

**MÁSTER UNIVERSITARIO EN INVESTIGACIÓN EN EFICIENCIA
ENERGÉTICA Y SOSTENIBILIDAD EN INDUSTRIA,
TRANSPORTE, EDIFICACIÓN Y URBANISMO**

TRABAJO FIN DE MÁSTER

***DIAGNÓSTICO TERMOECONÓMICO DE LOS
COMPONENTES DE LAS INTALACIONES DE
CLIMATIZACIÓN***

Estudiante	<i>Prol, Godoy, Irati</i>
Directora	<i>Picallo, Perez, Ana</i>
Codirector	<i>Sala, Lizarraga, Jose María</i>
Departamento	<i>Ingeniería Energética</i>
Curso académico	<i>2020-2021</i>

Bilbao, 23, junio, 2021



RESUMEN

La preocupación por el ahorro energético debido a causas como el agotamiento de recursos fósiles o el cambio climático, ha incentivado el desarrollo de diferentes técnicas con la finalidad de ahorrar energía. El mantenimiento de las instalaciones térmicas es una de las tareas clave para garantizar el buen funcionamiento de los equipos y sistemas. Para ello, la clave es realizar un diagnóstico que permita detectar y evaluar fallos. El diagnóstico termoeconómico es una herramienta capaz de identificar el aumento de costes debido a una anomalía en el sistema. Para poder aplicar el diagnóstico termoeconómico, a lo largo de los años, se han desarrollado diferentes métodos basados en el Segundo Principio y en la Termoeconomía.

Sin embargo, a pesar del notable interés y el gran avance que puede suponer aplicar el diagnóstico termoeconómico en los edificios, está todavía en fase de investigación y existen pocos trabajos realizados en el ámbito de las instalaciones de los edificios.

Mediante la simulación de una instalación en el software TRNSYS, junto con la implementación de una anomalía al sistema, se sacarán conclusiones de los efectos de esa anomalía aplicando el diagnóstico. Así se podrá desarrollar una mejor aplicación del diagnóstico termoeconómico en instalaciones térmicas.

Palabras clave: Diagnóstico termoeconómico; Análisis exergético; Instalaciones térmicas.

ABSTRACT

Concern for energy saving due to causes such as the depletion of fossil resources or climate change has prompted the development of different techniques with the aim of saving energy. The maintenance of thermal facilities is one of the key tasks to ensure the proper functioning of equipment and systems. The key to this is to carry out a diagnosis to detect and evaluate faults. The thermoeconomic diagnosis is a tool capable of identifying the cost increase due to an anomaly in the system. In order to apply the thermoeconomic diagnosis, over the years, different methods based on the Second Principle and Thermoeconomics have been developed.

However, in spite of the remarkable interest and the great advance that could mean applying the thermoeconomic diagnosis in buildings, it is still in the research phase and there are few works carried out in the field of building installations.

By simulating an installation in TRNSYS software, together with the implementation of an anomaly to the system, conclusions will be drawn about the effects of that anomaly by applying the diagnosis. In this way it will be possible to develop a better application of the thermoeconomic diagnosis in thermal installations.

Keywords: Thermoeconomic diagnosis; Exergy analysis; Thermal system.

LABURPENA

Baliabide fosilak agortzen daudelako edo klima-aldaketa dagoelako, energia aurrezteko hainbat teknika sustatu dira. Instalazio termikoen mantentze-lanak funtsezkoak dira ekipoen eta sistemen funtzionamendu egokia bermatzeko. Horretarako, diagnostiko bat egitea da gakoa, akatsak detektatu eta ebaluatu ahal izateko. Termoeconomia-diagnostikoak identifikatzen du sistemaren anomalia batek eragindako kostuen igoera. Termoeconomia-diagnostikoa aplikatu ahal izateko, urteetan zehar, Bigarren Printzipioan eta Termoeconomian oinarritutako hainbat metodo garatu dira.

Hala ere, nahiz eta interes handia duen eta eraikinetan Termoeconomia-diagnostikoa aplikatzeak aurrerapen handia ekar dezakeen, ikerketa-fasean dago eta lan gutxi egin dira eraikinen instalazioen arloan.

TRNSYS softwarean instalazio bat simulatuz eta sisteman anomalia bat ezarriz, anomalia horrek



sortutako aldaketen ondorioak aterako dira diagnostikoa aplikatuz. Horrela, Termoeconomia-diagnostikoaren aplikazioa instalazio termikoetan hobeto garatu ahal izateko.

Hitz-gakoak: Termoeconomia diagnostikoa; Exergia-analisia; Sistema termikoak.



ÍNDICE

RESUMEN	2
ABSTRACT.....	2
LABURPENA.....	2
1 INTRODUCCIÓN	7
1.1 ANÁLISIS TERMOECONÓMICO DE LAS INSTALACIONES	8
1.2 DIAGNÓSTICO DE OPERACIÓN DE LAS INSTALACIONES	8
1.2.1 DIAGNÓSTICO TERMOECONÓMICO	8
1.2.2 MÉTODOS DE DIAGNÓSTICO TERMOECONÓMICO.....	9
1.3 APLICACIÓN DEL DIAGNÓSTICO TERMOECONÓMICO EN INSTALACIONES TÉRMICAS EN EDIFICIOS.....	12
2 OBJETIVOS.....	14
3 MATERIALES Y MÉTODOS.....	15
3.1 MÉTODOS PARA EL ANÁLISIS TERMOECONÓMICO.....	15
3.2 MÉTODOS PARA EL DIAGNÓSTICO TERMOECONÓMICO	16
3.3 INSTALACIÓN EXPERIMENTAL DEL LCCE	17
3.3.1 Configuración de la instalación experimental.....	18
3.4 MODELADO DE LA INSTALACIÓN MEDIANTE EL SOFTWARE TRNSYS	20
3.4.1 Configuración de la instalación experimental.....	20
3.4.2 Simulación de la condición de referencia.....	24
3.5 INTRODUCCIÓN DE UNA ANOMALÍA AL MODELO	24
3.5.1 Simulación de la condición anómala.....	24
4 RESULTADOS NUMÉRICOS	24
4.1 RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN	24
4.1.1 Comprobación de la configuración del sistema de control.....	24
4.1.2 Variables termodinámicas dinámicas	26
4.1.3 Variables exergéticas dinámicas.....	27
4.2 RESULTADOS TERMOECONÓMICOS.....	28
4.3 RESULTADOS DEL DIAGNÓSTICO TERMOECONÓMICO	29
5 CONCLUSIONES.....	30
6 CONSIDERACIONES FINALES.....	32
6.1 MÉRITOS OBTENIDOS DE ESTE TRABAJO.....	32
7 REFERENCIAS	33
8 ANEXO I: DESCRIPCIÓN DE LAS TAREAS.....	34
8.1 DIAGRAMA DE GANTT	35
9 ANEXO II: DESCRIPCIÓN DEL PRESUPUESTO	35
9.1 HORAS INTERNAS.....	35



9.2 GASTOS.....	35
10 ANEXO III: INSTALACIÓN DEL LABORATORIO DE CONTROL DE CALIDAD EN EDIFICACIÓN DEL GOBIERNO VASCO	36

ÍNDICE DE IMAGENES

Imagen 1. Esquema de la instalación experimental	18
Imagen 2. Esquema de la instalación con los flujos y los equipos numerados.....	19
Imagen 3. Interface del Simulation Studio en Trnsys referido a la instalación configurada en el LCCE	20
Imagen 4. Interface del Simulation Studio en Trnsys referido a la instalación configurada en el LCCE simplificada.....	21
Imagen 5. Esquema del type 700.....	21
Imagen 6. Esquema del type 114.....	21
Imagen 7. Esquema del type 4a.....	21
Imagen 8. Esquema del type 5b.....	21
Imagen 9. Esquema del type 649.....	22
Imagen 10. Esquema del type 647.....	22
Imagen 11. Esquema del type 38.....	22
Imagen 12. Esquema del type utilizado para el motor de cogeneración.....	22
Imagen 13. Esquema del type 9e.....	23
Imagen 14. Esquema del type 2b.....	23
Imagen 15. Funcionamiento del controlador diferencial	23
Imagen 16. Esquema del type 25.....	24
Imagen 17. Gráfico del control del motor de cogeneración en relación a la temperatura del tanque.....	25
Imagen 18. Gráfico del control de la bomba 3 en relación a la bomba 2.....	25
Imagen 19. Gráfico del control de caldera en relación a la temperatura del tanque.....	26
Imagen 20. Gráfico del control de la producción de ACS en relación a la diferencia de temperaturas entre primario y secundario	26
Imagen 21. Gráfico de los valores energéticos del fuel y producto de la caldera.....	27
Imagen 22. Gráfico de los valores energéticos del fuel y producto del motor de cogeneración.....	27
Imagen 23. Gráfico de valores exergéticos del fuel y producto de la caldera	28
Imagen 24. Gráfico de valores exergéticos del fuel y producto del motor de cogeneración	28
Imagen 25. Diagrama de GANTT del Trabajo de Fin de Máster.....	35
Imagen 26. Laboratorio de Control de la Calidad en Edificación	36
Imagen 27. Motor de cogeneración	37
Imagen 28. Caldera de condensación	37
Imagen 29. Bomba	38



Imagen 30. Depósito de acumulación.....38

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Estructura productiva de la instalación 19
Tabla 2 Comparativa entre rendimientos energéticos y exergeticos 29
Tabla 3. Resultados globales de cada equipo..... 29
Tabla 4. Aumento de consumo de combustible en el caso con anomalía respecto al caso de referencia 30
Tabla 5 Comparación de los consumos en el caso de referencia y el caso anómalo 30
Tabla 6. Costes de las horas internas..... 35
Tabla 7. Gastos..... 36

1 INTRODUCCIÓN

La preocupación por el ahorro energético debido a causas como el agotamiento de recursos fósiles o el cambio climático, ha incentivado el desarrollo de diferentes técnicas con la finalidad de ahorrar energía. En su conjunto, los edificios son responsables del 40% del consumo energético de la Unión Europea y del 36% de las emisiones de gases de efecto invernadero, generadas principalmente durante su construcción, utilización, renovación y demolición [1]. Es por ello, por lo que la mejora de eficiencia energética de los edificios y de sus sistemas térmicos es determinante para conseguir objetivos como el ahorro energético o la neutralidad de emisiones de gases de efecto invernadero.

El mantenimiento de las instalaciones térmicas es una de las tareas claves para garantizar el buen funcionamiento de los equipos y sistemas. Esta tarea, se debe hacer a lo largo de toda la vida útil de la instalación. Por ello, realizar un diagnóstico FDD (fault detection and diagnosis) [2] es la clave para la detección y evaluación de fallos.

Uniendo la Termoeconomía, disciplina que combina el análisis exergético con el económico y que permite asignar costes monetarios a los flujos e irreversibilidades, con el diagnóstico, se obtiene una herramienta capaz de identificar el aumento de costes debido a una anomalía en el sistema.

A pesar del notable interés y el gran avance que puede suponer la aplicación del diagnóstico termoeconómico en los edificios, está todavía en fase de investigación y existen pocos trabajos realizados en el ámbito de las instalaciones de los edificios.

Así, esta investigación tiene como finalidad contribuir a la aplicación del diagnóstico termoeconómico en el mundo de las instalaciones energéticas de los edificios. Para ello, se van a utilizar los resultados obtenidos en los ensayos de una instalación experimental del Grupo de Investigación consolidado ENEDI de la UPV/EHU, en cuyo seno se va a realizar esta investigación, en el Laboratorio de Control de Calidad en la Edificación del Gobierno Vasco. Se trata de una instalación experimental de carácter flexible, que permite contemplar los diferentes tipos de tecnologías energéticas, para así evaluar la integración entre ellas. El interés mayor de esta instalación es su carácter semi-virtual, es decir, se calculan los perfiles de demanda de calefacción y ACS (agua caliente sanitaria), mediante simulación con el software TRNSYS 17 y mediante el sistema de control, y así se puede disipar la cantidad de calor que reproduzca fielmente ese perfil de demanda de la vivienda.

De esta manera, en este trabajo se pretende hacer una exposición de los estudios realizados hasta la fecha tanto en el desarrollo del diagnóstico termoeconómico como en la aplicación de éste a instalaciones térmicas de edificios.

Demos una explicación de lo que la Termoeconomía y el diagnóstico termoeconómico conllevan:

- La exergía representa la capacidad de la energía en convertirse en trabajo, es decir, en calidad. Algunos tipos de energía pueden convertirse en su totalidad en trabajo, como la energía eléctrica, donde toda la energía es exergía. Pero hay otros tipos de energía, como el calor, de la que solo una parte puede convertirse en trabajo, y así solo una parte del flujo de calor es flujo de exergía. [31]
- La termoeconomía, cuantifica los recursos naturales consumidos en un proceso mediante teorías termodinámicas y económicas. Es decir, asigna el coste a un determinado producto en base a los recursos consumidos. Combina el análisis exergético y el análisis energético y asigna costes monetarios a cada flujo. Por lo tanto, proporciona información que no se puede obtener con los análisis energéticos convencionales. [32]
- Mediante el diagnóstico termoeconómico se identifican los incrementos de costes

debidos a las anomalías del sistema. Estas anomalías influyen tanto en la actitud de los equipos como en las interacciones entre ellos y modifican su estado de funcionamiento reduciendo su rendimiento.

1.1 ANÁLISIS TERMOECONÓMICO DE LAS INSTALACIONES

El análisis termoeconómico combina el análisis termodinámico con el económico, así a diferencia del análisis exergético, introduce conceptos de valor económico. Para ello, se llevan a cabo unos pasos que se basan en una estructura física de la instalación (basada en equipos y flujos de masa y energía) y en una estructura productiva del sistema. En la estructura productiva se clasifican los flujos en fuel (recurso) o producto para cada equipo. Además, puede haber flujos que sean subproductos, los que no son el objetivo directo del equipo; flujos pérdidas, los que no tienen valor económico; y flujos residuos, que necesitan un tratamiento antes de ser arrojados al ambiente. La estructura productiva puede variar dependiendo del punto de vista de la analista y de uso o aplicación a que se destine.

Para realizar la asignación de costes en el análisis termoeconómico, se utilizan unidades de exergía (costes exergéticos) y unidades monetarias (costes exergoeconómicos). Ambos se basan en la Teoría del Coste Exergético, Valero y col 1986 [5],[6],[7].

1.2 DIAGNÓSTICO DE OPERACIÓN DE LAS INSTALACIONES

El diagnóstico es la disciplina, entre los estudios de sistemas energéticos, que se ocupa de los sistemas en los que el rendimiento esperado difiere del actual. Las malfunciones surgen cuando ocurre una anomalía de la operación en el sistema y generalmente implican una mayor cantidad de los recursos y/ o una degradación de eficiencia global. Los problemas que deben resolverse con la ayuda de procedimientos de diagnóstico son la detección de las anomalías creadas, la identificación de las causas y la cuantificación de los efectos. Todos los procedimientos existentes se basan en la comparación entre las condiciones degradadas ("reales") y las esperadas ("referencia"). El estado de funcionamiento real se determina utilizando los balances de masa y energía, junto con las relaciones de propiedades termodinámicas. El estado de referencia es un modelo validado de la instalación que representa su estado de referencia para cualquier modo de operación, condiciones ambientales y diferentes características del combustible utilizado.

Seguendo a Lazaretto y Tofollo 2007 [3], las causas de las variaciones de las condiciones de funcionamiento se suelen dividir en:

- Externas: debidas a la modificación de una condición externa como variables ambientales o calidad del combustible.
- Intrínsecas: debidas a degradación o fallos.
- Inducidas: causadas por variaciones de otro sistema, por ejemplo, debido a la interacción de los componentes o a la intervención del sistema de control.

1.2.1 DIAGNÓSTICO TERMOECONÓMICO

Como explican Lizarraga y Picallo 2019 [4], el diagnóstico termoeconómico tiene su fundamento en la función productiva de cada equipo dentro del conjunto de la instalación y en la exergía de los flujos. Este diagnóstico tiene como objetivo descubrir e interpretar el funcionamiento anormal de los equipos y cuantificar su efecto en términos de aumento de consumo de recursos, es decir, localiza y evalúa el incremento en el consumo de recursos debido a las anomalías de los equipos de la instalación.

1.2.2 MÉTODOS DE DIAGNÓSTICO TERMOECONÓMICO

Para poder aplicar el diagnóstico termoeconómico, a lo largo de los años, se han desarrollado diferentes métodos basados en el Segundo Principio y en la Termoeconomía. Por una parte, la Teoría del Coste Exergético, Valero y col 1986 [5],[6],[7], interrelaciona las irreversibilidades de los equipos de un sistema. Asimismo, la Teoría de las Perturbaciones, Valero y col 1990 [8], separa las malfunciones creadas en un equipo de las causadas por la influencia de otros equipos. Por otra parte, la Fórmula del Impacto en Fuel, Lozano y col 1994 [9], aporta los valores de recurso adicional causados por las ineficiencias de los equipos. Sin embargo, las anteriores metodologías no resuelven el problema de cuáles son las causas de las irreversibilidades. Para ello se desarrollaron: la Teoría de Malfunciones y Disfunciones, Torres y col 1999 [11], y la estrategia de Zooming, Verda y col 2002 [12],[13].

Además, Lazaretto y Tofollo 2007 [15], formulan una metodología totalmente diferente a las anteriores para localizar las causas de las malfunciones, llamada Funciones Características. Por último, Tsatsaronis y Morosuk 2012 [16] desarrollan un procedimiento formal del análisis de exergía que se llama metodología de la Exergía Avanzada.

A continuación, se detallan las bases de estas metodologías, así como sus aportaciones y limitaciones en relación con el diagnóstico termoeconómico y su relación entre ellas, como se puede apreciar en las comparaciones de las metodologías de diagnóstico termoeconómico realizadas por Pacheco-Ibarra 2011 [17], Usón y Valero 2011 [18] y Remiro 2015 [19].

1.2.2.1 Teoría del Coste Exergético

Mientras que los procedimientos clásicos de diagnóstico se basan en la realización de balances de materia, energía y exergía de la planta global analizada y de sus equipos individuales, Lozano 1987 [20], incorpora en su Tesis el balance del Coste Exergético. La teoría del Coste Exergético, desarrollada por Valero y col 1986 [5],[6],[7], determina la cantidad de exergía que ha sido necesaria para constituir cualquiera de los flujos internos y productos finales de cualquier planta. Además, interrelaciona las irreversibilidades de los equipos de un sistema, es decir, refleja el hecho de que una disminución en la irreversibilidad local en un equipo, tiene un efecto en el consumo global de exergía de la planta. En definitiva, la optimización energética consiste en minimizar el coste exergético unitario de los productos finales de la planta. Sin embargo, Lozano 1987 [20] no consigue desarrollar una teoría científicamente fundamentada del control y contabilidad analítica de los procesos energéticos con la incorporación del Coste Exergético.

1.2.2.2 Teoría de las Perturbaciones

La Teoría de las Perturbaciones, sucesora de la Teoría del Coste Exergético, es un segundo paso en el análisis exergético. Como ya se ha mencionado anteriormente, la principal ventaja del análisis exergético es localizar y cuantificar las irreversibilidades, pero esto no implica causalidad. Con esta teoría se discierne en qué parte de las irreversibilidades son causadas por las propias malfunciones de un equipo y qué parte son debidas a la influencia de otros subsistemas. Dicho de otra manera, cuando un equipo sufre una perturbación en la eficiencia, llamada malfunción, provoca disfunciones en el resto de los componentes, y con esta teoría se puede diferenciar si esas irreversibilidades son malfunciones o disfunciones.

1.2.2.3 Fórmula del Impacto en Fuel

La Fórmula del Impacto en Fuel fue presentada por Lozano y col 1994 [9] y desarrollada también por Reini y col 1995 [10] y Torres y col 1999 [11], entre otros.

Esta fórmula une el impacto del consumo de fuel con el diagnóstico termoeconómico, mediante el consumo de exergía unitaria de cada componente de la planta. La variación del consumo

unitario de exergía de cada componente, debido a ineficiencias en el equipo, aumenta su consumo de recursos (fuel). En consecuencia, implica un consumo adicional de los recursos externos. Por lo tanto, el impacto total de combustible de una planta se puede calcular mediante la suma del impacto del fuel de cada componente.

Torres y col 1999 [11] afirma que la Fórmula del Impacto en Fuel, o Impacto en el Consumo de Recursos, como la denomina, presenta mejoras frente a otros métodos como el de la Teoría de las Perturbaciones, ya que proporciona los valores exactos del recurso (fuel) adicional. Sin embargo, un mayor aumento del impacto en el combustible no implica un mayor impacto en las irreversibilidades. Para solucionar la pregunta de qué causa que las irreversibilidades y el impacto de combustible aumenten y cómo están relacionadas, Torres y col 1999 [11], desarrollan la Teoría de Malfunciones y Disfunciones.

1.2.2.4 Teoría de Malfunciones y Disfunciones

Como se ha dicho anteriormente, no existe una relación directa entre el aumento de las irreversibilidades y su impacto en fuel porque cuanto más avanzado está un equipo en el proceso de producción, mayor es su impacto en fuel.

La degradación de un equipo obliga a otros equipos a adaptar su comportamiento para mantener sus condiciones de producción y así modificar sus irreversibilidades. Un aumento en el consumo unitario de un equipo aumenta las irreversibilidades, no solo de dicho equipo, sino también las irreversibilidades de los equipos anteriores.

Se definen dos tipos de irreversibilidades:

- Irreversibilidad endógena o malfunción producida por un aumento del consumo unitario del equipo en sí.
- Irreversibilidad exógena o disfunción inducida en el equipo por la malfunción de otro equipo. Lo que obliga a ese equipo a consumir más fuel para obtener la producción requerida por los demás equipos.

La irreversibilidad endógena (malfunción) solo afecta al comportamiento de los equipos mientras que la irreversibilidad exógena (disfunción) afecta en cómo se adaptan los equipos para mantener la producción total de la planta, incluso cuando su consumo unitario permanece inalterable.

Las principales aportaciones de esta teoría al diagnóstico son, por una parte, que las disfunciones no pueden corregirse por sí mismas, solo se puede conseguir una reducción o eliminación de estas disminuyendo o eliminando la malfunción que las ha generado. Por otra parte, esta teoría afirma que el incremento de las irreversibilidades de un equipo se puede calcular sumando la malfunción en ese equipo, con las disfunciones generadas por esa malfunción y con la disfunción al incremento de la producción de la instalación.

Además, siguiendo con la Teoría de Malfunciones y Disfunciones, Torres y Valero 2015 [24], separan el impacto en el combustible (fuel) debido al incremento del consumo exergético unitario del propio equipo, del causado por la variación del producto del equipo.

1.2.2.5 Estrategia del Zooming

La estrategia del Zooming, Verda y col 2002 [12], [13], un continuación del estudio presentado en la Conferencia Internacional ECOS'99 [14]. Fue desarrollada con el fin de abordar el problema de encontrar las causas de la desviación de las condiciones reales con respecto a las condiciones de referencia. Este estudio, fue. Para ello, describe avances significativos en la localización de las causas reales de las malfunciones, a partir de la aplicación de procedimientos de filtrados de efectos inducidos que ocultan las causas reales de degradación. Así, se describe un procedimiento de diagnóstico termoeconómico de zoom progresivo, que permite concretar

el análisis en una zona cada vez más específica y definir una estructura productiva solo para esa zona.

Este procedimiento posibilita estimar los efectos inducidos, filtrar los más importantes y localizar los equipos donde ocurren las anomalías. También demuestra que en algunos casos y dependiendo del detalle del modelo termoeconómico, incluso puede ser posible detectar la naturaleza física de las anomalías o malfunciones.

Sin embargo, Verda y col [13], aseguran que quedan problemas sin resolver en el campo del diagnóstico termoeconómico que requieren más información como, por ejemplo, el problema de cuantificar con precisión el ahorro energético alcanzado al eliminar por separado cada anomalía.

1.2.2.6 Funciones Características

Lazaretto y Tofollo 2006 [21], hacen una crítica de los métodos de diagnóstico hasta ahora mencionados y muestran cómo todas las metodologías anteriores, todas basadas en el uso de las variables exergéticas, demuestran ser eficaces en la evaluación de los efectos de las malfunciones, pero ineficaces en identificar las fuentes de anomalías. La formulación matemática parece ser el punto débil del logro de este último objetivo. Es por ello por lo que Lazaretto y Tofollo 2007 [1] proponen un nuevo enfoque basado en un indicador que mide la alteración de la curva característica del equipo afectado por la anomalía. Afirman que la causa real de la alteración del comportamiento de los componentes es la modificación de su curva característica por degradación o por averías.

La degradación y los fallos se conocen como anomalías de funcionamiento y son las causas reales de los fallos del sistema. El efecto más directo de una anomalía de operación en un componente, es la alteración de las relaciones funcionales entre las variables termodinámicas de las corrientes de masa y energía involucradas en la operación de ese componente. Estas relaciones funcionales son conocidas como curvas características y cada componente (equipo) de un sistema tiene una. Cubren una gran variedad de variables físicas de acuerdo con el componente considerado, por ejemplo, modelos de transferencia de calor en intercambiadores de calor, caídas de presión en filtros, etc. La alteración de una curva característica produce una modificación del comportamiento del equipo y hace que se creen las malfunciones intrínsecas.

Por tanto, se alteran las cantidades de masa y energía relacionadas con el equipo en el que se ha producido la anomalía. Esta modificación, debido a la interacción entre componentes, afecta a su vez al funcionamiento de otros componentes, que reaccionan a estos cambios de acuerdo con sus curvas características no modificadas. Es decir, las alteraciones provocadas por las malfunciones intrínsecas se extienden por todo el sistema y hacen que las malfunciones inducidas surjan en los componentes que no se ven afectados por anomalías de funcionamiento.

Esto es, cuando en un sistema no existe ningún tipo de anomalía, éste trabaja en su estado de referencia, y cada equipo trabaja a lo largo de la curva característica de referencia. Si en un equipo se crea una malfunción intrínseca, este equipo deja de trabajar en la curva de referencia y comienza a trabajar en la curva real. Sin embargo, los equipos en los que se han creado malfunciones inducidas debido a esa malfunción intrínseca, siguen trabajando a lo largo de su curva de referencia, pero en puntos de operación diferentes.

Así mediante dos casos de prueba realizados por Lazaretto y Tofollo 2007 [1], se demuestra que la metodología propuesta es una herramienta prometedora para localizar las causas de malfunciones en sistemas energéticos. Se hace hincapié en que, pese a que los métodos anteriores demuestran ser ineficaces para localizar las fuentes de malfunciones, pueden aplicarse con éxito para la cuantificación de sus efectos.



1.2.2.7 Metodología de la Exergía Avanzada

La Teoría de la Exergía Avanzada, desarrollada por Tsatsaronis y Morosuk 2012 [16], se basa, entre otros, en los fundamentos del análisis de exergía desarrollado por Tsatsaronis 1999 [22], en los que se afirma que mediante un análisis exergético se puede lograr información (ej.: ubicación, magnitud y fuentes de las ineficiencias en un sistema) que con otros métodos como con un análisis energético sería imposible.

Debido a la falta de un procedimiento formal, el análisis de exergía no es muy utilizado entre los profesionales de la energía. Así, con esta metodología se desarrolla un procedimiento formal en el que se toman debidamente en cuenta las interacciones entre los equipos de un sistema. Las destrucciones de exergía se clasifican en partes inevitables y evitables, así como en partes endógenas y exógenas.

Destrucciones de exergía inevitables y evitables

Esta clasificación, presentada por vez primera por Tsatsaronis y Park 2002 [23], expresa cómo para cada equipo de un sistema hay irreversibilidades que no pueden reducirse, incluso utilizando las mejores tecnologías en el mercado, debido a limitaciones físicas, tecnológicas y económicas. Por ejemplo, los procesos de difusión, las reacciones químicas de combustión y las transferencias de calor en una caldera, son procesos altamente irreversibles. Por lo tanto, la parte restante de las destrucciones de exergía que no son inevitables, son evitables.

Destrucciones de exergía endógenas y exógenas

La destrucción de exergía endógena es la parte de destrucción de exergía total de un equipo, causada exclusivamente por las irreversibilidades en el propio equipo, cuando el resto de los equipos de la instalación operan con una eficiencia ideal.

La destrucción de exergía exógena es la parte de la destrucción de exergía total de un equipo que no es destrucción de exergía endógena, es decir, las ineficiencias de un equipo causadas por las ineficiencias en el resto de los equipos.

Se puede ver, que esta nomenclatura de la destrucción de exergía es muy similar a la de malfunciones intrínsecas e inducidas y a las disfunciones anteriormente mencionadas.

1.3 APLICACIÓN DEL DIAGNÓSTICO TERMOECONÓMICO EN INSTALACIONES TÉRMICAS EN EDIFICIOS

Pese a haber una gran cantidad de estudios y metodologías desarrolladas entorno al diagnóstico termoeconómico, lo cierto es que la aplicación de la Termoeconomía en los edificios está todavía en fase de investigación. Aun así, existen varias publicaciones de esta rama de la Termoeconomía en el ámbito de las instalaciones de los edificios.

Por una parte, Piacentino 2013 [25], utiliza el diagnóstico termoeconómico para detectar fallos únicos o múltiples en unidades de aire acondicionado, además de cuantificar el impacto de dichos fallos en términos de consumo adicional de energía. Para ello, se utiliza un simulador para evaluar datos termodinámicos en condiciones normales y defectuosos. Se imponen fallos individuales o simultáneos en la unidad de aire acondicionado: suciedad en el condensador y evaporador, carga insuficiente de refrigerante y fuga en la válvula del compresor.

Los resultados del estudio atestiguan que el procedimiento es suficientemente confiable tanto cuando se consideran fallos graves como leves. Además, se demuestra que el rendimiento del procedimiento de diagnóstico mejora ligeramente cuando los fallos, como por ejemplo, la carga insuficiente del refrigerante, están previamente filtrados. El enfoque propuesto parece tener un potencial evidente para la evaluación in situ de las ineficiencias de una planta y para desarrollar programas óptimos de actividades de mantenimiento.

En la misma línea al anterior, en el estudio presentado por Piacentino y Catrini 2016 [26], se estudia la eficacia del diagnóstico termoeconómico para la detección de averías en unidades de

aire acondicionado de expansión directa. En este trabajo se investiga la sensibilidad del desempeño del diagnóstico termoeconómico en la detección de una bobina de expansión directa sucia y la cuantificación del consumo adicional que induce; este fallo es crítico debido al enfriamiento y deshumidificación simultáneos que ocurren en la bobina. Los parámetros examinados son la temperatura y la humedad del aire de entrada, la humedad del estado de referencia y la relación de calor sensible. El análisis de exergía revela que debido a la deshumidificación más intensa que produce la presencia de suciedad, la eficiencia de exergía de la bobina del evaporador finalmente aumenta. Esto revela que las suposiciones utilizadas (tener en consideración exergía química y térmica en la exergía total del aire enfriado) en este análisis pueden conducir a resultados engañosos, ya que, basado en el rendimiento de exergía total, puede parecer erróneamente que una bobina sucia funciona de manera más eficiente, en comparación con el “caso de referencia” de la bobina limpia.

Una vez implementada la correcta técnica de diagnóstico, es decir, tener en cuenta solamente la fracción térmica de la exergía total del aire, el rendimiento de la metodología revela una alta sensibilidad tanto a las condiciones de aire de entrada como a la geometría de la bobina. En particular, resulta muy eficiente, tanto en la detección de unidad defectuosa como en la cuantificación del consumo de energía adicional inducido por el ensuciamiento cuando el aire que entra en la bobina tiene una humedad absoluta baja. Además, la eficiencia de la técnica aumenta cuando se consideran bobinas de mayor profundidad.

Siguiendo con plantas de refrigeración, Ommen y col 2017 [27], evalúan dos métodos de diagnóstico termoeconómico en términos de su aplicabilidad dentro de la refrigeración comercial. Pese a que este estudio no esté aplicado a instalaciones térmicas de edificios y esté centrado en el ámbito industrial, también es interesante analizar las metodologías utilizadas en este campo. Para ello, se propone un indicador relativo común para los dos métodos, que puede utilizarse para comparar directamente la calidad de la identificación de disfunciones intrínseca e inducidas. La calidad de los resultados se consideró equivalente entre los dos métodos.

Por otra parte, Picallo y col 2016 [28], aplican el diagnóstico termoeconómico a una planta de ACS y calefacción basada en una caldera de condensación. El diagnóstico se aplica a través de un caso mono-fallo utilizando dos metodologías: la Formula del Impacto en Fuel y el análisis de Malfunciones y Disfunciones. Para poder realizar el diagnóstico, se modifica un parámetro de un equipo de la planta y se evalúa su efecto sobre los demás componentes y sobre toda la planta. El principal resultado es que, mediante la aplicación de esta metodología, se pueden cuantificar fácilmente los efectos producidos por el componente defectuoso, tanto en unidades exergéticas como en monetarias. Mediante este estudio, se proponen nuevos índices para evaluar el efecto del coste de malfunciones de cada equipo sobre el impacto del combustible (fuel) calculado en el diagnóstico. Además, se deducen nuevas expresiones para calcular el coste económico asociado a las anomalías y a la intervención del sistema de control.

Además, Picallo y col 2019 [29], desarrollan otro estudio trabajando también en una instalación de ACS y calefacción (alimentada por un motor Stirling y una caldera de condensación) y le aplican el Análisis Dinámico de la Exergía Avanzada, siendo la primera vez que se aplica un análisis de Exergía Avanzada utilizando condiciones dinámicas a un sistema de energía de un edificio. El Análisis Dinámico de la Exergía Avanzada, proporciona información sobre la destrucción de exergía de los equipos al distinguir entre destrucción de exergía evitables e inevitables; además de hacer diferenciación entre las destrucciones de exergía endógenas y exógenas. Esa información no se puede obtener mediante ningún otro tipo de enfoque. Además, la aplicación del diagnóstico termoeconómico en sistemas dinámicos puede ser más complicado, a pesar de eso, el Análisis Dinámico de la Exergía Avanzada se puede aplicar igualmente, pero ajustando algunos supuestos. Por tanto, este estudio afirma que se puede dar un paso adelante en la reducción del uso de energía utilizando la información proporcionada.

Por último, el estudio más reciente, desarrollado por Picallo y col 2020 [30], aplica la termoeconomía en una instalación de calefacción, ventilación, aire acondicionado y

refrigeración (HVAC&R system, en inglés). Se desarrollan nuevos aspectos metodológicos de las aplicaciones termoeconómicas, como un nuevo método para establecer la estructura dinámica productiva, en particular para definir las válvulas de tres vías y los componentes inerciales. Además, se explica una metodología novedosa y fácil de usar para filtrar los efectos inducidos y en consecuencia, se obtiene una nueva forma de resolver el problema directo del diagnóstico. En definitiva, este estudio desarrolla una nueva metodología para ser implementada en sistemas dinámicos de detección y diagnóstico de fallos. La metodología utilizada es la aplicación de dos fallos virtuales. Si bien las anomalías se incorporan deliberadamente, deben considerarse como un resultado “ciego”, como si se obtuvieran directamente de un monitoreo real. Así, el problema del diagnóstico directo se resuelve fácilmente una vez que se conoce el modelo térmico dinámico de referencia de cada componente. Para eso, se desarrolla una única metodología de simulación innovadora para filtrar todos los efectos inducidos.

2 OBJETIVOS

El objetivo de esta investigación es realizar un diagnóstico en los componentes de las instalaciones de climatización mediante la aplicación de la termoeconomía. A lo largo de este trabajo la teoría se aplicará en una simulación transitoria realizada en Trnsys. Sin embargo, la finalidad principal será trasladar el diagnóstico de manera experimental a partir de la monitorización y la introducción de anomalías en los equipos del Laboratorio de Control de Calidad de la Edificación (LCCE) del Gobierno Vasco.

Para cumplir con este objetivo, se deberán conseguir una serie de objetivos específicos, que son alcanzables por una persona que tiene ya la experiencia y conocimientos sobre la termoeconomía.

OBJETIVO ESPECÍFICO 1: Estudio bibliográfico de las metodologías de diagnóstico en instalaciones de climatización (sobre todo de calefacción y ACS en edificios terciarios y residenciales)

- Introducción al diagnóstico termoeconómico
- Análisis del procedimiento para la aplicación del diagnóstico termoeconómico

OBJETIVO ESPECÍFICO 2¹: Análisis del funcionamiento de la instalación experimental del LCCE. Metodología y elección de equipos a analizar.

- Ensayo experimental del equipo escogido para la aplicación del diagnóstico.
- Obtención del modelo térmico del equipo en el modo de funcionamiento sin anomalías
- Introducción de alguna anomalía

OBJETIVO ESPECÍFICO 3: Simulación de la instalación diseñada en LCCE en el software TRNSYS.

- Elección de los componentes (types) óptimos y de sus parámetros para la simulación.
- Diseño de control de la instalación

¹ Debido a problemas técnicos relacionados con la instalación experimental del LCCE, no se ha podido realizar el ensayo. Sin embargo, se ha estudiado la instalación y se han configurado las válvulas y el control para llevar a cabo el ensayo.

OBJETIVO ESPECÍFICO 4: Aplicación del diagnóstico termoeconómico para localizar y cuantificar los efectos producidos por la anomalía.

OBJETIVO ESPECÍFICO 5: Conclusiones, discusión, y redacción del documento para su diseminación.

3 MATERIALES Y MÉTODOS

A continuación, se repasan brevemente las metodologías para el análisis termoeconómico, basado en la Termoeconomía Simbólica y el diagnóstico termoeconómico basado en la Fórmula del Impacto en Fuel.

Asimismo, se describe la instalación experimental y su modelado en TRNSYS.

3.1 MÉTODOS PARA EL ANÁLISIS TERMOECONÓMICO

Antes de cualquier desarrollo, vale la pena mencionar algunas expresiones matemáticas simbólicas de termoeconomía (ST) para su posterior uso. Mediante la estructura productiva, el vector producto, \mathbf{P} , el vector combustible, \mathbf{F} , y el consumo total de combustible, F_T , se escriben como sigue [13]:

$$\mathbf{P} = \mathbf{P}_s + \langle \mathbf{KP} \rangle \cdot \mathbf{P} \quad 1)$$

$$\mathbf{F} = \mathbf{I} + \mathbf{P} = \mathbf{K}_D \cdot \mathbf{P} \quad 2)$$

$$F_T = {}^t\mathbf{u} \cdot (\mathbf{I} + \mathbf{P}_s) = {}^t\boldsymbol{\kappa}_0 \cdot \mathbf{P} \quad 3)$$

El vector de producto final se especifica con \mathbf{P}_s ; \mathbf{K}_D es una matriz diagonal que contiene el consumo unitario total de exergía de los componentes; \mathbf{I} corresponde al vector de irreversibilidad y a la matriz $\langle \mathbf{KP} \rangle$, y el vector $\boldsymbol{\kappa}_0$, revela la distribución del consumo unitario de exergía impulsado por otro componente y por el consumo externo. Sus elementos κ_{ij} , y κ_{0j} representan la cantidad de recursos procedentes del componente i y de los recursos externos, respectivamente, que son necesarios para obtener una unidad de producto del componente j . Por tanto, se conocen como consumo marginal de exergía y consumo marginal de exergía externa. Para cada componente, el consumo unitario de exergía es igual a la suma de todos los consumos marginales de exergía del componente.

$$\mathbf{K} = \boldsymbol{\kappa}_0 + {}^t\mathbf{u} \cdot \langle \mathbf{KP} \rangle \quad 4)$$

Algunas ecuaciones necesarias resultan directamente de la aplicación del ST; entre ellas el producto, el fuel y la irreversibilidad de cada componente se definen respectivamente como:

$$\mathbf{P} = |\mathbf{P}\rangle \cdot \mathbf{P}_s \quad \text{where} \quad |\mathbf{P}\rangle = (\mathbf{U}_D - \langle \mathbf{KP} \rangle)^{-1} \quad 5)$$

$$\mathbf{F} = |\mathbf{F}\rangle \cdot \mathbf{P}_s \quad \text{where} \quad |\mathbf{F}\rangle = \mathbf{K}_D \cdot |\mathbf{P}\rangle = \mathbf{K}_D \cdot (\mathbf{U}_D - \langle \mathbf{KP} \rangle)^{-1} \quad 6)$$

$$\mathbf{I} = |\mathbf{I}\rangle \cdot \mathbf{P}_s \quad \text{where} \quad |\mathbf{I}\rangle = (\mathbf{K}_D - \mathbf{U}_D) \cdot |\mathbf{P}\rangle = (\mathbf{K}_D - \mathbf{U}_D) \cdot (\mathbf{U}_D - \langle \mathbf{KP} \rangle)^{-1} \quad 7)$$

Asimismo, los costes unitarios exergéticos de los productos de los componentes están relacionados con los costes de exergía de los recursos externos ($k_{0,i}^*$ para el componente i) o con el consumo marginal de exergía asociado a los recursos externos ($\kappa_{0,i}$) de la siguiente manera:

$$\mathbf{k}_P^* = {}^t|\mathbf{P}\rangle \cdot \mathbf{k}_0^* = {}^t|\mathbf{P}\rangle \cdot \boldsymbol{\kappa}_0 \quad 8)$$

Y, por último, el coste económico unitario del fuel en cada componente relacionado con el consumo unitario externo se expresa mediante:

$$c_{F_{k0}} = {}^t c_F \cdot \kappa_{0D} \quad 9)$$

3.2 MÉTODOS PARA EL DIAGNÓSTICO TERMOECONÓMICO

Impacto en fuel

En la literatura se han utilizado diferentes indicadores exergéticos para evaluar los efectos del mal funcionamiento de los componentes y la detección de las anomalías que generan el mal funcionamiento. La evaluación de la contribución del componente defectuoso a la variación del consumo total de combustible de la planta viene dada por la fórmula del impacto del fuel, sugerida por primera vez por Lozano y col 1994 [9]. El impacto del combustible es la diferencia entre el consumo de recursos de la planta en condiciones reales de funcionamiento, F_T , y el consumo de recursos en condiciones de referencia, F_T^0 :

$$\Delta F_T = F_T - F_T^0 \quad 10)$$

Teniendo en cuenta la ecuación (3), el impacto del combustible se puede expresar de dos maneras diferentes que se describirán detalladamente.

Considerando el primer miembro del lado derecho de la ecuación (3), el impacto en fuel se representa sumando el aumento de las irreversibilidades que han surgido de las anomalías inesperadas y el aumento del producto final generado por el aumento del consumo de recursos de la planta. Así, el impacto del combustible puede expresarse de la siguiente manera

$$\textcircled{1} \Delta F_T = {}^t \mathbf{u} \cdot [(\mathbf{I} + \mathbf{P}_s) - (\mathbf{I}^0 + \mathbf{P}_s^0)] = {}^t \mathbf{u} \cdot [\Delta \mathbf{I} + \Delta \mathbf{P}_s] \quad 11)$$

La variación del producto es la diferencia entre la condición de funcionamiento y la de referencia:

$$\Delta \mathbf{P} = \mathbf{P} - \mathbf{P}^0 \quad 12)$$

Si el análisis se centra en el crecimiento de las irreversibilidades, utilizando la ecuación (2) y la ecuación (12), $\Delta \mathbf{I}$ puede expresarse como:

$$\Delta \mathbf{I} = ((\mathbf{K}_D - \mathbf{U}_D) \cdot \mathbf{P}) - ((\mathbf{K}_D^0 - \mathbf{U}_D) \cdot \mathbf{P}^0) = \Delta \mathbf{K}_D \cdot \mathbf{P}^0 + (\mathbf{K}_D - \mathbf{U}_D) \cdot \Delta \mathbf{P} \quad 13)$$

A partir de aquí, el aumento de irreversibilidades se descompone en dos componentes; el primero se debe al aumento del consumo exergético unitario en los propios componentes y el segundo representa el ajuste en el producto que debe sufrir cada componente para adaptarse a las nuevas condiciones de funcionamiento. El primer componente se denomina *mal funcionamiento* MF:

$$\mathbf{MF} = \Delta \mathbf{K}_D \cdot \mathbf{P}^0 \quad 14)$$

La segunda componente se denomina *disfunción* DF que se induce en cada componente a causa de las disfunciones de los otros componentes. Consiste en el incremento de la irreversibilidad del componente debido a la variación de su producción local causada por el mal funcionamiento de otros componentes:

$$\mathbf{DF} = (\mathbf{K}_D - \mathbf{U}_D) \cdot \Delta \mathbf{P} \quad 15)$$

En consecuencia, volviendo a la ecuación (11), el impacto del combustible puede expresarse como sigue:

$$\textcircled{1} \Delta F_T = t_u \cdot [\mathbf{MF} + \mathbf{DF} + \Delta \mathbf{P}_S] \quad 16)$$

Como resumen final esta es la perspectiva para evaluar el impacto del fuel: la variación de la irreversibilidad en cada componente es la suma del mal funcionamiento y las disfunciones generadas en el componente debido a las anomalías en los otros componentes. Por lo tanto, el impacto total del fuel de la planta es igual a la suma de las variaciones de irreversibilidad de los componentes más la variación del producto total de la planta.

3.3 INSTALACIÓN EXPERIMENTAL DEL LCCE

El lugar donde se llevarán a cabo los ensayos, será el Laboratorio de Control de Calidad en Edificación del Gobierno Vasco (LCCE).²

El carácter flexible de la instalación experimental permite configurar las instalaciones seleccionadas para el análisis, y, debido a la numerosa sensorica se monitorizan las variables necesarias para su modelado energético.

La instalación consta de más de 120 señales para controlar y monitorizar las variables deseadas, y para, de este modo, poder obtener información precisa, así como para garantizar su correcto funcionamiento. De este modo, se han instalado 46 sondas de temperatura de alta precisión Pt 100 clase 1/10, 40 en tubería y 6 en depósitos, 11 caudalímetros electromagnéticos Siemens SITRANS F M (sensores MAG 3100 y 5100 W y transmisores MAG 6000), con incertidumbre inferior al 0,1%, 2 presostatos (uno en el circuito general y otro en el solar), así como sensores de temperatura ambiente, humedad y presión en el interior y de temperatura y humedad en el exterior; contadores de gas tanto para la caldera como para los equipos de micro-cogeneración y contadores de electricidad para contabilizar la generación de la cogeneración y el consumo de la bomba de calor.

Todo el control de la instalación se gestiona mediante un autómata programable Siemens IM 151-8 PN/DP CPU para ET200S y un módulo de expansión, además de las correspondientes tarjetas de entrada y salida para las señales, conectado vía Ethernet a un PC en el que se dispone de la interfaz a través de la cual se opera y donde se recogen los datos.

Se dispone pues de un banco de ensayos, dotado de un sistema de simulación de carga de térmica y eléctrica, con sistemas de control, visualización y registro automatizado de las diferentes variables. Mediante este banco de pruebas se va a poder caracterizar y aplicar el diagnóstico termoeconómico a la instalación diseñada.

Los equipos con los que cuenta actualmente la instalación experimental del LCCE se dividen en cinco módulos: (1) generación de alta temperatura, (2) generación de baja temperatura, (3) acumulación, (4) producción de agua caliente sanitaria, (5) consumo de calefacción y (6) colectores solares. Ver Imagen 1.

- Para la generación de alta temperatura se dispone de un motor de cogeneración de combustión interna (produce 5,5 kW eléctricos y 12,5 kW térmicos), un motor Stirling (1 kW eléctrico y 5 kW térmicos) y una caldera de condensación (28 kW térmicos de ACS y 20 kW térmicos calefacción, con un rendimiento del 97%).
- Para la generación de baja temperatura también sirve la caldera de condensación. Por otra parte, hay una bomba de calor aire-agua (17,9 kW térmicos con COP de 2,5)

² Como se ha dicho, debido a problemas técnicos no se ha podido poner en marcha la instalación. Sin embargo se ha realizado todo el proceso de análisis y configuración de la instalación en estudio

- Para el almacenamiento térmico hay dos tanques de 1000 litros para el ACS.
- El módulo de producción de ACS dispone de otro tanque de 1000 litros.
- El módulo de disipación de calor está formado por un aerotermo (fan coil en inglés) con una potencia térmica nominal máxima de 24,9 kW.
- El módulo de colectores solares produce calor en los tanques UBS de almacenamiento térmico.

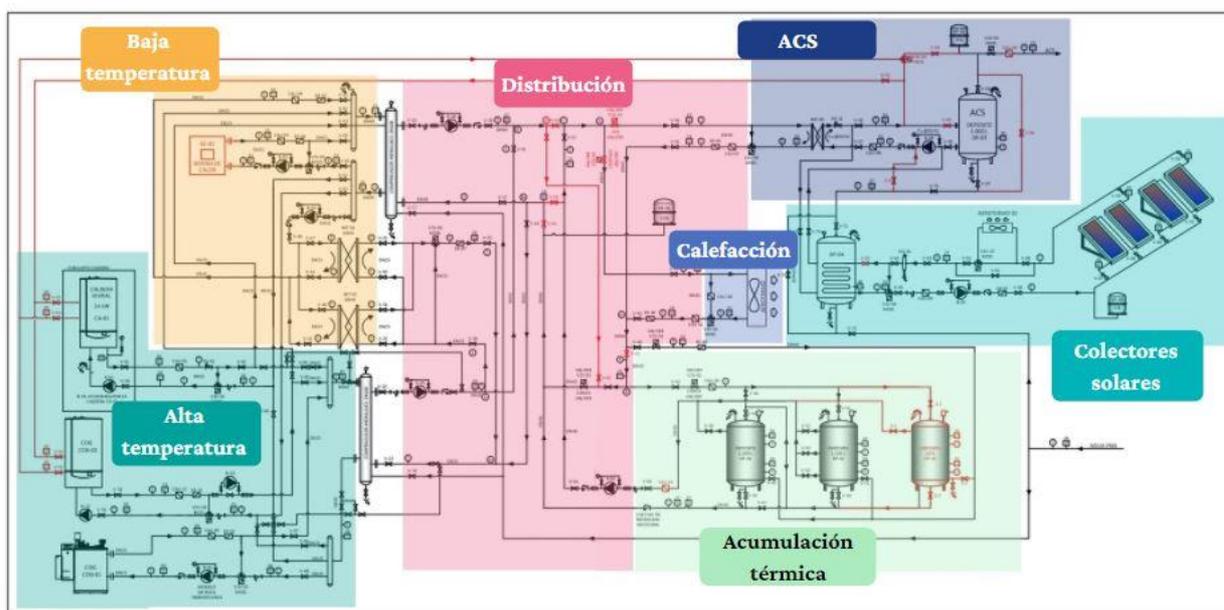


Imagen 1. Esquema de la instalación experimental

3.3.1 Configuración de la instalación experimental

La instalación diseñada para este trabajo suministra el agua caliente sanitaria (ACS) de un bloque de viviendas de 20 habitantes por medio de una caldera de condensación de 28 kW térmicos de ACS y 20 kW térmicos de calefacción y un equipo de cogeneración de 5,5 kW eléctricos y 12,5 kW térmicos, ver Imagen 1.

Los equipos más característicos son los siguientes:

- Generación: Caldera de condensación y motor de cogeneración.
- Distribución: compensador hidráulico, válvulas de tres vías, intercambiador de calor.
- Almacenaje: depósito de 1000 [l] de acumulación.
- Suministro: grifos para ACS

Asimismo, la instalación cuenta con las necesarias bombas hidráulicas que presurizan la instalación y mueven el caudal; también cuenta con un sistema de control.

3.3.1.1 Aplicación de la termoeconomía

Para poder aplicar la termoeconomía se han identificado todos los equipos y todos los flujos. En total se han identificado 13 equipos y 27 flujos. Ver Imagen 2.

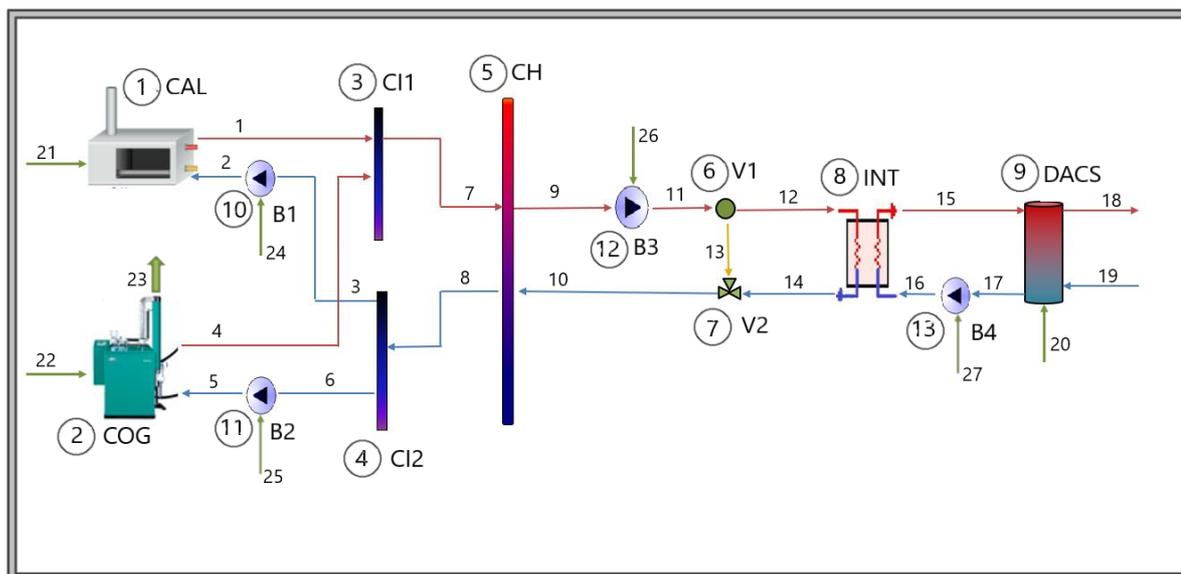


Imagen 2. Esquema de la instalación con los flujos y los equipos numerados

Así mismo, se ha analizado la estructura productiva de la instalación, es decir, se ha decidido qué flujos forman parte del fuel y qué flujos forman parte del producto de cada equipo, tal y como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Estructura productiva de la instalación

Nº	EQUIPO	NOMBRE	FUEL	PRODUCTO
1	CAL	CALDERA	21	1-2
2	COG	MOTOR DE COGENERACIÓN	22	23+(4-5)
3	CI1	COLECTOR DE IMPULSO 1	1+4	7
4	CI2	COLECTOR DE IMPULSO 2	8	3+6
5	CH	COMPENSADOR HIDRÁULICO	7-8	9-10
6	V1	VÁLVULA 1	11	12+13
7	V2	VÁLVULA 2	13+14	10
8	INT	INTERCAMBIADOR DE CALOR	12-14	15-16
9	DACS	DEPÓSITO ACS	(15-17) +20	18-19
10	B1	BOMBA 1	24	2-3
11	B2	BOMBA 2	25	5-6
12	B3	BOMBA 3	26	11-9
13	B4	BOMBA 4	27	16-17

3.3.1.2 Configuración del control

El control que domotiza la instalación es clave para un suministro eficiente de la demanda de ACS. A continuación, se explican los comandos y los set-points principales para el uso adecuado de la instalación:

- Cuando el agua del tanque de almacenamiento sea $T_{DACS} < 62^{\circ}C$, se encienden la bomba 3 y el motor de cogeneración. Está programado para que la bomba 3 no se active si no existe caudal.
- Cuando la diferencia de temperaturas entre la entrada al intercambiador desde el

circuito primario y la entrada al intercambiador desde el circuito secundario es $T_{\text{primario}} - T_{\text{secundario}} > 5^{\circ}\text{C}$ se activa la producción de ACS.

- Además, mientras estén el motor de cogeneración activo, la bomba 3 activa y la producción de ACS activa, si la temperatura del tanque es $T_{\text{DACS}} < 58^{\circ}\text{C}$, se activa el equipo auxiliar, en este caso la caldera.
- Para que la producción de ACS cese, la diferencia de temperaturas entre el sistema primario y el secundario debe disminuir los 2°C , es decir $T_{\text{primario}} - T_{\text{secundario}} < 2^{\circ}\text{C}$.
- Para que el motor de cogeneración se desactive la temperatura del tanque tiene que superar los 67°C , $T_{\text{DACS}} > 67^{\circ}\text{C}$.

3.4 MODELADO DE LA INSTALACIÓN MEDIANTE EL SOFTWARE TRNSYS

TRNSYS es un entorno de software extremadamente flexible basado en gráficos que se utiliza para simular el comportamiento de sistemas transitorios. TRNSYS se compone de dos partes. [33]

La primera es un motor (llamado núcleo) que lee y procesa el archivo de entrada, resuelve iterativamente el sistema, determina la convergencia y traza las variables del sistema. El núcleo también proporciona utilidades que (entre otras cosas) determinan las propiedades termofísicas, invierten matrices, realizan regresiones lineales e interpolan archivos de datos externos.

La segunda parte de TRNSYS es una amplia biblioteca de componentes, cada uno de los cuales modela el rendimiento de una parte del sistema. La biblioteca estándar incluye aproximadamente 150 modelos que van desde las bombas hasta los edificios multizona, desde los aerogeneradores hasta los electrolizadores, desde los procesadores de datos meteorológicos hasta las rutinas de economía, y desde los equipos básicos de HVAC hasta las tecnologías emergentes más avanzadas. Los modelos están contruidos de tal manera que los usuarios pueden modificar los componentes existentes o escribir los suyos propios, ampliando las capacidades del entorno.

3.4.1 Configuración de la instalación experimental

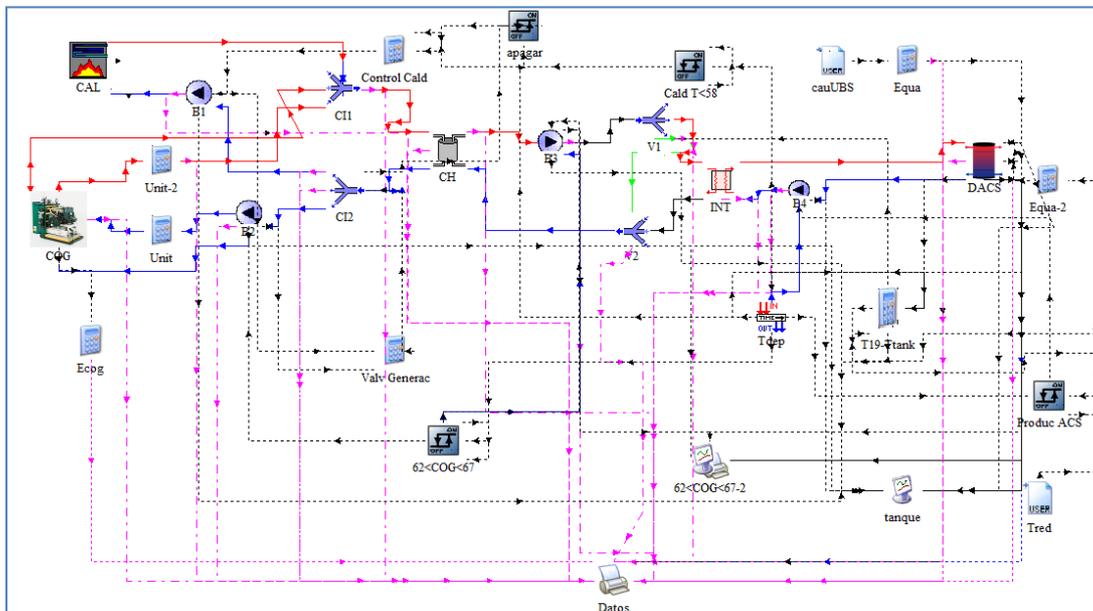


Imagen 3. Interface del Simulation Studio en Trnsys referido a la instalación configurada en el LCCE

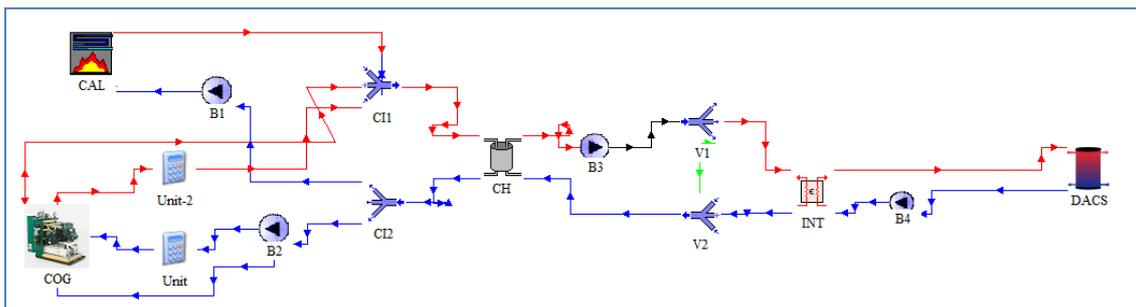


Imagen 4. Interface del Simulation Studio en Trnsys referido a la instalación configurada en el LCCE simplificada

Gracias a la versatilidad de este software, la instalación diseñada en el LCCE se ha modelado en la interfaz del Simulation Studio de TRNSYS, estos son los “types” o componentes principales usados:

- Para la caldera: type 700 (Imagen 5). Cuyos parámetros han sido:
 - Potencia nominal: 100800 [kJ/h]

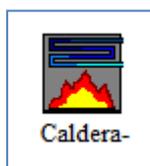


Imagen 5. Esquema del type 700

- Para las bombas: type 114 (Imagen 6). Cuyos parámetros han sido:
 - Caudal máximo: 1000 [kg/h]
 - Potencia nominal: 2684 [kJ/hr]



Imagen 6. Esquema del type 114

- Para el tanque: type 4a (Imagen 7). Cuyos parámetros han sido:
 - Volumen: 1 [m³]
 - Coeficiente de pérdida del tanque: 3 [kJ/h· m²·K]



Imagen 7. Esquema del type 4a

- Para el intercambiador: type 5b (Imagen 8). Cuyos parámetros han sido:
 - Coeficiente global de transferencia de calor: 514 [kJ/h·K]

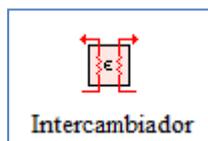


Imagen 8. Esquema del type 5b

- Para el colector de impulso 1: type 649 (Imagen 9).

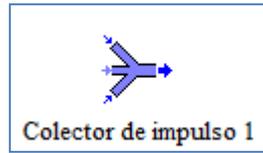


Imagen 9. Esquema del type 649

- Para el colector de impulso 2: type 647 (Imagen 10).



Imagen 10. Esquema del type 647

- Para el compensador hidráulico: type 38 (Imagen 11). Cuyos parámetros han sido:
 - Volumen: 0,35[m³]
 - Coeficiente global de pérdidas: 5 [kJ/hK]



Imagen 11. Esquema del type 38

- Para el motor de cogeneración se ha utilizado un elemento de la biblioteca creado por el usuario (Imagen 12). Cuyos parámetros han sido:
 - Potencia nominal: 19800 [kJ/h]



Imagen 12. Esquema del type utilizado para el motor de cogeneración

Para todos los equipos se ha considerado que el fluido es el agua por lo que para todos los equipos:

- Capacidad calorífica del fluido: 4,19 [kJ/kg K]
- Densidad del fluido: 1000 [kg/m³]
- Punto de ebullición: 100 [°C]

3.4.1.1 Comandos de control

Una de las cosas más importantes para una simulación dinámica es la configuración de los comandos de control. Esto es, el "time-step" de cada iteración y el periodo de estudio. En este caso concreto, se ha escogido un time-step de 0,125 horas, es decir 7,5 minutos, y se ha simulado a lo largo de 168 horas, es decir 7 días.

3.4.1.1 Implementación de la demanda de ACS

Para generar el perfil de la demanda de ACS se ha utilizado la herramienta DHW-calc [34]. Los perfiles generados con esta herramienta son archivos de texto que contienen una lista de valores de caudal para cada paso de tiempo. El programa distribuye la demanda de ACS a lo

largo del año con medios estadísticos, según una función de probabilidad.

Para implementar la demanda de ACS en TRNSYS se utiliza el lector de datos type 9e (Imagen 13) en el que se puede insertar el documento de texto obtenido del perfil de la demanda.

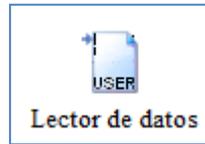


Imagen 13. Es quema del type 9e

3.4.1.2 Configuración del control

Para modelar el control antes mencionado, se hace uso del “controlador diferencial” del TRNSYS (type 2b), ver Imagen 14.



Imagen 14. Esquema del type 2b

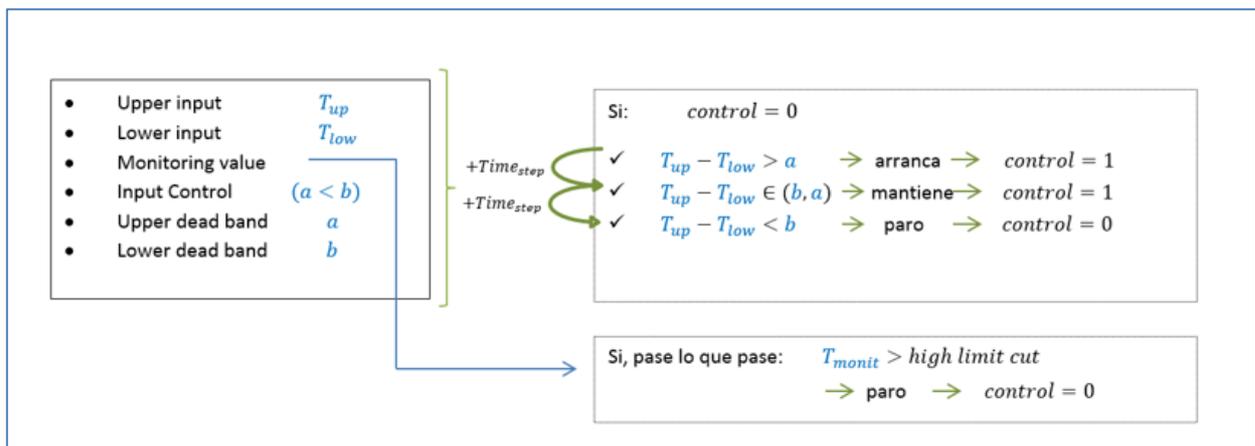


Imagen 15. Funcionamiento del controlador diferencial

El regulador diferencial de encendido/apagado genera una función de control que puede tener un valor de 1 o 0. El valor de la señal de control se elige en función de la diferencia entre las temperaturas superior e inferior T_H y T_L , comparada con dos diferencias de temperatura de banda muerta ΔT_H y ΔT_L . El nuevo valor de la función de control depende del valor de la función de control de entrada en el time-step anterior.

Por razones de seguridad, este controlador incluye un límite superior de desconexión. Independientemente de las condiciones de banda muerta, la función de control se pondrá a cero si se supera la condición de límite superior. Este controlador no está restringido a la detección de temperaturas, aunque se utilice la notación de temperatura. Ver Imagen 15.

Este controlador se ha incluido varias veces, tal y como se ha explicado previamente, para controlar la marcha/paro de la caldera y del motor de cogeneración en base a la temperatura del depósito de ACS. También se han utilizado para controlar la producción de ACS en función de las temperaturas del circuito primario y el circuito secundario.

3.4.1.3 Extracción de datos

Además, se han incluido unos “printers” (type 25) que se encargan de descargar a un archivo

de Excel las variables termodinámicas necesarias para su posterior análisis. Ver Imagen 16.

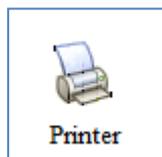


Imagen 16. Esquema del type 25

Concretamente cada time-step descargan los valores de:

- temperaturas de cada flujo y temperaturas acumuladas
- caudales de cada flujo
- consumo de combustible
- generación de electricidad

3.4.2 Simulación de la condición de referencia

Este modelo reproducido en TRNSYS de la instalación configurada del LCCE se considera el “modelo de referencia” en el cual se aplicará el estudio de reparto de costes termoeconómicos.

3.5 INTRODUCCIÓN DE UNA ANOMALÍA AL MODELO

Para poder aplicar el diagnóstico termoeconómico, se aplicará deliberadamente una anomalía a uno de los componentes de la instalación: al compensador hidráulico (type38).

Uno de los parámetros a definir de este equipo corresponde al coeficiente global de pérdidas.

Por lo tanto, este parámetro se aumentará desde 5 [kJ/h·K] al 15 [kJ/h·K] para poder reproducir “pérdidas en el aislamiento” en el equipo.

3.5.1 Simulación de la condición anómala

El siguiente paso consiste en simular la misma instalación con esta anomalía incluida.

Se obtendrán las mismas variables termoeconómicas que en la situación de referencia para poder aplicar el método de diagnóstico del “impacto en fuel”.

4 RESULTADOS NUMÉRICOS

Este apartado agrupa los resultados numéricos obtenidos de la simulación, el análisis termoeconómico y el diagnóstico basado en la fórmula del impacto en fuel.

4.1 RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN

Los siguientes apartados tratan de justificar el modelado correcto en TRNSYS.

4.1.1 Comprobación de la configuración del sistema de control

La intervención del sistema de control en la simulación (basada en controladores diferenciales) se comprueba en los siguientes gráficos:

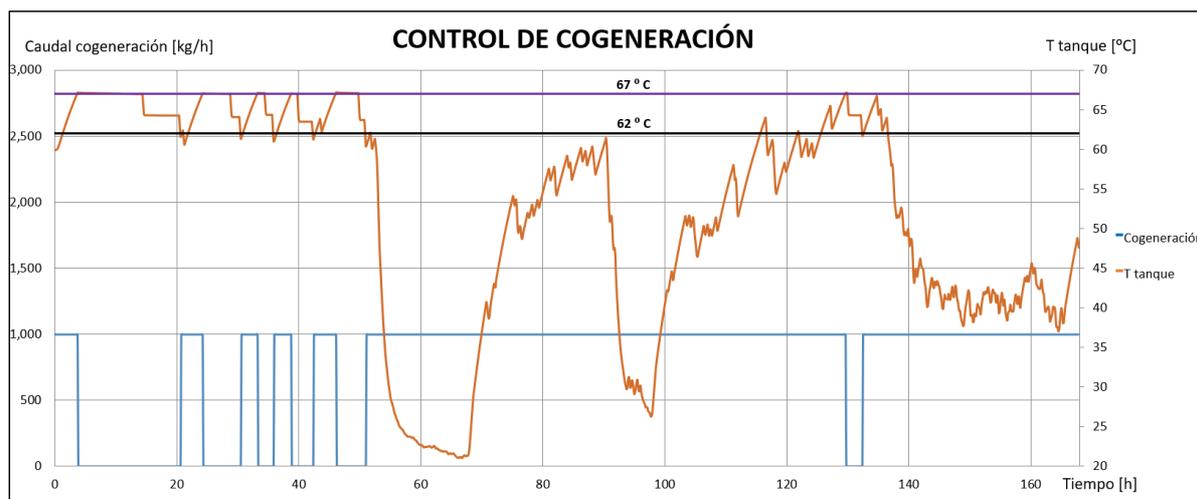


Imagen 17. Gráfico del control del motor de cogeneración en relación a la temperatura del tanque.

En la Imagen 17 se demuestra el control en relación a la temperatura del tanque y el marcha/paro del motor de cogeneración:

- Se demuestra como cuando la temperatura del tanque aumenta los 67°C, el motor de cogeneración deja de funcionar
- Por otra parte cuando la temperatura del tanque es menor que 62°C el motor se pone en marcha hasta conseguir que la temperatura de tanque por encima de los 62°C.
- Que el motor de cogeneración arranque demuestra que la bomba del motor (B2) se activa.

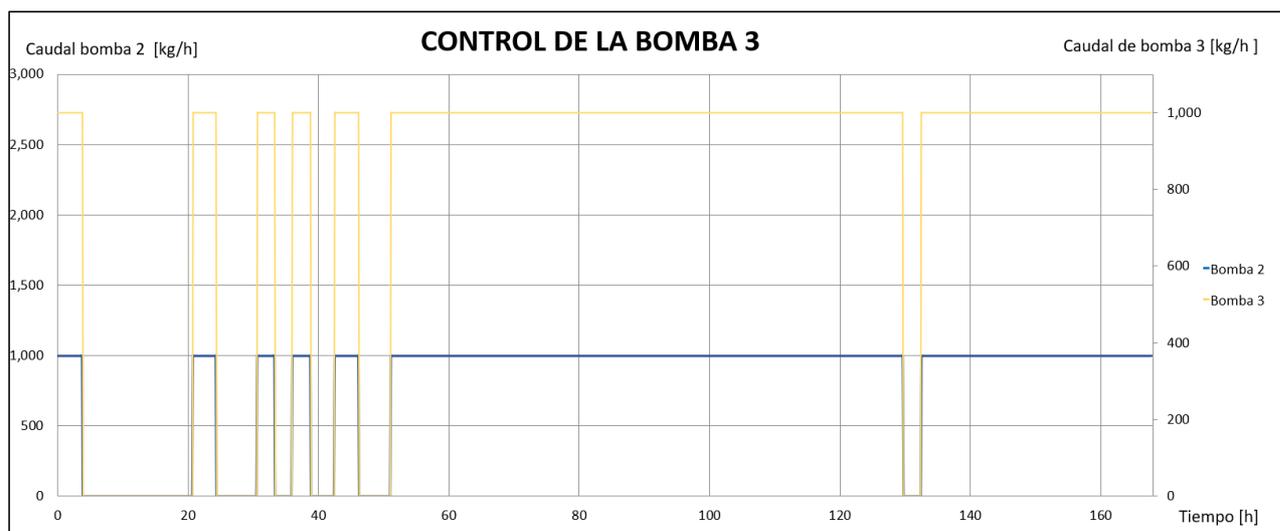


Imagen 18. Gráfico del control de la bomba 3 en relación a la bomba 2

Por otra parte, se ve como al arrancar el motor y la bomba 2 (B2), se activa la bomba 3 (B3) tal y como se ha configurado, ver Imagen 18.

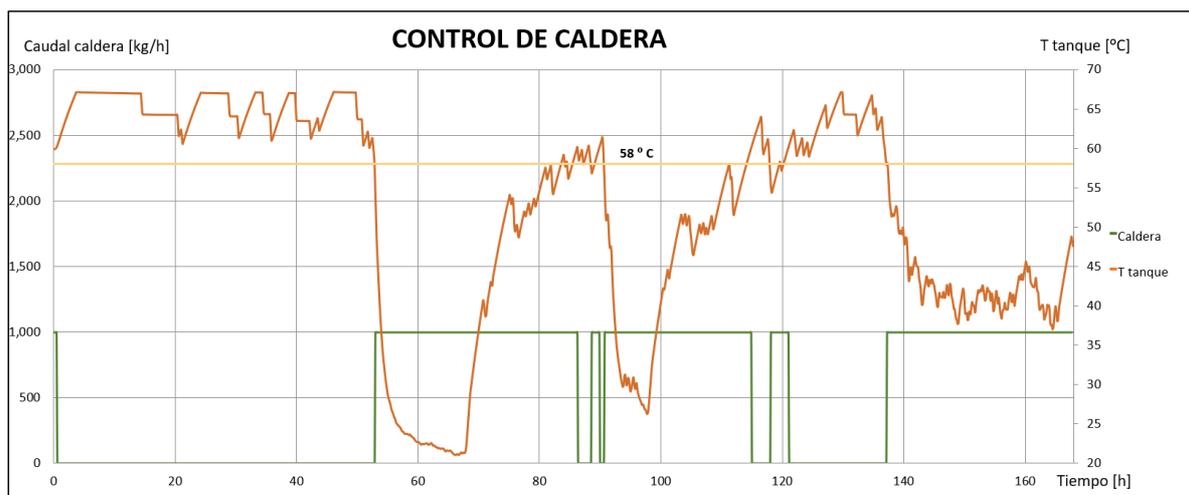


Imagen 19. Gráfico del control de caldera en relación a la temperatura del tanque.

Además, se puede comprobar cómo, efectivamente, la caldera entra a trabajar cuando la temperatura del depósito baja de 58°C, ver Imagen 19.

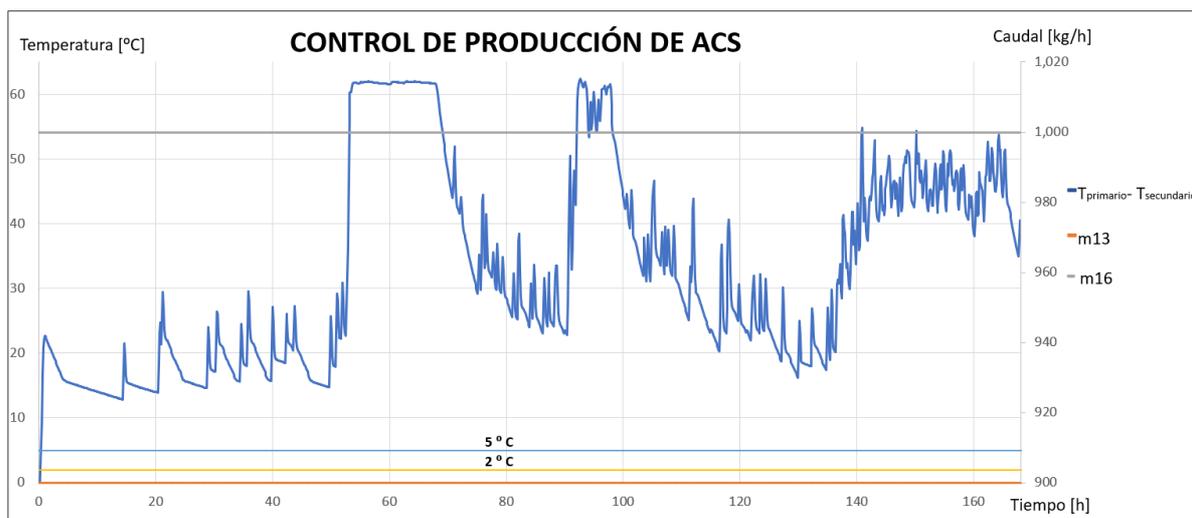


Imagen 20. Gráfico del control de la producción de ACS en relación a la diferencia de temperaturas entre primario y secundario

Por último, se comprueba como la producción de ACS no cesa en el espacio de tiempo calculado debido a que la diferencia de temperaturas entre el circuito primario y el secundario es siempre mayor que 5°C (Imagen 20). Esto puede deberse a una demanda sobredimensionada para la potencia diseñada.

4.1.2 Variables termodinámicas dinámicas

Los siguientes gráficos muestran el dinamismo de la instalación y los modos de funcionamiento de los equipos de generación. Por una parte los valores energéticos del fuel y combustible de la caldera (Imagen 21) y por otra parte, los valores del motor de cogeneración (Imagen 22) obtenidos de la simulación de TRNSYS.

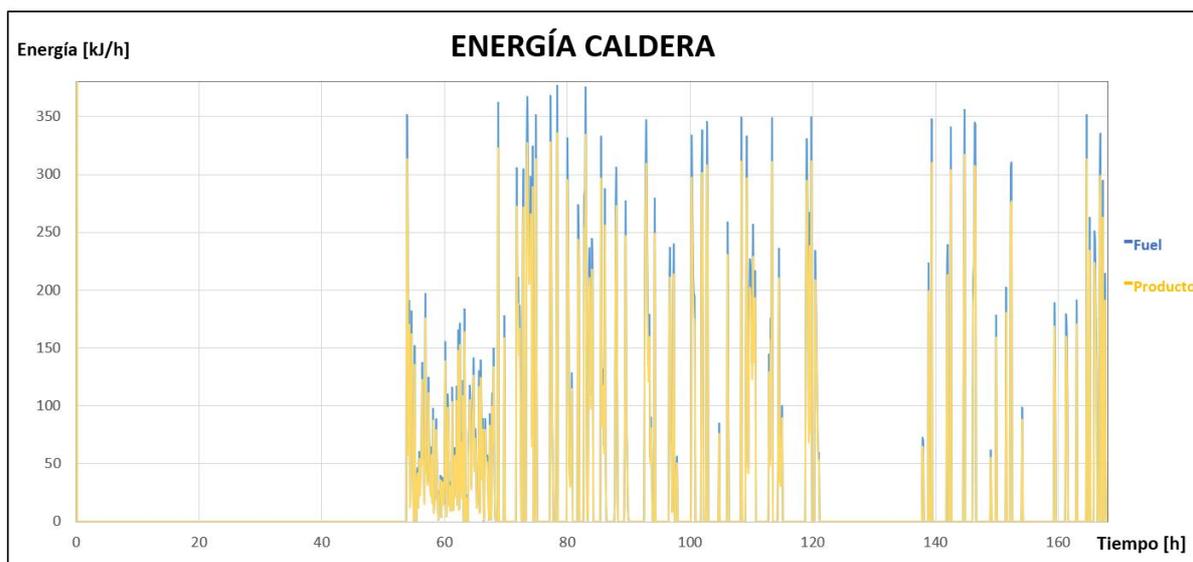


Imagen 21. Gráfico de los valores energéticos del fuel y producto de la caldera

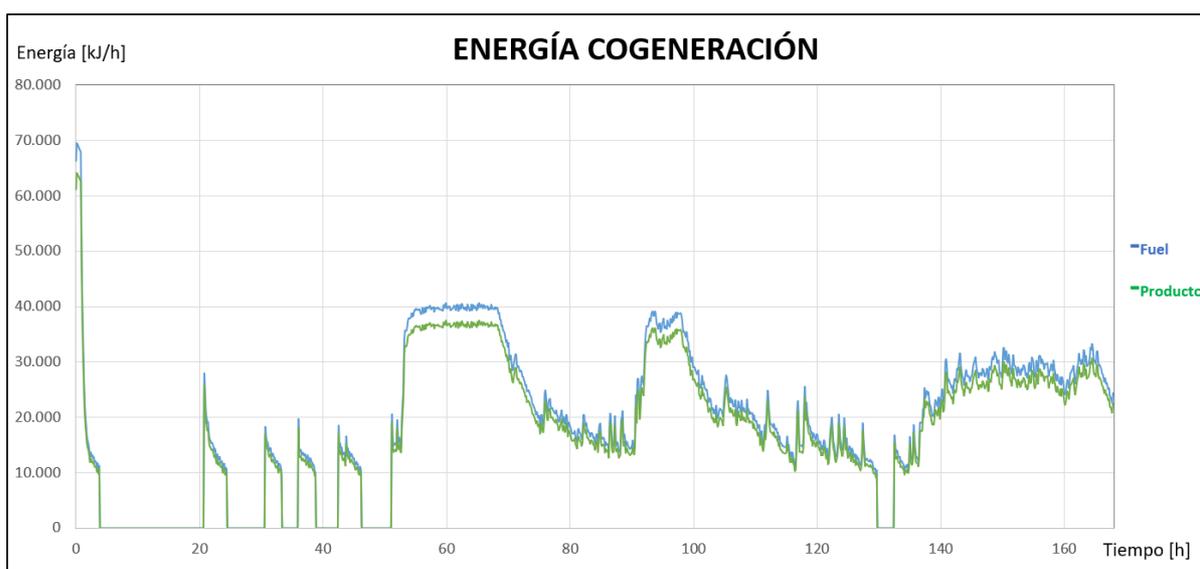


Imagen 22. Gráfico de los valores energéticos del fuel y producto del motor de cogeneración

Se comprueba como en ambos equipos (CAL. COG), los flujos fuel son mayores que los flujos producto. Además, estos gráficos también demuestran el control diseñado de la instalación debido a que las horas de más demanda de ACS coinciden con un mayor consumo de combustible por parte de los dos equipos y por lo tanto con una mayor generación de energía.

4.1.3 Variables exergéticas dinámicas

A partir de los datos obtenidos de la simulación de TRNSYS se pueden calcular los flujos exergéticos a lo largo de la instalación. Los siguientes gráficos son análogos a los anteriores, pero en términos exergéticos. Ver Imagen 23 e Imagen 27.

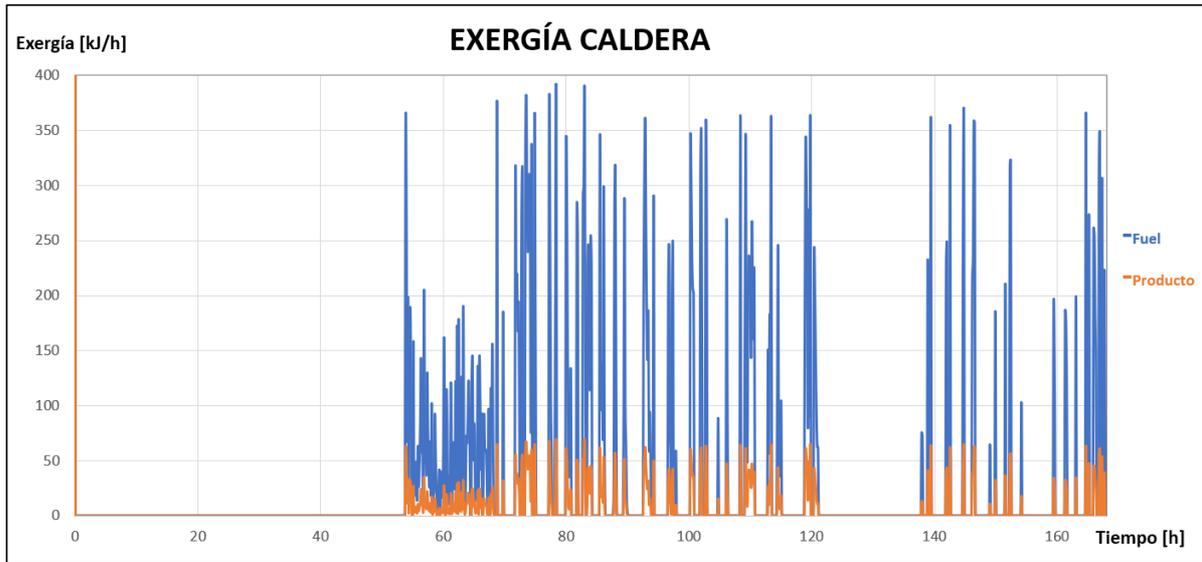


Imagen 23. Gráfico de valores exergéticos del fuel y producto de la caldera

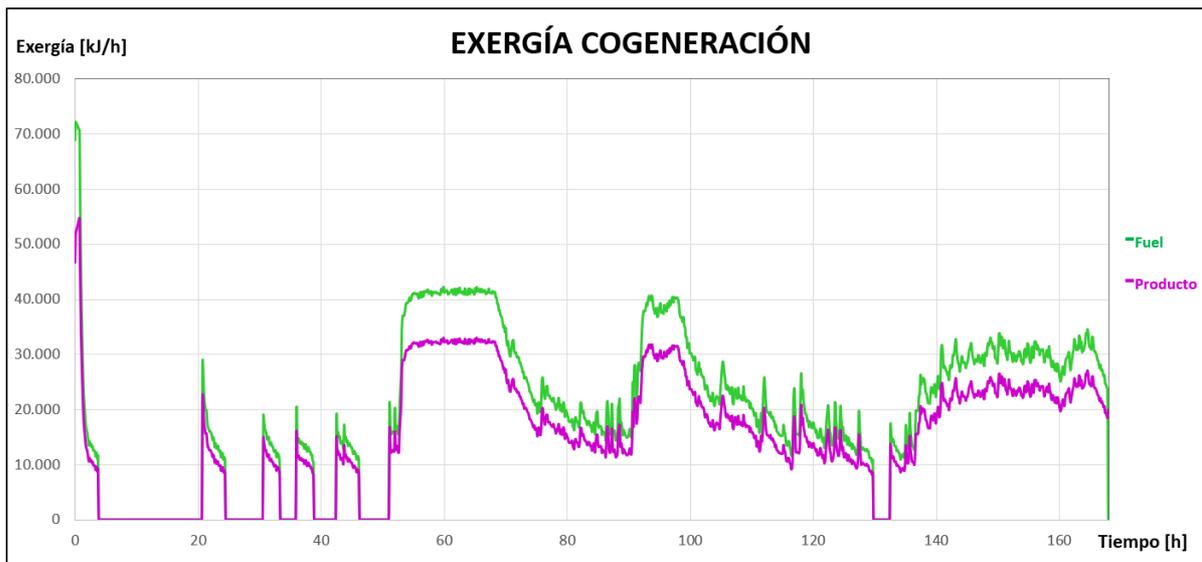


Imagen 24. Gráfico de valores exergéticos del fuel y producto del motor de cogeneración

4.2 RESULTADOS TERMOECONÓMICOS

En base a la metodología explicada en el apartado anterior, obtenemos los siguientes resultados, ver Tabla 2 y Tabla 3:

Tabla 2 Comparativa entre rendimientos energéticos y exergéticos

Nº	EQUIPO	η_{EN}	η_{EX}
1	CAL	89%	2%
2	COG	92%	89%
3	CI1	100%	100%
4	CI2	100%	100%
5	CH	95%	95%
6	V1	100%	100%
7	V2	100%	100%
8	INT	100%	52%
9	DACS	89%	67%

Tabla 3. Resultados globales de cada equipo

Nº	EQUIPO	ESTUDIO TERMOECONÓMICO		
		FUEL [MJ]	PRODUCTO [MJ]	KD
1	CAL	3295	77	42.71
2	COG	4457835	3962445	1.13
3	CI1	10793942	10787794	1.00
4	CI2	10160766	10158332	1.00
5	CH	627028	592916	1.06
6	V1	6338818	6338794	1.00
7	V2	5717839	5716568	1.00
8	INT	620955	321846	1.93
9	DACS	339287	227493	1.49

El siguiente paso consiste en aplicar las fórmulas termoeconómicas definidas al principio del trabajo para poder obtener los costes exergéticos unitarios relacionados con cada equipo. Estos costes van más allá que los resultados exergéticos y describen las interacciones que existen entre los componentes gracias a la definición de la estructura productiva.

- Así, el coste exergético unitario de los fueles de los equipos representa el consumo de recursos requeridos para llegar a ese punto de la cadena energética
- El coste exergético unitario de los productos de los equipos representa el consumo de recursos hasta llegar a ese equipo y las irreversibilidades internas del componente en estudio.

Se puede dar un paso más allá de los costes exergéticos e incluir los costes económicos unitarios del consumo de recursos (coste del combustible y de la electricidad) y los costes de adquisición y mantenimiento de cada componente. Así se obtendrían los resultados en base a los costes exergoeconómicos.

Si en vez de unidades económicas se trabajar con unidades de emisiones de GEI, se obtendrían los costes exergoambientales.

4.3 RESULTADOS DEL DIAGNÓSTICO TERMOECONÓMICO

Tal y como se ha comentado, el diagnóstico termoeconómico tiene como objetivo detectar anomalías y cuantificar los efectos en el incremento de consumo exergético total en la instalación.

Para ello:

- Se ha incorporado deliberadamente un error en el compensador hidráulico eliminado aislamiento del mismo.
- Se ha mantenido el producto final constante (el consumo de ACS) para poder comparar ambas instalaciones.
- Se han mantenido las mismas condiciones ambientales (misma temperatura ambiental y misma temperatura de red), así como misma calidad de fuel (mismo PCI).

Cuando se comparan la instalación de referencia (sin fallos) respecto a la instalación anómala, se detecta un aumento en el consumo de recursos externos (consumo de combustible, ΔF) que indica la aparición de alguna anomalía, ver Tabla 4.

Tabla 4. Aumento de consumo de combustible en el caso con anomalía respecto al caso de referencia.

		CASO REFERENC	CASO FALLO	ΔF [MJ]
		FUEL [MJ]	FUEL [MJ]	
1	CAL	3295	4273	978
2	COG	4457835	5740134	760555
			ΔF total	761533

- Como se comprueba, tanto el consumo de la caldera como el consumo de la cogeneración se aumentan al haber una anomalía en el sistema. Esto se debe a que estos equipos se deben adaptar a las nuevas condiciones anómalas del sistema para poder seguir aportando la misma cantidad de ACS a las personas usuarias.

Si se comparan los rendimientos exergéticos y los consumos unitarios de los equipos en ambas condiciones podemos obtener las siguientes conclusiones, ver Tabla 5.

Tabla 5 Comparación de los consumos en el caso de referencia y el caso anómalo

Nº	EQUIPO	η_{EX}		KD	
		REFERENCIA	FALLO	REFERENCIA	FALLO
1	CAL	2%	6%	42.71	17.02
2	COG	89%	82%	1.13	1.22
3	CI1	100%	100%	1.00	1.00
4	CI2	100%	100%	1.00	1.00
5	CH	95%	91%	1.06	1.10
6	V1	100%	100%	1.00	1.00
7	V2	100%	100%	1.00	1.00
8	INT	52%	52%	1.93	1.93
9	DACS	67%	67%	1.49	1.49

5 CONCLUSIONES

El diagnóstico se basa en descubrir las anomalías que ocurren en los componentes, es decir, la degradación de su comportamiento que provoca variaciones en la eficiencia general. Las metodologías termoeconómicas representan una poderosa herramienta que ayuda a detectar

posibles anomalías, localizarlas, cuantificar sus efectos sobre los componentes y comprender las causas. Así, tal y como se ha visto en este trabajo existen varios estudios en relación con diferentes metodologías de diagnóstico termoeconómico, ya que es una herramienta útil para el mantenimiento de instalaciones térmicas.

Sin embargo, existen pocos trabajos realizados en el ámbito de las instalaciones de los edificios. Así, en este trabajo se han analizado los estudios de diagnóstico termoeconómico aplicados a instalaciones térmicas, con el fin de observar los avances realizados en otras investigaciones, así como los problemas que hayan podido surgir en las aplicaciones. De esta manera, se podrá estudiar una mejor aplicación del diagnóstico termoeconómico en instalaciones térmicas, que es, al fin y al cabo, la finalidad de esta investigación.

Para ello, antes de realizar un diagnóstico en sí, se ha analizado y validado una simulación en TRNSYS que representa una configuración de la instalación del LCCE. Una vez incluido el control y las demandas de ACS correspondientes se han analizado los datos termodinámicos y se ha comparado un estudio energético respecto al exergético.

- Si comparamos los resultados obtenidos a partir del estudio energético, comprobamos que los rendimientos son muy elevados y cercanos a la unidad.
- Sin embargo, los rendimientos exergéticos varían de forma significativa:
 - El rendimiento de la caldera disminuye notablemente cuando se trata de variables exergéticas. Esto se debe a que se usa un combustible fósil de alta calidad (de un factor de calidad del 1.04) para generar calor de baja calidad (factor de calidad muy bajo). Por ello, esa transformación energética se penaliza hasta llegar a valores de rendimientos del 2 %.
 - En los equipos de cogeneración esa distinción no es tan notable. Al fin y al cabo, se usa combustible fósil para generar 2 productos: calor (de baja exergía) y electricidad (100 % exergía, esto es, factor de calidad de 1). Por lo tanto, aunque generar calor desde un combustible esté penalizado, se compensa con la generación de electricidad.
 - Se puede decir algo parecido respecto al intercambiador (INT) de calor, donde los niveles térmicos de generación se penalizan en términos exergéticos.
 - En el tanque de acumulación de ACS (DACs) se destruye exergía por mezclar flujos a distinta temperatura (hecho que no se considera en un análisis basado exclusivamente en el primer principio de la termodinámica).

De los resultados exergéticos se han calculado los consumos exergéticos unitarios de cada equipo, definidos como el ratio entre el Fuel y el Producto de cada equipo.

- Como era de esperar, los equipos que mayor consumo exergético unitario tienen son aquellos con menor rendimiento exergético debido a las irreversibilidades internas del proceso de transformación energética.

A continuación, se ha incorporado deliberadamente una anomalía en el compensador hidráulico y se han analizado sus efectos en términos de consumos de recursos (ya que la demanda de ACS se ha mantenido constante). El aumento del consumo en fuel es de 761533 MJ respecto al consumo de referencia.

También se han comparado los rendimientos exergéticos y los consumos unitarios de los equipos en ambas condiciones:

- Se puede comprobar que únicamente los equipos aguas arriba de la anomalía tienen consumos exergéticos unitarios distintos respecto a la situación de referencia. Esto es, a los equipos aguas abajo (V1, V2, INT, DACs) no les afecta el hecho que haya anomalías, ya que

este sistema se puede considerar un sistema secuencial y para mantener la misma cantidad de ACS solo necesitan la misma cantidad de recursos.

- El equipo anómalo (CH) tiene un aumento en el consumo exergético unitario. Esto era de esperar ya que la anomalía (la pérdida de aislamiento) hace que deba de consumir más para conseguir el mismo producto respecto a la situación de referencia,
- Los equipos que se distinguen en la forma de trabajar son los que están por delante del equipo anómalo (CAL, COG). A estos equipos les suceden dos cosas diversas:
 - El consumo exergético unitario de la caldera (CAL) disminuye respecto a la referencia. Esto es, sucede una “buenafunción”
 - El consumo exergético unitario del motor de cogeneración (COG) aumenta respecto a la referencia. Esto es, sucede una “malfunción”
- Para poder entender el significado de las “malfunciones” y “buenasfunciones” es necesario comprender que existen una serie de acciones inducidas por la anomalía que hacen que los equipos aguas arriba tengan que adaptarse a las nuevas condiciones. Esto puede hacer que se muevan a lo largo de su curva de funcionamiento (la cual no es lineal) y lleguen a un punto de mejor funcionamiento (o peor). El hecho de que el consumo unitario varíe no significa que tengan una anomalía, sino que tengan efectos inducidos.

La clave del diagnóstico termoeconómico se basa en discriminar entre estos efectos inducidos por las anomalías de otros equipos y los efectos producidos por los fallos en los propios equipos.

Si no se hace eso, equipos como la caldera (CAL) o el motor de cogeneración (COG) pueden considerarse erróneamente como equipos anómalos (aunque no se les haya introducido ninguna anomalía).

Por ello, en este trabajo se ha demostrado la necesidad de ir más allá en el diagnóstico termoeconómico y no basarse exclusivamente en el aumento del consumo de combustible.

6 CONSIDERACIONES FINALES

Hay que señalar que debido a problemas en la implementación de la demanda en la instalación del LCCE no se han podido obtener los datos de la simulación de la instalación deseada. Sin embargo, al haber podido simular esa misma instalación en el software TRNSYS, se ha podido desarrollar la aplicación del diagnóstico termoeconómico en instalaciones térmicas, aunque de una manera puramente virtual.

Es por ello, por lo que el trabajo realizado sí que ha sido útil para el objetivo deseado, pero se seguirá trabajando en la investigación de este campo para poder llevar su aplicación a instalaciones reales.

6.1 MÉRITOS OBTENIDOS DE ESTE TRABAJO

Cabe resaltar, que este trabajo ha sido aceptado y financiado mediante una beca Iker del Gobierno Vasco. Asimismo, que este trabajo se ha presentado en un congreso internacional con revisión a pares:

- Título: Instalazio termikoen Termoeconomia-diagnostikoa
- Autores: Prol-Godoy I., Picallo-Perez A., Sala-Lizarraga J.M
- Congreso: IkerGazte 2021 Nazioarteko ikerketa euskaraz (Gasteiz, Spain)

Estos hechos le dan validez y difusión al trabajo realizado hasta la fecha.

7 REFERENCIAS

1. Comisión Europea- Departamento de Energía, La eficiencia energética de los edificios, Bruselas, 2020.
2. R.K. Mehra, J. Peschon, An innovations approach to fault detection and diagnosis in dynamic systems, Automatica, Volume 7, Issue 5, 1971.
3. A. Toffolo, A. Lazzaretto, A New Thermoeconomic Method for the Location of Causes of Malfunctions in Energy Systems, Journal of Energy Resources Technology 129, 2007, 1-9.
4. Sala-Lizarraga, J. M., & Picallo-Perez, A. Exergy Analysis and Thermoeconomics of Buildings: Design and Analysis for Sustainable Energy Systems. Butterworth-Heinemann, 2019.
5. A. Valero, M.A. Lozano, M. Muñoz, A general theory of exergy saving. Part I: On the exergetic cost. AES Vol 2-3, ASME Book 100236, 193-198, 1986.
6. A. Valero, M.A. Lozano, M. Muñoz, A general theory of exergy saving. Part II: On the thermoeconomic cost. AES Vol 2-3, ASME Book 100236, 193-198, 1986
7. A. Valero, M.A. Lozano, M. Muñoz, A general theory of exergy saving. Part III: Energy saving and thermoeconomics, Computer-Aided engineering and energy system. AES Vol 2-3, ASME Book 100236, 193-198, 1986
8. A. Valero, M.A. Lozano, C. Torres, On Causality in Organized Energy Systems III Theory of Perturbations, A Future for Energy, Proceedings of the International Symposium Flowers'90, S.S. Stecco y M.J. Moran (eds.), Pergamon Press, Nueva York, 1990.
9. Lozano MA, Bartolomé JJ, Valero A, Reini M. Thermoeconomic diagnosis of energy systems. In: Flowers 94, Florence World Energy Research Symposium, Florence, Italy, 1994. p. 149-56.
10. M. Reini, A. Lazzaretto, A. Macor, Average Structural and Marginal Costs as Result of a Unified Formulation of Thermoeconomic Problem, Proceedings of Second Law Analysis of Energy Systems: Towards the 21st Century, E Sciubba y J.J. Moran (eds.), Roma, 1995, 307-323.
11. C. Torres, A. Valero, L. Serra, J. Royo, Structural Theory of Thermoeconomic Diagnosis. Part I-On Malfunction and Dysfunction Analysis, Proceedings of ECOS 1999, M. Ishida, G. Tsatsaronis, M.J. Moran y H.Kataoka, (eds.) Tokyo, junio 8-10, 1999, 368-373.
12. V. Verda, L. Serra, A. Valero, Thermoeconomic Diagnosis Zooming Strategy Applied to Highly Complex Energy Systems Part I- Detection and Localization of Anomalies, ASME Paper IMECE 2002-33183, 2002.
13. V. Verda, L. Serra, A. Valero, Thermoeconomic Diagnosis Zooming Strategy Applied to Highly Complex Energy Systems Part II- On the Choice of the Productive Structure, ASME Paper IMECE 2002-33185, 2002.
14. Valero, A., Torres, C., and Lerch, F., Structural Theory and Thermoeconomic Diagnosis. Part III: Intrinsic and Induced Malfunctions, ECOS 99, June 8-10, Tokyo, Japan, 1999.
15. A. Lazzaretto, A. Toffolo, A New Thermoeconomic Method for the Location of Causes of Malfunctions in Energy Systems, Journal of Energy Resources Technology 129, 2007, 1-9.
16. G. Tsatsaronis, T. Morosuk, Advanced thermodynamic (exergetic) analysis, 6th European Thermal Sciences Conference, Journal of Physics: Conference Series 395, 2012.
17. J.J. Pacheco-Ibarra, Metodologías de diagnóstico termoeconómico de sistemas energéticos V 7. 1st ed. Saarbrücken, Alemania: Editorial Académica Española, 2011
18. S. Usón, A. Valero, Thermoeconomic diagnosis for improving the operation of energy intensive systems: Comparison of methods, Applied Energy 88, 2011, 699-711.
19. J.A. Remiro, Integración de Metodologías de Diagnóstico de la Operación de Centrales Eléctricas, Tesis Doctoral, Universidad de Zaragoza, 2005.
20. M.A. Lozano, Metodología para el Análisis Exergético de Calderas de Vapor en Centrales Termoeléctricas, Tesis Doctoral, Universidad de Zaragoza, 1987.



21. A. Lazzaretto, A. Toffolo, A Critical Review of the Thermo-economic Diagnosis Methodologies for the Location of causes of malfunctions in Energy Systems, *Journal of Energy Resources Technology* 123 ,2006, 335-342.
22. G. Tsatsaronis, Strengths and limitations of exergy analysis en A. Bejan y E. Mamut, (eds.), *Thermodynamic optimization of complex energy systems*, Kluwer Academic Press, Dordrecht, 1999.
23. G. Tsatsaronis, G., M.H. Park, On avoidable and unavoidable exergy destructions and investment costs in thermal systems. *Energy Conversion and Management* 43, 2002, 1259-1270.
24. C. Torres, A. Valero, *Thermo-economic Analysis*. Universidad de Zaragoza, 2015
25. A. Piacentino, Innovative thermo-economic diagnosis of multiple faults in air conditioning units: methodological improvements and increased reliability of results, *International Journal of Refrigeration*, 2013.
26. A. Piacentino, P. Catrini, Assessing the Robustness of Thermo-economic Diagnosis of Fouled Evaporators: Sensitivity Analysis of the Exergetic performance of Direct Expansion Coils, *Entropy* marzo, 2016.
27. Ommen, T., Sigthorsson, O., & Elmegaard, B. Two Thermo-economic Diagnosis Methods Applied to Representative Operating Data of a Commercial Transcritical Refrigeration Plant. *Entropy*, 19(2), 69, 2017.
28. A. Picallo, J.M. Sala, E. Iribar, M. Odriozola, L Portillo, Application of the malfunction thermo-economic diagnosis to a dynamic heating and DHW facility for fault detection, *Energy and Buildings* 135, 2016, 385-397.
29. A. Picallo, J M Sala, G Tsatsaronis, S. Sayadi, Dynamic Advanced Exergy Analysis in Building Heating Systems Part 1 Dynamic modeling and avoidable and unavoidable assessment. *Entropy*, 22-32, 2019.
30. A. Picallo, A. Lazzaretto, J.M. Sala, Overview and implementation of dynamic thermo-economic & diagnosis analyses in HVAC&R systems, *Energy and Buildings*, 2020.
31. A.Picallo, J.M.Sala ,E.Iribar, *Exergia: herramienta para promover la eficiencia energética en los edificios*, Elhuyar, 2020.
32. A. Valero, C. Torres, *Thermo-economic analysis*, Center of Research for Energy Resources and Consumption, Centro Politecnico Superior, Universidad de Zaragoza, Spain, 2006.
33. TRNSYS. Transient System Simulation Tool. *What is TRNSYS?* Recuperado el 21 de junio de <http://www.TRNSYS.com/>
34. UNIVERSITAT KASSEL. *DHW-calc*. Recuperado el 21 de junio de <https://www.uni-kassel.de/uni/>

8 ANEXO I: DESCRIPCIÓN DE LAS TAREAS

Para poder conseguir los objetivos de la investigación se han desarrollado las siguientes tareas:

- **Tarea 0** Coordinar y gestionar el trabajo
- **Tarea 1** Analizar las metodologías de diagnóstico de las instalaciones térmicas, realizando una lectura bibliográfica lo más amplia posible (sobre todo acerca de las instalaciones de calefacción y ACS de edificios terciarios y residencias).
- **Tarea 2** Conocer los inicios del diagnóstico termo-económico y analizar el procedimiento para su aplicación.
- **Tarea 3** Analizar el funcionamiento de la instalación experimental del LCCE, aprender la metodología y diseñar e implementar los ensayos que se van a realizar.
- **Tarea 4** Aplicar el diagnóstico al ensayo para el cual se deberá obtener el modelo térmico de cada equipo en forma de funcionamiento sin anomalías.

- **Tarea 5** Introducir una anomalía en el equipo seleccionado. Volver a realizar el ensayo experimental con anomalías y aplicar y evaluar el diagnóstico termoeconómico para analizar y cuantificar los efectos derivados de la anomalía.
- **Tarea 6** Definir las principales conclusiones y debates para el desarrollo del procedimiento del diagnóstico termoeconómico.
- **Tarea 7** Redactar del documento de memoria del TFM.
- **Tarea 8** Obtener y redactar las conclusiones.
- **Tarea 9** Realizar y preparar la presentación oral del TFM.

8.1 DIAGRAMA DE GANTT

Se muestra en la Imagen 25 el diagrama de Gantt considerando el desglose de las tareas previamente descritas. Cada tarea se vincula a un periodo de horas requerido para llevar a cabo el trabajo. Se han dedicado un total de 412 horas.

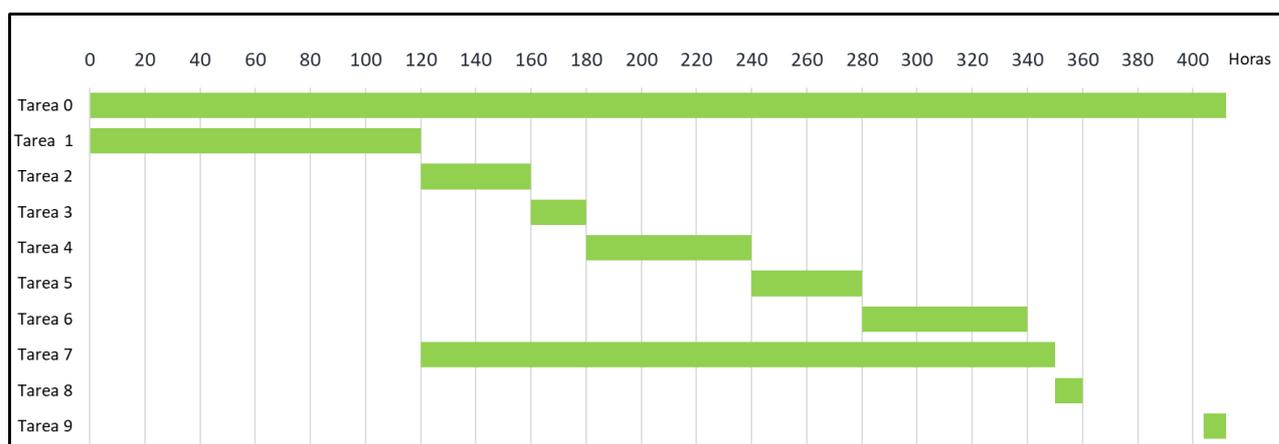


Imagen 25. Diagrama de GANTT del Trabajo de Fin de Máster

9 ANEXO II: DESCRIPCIÓN DEL PRESUPUESTO

En este apartado se recogen todos los desembolsos derivados del desarrollo de este trabajo, que se dividen en dos grupos: horas internas y gastos.

9.1 HORAS INTERNAS

La Tabla 6 muestra una estimación de las horas trabajadas por las personas implicadas en este trabajo.

Tabla 6. Costes de las horas internas

	Nº de horas	Coste por h [€/h]	Coste [€]
Directora	65	40	2.600
Codirector	10	40	400
Alumna	412	15	6.180
TOTAL			9.180 €

9.2 GASTOS

Debido a la situación del COVID-19 en el presente curso académico, algunas de las reuniones se

han realizado online, por lo que no han supuesto ningún gasto en cuanto a movilidad. Sin embargo, algunas de las reuniones, así como gran parte del desarrollo del proyecto se han realizado en el Laboratorio de Control de Calidad en la Edificación del Gobierno Vasco. En la Tabla 7 se muestran los gastos que esto ha supuesto.

Tabla 7. Gastos

	Nº de viajes	Coste por viaje [km/viaje]	Coste por distancia [€/km]	Coste [€]
Directora	5	124,8	0,6	374,4
Codirector	2	124,8	0,6	149,76
Alumna	25	5,6	0,6	84
TOTAL				608,16 €

10 ANEXO III: INSTALACIÓN DEL LABORATORIO DE CONTROL DE CALIDAD EN EDIFICACIÓN DEL GOBIERNO VASCO

A continuación, se muestran unas imágenes de la instalación del laboratorio del LCCE (Imagen 26) y de los equipos utilizados para el diseño de la instalación:

- Motor de cogeneración (Imagen 27)
- Caldera de condensación (Imagen 28)
- Bomba (Imagen 29)
- Depósito de acumulación (Imagen 30)



Imagen 26. Laboratorio de Control de la Calidad en Edificación



Imagen 27. Motor de cogeneración



Imagen 28. Caldera de condensación

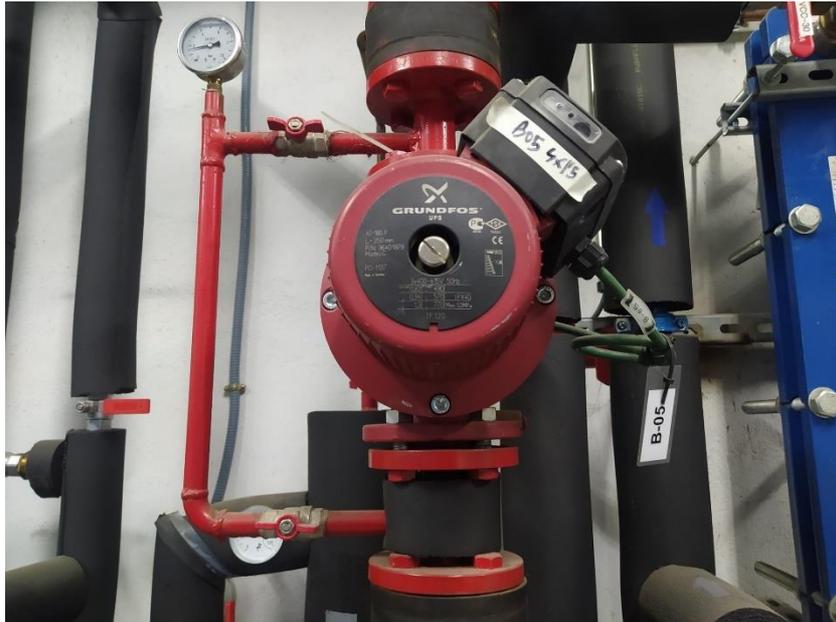


Imagen 29. Bomba



Imagen 30. Depósito de acumulación