiento anómalo)

El método de la firma térmica también ha sido mejorado por[16] y[17] mediante la incorporación de la agrupación en el método. De hecho,[16] y[17] propusieron realizar una agrupación de los patrones de carga térmica para identificar diferentes tipos de usuarios finales y, de este modo, crear umbrales adaptativos.

En conclusión, estos dos métodos son fáciles de utilizar, requieren pocos datos y permiten una detección rápida; sin embargo, siguen sin ofrecer ninguna pista sobre el origen de la avería.

#### 1.3.5. Detección de fallos

Fabre et al. [4] propusieron un indicador para detectar una válvula atascada en posición de apertura. Tal y como se muestra en la figura 35, cuando una válvula se atasca en una posición, el caudal ya no está controlado por la válvula de control y, en todos los casos de mal funcionamiento (excepto en la apertura del 10 %), el caudal másico es superior al necesario la mayor parte del tiempo. Además, la figura subraya que una válvula atascada implica inestabilidad en el caudal que pasa a través de ella. Esta es la firma específica de una válvula atascada. Por lo tanto, para detectar una válvula de control primaria atascada, se ha desarrollado un indicador basado en esta firma específica.

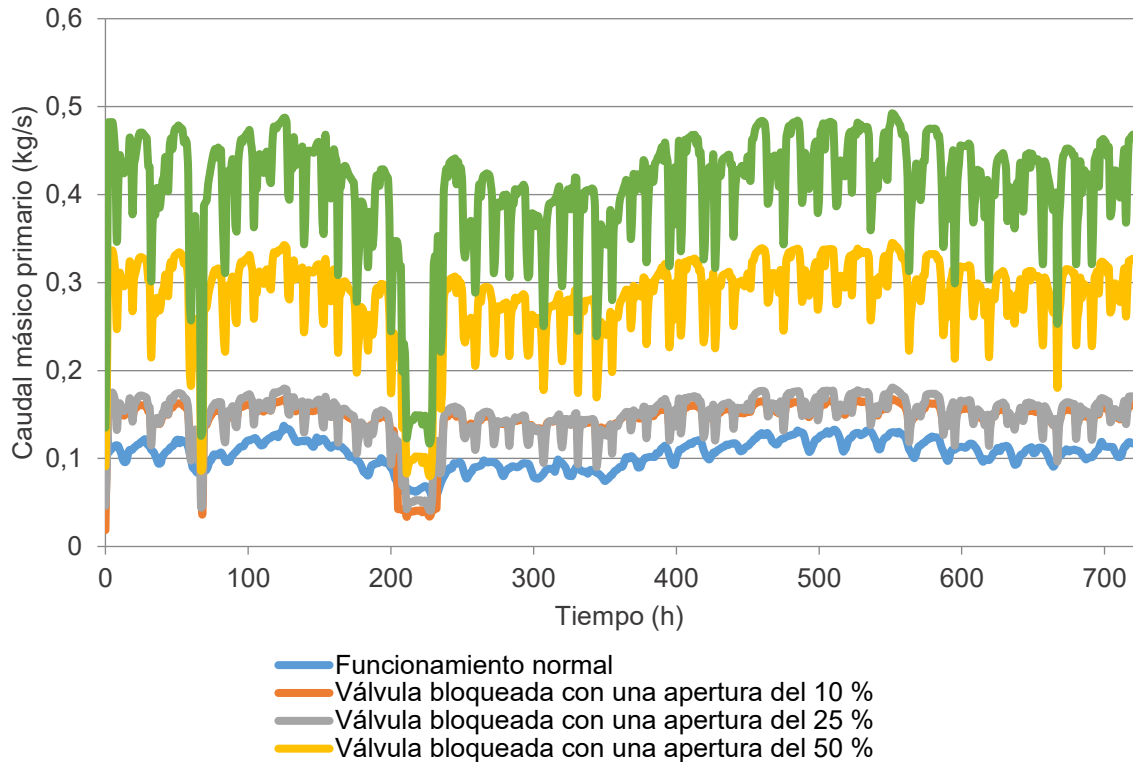


Figura35 : Evolución temporal del caudal másico primario

Para comprender plenamente la inestabilidad del caudal másico, se ha realizado un análisis espectral. Los resultados ponen de manifiesto que, en condiciones normales de funcionamiento, las variaciones más evidentes del caudal másico se producen cada 24 h, 12 h y 8 h, en consonancia con las principales variaciones de la demanda de calefacción. Por otro lado, cuando la válvula está obstruida, las variaciones más significativas se producen a una frecuencia menor, inferior a 6 h, lo que significa que se producen grandes variaciones del caudal más de cuatro veces al día.

Por lo tanto, para disponer de un indicador fácil de usar, se propone un indicador basado en la variación relativa del caudal másico. Según el análisis espectral, cuando una válvula está obstruida, las grandes variaciones del caudal másico se producen más de cuatro veces al día. Midiendo el caudal másico cada hora, es posible trazar la evolución del caudal másico relativo. Se considera una variación elevada del caudal másico relativa de  $\pm 15\%$  en una hora.

$$D_m = \frac{\dot{m}_t - \dot{m}_{t+\Delta t}}{\dot{m}_{t+\Delta t}}$$

La Figura 36 muestra el uso del indicador en el caso de una válvula obstruida y una válvula en funcionamiento normal. En el funcionamiento normal, no se supera el umbral del 15 %. Por lo tanto, como era de esperar, no se detecta ningún fallo. En el caso de la válvula obstruida, se detecta el fallo al superarse el umbral (puntos rojos en Figura 36) más de cuatro veces al día.

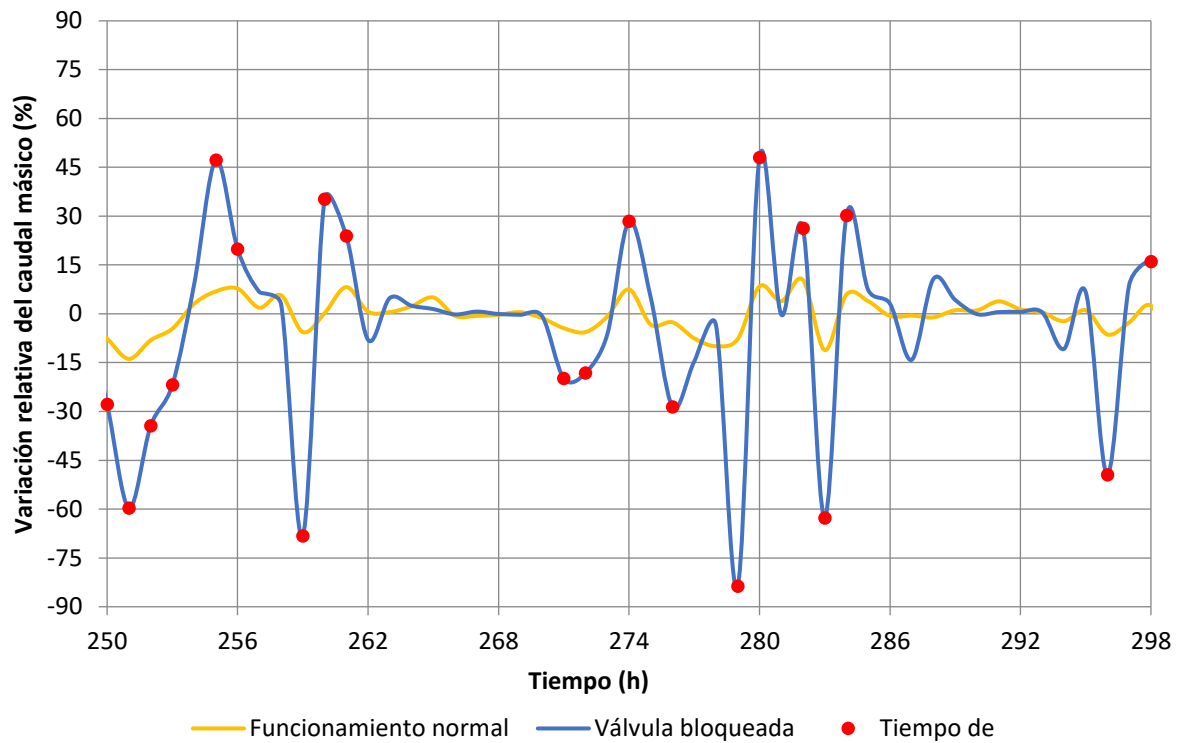


Figura36 Evolución temporal de la variación del caudal másico relativo para una válvula obstruida y una válvula en funcionamiento normal

Este indicador permite detectar un fallo específico; es fácil de usar, requiere pocos datos y ha sido validado mediante datos in situ. Sin embargo, no puede utilizarse en válvulas de control de la subestación de agua caliente sanitaria.

Fabre et al.[4] propusieron un indicador para detectar la incrustación en los intercambiadores de calor. El indicador se basa en la misma hipótesis que[10]. Para elaborar un indicador de incrustación, se parte de la premisa de que la mayoría de los intercambiadores de calor (HEX) empleados en las redes de calefacción urbana (DHN) son intercambiadores de calor de placas en contracorriente. La característica específica de la incrustación es el aumento de la resistencia térmica global del intercambiador de calor. De hecho, sin incrustaciones, la resistencia térmica puede expresarse como:

$$R_{global, clean} = \frac{1}{h_p S} + \frac{1}{h_s S}$$

Sin embargo, según la correlación de Dittus-Boetler, el coeficiente de transferencia de calor por convección puede expresarse en función del caudal másico como:

$$hS = \gamma \dot{m}^{0.8}$$

Donde el coeficiente  $\gamma$  solo depende de la geometría del HEX y de las características del fluido, por lo que en nuestro caso es una constante. Suponiendo que la resistencia conductiva de las placas es insignificante, la resistencia térmica puede reescribirse como:

$$R_{global, clean} = \frac{1}{\gamma \dot{m}_p^{0.8}} + \frac{1}{\gamma \dot{m}_s^{0.8}}$$

$$R_{global, clean} = \frac{1}{\gamma} \frac{\dot{m}_p^{0.8} + \dot{m}_s^{0.8}}{\dot{m}_p^{0.8} \dot{m}_s^{0.8}}$$



$$R_{global, clean} = \frac{1}{\gamma} \dot{M} \text{ with } \dot{M} = \frac{\dot{m}_p^{0.8} + \dot{m}_s^{0.8}}{\dot{m}_p^{0.8} \dot{m}_s^{0.8}}$$

Según la ecuación anterior, la resistencia térmica sin incrustaciones evoluciona linealmente con la variable  $\dot{M}$ . Sin embargo, cuando aparecen incrustaciones, la resistencia térmica global deja de ser lineal (véase la figura 37):

$$R_{total} = R_{global, clean} + R_{fouling}$$

Además, es necesario identificar un umbral para establecer un límite a partir del cual el impacto de las incrustaciones degrade significativamente el rendimiento de la subestación. Según el estudio, la temperatura de retorno desciende más de 5 °C cuando la relación entre la resistencia térmica con y sin incrustaciones supera 1,4. Se considera que un descenso de 5 °C es lo suficientemente importante como para reducir notablemente el rendimiento. Por lo tanto, se detectará un fallo cuando:

$$R_{total} > 1.4 R_{global, clean}$$

La resistencia térmica sin incrustaciones puede calcularse a partir de los datos medidos (las temperaturas a ambos lados y la potencia intercambiada) justo después de una limpieza completa del HEX. Gracias a esos mismos datos, también puede calcularse la resistencia térmica durante el funcionamiento:

$$R_{total} = \frac{DTLM}{P} \text{ with } DTLM = \frac{(T_{p,in} - T_{s,out}) - (T_{p,out} - T_{s,in})}{\ln(T_{p,in} - T_{s,out}) - \ln(T_{p,out} - T_{s,in})}$$

Por lo tanto, midiendo las temperaturas y los caudales a ambos lados, se puede representar gráficamente la evolución de la resistencia térmica, así como el umbral que no debe superarse. La figura 37 ilustra la metodología mediante la representación de los datos en un gráfico. Cuando un dato de resistencia térmica supera el umbral, el efecto de la incrustación es lo suficientemente importante como para requerir una limpieza.

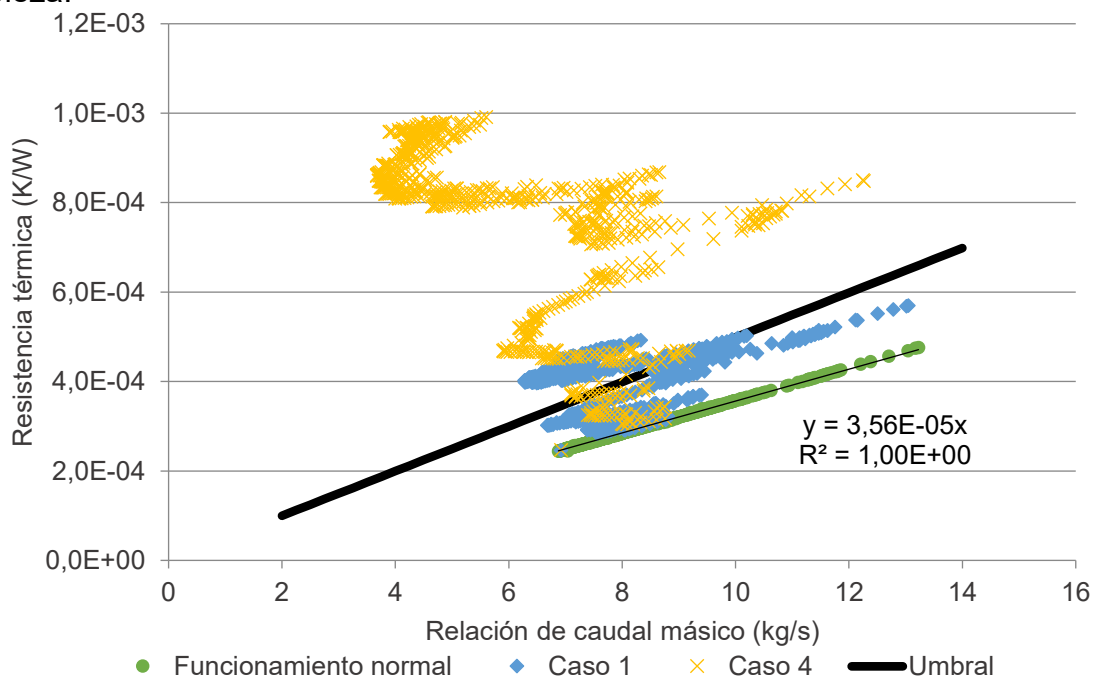


Figura37 : Indicador de detección de ensuciamiento (los casos 1 y 4 representan intercambiadores de calor ensuciados)

Este indicador permite detectar un fallo específico; es fácil de utilizar y ha sido validado mediante datos in situ. Sin embargo, requiere datos del lado secundario.



Fabre et al. [4] propusieron un indicador para detectar una válvula obstruida en el lado secundario. La característica específica del funcionamiento anómalo de una válvula secundaria es un caudal másico prácticamente constante. Por otra parte, medir el caudal másico en los radiadores resulta bastante difícil de llevar a cabo y bastante costoso. Por lo tanto, una medición basada en las temperaturas de entrada y salida del radiador resulta más sencilla y precisa. Así pues, la pregunta es: ¿qué impacto tiene un caudal constante en la temperatura del radiador? La relación entre la temperatura de l e y el caudal másico en este caso puede expresarse mediante las siguientes ecuaciones:

$$= C_p \dot{m}_{rad} (T_{in,rad} - T_{out,rad}) = KS DTLM_{rad} = KS \frac{(T_{in,rad} - T_{out,rad})}{\ln \left( \frac{T_{in,rad} - T_{indoor}}{T_{out,rad} - T_{indoor}} \right)}$$

$$C_p \dot{m}_{rad} = \frac{KS}{\ln \left( \frac{T_{in,rad} - T_{indoor}}{T_{out,rad} - T_{indoor}} \right)}$$

En la ecuación anterior, todos los parámetros son constantes cuando una válvula está obstruida, salvo las temperaturas. De hecho, para el rango de temperaturas  $C_p$ , que es constante,  $\dot{m}_{rad}$  no varía debido al fallo de funcionamiento y KS depende del caudal, que en este caso es constante. Por consiguiente, el factor  $DTLM' = \frac{1}{\ln \left( \frac{T_{in,rad} - T_{indoor}}{T_{out,rad} - T_{indoor}} \right)}$

debe ser constante si hay una válvula obstruida y debe variar en condiciones normales de funcionamiento. Este razonamiento queda validado por la Figura 38.

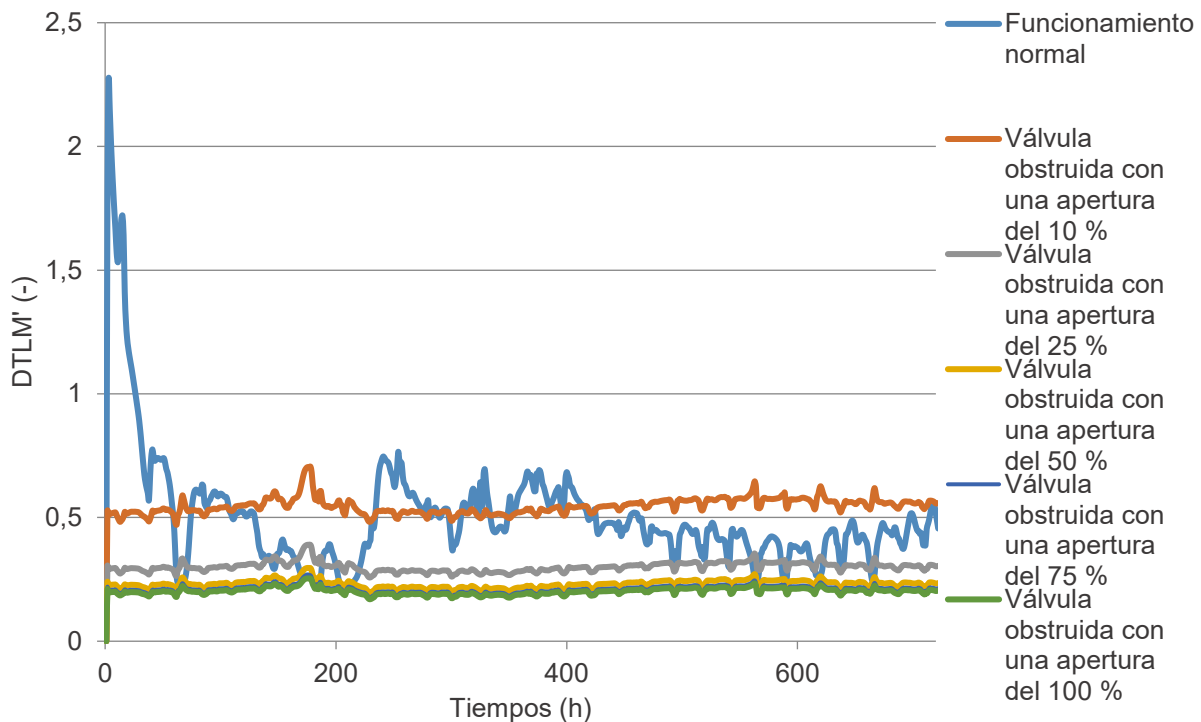


Figura 38 Evolución temporal del DTLM' de los radiadores deteriorados para cada caso

Con el fin de detectar la ausencia de variación del factor, se ha desarrollado un indicador de rendimiento basado en la variación relativa de  $DTLM'$  (véase la figura 39). La idea consiste en realizar un seguimiento de la variación relativa y enviar una alerta cuando no se supere un umbral del 10 % al menos dos veces por semana. No obstante, el umbral debe validarse mediante datos in situ.

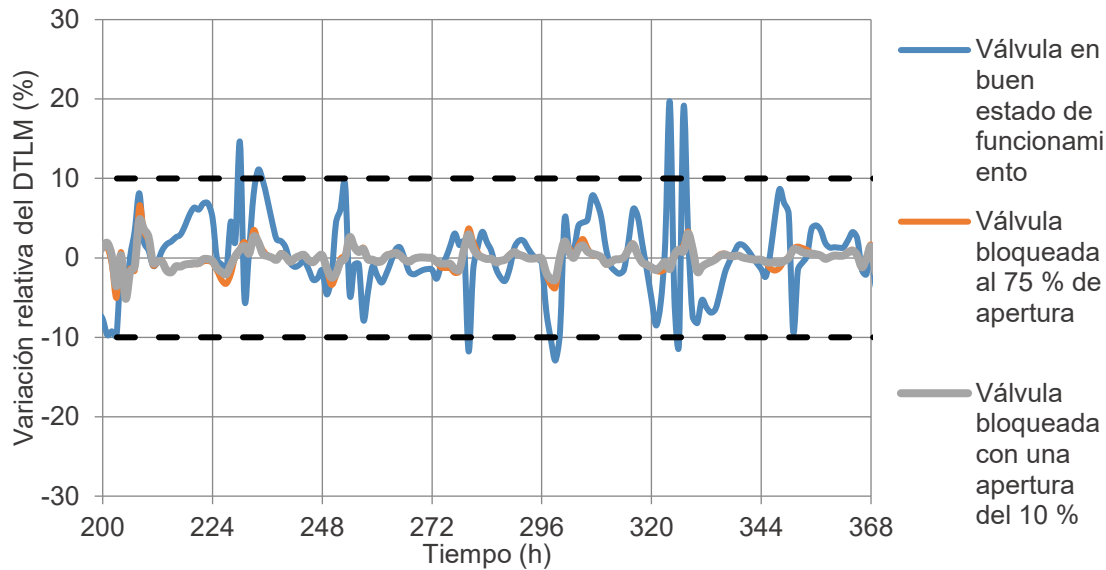


Figura39 Evolución temporal de la variación relativa del DTLM a lo largo de una semana

Fabre et al.[4] propusieron un indicador para detectar una temperatura de retorno primario del agua caliente sanitaria inadecuada. De hecho, el aumento del caudal másico de recirculación reduce el rendimiento de la subestación. Por lo tanto, el factor importante es la relación entre el caudal másico de recirculación y el caudal másico medio diario de demanda:

$$F = \dot{m}_{recirc} / \dot{m}_{demand}$$

Cuanto mayor sea la relación F, menos eficiente es el sistema. Sin embargo, resulta difícil medirla, ya que normalmente no se dispone de datos sobre el lado secundario del intercambiador de calor de agua caliente sanitaria. Por lo tanto, el indicador debe utilizar los datos disponibles, es decir, los datos del lado primario. El concepto del indicador consiste, por tanto, en comparar la eficiencia del intercambiador de agua caliente sanitaria de cada subestación con casos de referencia utilizando únicamente las temperaturas de entrada y salida del lado primario del intercambiador (véase la figura 40).

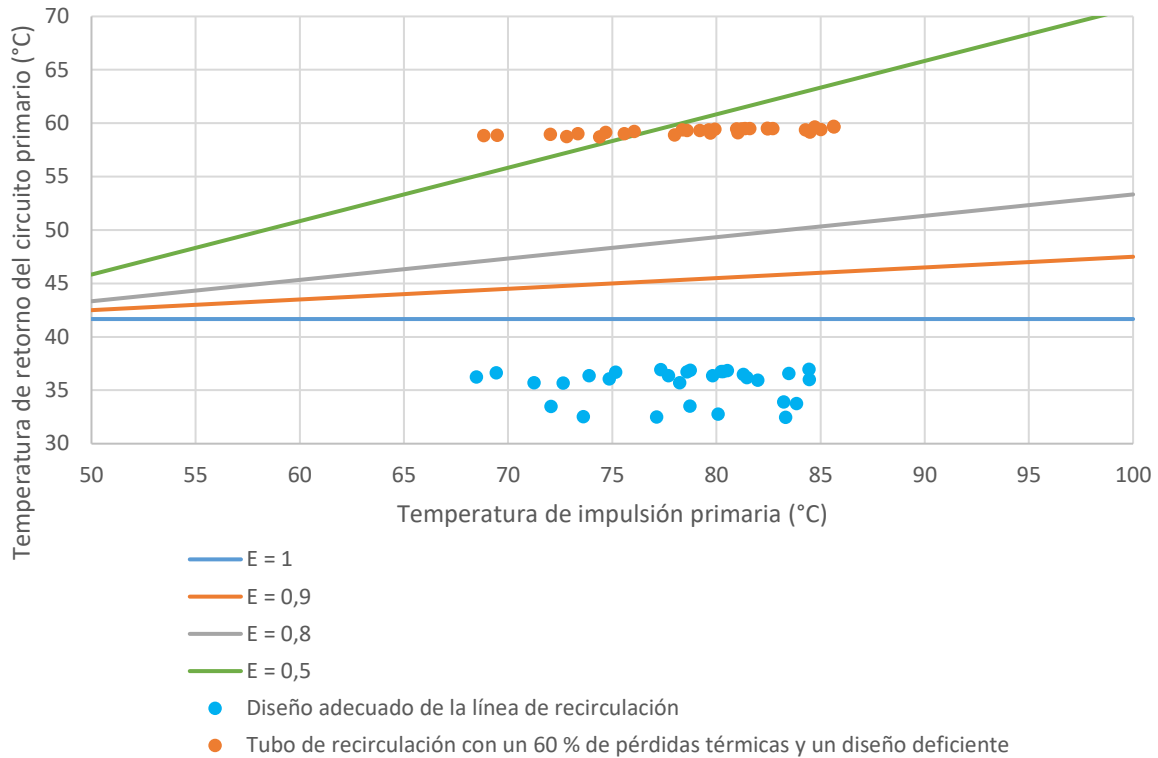


Figura40 Indicador para la detección de una temperatura de retorno del agua caliente sanitaria demasiado elevada

Los casos de referencia están representados por las líneas de eficiencia constante (véase **Hiba! A hivatkozási forrás nem található.**). Para trazar estas líneas, son necesarias tres hipótesis: una sobre la temperatura del agua fría de la red municipal, otra sobre la temperatura de retorno del circuito de recirculación y una sobre la relación F. Se determinan mediante las siguientes ecuaciones:

$$E = \frac{(T_{p,in} - T_{p,out})}{(T_{p,in} - T_{s,in})}$$

$$(\dot{m}_{recirc} + \dot{m}_{demand})T_{s,in} = \dot{m}_{recirc} T_{recirc} + \dot{m}_{demand} T_{cold,water}$$

$$T_{p,out} = (1 - E) T_{p,in} + \frac{E}{1 + F} (T_{recirc} F + T_{cold,water})$$

Al medir la temperatura en el lado primario, es posible determinar la eficiencia del intercambiador de agua caliente sanitaria bajo ciertas hipótesis. De hecho, tal y como se muestra en **Hiba! A hivatkozási forrás nem található.**, los puntos de medición correspondientes a un sistema defectuoso (punto naranja) se encuentran cerca de la línea de eficiencia de 0,5. Normalmente, un intercambiador de calor de agua caliente sanitaria (ACS) en un sistema de calefacción central tiene un valor de eficiencia comprendido entre 0,8 y 0,95. Por lo tanto, el indicador detecta un fallo en el sistema de ACS. Por el contrario, los puntos de medición correspondientes a un sistema sin fallos (punto azul) se sitúan por debajo de la línea de eficiencia 1. Esto solo significa que las hipótesis utilizadas para elaborar el indicador son demasiado estrictas. Por lo tanto, el suministro de ACS funciona mejor de lo esperado.



## Referencias

- [1] H. Gadd y S. Werner, «Detección de averías en subestaciones de calefacción urbana», *Applied Energy*, vol. 157, pp. 51-59, 2015.
- [2] S. Mansson, P.-O. Johansson Kallioniemi, M. Thern y T. Van Oevelen, «Faults in district heating customer installations and ways to approach them: Experiences from Swedish utilities», *\*Energy\**, vol. 180, pp. 163-174, 2019.
- [3] S. Frederiksen y S. Werner, *Calefacción y refrigeración urbanas*, Studentlitteratur, 2013.
- [4] A. Fabre, C. Duchayne, T. Nyberg, V. Gavan, K. Lygnerud y P. Stabat, «Estudio de coste-beneficio de la red secundaria de los edificios para mejorar el rendimiento de la calefacción urbana», IEA DHC/CHP, 2023.
- [5] P.-O. Johansson, P. Lauenburg y J. Wollerstrand, «Mejora de la refrigeración del agua de calefacción urbana en las subestaciones mediante el uso de esquemas de conexión alternativos», *22.ª Conferencia Internacional sobre Eficiencia, Coste, Optimización, Simulación e Impacto Ambiental de los Sistemas Energéticos*, pp. 843-852, 2009.
- [6] S. Buffa, M. Fouladfar, G. Franchini, I. Lozano Gabarre y M. Andrés Chicote, «Estrategias avanzadas de control y detección de fallos para sistemas de calefacción y refrigeración urbanísticos: una revisión», *Applied Sciences*, vol. 11, n.º 11, p. 455, 2021.
- [7] A. Rafati y H. R. Shaker, «Mantenimiento predictivo de redes de calefacción urbana: una revisión exhaustiva de métodos y retos», *\*Thermal Science and Engineering Progress\**, vol. 53, p. 102722, 2024.
- [8] M. Neumayer, D. Stecher, S. Grimm, A. Maier, D. Bückner y J. Schmidt, «Detección de fallos y anomalías en subestaciones de calefacción urbana: un estudio sobre metodología y conjuntos de datos», *\*Energy\**, vol. 276, p. 127569, 2023.
- [9] R. Kim, Y. Hong, Y. Choi y S. Yoon, «Detección de incrustaciones a nivel de sistema en subestaciones de calefacción urbana mediante un sistema de automatización de edificios asistido por sensores virtuales», *\*Energy\**, vol. 227, p. 120515, 2021.
- [10] E. Guelpa y V. Verda, «Detección automática de incrustaciones en subestaciones de calefacción urbana: metodología y ensayos», *\*Applied Energy\**, vol. 258, p. 114059, 2020.
- [11] N. Zimmerman, E. Dahlquist y K. Kyprianidis, «Hacia la detección y el diagnóstico de fallos en línea en sistemas de calefacción urbana», *\*Energy Proceedings\**, vol. 105, pp. 1960-1966, 2017.



- [12] P. Xue, Z. Zhou, X. Fang, X. Chen, L. Liu, Y. Liu y J. Liu, «Detección de fallos y optimización del funcionamiento en subestaciones de calefacción urbana basadas en técnicas de minería de datos», *\*Applied Energy\**, vol. 205, pp. 926-940, 2017.
- [13] H. Gadd y S. Werner, «Cómo lograr bajas temperaturas de retorno en las subestaciones de calefacción urbana», *\*Applied Energy\**, vol. 136, pp. 59-67, 2014.
- [14] S. Mansson, K. Davidsson, P. Lauenburg y M. Thern, «Métodos estadísticos automatizados para la detección de fallos en las instalaciones de los usuarios de calefacción urbana», *\*Energies\**, vol. 12, n.º 11, p. 113, 2018.
- [15] A. Fabre, «Desarrollo de indicadores de rendimiento y detección de fallos en las redes de calefacción con el objetivo de optimizar su gestión», tesis doctoral, MINES ParisTech, 2020.
- [16] F. Theusch, P. Klein, R. Bergmann, W. Wilke, W. Bock y A. Weber, «Detección de fallos y monitorización del estado en la calefacción urbana mediante datos de contadores inteligentes», *Conferencia Europea de la PHM Society*, vol. 6, n.º 11, p. 11, 2021.
- [17] S. Farouq, S. Byttner, M.-R. Bouguelia, N. Nord y H. Gadd, «Monitorización a gran escala de subestaciones de calefacción urbana con diversidad operativa: un enfoque basado en grupos de referencia», *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 90, p. 103492, 2020.