

MÁSTER UNIVERSITARIO EN

**Investigación en Eficiencia Energética y Sostenibilidad en
Industria, Transporte, Edificación y Urbanismo**

TRABAJO FIN DE MÁSTER

**ANÁLISIS TERMEOECONÓMICO EN LA
INSTALACIÓN EXPERIMENTAL DEL LCCE**

Estudiante

Bermejo Ugarte, Leire

Director/Directora

Picallo Pérez, Ana

Departamento

Ingeniería Energética

Curso académico

2021/2022

Bilbao, 2022



AGRADECIMIENTOS

Me gustaría agradecer a todos los que me han ayudado a llevar a cabo este proyecto. Primero, gracias a mi tutora Ana Picallo y a la doctoranda Irati Prol por su orientación y aportes indispensables para el desarrollo de este trabajo. En segundo lugar, agradecer a la planta experimental del LCCE por concederme la oportunidad de utilizar su laboratorio para la adquisición de datos. Gracias también al profesor JM Sala Lizarraga por introducirme los conocimientos básicos necesarios para realizar este trabajo.

Gracias a los de casa por estar siempre apoyándome y a mis amigas por todos los gestos de apoyo y ánimo recibidos. Y por último a los compañeros más cercanos de clase por compartir momentos de estrés y de diversión a lo largo de todo el curso.

eman ta zabal zazu



Universidad
del País Vasco

Euskal Herriko
Unibertsitatea

BILBOKO
INGENIARITZA ESKOLA

ESCUELA
DE INGENIERÍA DE BILBAO



RESUMEN

La demanda energética aumenta sin cesar repercutiendo tanto en los recursos como en la emisión de gases contaminantes. Esta preocupación por el ahorro energético ha derivado en desarrollos de diferentes técnicas para el mantenimiento de las instalaciones térmicas en los edificios, con el objetivo de garantizar el buen funcionamiento de los equipos y sistemas. Mediante la termoeconomía se combina el análisis termodinámico con el económico, calculando así el coste de los recursos utilizados, la inversión en los equipos y los costes de operación y mantenimiento. Para localizar las pérdidas en la utilidad de la energía se realiza un diagnóstico termoeconómico, que descubre el funcionamiento anormal de los equipos y los cuantifica.

Aunque cada vez son más frecuentes los análisis termoeconómicos, todavía no son métodos del todo recurrentes, menos aún la termoeconomía con fines de diagnóstico y mantenimiento preventivo en el ámbito de las instalaciones de viviendas.

Este trabajo diseña y ensaya experimentalmente una instalación de un edificio situado en Burgos en el Laboratorio de Control de Calidad en la Edificación del Gobierno Vasco. La instalación consta de una bomba de calor aerotérmica con una caldera de gas auxiliar para abastecer la demanda de calefacción a lo largo de dos semanas de invierno. El control se ha diseñado siguiendo las pautas definidas en el laboratorio. Tras la recolecta de datos y los correspondientes análisis energéticos y exergéticos, los resultados se han analizado por medio de la termoeconomía, para poder tener un estudio más profundo centrado en las irreversibilidades. Así, mediante el análisis termoeconómico se han calculado los costes asociados a cada punto del sistema y de los equipos de la instalación. Los resultados muestran que la instalación podría prescindir de la caldera y trabajar exclusivamente con la bomba de calor sin apenas sacrificar el confort térmico interior, ahorrando un 3% en 12 días. Asimismo, se calcula que el coste de calefacción debido exclusivamente al consumo de combustible es de 195,27 €/ (12 días) y el coste considerando la adquisición, operación y mantenimiento de los equipos es de 244,02 €/ (12 días).

Palabras Clave: Termoeconomía, diagnóstico, irreversibilidades



ABSTRACT

Energy demand is constantly increasing, affecting both resources and the emission of pollutant gases. This concern for energy saving has led to the development of different techniques for the maintenance of thermal installations in buildings, with the aim of guaranteeing the proper functioning of equipment and systems. Thermoeconomics combines thermodynamic analysis with economic analysis, thus calculating the cost of the resources used, the investment in the equipment and the operating and maintenance costs. In order to locate the losses in energy use, a thermo-economic diagnosis is carried out, which discovers the abnormal operation of the equipment and quantifies them.

Although thermo-economic analyses are becoming more and more frequent, they are not yet fully recurrent methods, let alone thermo-economics for diagnostic and preventive maintenance purposes in the field of residential installations.

This work designs and experimentally tests an installation in a building located in Burgos at the Building Quality Control Laboratory of the Basque Government. The installation consists of an aerothermal heat pump with an auxiliary gas boiler to supply the heating demand for two weeks in winter. The control has been designed following the guidelines defined in the laboratory. After data collection and the corresponding energy and exergy analyses, the results have been analysed by means of thermoeconomics, in order to have a more in-depth study focused on irreversibilities. Thus, by means of the thermo-economic analysis, the costs associated with each point of the system and the equipment of the installation have been calculated. The results show that the installation could dispense with the boiler and work exclusively with the heat pump with hardly any sacrifice in indoor thermal comfort, saving 3% in 12 days. It is also calculated that the heating cost due to fuel consumption alone is 195.27 €/ (12 days) and the cost considering the purchase, operation and maintenance of the equipment is 244.02 €/ (12 days).

Key Words: Thermoeconomic, diagnostic, irreversibilities.



LABURPENA

Energia-eskaria etengabe handitzen da, eta eragina du bai baliabideetan, bai gas kutsatzaileen isurketa. Energia aurrezteko kezka horren ondorioz, eraikinetako instalazio termikoak mantentzeko hainbat teknika garatu dira, ekipoen eta sistemen funtzionamendu egokia bermatzeko. Termoekonomiaren bidez, analisi termodinamiko eta ekonomikoa konbinatzen dira, eta, horrela, erabilitako baliabideen kostua, ekipoetan egindako inbertsioa eta eragiketa- eta mantentze- kostuak kalkulatu dira. Energiaren erabilgarritasunaren galerak aurkitzeko diagnostiko termoekonomiko bat egiten da, ekipoen funtzionamendu anormala aurkitu eta kuantifikatzen dituen.

Analisi termoekonomikoak gero eta ohikoagoak diren arren, oraindik ez dira erabat errepikatutako metodoak, are gutxiago etxebizitza-instalazioen eremuan diagnostiko eta mantentze prebentiboa egiteko termoeconomia.

Lan honek esperimentalki diseinatu eta entseatu du eraikin baten instalazio bat Burgosen, Eusko Jaurlaritzaren Eraikuntzaren Kalitatea Kontrolatzeko Laborategian. Instalazioak bero-ponpa aerotermiko bat du, gas-galdara osagarri batekin neguko bi astetan berokuntza-eskaria hornitzeko. Kontrola laborategian zehaztutako jarraibideen arabera diseinatu da. Datuak bildu eta dagozkien analisi energetiko eta exergetikoak egin ondoren, emaitzak termoekonomiaren bidez aztertu dira, atzeraezintasunetan oinarritutako azterketa sakonagoa izan ahal izateko. Hala, analisi termoekonomikoaren bidez, instalazioaren sistemako eta tresneriako puntu bakoitzari lotutako kostuak kalkulatu dira. Emaitzek erakusten dutenez, instalazioak galdara bazter dezake eta bero-ponparekin bakarrik lan egin dezake, barruko erosotasun termikoa ia sakrifikatu gabe, 12 egunetan %3 aurreztuz. Era berean, kalkulatu da berokuntzaren kostua, erregaiaren kontsumoagatik soilik, 195,27€/ (12egun) dela, eta ekipamenduen erosketa, eragiketa eta mantentzea kontuan hartuta kostua 244,02€/ (12egun) dela.

Hitz gakoak: Termoeconomia, diagnostikoa, atzeraezintasunak



ÍNDICE

1.	INTRODUCCIÓN	12
2.	CONTEXTO	13
2.1.	Estado actual de la planta experimental del LCCE	14
2.2.	Modo de funcionamiento.....	16
3.	OBJETIVOS Y ALCANCE DEL TRABAJO	16
4.	BENEFICIOS QUE APORTA EL TRABAJO.....	18
5.	ANÁLISIS DEL ESTADO DEL ARTE	18
5.1.	Conclusiones derivadas del estado del arte	22
6.	MÉTODOS PARA EL ANÁLISIS.....	22
7.	CONFIGURACIÓN DE LA INSTALACIÓN EXPERIMENTAL.	23
7.1.	Definición del sistema	24
7.2.	Configuración del control.	26
8.	RESULTADOS.....	28
8.1.	Resultados del ensayo.....	28
8.1.1.	Análisis de los datos brutos	30
8.1.2.	Análisis energético	31
8.1.3.	Análisis exergético	33
8.2.	Comprobación del sistema de control de BC.....	34
8.2.1.	Anomalía en la caldera	35
8.3.	Resultados termoeconómicos.	36
8.3.1.	Otros datos económicos	37
8.3.2.	Costes exergéticos	38
8.3.3.	Costes exergoeconómicos	39
9.	PROBLEMAS A LA HORA DE EJECUTAR EL ENSAYO.....	41
10.	DESCRIPCIÓN DE TAREAS, DIAGRAMA DE GANTT.	45



11.	DESCRIPCIÓN DEL PRESUPUESTO	46
11.1.	Horas trabajadas.....	46
11.2.	Depreciaciones	46



LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Características del edificio	23
Tabla 2. Estructura productiva de la instalación.....	25
Tabla 3. Estructura productiva final	26
Tabla 4. Etapas de funcionamiento de la instalación	27
Tabla 5. Condiciones de funcionamiento de la instalación	28
Tabla 6. Valores de energías y exergías de cada flujo	29
Tabla 7. Tiempo de funcionamiento de equipos generadores y de distribución.....	30
Tabla 8. Estructura productiva simplificada	36
Tabla 9 Costes económicos unitarios de los recursos de entrada.....	37
Tabla 10 Datos económicos de los componentes de la instalación.....	37
Tabla 11 Resultados exergéticos de los componentes de la instalación	38
Tabla 12 Resultados exergoeconómicos de los componentes de la instalación sin tener en cuenta los costes de Z	39
Tabla 13 Resultados exergoeconómicos de los componentes de la instalación teniendo en cuenta los costes de Z	40
Tabla 14 Resultados exergoeconómicos teniendo en cuenta los costes de Z con y sin caldera de apoyo	41
Tabla 15 Comparación del coste total del producto del sistema.....	41
Tabla 16. Coste de las horas trabajadas	46
Tabla 17. Coste de las depreciaciones del ensayo experimenta del laboratorio.....	46



LISTA DE IMÁGENES

Imagen 1 Esquema de la instalación experimental del LCCE	15
Imagen 2. Esquema de los flujos de la instalación.....	24
Imagen 3. Esquema final de los flujos de la instalación	25
Imagen 4. Relación de los sensores con los flujos establecidos.....	26
Imagen 5. Esquema del proceso de control	27
Imagen 6. Temperaturas del flujo caliente a lo largo del ensayo	28
Imagen 7. Temperaturas del flujo frío a lo largo del ensayo.....	29
Imagen 8. Demanda real de la instalación del laboratorio del LCCE	30
Imagen 9. Consumo de gas de la caldera.....	31
Imagen 10. Consumo de electricidad de la bomba de calor	31
Imagen 11. Gráfico de valores energéticos más el valor del rendimiento de la caldera	32
Imagen 12. Gráfico de valores energéticos y valor del COP de la BC.....	32
Imagen 13. Gráfico de valores exergéticos y rendimiento exergético de la caldera	33
Imagen 14. Gráfico de valores exergéticos del fuel y producto de BC.....	34
Imagen 15. Gráfico del control de la BC.....	34
Imagen 16. Gráfico del control de la caldera.....	35
Imagen 17. Gráfico del consumo de gas e incremento de temperatura en la caldera	35
Imagen 18. Estructura productiva simplificada	36
Imagen 19 Evolución de los Fuegos y Productos de cada equipo en la cadena energética	38
Imagen 20 Evolución de los costes exergéticos unitarios a lo largo de la cadena energética	39
Imagen 21. Diagrama de Gantt.....	45



ACRONIMOS Y SÍMBOLOS

ACRONIMOS	
ACS	Agua caliente sanitaria
BC	Bomba de calor
AER	Aerotermino
CI	Colector de impulso
CH	Compensador hidráulico
DV	Diverter

SYMBOLS	
Subíndice	
i	Numero de equipo
o	Estado de referencia
T	Total
P, F	Productos, fueles
Superíndice	
t	Transpuesta

MATEMÁTICAS Y FÍSICA	
b [kJ/kg]	Exergía
F	Vector de fueles
P	Vector de productos
I	Vector de irreversibilidades
k_p^*	Vector de costes exergéticos unitarios de los productos
c_f	Vector del coste monetario o exergoeconómico por unidad de fuel
$\langle KP \rangle$	Matriz de reparto de consumos unitarios
$ F\rangle, P\rangle, I\rangle$	Operaciones matriciales



MEMORIA

1. INTRODUCCIÓN

La demanda energética de un edificio es la energía para que en su interior un usuario pueda disfrutar de unas determinadas condiciones de confort. Esta energía incluye la necesaria para abastecer la calefacción, la refrigeración, la ventilación, la producción de agua caliente sanitaria (ACS) y la iluminación. La demanda energética de un edificio varía dependiendo de varios factores que básicamente se pueden clasificar en los siguientes: la ubicación y climatología, la función y uso final del edificio, el diseño del edificio, la calidad de la construcción y el comportamiento del usuario. Además, la demanda actual varía debido a los picos de demanda no controlados y a la capacidad de transmisión y distribución insuficiente en la red eléctrica, tal y como se menciona en el estudio de Miguel Chen et.al [1].

La demanda energética aumenta sin cesar, por ejemplo, de enero a junio de 2021 la demanda es un 5.1% superior a la registrada en el mismo periodo del año 2020, según la Red Eléctrica Española [2]. El incremento del consumo energético no solamente repercute en los recursos, sino también en la emisión de gases contaminantes hacia la atmósfera. El uso excesivo de algunas materias primas está produciendo su rápido agotamiento de tal manera que no tienen tiempo suficiente para regenerarse. Por este motivo, surge la gran apuesta hacia las energías de origen renovable, incluyendo también aquellas que permiten la reducción de gases de efecto invernadero. En el caso de los edificios, un frente abierto consiste en utilizar medidas pasivas, que se encargan de proporcionar el confort a cada vivienda sin la necesidad de ninguna fuente de alimentación.

Esta preocupación por el ahorro energético ha llevado a desarrollar diferentes técnicas. El mantenimiento de las instalaciones térmicas en los edificios es clave para poder garantizar el buen funcionamiento de los equipos y sistemas. Debido a esto, se realizan estudios y posteriores diagnósticos que permiten detectar y evaluar fallos. Un sistema de mantenimiento adecuado garantiza la mejora de los servicios eléctricos, proporcionando así un sistema preventivo sobre las bases del conocimiento del estado de los equipos. El comportamiento de cada equipo se describe mediante parámetros que representan los consumos de recursos provenientes de otros equipos o del entorno. Este mantenimiento ha ido variando con el paso de los años, según Torne et. al [3], el proceso de mantenimiento ha sido modificado para conseguir un sistema preventivo y predictivo. Las bases del mantenimiento consisten en inspeccionar los equipos a intervalos regulares y tomar acción para prevenir los fallos y evitar las consecuencias de las mismas. La ingeniería de mantenimiento permite, a partir del análisis y modelado de los resultados obtenidos en la ejecución, una renovación continua y establecer una estrategia. Por consiguiente, la programación y planificación de las actividades para garantizar una producción donde el coste económico sea el mínimo. Visto esto, un proceso de mantenimiento se caracteriza por las siguientes actividades:

- Planificación
- Programación
- Asignación de tareas/trabajo
- Ejecución
- Proceso de análisis

Alrededor de estos conceptos surge el concepto de la Termoeconomía. Tal y como se desarrolla en la Ref [4] , la Termoeconomía consiste en la combinación del análisis termodinámico con el económico, calculando el coste de los recursos utilizados, la inversión en los equipos y los costes de operación y mantenimiento. Con los datos obtenidos posibilita localizar y cuantificar las irreversibilidades. La irreversibilidad representa la pérdida en la utilidad de la energía que es destruida tanto internamente como externamente. Para localizar estas irreversibilidades se realiza el llamado diagnóstico termoeconómico, que tiene como objetivo descubrir e interpretar el funcionamiento anormal de los equipos y cuantificar su efecto en términos de aumento de consumo de recursos. Localiza y evalúa el incremento en el consumo de recursos debido a las anomalías de los equipos de la instalación, para ello, compara entre dos condiciones de operación: la condición de operación real y la correspondiente a la de referencia.

Así, se compararán las demandas y los consumos, entre el diseño y el mantenimiento y por último se podrán explorar las siguientes técnicas de mantenimiento de las instalaciones:

- Energía en los edificios: demandas vs consumo
 - Finalidad y funcionalidad de la envolvente y de las instalaciones térmicas.
 - Requerimiento de las instalaciones térmicas para el confort.
- Diseño vs mantenimiento
 - Necesidad de un buen mantenimiento para reducir el consumo a lo largo de la vida útil de la instalación.
 - Degradación de los equipos.
- Técnicas de mantenimiento de instalaciones térmicas.
 - Diagnóstico termoeconómico.

2. CONTEXTO

En Europa, el 40% de la energía consumida se consume en los edificios, provocando así más del 50% de las emisiones de CO_2 [5]. Estos consumos elevados han llevado al planeta a una situación de crisis climática. Con el fin de llegar a una solución, se ha establecido la Unión de la Energía, la cual establece metas para el año 2030, poniendo como año tope el 2050. Esta Unión de la Energía debe abarcar cinco dimensiones: seguridad energética, mercado interior de la energía, eficiencia energética, descarbonización e investigación, innovación y competitividad. En el Reglamento de (UE) 2018/1999 se habló por primera vez sobre la gobernanza de la Unión de la Energía y la Acción por el clima [6].

Hoy en día, la situación climática continúa siendo preocupante, por lo que, en mayo de 2021, el Boletín Oficial del Estado (BOE) [7] comunica la decisión de la Unión Europea de establecer una nueva estrategia teniendo como meta ser el primer continente neutro climáticamente para el año 2050. La obligación de limitar las emisiones condiciona las políticas sectoriales e implica cambios en los patrones de consumo. Así, entre las importantes transformaciones que se van a producir en el sistema energético y en la economía, está la mejora sistemática de la eficiencia energética de la economía. Concretamente, la previsión es que la intensidad energética primaria mejore anualmente un 3.5% hasta 2030, por lo que la dependencia energética del país se estima que descienda del 74% al 61% en el año 2030, como consecuencia de la caída de las importaciones de carbón y petróleo.



La ley debe asegurar la consecución de la neutralidad de las emisiones de gases de efecto invernadero antes del año 2050 y un sistema energético eficiente y renovable. Por lo tanto, se han establecido ciertas metas como las siguientes:

- Las emisiones del conjunto de la economía española en el año 2030 deberán reducirse en un 23% respecto a 1990.
- En el 2030 deberá alcanzarse el uso de energías renovables en un 42%.
- El sistema eléctrico deberá incluir al menos un 74% de energía de origen renovable.
- Mejorar la eficiencia energética disminuyendo el consumo de energía primaria en un 39.5%.

Por otro lado, la ley establece la obligación de que todos los sectores contribuyan con sus esfuerzos a la descarbonización, prevista para el año 2050. Para poder lograr un inmobiliario descarbonizado y altamente eficiente desde el punto de vista energético, y garantizar estrategias de renovación que aporten los avances necesarios para transformar los edificios existentes en edificios de consumo de energía casi nulo, se requiere que los Estados proporcionen un acceso igualitario a la financiación, en particular para los consumidores que sufren pobreza energética. Estas medidas están contenidas en la directiva UE [8].

Para abordar estas cuestiones es necesario utilizar sistemas de mantenimiento y prevención. Con ellas se pueden detectar las malfunciones de los equipos de una instalación. Estas anomalías conllevan un gasto innecesario de recursos y por supuesto un gasto económico. En el caso de este estudio, las instalaciones a evaluar serán instalaciones térmicas de edificios, ensayadas a escala de laboratorio, formadas por un conjunto de elementos como calderas, bombas de calor, tuberías, intercambiadores de calor, etc. Los edificios a estudiar se encuentran en el Laboratorio de Control de la Edificación del Gobierno Vasco (en adelante LCCE), donde se quiere analizar y diagnosticar la instalación térmica experimental, para detectar los puntos de mayor consumo, con el objetivo de reducir el consumo de los recursos y las emisiones de CO_2 . El análisis utilizado en este caso, consiste en el análisis termodinámico, el cual describe los procesos mediante balances de masa y energía. Pero este análisis no considera la calidad de la energética, sino solo su cantidad. Aquí entra en juego la metodología exérgica, que une los dos Principios de la Termodinámica, permitiendo cuantificar las irreversibilidades e identificar así en qué equipo o subsistema son estas mayores [9].

Se puede comprobar que estas mediciones son de gran valor y sabiendo que pueden llegar a dar más información de la que previamente se podía disponer. Por consiguiente, se crean laboratorios experimentales, con el fin de poder hacer numerosas variaciones en las instalaciones y así sacar conclusiones válidas para incorporarlas a instalaciones reales.

2.1. Estado actual de la planta experimental del LCCE

La planta experimental de LCCE se caracteriza por ser una instalación flexible que posibilita la configuración de diferentes instalaciones dependiendo de la demanda requerida. Para ello, la instalación se divide en distintas islas como se puede ver en la Imagen 1, las islas de baja y

alta temperatura y los colectores solares corresponden a los diferentes equipos de generación, después se encuentran los equipos de distribución, y las islas de calefacción, ACS corresponden al sector de terminales de demanda, por último, la isla de acumulación térmica pertenece a los equipos de almacenamiento.

Para llevar a cabo estas configuraciones y sus posteriores conclusiones, se cuenta con un banco de ensayos, que dispone de un sistema de simulación de carga térmica y eléctrica, sistemas de control, visualización y de un registro automatizado de las diferentes variables.

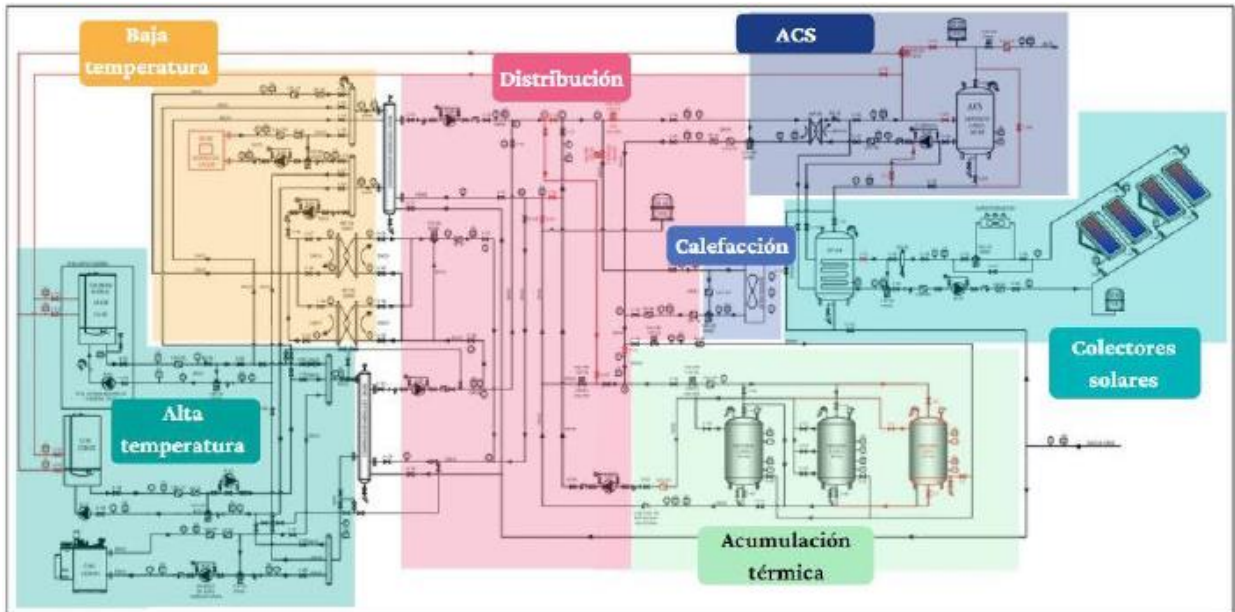


Imagen 1 Esquema de la instalación experimental del LCCE

Se requiere conocer más detalladamente los equipos que pertenecen a cada isla, las potencias de los equipos de generación y el volumen de los acumuladores térmicos:

-Equipos de generación:

- Colectores solares
- Caldera de condensación: 28kW
- Motor de microgeneración: 12.5 kW térmicos y 5kW eléctricos.
- Motor Stirling: 5kW térmicos y 1kW eléctrico.
- Bomba de calor aerotérmica: 17.9 kW

-Equipos de distribución:

- Bombas hidráulicas
- Intercambiadores de calor
- Valvulería
- Compresores hidráulicos

-Almacenamiento:



- Depósitos de acumulación de agua caliente: 3 depósitos de 1000 litros/u y un equipo de 500 litros.

-Terminales de demanda:

- Simulador de calefacción: máxima disipación de 42.8 kW
- ACS

La instalación consta de más de 100 señales para controlar y monitorizar las variables que se desean evaluar. Para ello, se hace uso de 46 sondas de temperatura alta, 40 de ellas situadas en tuberías y el resto en depósitos, 11 caudalímetros electromagnéticos, 2 presostatos, uno en el circuito general y el otro en el circuito solar. Además, cuenta con sensores de temperatura ambiente, humedad y presión tanto en el interior como en el exterior del laboratorio. La caldera y los equipos de micro-cogeneración cuentan con contadores de gas y de electricidad, para así contabilizar la generación de la cogeneración y el consumo de la bomba de calor.

2.2. Modo de funcionamiento

En los ensayos a realizar, aparte de tener en cuenta la configuración de la instalación, hay que definir ciertas estrategias en función del tipo de edificio que se quiere simular. Uno de los pasos clave consiste en definir los perfiles de demanda que los equipos de generación tienen que satisfacer. Para ello, existen dos modos de actuación: mediante curvas de demanda conocidas, o mediante la plataforma semi-virtual, que simula el edificio deseado a tiempo real para analizar dichas demandas.

Por un lado, las curvas de demanda, que son las que se definirán en este trabajo, consisten en curvas predeterminadas que definen las demandas horarias de ACS y calefacción de un perfil de viviendas.

Por otro lado, las demandas se pueden definir a partir de la plataforma semi-virtual basada en un flujo bidireccional de intercambio de información, entre la instalación física y el edificio simulado en el software Trnsys, a tiempo real. El software de simulación energética se encarga de recoger las señales reales de la planta experimental, donde incluye, además, el modelo del edificio, sus sistemas, función de ocupación, condiciones climatológicas, etc. Calcula la demanda y una temperatura de retorno que se lleva a la instalación experimental para actuar en el control y seguir trabajando.

3. OBJETIVOS Y ALCANCE DEL TRABAJO

El objetivo de este TFM es realizar un ensayo experimental en la instalación del LCCE y analizar los resultados por medio de la termoeconomía. Para ello previamente se deberá de definir la instalación y el control a implementar en el laboratorio.

Los sub-objetivos de este estudio serían:

- Estudio bibliográfico de las metodologías termoeconómicas y de diagnóstico en instalaciones de climatización. Sobre todo, en calefacción y ACS en edificios terciarios y residencias.
 - Introducción al diagnóstico termoeconómico.



- Análisis del funcionamiento de la instalación experimental del LCCE. Metodología y elección de equipos a analizar.
 - Definición de las demandas a ensayar según el perfil de los edificios.
 - Definición del control.
 - Ensayo experimental del sistema escogido en el LCCE.
 - Obtención de las variables termodinámicas del laboratorio.
 - Introducción de alguna anomalía en el equipo del LCCE.
 - Elaboración del modelo térmico del sistema.
- Análisis energético del ensayo.
- Aplicación de la termoeconomía para calcular los costes.
- Conclusiones, discusión.

El trabajo a realizar aplica y explota un software de control y diagnóstico de instalaciones térmicas, que está basado en la Termoeconomía en una instalación configurada y ensayada en las instalaciones del LCCE. El software está dedicado al cálculo de costes termoeconómicos del sistema térmico, que detecta los componentes con mayores irreversibilidades que incrementan el coste a lo largo de la cadena energética.

Los resultados obtenidos del software, explicados en Ref [10], dependen de la calidad de los datos, y para ello es necesario disponer de sondas precisas y bien calibradas, por lo que las mayores dificultades están relacionadas con el análisis y filtrado de los datos obtenidos de los sensores. Una vez obtenidos los datos de la producción de ACS, de calefacción y de las emisiones de CO_2 , se sabe que los costes finales del producto útil se deben principalmente a las irreversibilidades halladas a lo largo del sistema, por lo que no son beneficiosas. Estos costes se obtienen a partir de una estructura productiva que interconecta todos los componentes en función de los ratios de distribución, los consumos exergéticos unitarios de cada equipo y los recursos externos. Es una información muy útil debido a que cuando varía un parámetro de un componente, varía su consumo unitario de exergía, por lo que también cambian los costes relacionados con ese componente.

Actualmente, el software detecta los modos de funcionamientos en los que los consumos de ACS y calefacción son mayores. Además, se puede detectar el modo de funcionamiento más favorable para así reducir el consumo de los recursos. El siguiente paso consiste en la implementación de los objetivos de control mediante algoritmos de optimización, considerando todas las variables presentes. El objetivo principal consiste en reducir las irreversibilidades excluyendo las evitables que se puede obtener mediante la estrategia de control adecuada o la modificación del equipo.

Este TFM realiza un ensayo en las instalaciones del LCCE para posteriormente aplicar la termoeconomía en base a los datos obtenidos experimentalmente. Para ello, es necesario realizar el estudio del arte de la aplicación del diagnóstico termoeconómico en instalaciones térmicas, para así poder profundizar en la instalación real de ACS y calefacción. Como objetivo final está la ampliación del software mediante la implementación del diagnóstico termoeconómico, haciendo un estudio de la viabilidad e interpretando los resultados obtenidos.

4. BENEFICIOS QUE APORTA EL TRABAJO

Con la finalidad de implementar un mantenimiento preventivo, uno de los beneficios que aporta este trabajo es el conocimiento detallado del funcionamiento de la instalación, para así poder aplicar técnicas de ahorro energético a lo largo de la vida útil de la misma. Asimismo, este análisis permite analizar detalladamente el funcionamiento de la instalación. Lo que deriva a un beneficio externo, donde se cumplirían con los objetivos previamente mencionados. La implementación del software y su posterior estudio podrá aportar un beneficio directo las comunidades de vecinos, a modo de ahorro económico y de eficiencia de sus instalaciones, ya que, se puede hacer una corrección de comportamiento referido al uso del combustible, gastando menos recursos. Además, se conseguiría una instalación de calefacción y de ACS con un buen rendimiento, lo que conllevaría a un uso ajustado a sus necesidades. Como es ejemplo de la calefacción, que, si su eficiencia es adecuada, la temperatura y horas de funcionamiento serán solo las justas y necesarias, sin necesidad de tener la instalación demasiado tiempo activa.

Como beneficios secundarios, pero también de gran importancia, se encuentran los relacionados con el medio ambiente, la reducción de recursos repercute en la producción de gases de efecto invernadero y también, en el agotamiento extremo de recursos.

Así, a lo largo de este TFM se pretende elaborar y testear una herramienta para el mantenimiento de las instalaciones térmicas basada en la termoeconomía. El testeo en el laboratorio real del LCCE permitirá definir una estrategia para aplicar el diagnóstico termoeconómico en instalaciones experimentales, con el fin de escalar los resultados a instalaciones reales.

5. ANÁLISIS DEL ESTADO DEL ARTE

En este apartado, se analizan las aplicaciones e investigaciones en relación con la Termoeconomía y el diagnóstico termoeconómico. La finalidad es conocer y estudiar los avances relacionados con el mismo.

Se podría decir que el primero que relacionó los costes con la exergía y calculó los costes debidos a las irreversibilidades en una planta de separación de aire fue Benedict [11]. Aunque no fue el primero en hablar de costes y del Segundo Principio, en 1932 el primer autor que utilizó el Segundo Principio para el cálculo de costes fue Keenan [12], donde calculó los costes de la electricidad y el vapor producido en una planta de cogeneración, repartiendo la energía en función de lo que se denominaba las disponibilidades de esas energías, dejando a un lado el concepto de la exergía. Años más tarde, se comenzó a asociar la utilidad de los flujos con su exergía, para así poder llegar al cálculo del coste del combustible y costes de operación y amortización de las inversiones realizadas a lo largo de la planta. Este estudio de la interacción entre el coste y la eficiencia fue realizado por Evans y Tribus en el año 1962 [13]. Uno de los autores del último trabajo mencionado, Tribus continuó con el estudio de la Termoeconomía en procesos industriales en acompañamiento de El-Sayed, en 1983 [14].

Hasta los años ochenta, no se comenzó a aplicar la Termoeconomía en la optimización y diseño de los sistemas térmicos. Uno de los autores que comenzó a fomentar esta práctica fue Gaggioli, que fue presentado avances en el análisis exergético y en la Termoeconomía. A partir de ahí, surge un gran interés sobre la Termoeconomía lo que hace surgir ciertos autores



que cabe destacar. Como, por ejemplo, Tsatsaronis y Winhold, en el año 1985, que estudian el análisis exergoeconómico [15], donde además se comienza a introducir conceptos como Fuegos y Productos. Los métodos de análisis exergoeconómicos y de optimización de los sistemas energéticos utilizaban valores de costes medios o marginales por unidad de exergía para cada flujo. Estos costes no contenían la información detallada sobre cuanta exergía y a qué coste era suministrado cada unidad de ésta a la corriente. Se tenía la certeza de que el conocimiento de la adición de exergía y el coste correspondiente se podía utilizar para mejorar el proceso de cálculo de costes. En el artículo mencionado anteriormente, se presenta un nuevo enfoque para el cálculo de costes de exergía basado en la exergoeconomía. Este nuevo enfoque elimina la necesidad de supuestos auxiliares en el análisis exergoeconómico de los sistemas energéticos y mejora la equidad del proceso de cálculo de costes al examinar más detenidamente los procesos de formación de costes y valor monetario. Por lo que se desarrollaron nuevos métodos termoeconómicos para el diseño de sistemas, como fue el caso de van Spakovsky en el año 1986 [16].

Por otra parte, Moran y Sciubba definen el análisis exergético [17], con la finalidad de conseguir una utilización eficaz de recursos energéticos como el petróleo, el gas natural y el carbón. Por lo que se implementó como objetivo el desarrollo de sistemas para promover su buena utilización. Así consiguieron determinar la ubicación, el tipo y la verdadera magnitud de los residuos y pérdidas. Esta información pasó a ser utilizada para reducir la ineficiencia de los sistemas existentes. A pesar del notable interés por la aplicación de la Termoeconomía en edificios, está todavía en fase de investigación y es escasamente utilizada en la práctica diaria, ya que todavía hay numerosos aspectos metodológicos que deben de ser resueltos.

En esa época se comenzó a indagar en las posibles aplicaciones de la exergía y el análisis termoeconómico, lo que conlleva a crear nuevas teorías sobre las estructuras de los sistemas energéticos cuyo objetivo central es el estudio del proceso de formación de los costes de producción de instalaciones para la generación de energía. Así como nuevas aplicaciones dirigidas al diagnóstico, simulación, optimización, integración de procesos y contabilidad de costes en plantas energéticas. Estos avances se presentan en la Exergoeconomía Simbólica [18]. La Termoeconomía Simbólica o Exergoeconomía Simbólica permite obtener ecuaciones generales que relacionan el rendimiento total de la instalación y las variables termoeconómicas como los fueles, productos, costes exergéticos, etc., con la eficiencia de cada componente.

En los años noventa debido al interés por la Termoeconomía, se crearon diferentes teorías, por lo que se procedió a estandarizarlas. Aquí tuvo un papel muy importante la Universidad de Zaragoza, en el año 1994 desarrolló la Teoría Estructural [19], que unifica las diferentes metodologías. Entre las clasificaciones de estas metodologías destacan dos tipos, métodos algebraicos y métodos de cálculo.

Los métodos algebraicos tienen como objetivo una asignación racional de costes a los productos del sistema; es decir, se basan en ecuaciones algebraicas de balances de costes, obtenidas a partir del análisis económico convencional y complementadas con ecuaciones auxiliares. Este análisis convencional, también llamado análisis energético, tiene como objetivo optimizar el modo de operación de una instalación, conociendo el estado de su funcionamiento, y así poder explicar las causas de un aumento del consumo de combustible. Pero este análisis no permite identificar las verdaderas ineficiencias, ya que solamente identifica como tales los calores perdidos al ambiente. Por este motivo, se procede a realizar



un estudio mucho más profundo utilizando el análisis exergético. Efectuando este análisis, se consigue una información precisa sobre en qué componente se produce la irreversibilidad. Pero este análisis también se encuentra incompleto, debido a su falta de información sobre los costes. Realizar esta contabilidad permitiría determinar el coste de los productos para así poder establecer unas bases para su control y evaluar la rentabilidad de dichos productos. Para la asignación de estos costes se utiliza la exergía. De aquí surge el concepto de coste exergético, que es la cantidad de exergía que ha sido necesaria para producir un flujo concreto. Un flujo siempre tiene la misma exergía, pero un coste exergético diferente, por lo que se puede deducir que cuanto mayor sean las irreversibilidades de un sistema mayor será el coste exergético del flujo. De aquí surge el concepto de la Teoría del Coste Exergético (TCE), que fue desarrollada por Lozano y Valero en el año 1993 [20].

Dentro de la clasificación de los métodos algebraicos también encontramos los Métodos de Análisis Exergoeconómico escrito por Tsatsaronis, en 1993 [21], que consiste en la combinación del análisis exergético con el económico, siendo así una base para asignar valores monetarios a los flujos de energía y a las ineficiencias de los sistemas. Para finalizar, encontramos el método LIFO (Last-In First-Out) también desarrollado por Tsatsaronis en el 1993 [22], y el método SPECO (Specific Exergy Costing) escrito por Tsatsaronis y Lazzaretto [23].

Por otra parte, los métodos de cálculo están basados en la utilización de ecuaciones diferenciales, donde el objetivo es la optimización del diseño y operación de una instalación, utilizando criterios y variables del Segundo Principio. Dentro de estos grupos encontramos el Método Termoeconómico Funcional (TFA) estudiado por Frangopoulos en el año 1983 [24], el Método de Análisis Ingenieril (EFA) desarrollado en 1993 por von Spakovsky y Evans [25], y la Teoría Estructural, mencionada con anterioridad.

Una de las metodologías más nuevas fue desarrollada por Tsatsaronis y Morosuk en el año 2012 [26], a la que se le denomina Exergía Avanzada. Donde afirma que los costes son más adecuados para cuantificar los efectos que para localizar las causas de las anomalías. Este método se basa en la diferenciación de la destrucción de exergía endógena y exógena. La destrucción de exergía endógena, es debida exclusivamente a las irreversibilidades en el propio equipo. Por otro lado, la destrucción de exergía exógena, es la debida a las ineficiencias en el resto de los equipos de la instalación.

Se pueden encontrar varios trabajos donde han sido implantados los métodos previamente mencionados, como el estudio de un sistema de conversión de energía para aplicaciones de calentamiento de agua, de aire, etc., llevado a cabo por la Universidad de Manabí, en Ecuador [27]. Cabe destacar el estudio de irreversibilidades de un ciclo de gas con compresión húmeda, realizado en México [28]. Aquí se muestra el completo diagnóstico termoeconómico de un Ciclo Brayton, donde se presenta la estructura productiva y la teoría del coste exergético, y finalmente muestran las conclusiones de la Exergía Avanzada. Este estudio puede encontrarse en abundancia, así como en el siguiente estudio del ciclo Brayton [29], llevado a cabo por la Fundación Universidad de América. De la misma manera, el análisis exergético y exergoeconómico del ciclo Allam muestra la evaluación de dichos parámetros para una mejor caracterización de las ineficiencias y la priorización en los cambios de diseño del ciclo, con el fin de incrementar la eficiencia [30].

Por otra parte, es de interés regular tanto el coste como el consumo en plantas de producción, debido a que suelen estar activos continuamente. Con el objetivo de comprobar



que la minimización de la exergía destruida conlleva una disminución en los costos exergéticos, destaca la investigación en una planta de aprovechamiento integral de naranja. Donde se plantean tres diferentes situaciones para así evaluar y analizar cuál sería la opción más viable según el análisis termoeconómico. El primer caso de estudio consiste en la planta base, el segundo consiste en un economizador, que precalienta el agua que consume la caldera, y el tercer caso de estudio se basa en seguir precalentando el agua usando un segundo economizador. Se concluye que, si se minimizan la destrucción de la exergía en la caldera y de la planta general se reducen los costes exergéticos [31]. Otro ejemplo de esto se encuentra en una planta de extracción de aceite de palma africana. En este caso, se propone un módulo de gestión termoeconómico para realizar la identificación de pérdidas económicas, oportunidades de mejora y escenarios potenciales relacionados con el uso de cualquier fuente de energía aplicada a dicha planta, ubicada en Colombia. En este caso los tres escenarios a analizar son: un sistema de cogeneración de turbina de vapor de condensación-extracción, un sistema de gasificación de biomasa acoplado a un motogenerador y un sistema de gasificación de biomasa integrada a un ciclo combinado. Después de analizarlo, se deduce que la tecnología más viable es el sistema de gasificación de biomasa integrada a un ciclo combinado [32].

Uno de los sectores que experimenta el desarrollo de estos análisis son las plantas de energía solar, y con este avance también son numerosos los estudios en los que se aplica algún método de la Termoeconomía. Como es el caso del análisis exergético realizado para comparar una torre de refrigeración y un aerocondensador en una central termosolar. A lo largo del trabajo se concluye que el sistema seco no era viable a bajas presiones de condensación, realizado por Clemente et al. [33] en la Universidad Miguel Hernández de Elche. Aunque la energía solar es una de las formas más abundantes e inagotables de energía renovable limpia, su uso sufre barreras económicas relacionadas principalmente con su intermitencia. En el siguiente artículo desarrollado por la Universidad de Mont Blanc [34], se comparan diferentes sistemas, como el sistema convencional de referencia, cuatro sistemas solares combinados de calefacción y energía, etc. El estudio se realiza en una vivienda individual situada en Chambéry, Francia. La elección del sistema idóneo se ha realizado mediante el coste total unitario del producto.

Por otro lado, en las centrales termoeléctricas cada vez es más común implantar acciones que requieran conocer el estado del funcionamiento termodinámico de los equipos y cuantificar económicamente las pérdidas de eficiencia, encuentran la respuesta en la Termoeconomía. Como es el caso del estudio realizado en un sistema de aire y gases del generador de vapor de la central termoeléctrica Antonio Guiteras [35]. A lo que concluyeron que existía un gran margen para el ahorro económico con la realización de acciones de mantenimiento y modernización. Al igual que este artículo existen otros muchos estudios sobre centrales termoeléctricas, así, se puede ver el estudio del análisis exergético y termoeconómico de la Central Termoeléctrica de Villa de Reyes [36].

Una de las aplicaciones de estos métodos incluye las viviendas, ya que es preciso conciliar los requerimientos de confort térmico, lumínico y acústico, donde el coste energético sea lo más reducido posible. Una instalación térmica en un edificio o vivienda consiste en un sistema dinámico cuya operación depende de condiciones modificables por un operador, como la temperatura de producción del agua caliente, la temperatura de acumulación de ACS, etc. Existen también otras no modificables donde se encuentran las condiciones ambientales y las características del combustible. Y finalmente las condiciones asociadas al deterioro de los

equipos. De forma periódica, hay que realizar acciones de control y mantenimiento para poder conservar la eficiencia y lograr una mayor disponibilidad de los equipos. Para ello, se ha desarrollado un estudio sobre una vivienda ideal, que se climatiza de manera totalmente pasiva, recogido en la reciente propuesta de un parámetro de eficiencia exergética para edificios y viviendas [37].

Estos estudios pretenden plantear propuestas para una eficiencia energética sostenible y para una disminución del consumo de energía eléctrica mensual. Para ello, son numerosos los estudios en edificios reales, como el siguiente: el análisis de los sistemas energéticos en un edificio de administración central del SECAP [38]. Véase también este tipo de análisis en otro estudio, como el de un novedoso sistema combinado de refrigeración, calefacción y electricidad (CCHP) integrado con almacenamiento de energía térmica (TES) y un sistema híbrido de refrigeración para un complejo residencial en Teherán [39]. En este trabajo novedoso se usa un sistema de almacenamiento de energía térmica, el cual adapta la carga térmica y el calor generado al sistema. Su utilización consiste en que cuando el almacenamiento se encuentra totalmente cargado, el motor se apaga y utiliza únicamente la energía almacenada. Como en los anteriores estudios se ha podido comprobar, la mayor destrucción de exergía corresponde a la caldera.

5.1. Conclusiones derivadas del estado del arte

Como se puede comprobar, se han hecho numerosos estudios relacionados con la Termoeconomía, dándole así una oportunidad de mejora y desarrollo. Aunque su uso se esté volviendo más frecuente, todavía no es un método del todo recurrente, menos aún la termoeconomía con fines de diagnóstico y mantenimiento preventivo, debido a que la extracción de datos en muchos casos es costosa y poco fiable. Por este motivo, y con ánimo de conseguir un avance significativo y útil, se procederá a realizar el siguiente TFM: aplicación de la Termoeconomía en una instalación experimental del LCCE, del cual no se han encontrado otras aportaciones.

6. Métodos para el análisis.

El posterior análisis termoeconómico se realizará según algunas expresiones de la termoeconomía simbólica (ST), explicada anteriormente. Utilizando la estructura productiva, el producto (P), el fuel (F) y el consumo total de combustible (F_T), las expresiones que se van a utilizar serían las siguientes [42].

$$P = P_S + \langle KP \rangle P \quad (1)$$

$$F = P + I = K_D \cdot P \quad (2)$$

Donde, P_S corresponde al vector de producto final; K_D es una matriz diagonal que contiene el consumo unitario total de exergía; I es el vector de irreversibilidad; $\langle KP \rangle$ corresponde a una matriz formada por recursos que provienen del componente i necesario para producir una unidad de producto j (k_{ij}).

$$F_T = {}^t u \cdot (I + P_S) = {}^t k_0 \cdot P \quad (3)$$

k_0 corresponde al vector que contiene los consumos exergéticos unitarios de recursos externos.

$$K = k_0 + {}^t u \cdot \langle KP \rangle \quad (4)$$

Donde K es el vector de consumo unitario de exergía de cada componente.

A continuación, se van a definir más detalladamente el producto, fuel y la irreversibilidad de cada componente:

$$P = |P\rangle P_S \rightarrow |P\rangle = (U_D - \langle KP \rangle)^{-1} \quad (5)$$

$$F = |F\rangle P_S \rightarrow |F\rangle = K_D \cdot |P\rangle = K_D \cdot (U_D - \langle KP \rangle)^{-1} \quad (6)$$

$$I = |I\rangle P_S \rightarrow |I\rangle = (K_D - U_D) \cdot |P\rangle = (K_D - U_D) \cdot (U_D - \langle KP \rangle)^{-1} \quad (7)$$

Los costes unitarios exergéticos de los productos de los componentes se relacionan con los costes de exergía de los recursos externos, $k_{0,i}^*$, y también se relaciona con el consumo marginal de exergía derivado de los recursos externos, $k_{0,i}$. Estas relaciones se pueden expresar de la siguiente manera:

$$k_p^* = {}^t |P\rangle \cdot k_0^* = {}^t |P\rangle \cdot k_0 \quad (8)$$

Una vez calculados los costes unitarios exergéticos, se calculan los costes económicos para así concluir el análisis termoeconómico. Para ello, se utiliza la siguiente expresión:

$$c_{Fk_0} = {}^t c_F \cdot k_{0D} \quad (1)$$

7. Configuración de la instalación experimental.

La instalación que se quiere diseñar para este trabajo está centrada en la demanda de calefacción de un edificio de 8 viviendas situado en Burgos, donde su altura total ronda los 48 metros y consta de una superficie útil de 200 m^2 . Las características más relevantes de este edificio se recogen en la Tabla 1.

Tabla 1. Características del edificio

Localidad	Burgos
Zona climática	E1
Nº viviendas	8
Dimensiones planta	10 m
Altura del edificio	48 m
Altura entreplantas	2,7 m
%Superficie acristalada	40
Superficie útil	200 m ²
Tconfort	21 °C
Tmin Burgos	-4,2 °C
Qpico	45900 W
UA	1821,429 W/K

La configuración se basa en una bomba de calor encargada de suministrar el agua caliente requerida para suplir la demanda de calefacción. En el caso de que la demanda no pueda ser cubierta por la bomba de calor, se utilizará la caldera. El equipo que se encarga de simular la demanda de calefacción es el aerotermo. A modo de resumen, los equipos de generación utilizados son la bomba de calor y la caldera; que son capaces de proporcionar una potencia pico de unos 45,9 kW. Por otro lado, los equipos de distribución constan de dos colectores de impulsión y retorno y un compresor hidráulico; y el equipo de suministro es el aerotermo. En este diseño no se utilizará ningún depósito de acumulación.

Asimismo, en la instalación se utilizarán tres bombas hidráulicas, una para la caldera, otra para la bomba de calor y la tercera para suministrar el caudal al aerotermo.

7.1. Definición del sistema

Como se ha mencionado anteriormente para poder aplicar la termoeconomía hay que identificar y numerar los equipos y los flujos que forman parte de la instalación. La instalación configurada consta de 10 equipos y 21 flujos, como se muestra en la Imagen 2.

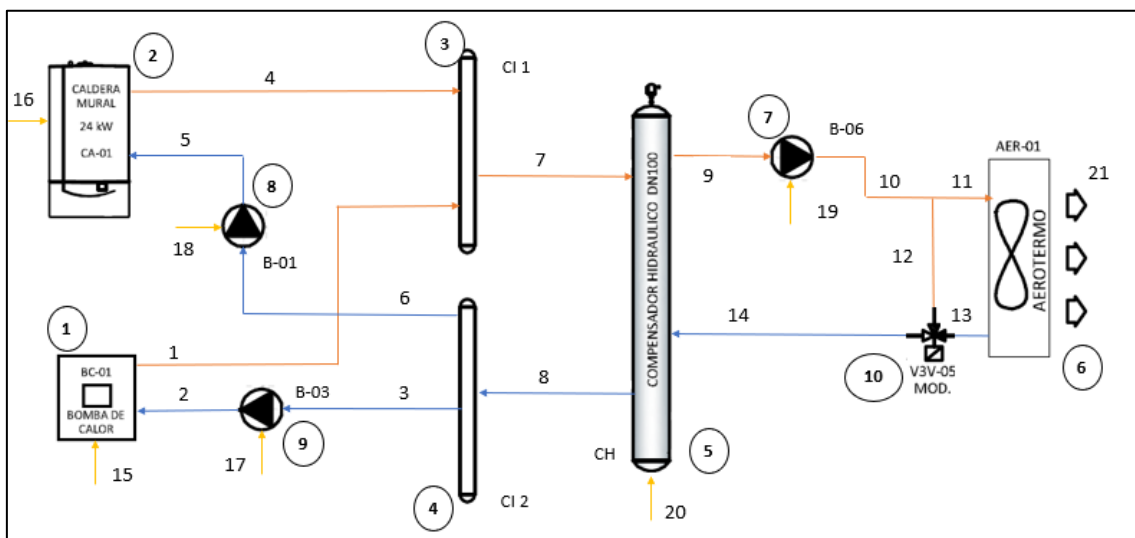


Imagen 2. Esquema de los flujos de la instalación

Las líneas de color rojo que se aprecian en el esquema corresponden al flujo caliente que se dirige hacia el aerotermo, y las líneas azules corresponden al fluido frío. Las líneas amarillas corresponden a las entradas exteriores: combustible o energía eléctrica suministrada en los equipos generadores y bombas y carga y/o descarga del compensador hidráulico.

Una vez identificados todos los componentes de la instalación se define la estructura productiva, dividiendo los flujos de cada equipo en fuel o producto, Tabla 2.

Tabla 2. Estructura productiva de la instalación

Nº	NOMBRE	FUEL	PRODUCTO
1	BC (Bomba de calor)	15	1-2
2	CA (Caldera)	16	4-5
3	CI 1 (Colector de impulso 1)	4+1	7
4	CI 2 (Colector de impulso 2)	8	6+3
5	CH (Compensador hidráulico)	7-8	9-14
6	AER-01 (Aeroterma)	11-13	21
7	B-06 (Bomba)	19	10-9
8	B-01 (Bomba)	18	5-6
9	B-03 (Bomba)	17	2-3
10	V3V-05 (Válvula 3 vías)	12+13	14

En el análisis termoeconómico no se consideran las bombas, debido a que únicamente se analizan los flujos térmicos y no se incorporan las exergías mecánicas relacionadas con el cambio de presión. Además, se incorporará un nuevo equipo, el diverter. Su función consiste en hacer una división de flujos que facilitará el análisis termoeconómico, ya que en la realidad esa división se realiza sin ningún dispositivo. En las siguientes imágenes se muestra la estructura final que se estudiará en este trabajo, Imagen 3.

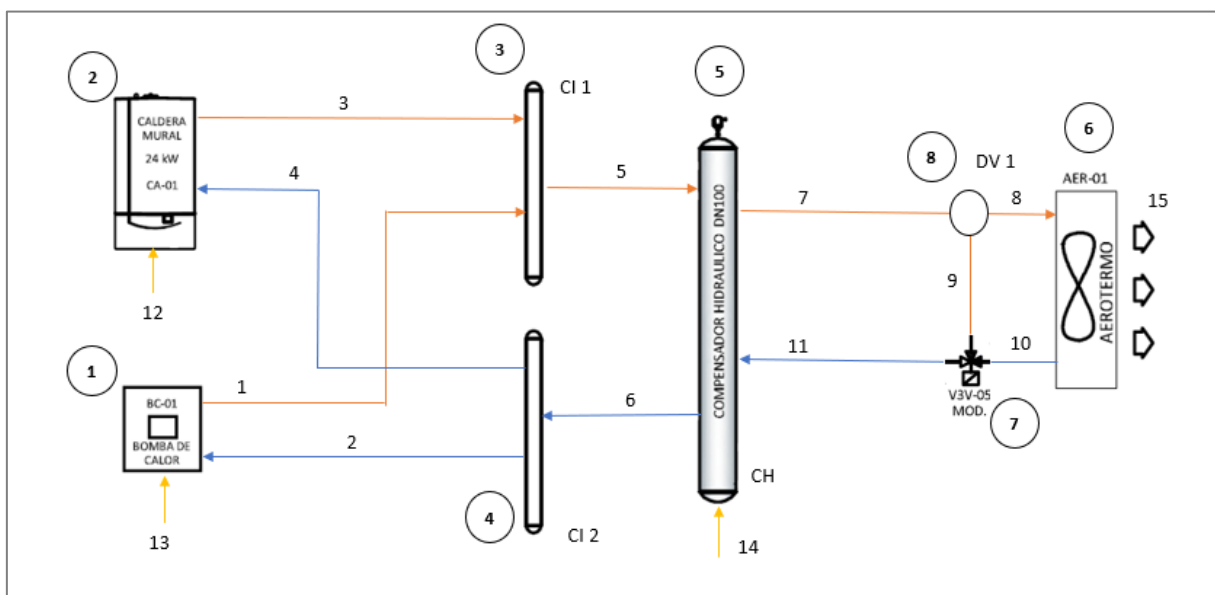


Imagen 3. Esquema final de los flujos de la instalación

Una vez definidos los flujos de la instalación se define la estructura productiva de la instalación, que consiste en identificar las entradas y salidas de cada equipo, véase en la Tabla 3.

Tabla 3. Estructura productiva final

Nº	NOMBRE	FUEL	PRODUCTO
1	BC (Bomba de calor)	13	1-2
2	CA (Caldera)	12	3-4
3	CI 1 (Colector de impulso 1)	1+3	5
4	CI 2 (Colector de impulso 2)	6	2+4
5	CH (Compensador hidráulico)	5-6+14	7-11
6	AER-01 (Aerotermino)	8-10	15
7	V3V-05 (Válvula 3 vías)	10+9	11
8	DV 1 (Diverter 1)	7	8+9

7.2. Configuración del control.

Configurar el control es una de las partes clave para obtener datos reales y fiables. Para ello, se requiere establecer valores de funcionamiento, que en este caso se basarán en las temperaturas de los sensores colocados a lo largo de la instalación. Los sensores clave serán dos:

- ST-12: este sensor de temperatura está situado en la entrada del fluido frío a la bomba de calor. Mediante este sensor se controlará que la diferencia de temperatura en el aerotermino sea adecuada. Esto quiere decir que, si la temperatura del sensor es mayor de 30°C, el intercambio de calor con el ambiente es pequeño, por otro lado, si esa temperatura es menor de 25°C se concluye que la temperatura que llega al aerotermino no es lo suficientemente alta, por lo que necesitará apoyo de la caldera.
- ST-22: este sensor de temperatura está situado en la entrada del fluido caliente al aerotermino. Mediante este sensor se controla que la temperatura que llega al aerotermino es lo suficientemente alta como para poder calentar el habitáculo a la temperatura de consigna.

La Imagen 4 Imagen 4. Relación de los sensores con los flujos establecidos, relaciona la posición de los sensores en relación con la denominación del flujo de la imagen de los flujos.

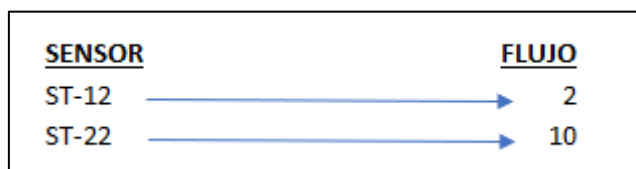


Imagen 4. Relación de los sensores con los flujos establecidos

La instalación estará apagada mientras la demanda sea menor de 0.01 (ya que el programa de control no acepta un valor nulo). En el momento en el que detecte demanda el primer paso será encender la bomba de calor para comenzar a producir agua caliente, posteriormente, cuando el sensor ST-12 llegue al valor mínimo se encenderá la bomba-06 para así comenzar a mandar agua caliente al aerotermino. Si la temperatura a la que llega el fluido al aerotermino es mayor de 40°C se dejará encendida únicamente la bomba, para así

poder apagar la bomba de calor, evitando así el consumo de combustible. Cuando esa temperatura baje, se volverá a encender la bomba de calor. Si la demanda es elevada y la producción de la bomba de calor es insuficiente se encenderá la caldera para poder suplir la demanda establecida. La instalación se apagará independientemente del proceso en el que se encuentre cuando la demanda sea menor que 0,01.

El proceso de control se esquematiza en la siguiente imagen, Imagen 5.

- Los números dentro de las circunferencias representan los modos de funcionamiento posibles (descritos a continuación).
- Las flechas que interconectan las circunferencias describen las inecuaciones a partir de las cuales el control interviene. Tal y como está configurada la instalación experimental solo se puede definir una inecuación por cada transición, de cómo que, si se desean dos condiciones, deberá de crearse un modo de funcionamiento intermedio; véanse en la Imagen 5 las transiciones “Demanda > 0.01” y “ST-12>30” las cuales activan en modo de funcionamiento “2”.

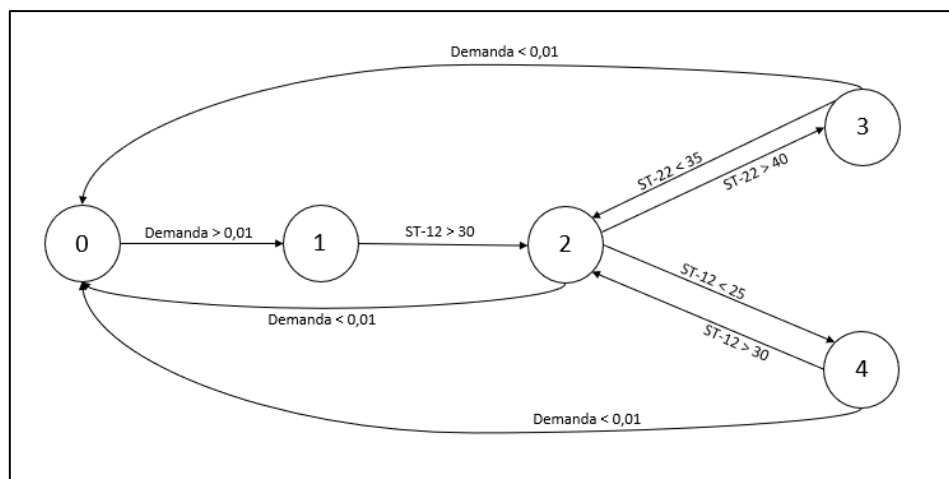


Imagen 5. Esquema del proceso de control

El proceso de funcionamiento cuenta con 4 estados como se ha mencionado anteriormente, en cada una de ellas trabajarán diferentes equipos. Los modos de funcionamiento se definen en la siguiente tabla, Tabla 4.

Tabla 4. Etapas de funcionamiento de la instalación

Nº estado	Modo de funcionamiento	Caldera	Micro-CHP	Bomba de calor	Colectores	Descarga TES	Carga TES	Alta	Baja	Alta/Baja	Aerotermino
		CA-01	COG-01	BC-01	SOLAR	B-07	CARGA	B-05	B-06	B-04	Aer-01
0	Ninguna isla activa										
1	BC-01 + Aeotermino			X							X
2	B-06+BC-01 + Aerotermino			X					X		X
3	B-06 + Aerotermino								X		X
4	BC-01+B-06+CA-01 + Aerotermino	X		X					X		X

Una vez definidos los equipos y el modo de funcionamiento, hay que configurar todas las transiciones posibles con los valores establecidos de funcionamiento. Las transiciones representan los límites de los valores de los sensores a partir de los cuales el sistema de

control intervendrá y cambiará de un modo de funcionamiento a otro. Para ello, se define el sensor que condiciona cada etapa y los valores límites de funcionamiento, Tabla 5.

Tabla 5. Condiciones de funcionamiento de la instalación

Transición	Nº estado	Modo de funcionamiento	Modo previo	AUTOMÁTICO				
				Sensor 1	Sensor 2	Valor mín	Valor máx	Tmín de lec
0	0	Ninguna isla activa	4	Demanda calefacción	-	0	0,01	15
1	1	BC-01 + Aerotermo	0	Demanda calefacción	-	0,01	10000	15
2	2	B-06+BC-01 + Aerotermo	1	ST-12	-	30	10000	15
3	0	Ninguna isla activa	2	Demanda calefacción	-	0	0,01	15
4	3	B-06 + Aerotermo	2	ST-12	-	40	10000	15
5	0	Ninguna isla activa	3	Demanda calefacción	-	0	0,01	15
6	2	B-06+BC-01 + Aerotermo	3	ST-22	-	0	35	15
7	4	BC-01+B-06+CA-01 + Aerotermo	2	ST-12	-	0	25	15
8	2	B-06+BC-01+ Aerotermo	4	ST-12	-	30	10000	15
9	0	Ninguna isla activa	4	Demanda calefacción	-	0	0,01	15

8. Resultados

A continuación, se muestran los resultados obtenidos del ensayo experimental del LCCE, distinguiendo entre (1) los datos obtenidos en el laboratorio, (2) la adecuación del sistema de control y (3) la aplicación de la termoeconomía.

8.1. Resultados del ensayo.

Este apartado recoge y analiza los datos obtenidos de los sensores del laboratorio. Así como las temperaturas a lo largo de la instalación, el valor de las energías y exergías de cada flujo.

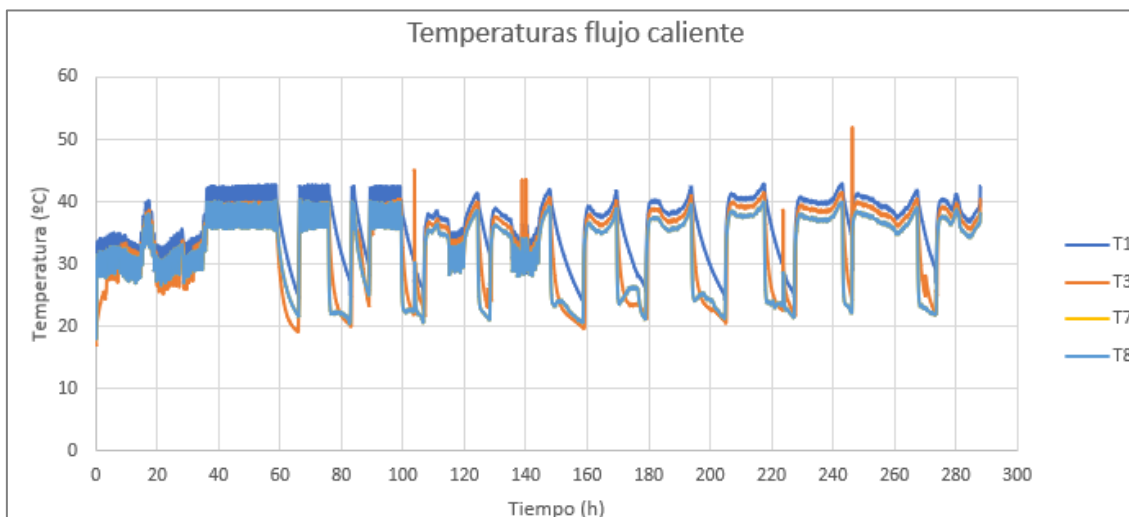


Imagen 6. Temperaturas del flujo caliente a lo largo del ensayo

En la Imagen 6 se muestran las temperaturas de los flujos distribuidos por toda la instalación; donde T1 es la temperatura del flujo de salida de la bomba de calor y T8 la temperatura del flujo de entrada al aerotermo. Todas las temperaturas oscilan entre los 20-40°C, teniendo un pico en T3 que corresponde al arranque de la caldera.

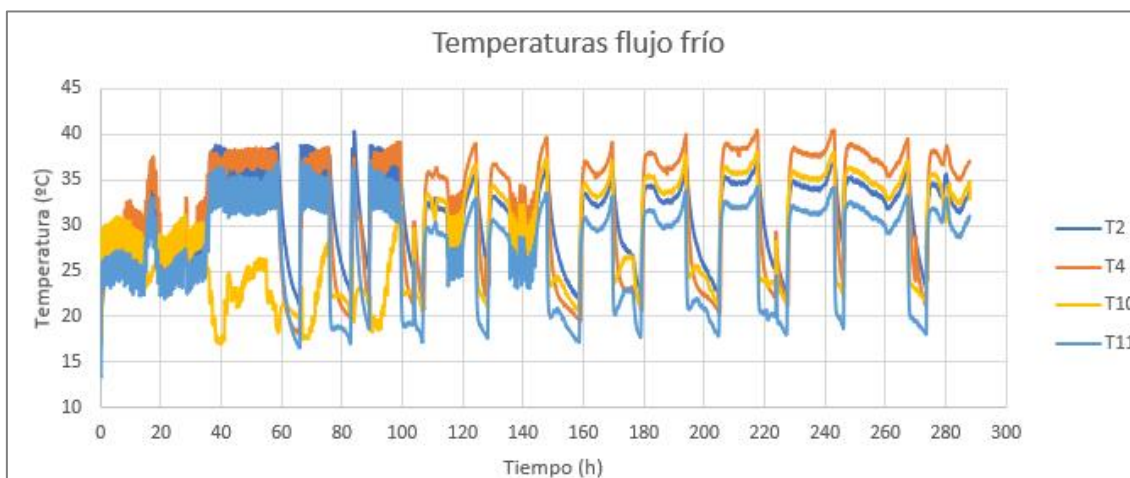


Imagen 7. Temperaturas del flujo frío a lo largo del ensayo

En la Imagen 7 se encuentran las variaciones de temperatura del flujo frío a lo largo de la instalación. T2 corresponde a la temperatura del flujo de entrada a la bomba de calor y T10 corresponde a la temperatura del flujo de salida del aerotermo. En este caso, las temperaturas de los flujos están situadas entre los 18-38°C.

Tabla 6. Valores de energías y exergías de cada flujo

FLUJO	E [kJ]	B [kJ]
1	12958,47	213,41
2	11182,91	116,95
3	575,16	4,70
4	572,68	4,49
5	13533,62	217,44
6	11755,59	121,35
7	29962,42	348,31
8	24921,38	260,50
9	5041,04	87,81
10	23291,23	183,67
11	25551,79	175,28
12	13,82	14,37
13	929,28	929,28
14	-1,21	0,00
15	1619,04	15,67

En la Tabla 6 se muestran los valores de las energías (E) y exergías (B) de cada flujo, que han sido calculadas acumulando las energías promedio de los datos recogidos cada 5 minutos durante 12 días.

Con los datos calculados anteriormente se calcula el tiempo de trabajo de los equipos generadores (bomba de calor y caldera) y del equipo de distribución (aerotermo), véase Tabla 7. Queda en evidencia que la caldera entra en funcionamiento un tiempo demasiado breve, por lo que más adelante se estudiará el porqué de su poco funcionamiento.

Tabla 7. Tiempo de funcionamiento de equipos generadores y de distribución

EQUIPO	CA	BC	AER-01
ACTIVO(%)	0,26	68	74
ACTIVO(H)	0,75	196,7	212,4
ACTIVO (MIN)	45	11805	12745

8.1.1. Análisis de los datos brutos

En la siguiente Imagen 8 se muestra la demanda de calefacción calculada e implementada en el LCCE. Tal como se ha comentado, corresponde a la demanda de calefacción de un edificio de 8 viviendas en Burgos. Este perfil de demanda se ha calculado hora a hora en case al método simplificado de Grados-Día y a las temperaturas tipo del lugar. Sin embargo, el LCCE actualiza la demanda cada 10 segundos, por lo que interpola las demandas horarias obteniendo consumos en el periodo correspondiente.

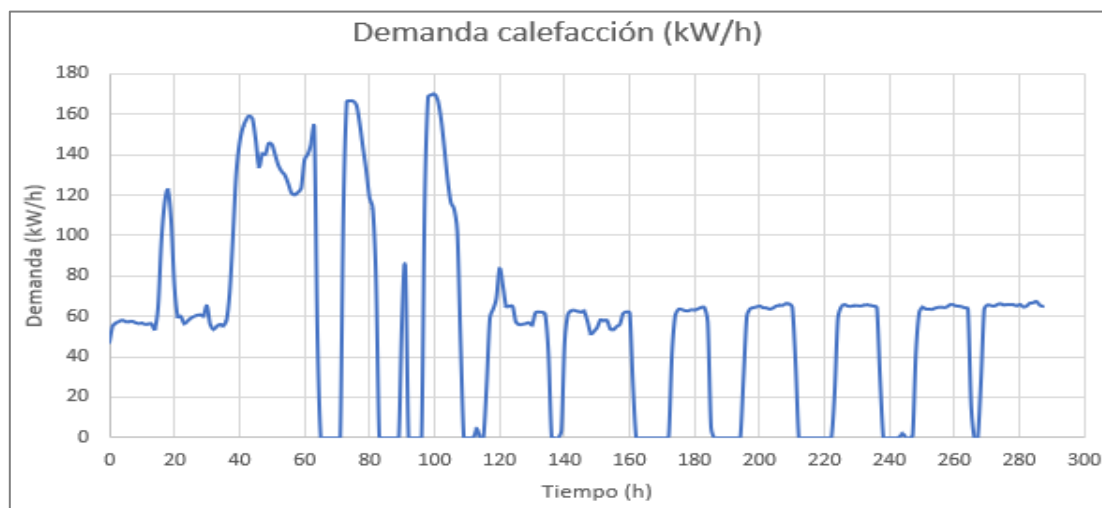


Imagen 8. Demanda real de la instalación del laboratorio del LCCE

En la Imagen 9 e Imagen 10 se muestran los resultados de los consumos tanto de gas natural (caldera) como los consumos de electricidad (bomba de calor), a lo largo del periodo del ensayo, necesarios para suplir la demanda de calefacción definida anteriormente.

- En el caso de la caldera, se aprecia que el consumo es muy puntual y muy poco frecuente, así que en los siguientes puntos se hará un estudio más detallado para conocer ese comportamiento.
- Por otro lado, el consumo de electricidad de la bomba de calor se activa y se desactiva dependiendo de la demanda de calefacción necesaria en cada caso.

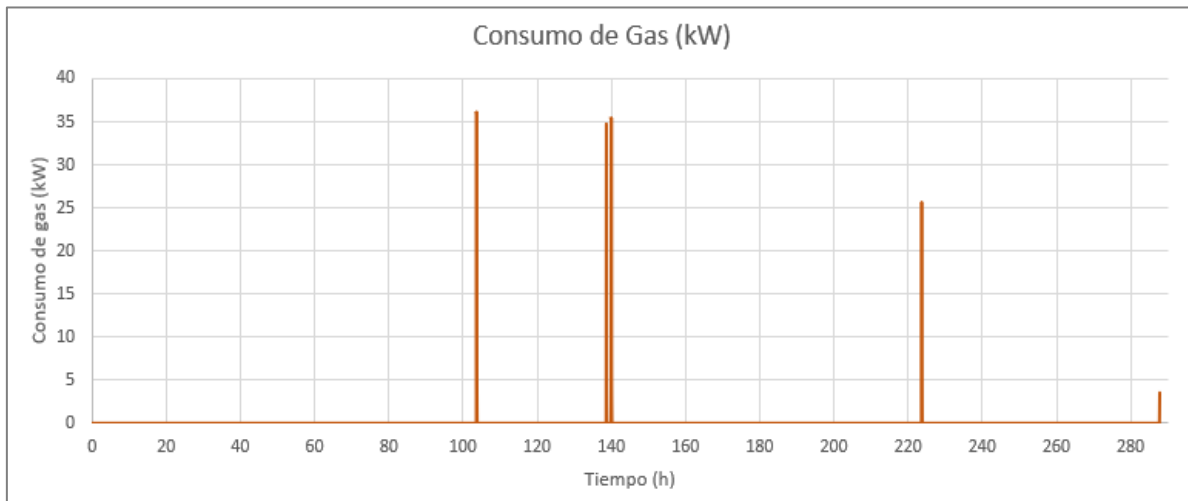


Imagen 9. Consumo de gas de la caldera

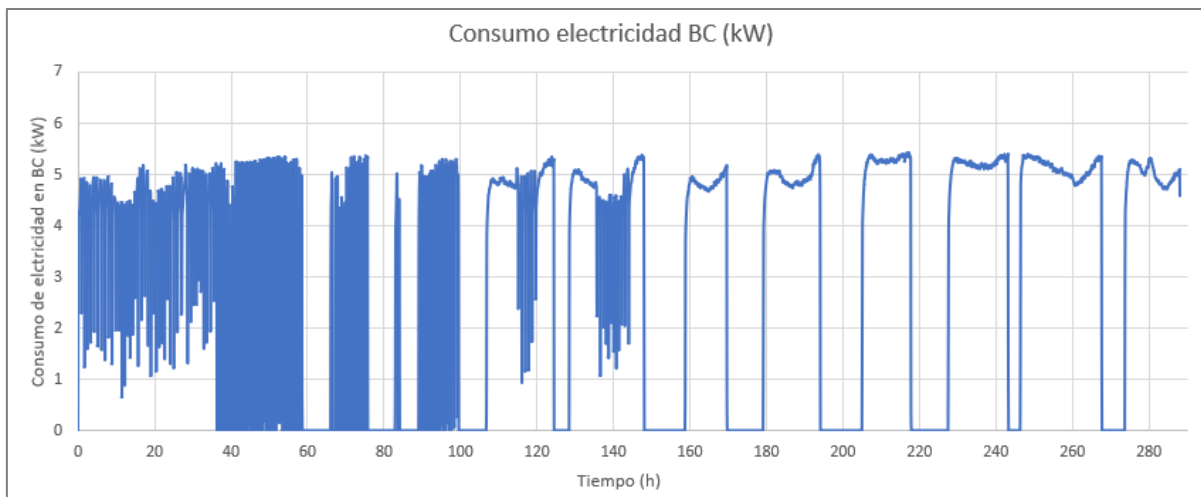


Imagen 10. Consumo de electricidad de la bomba de calor

8.1.2. Análisis energético

Los gráficos de la Imagen 11 y la Imagen 12 describen los modos de funcionamiento de los equipos de generación. Por una parte, se muestran los valores energéticos del fuel y el producto de la caldera, así como el rendimiento, y, por otra parte, los valores correspondientes a la bomba de calor. Se puede apreciar lo siguiente:

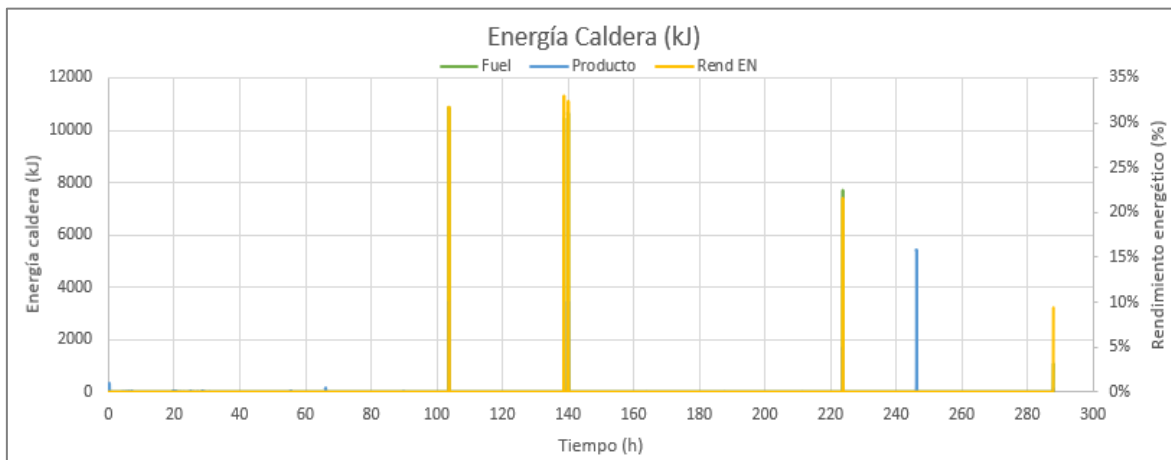


Imagen 11. Gráfico de valores energéticos más el valor del rendimiento de la caldera

En cuanto a la caldera,

- Se comprueba que existe un comportamiento extraño: el rendimiento de la caldera es muy bajo (cercano al 30%) respecto su rendimiento nominal, del 90%. Esto se puede deber al escaso periodo de activación entre el arranque y la parada, el cual no le permite llegar a estado estacionarios. Desde luego este es un escenario desfavorable que hace que la caldera consuma más de lo que le corresponde.

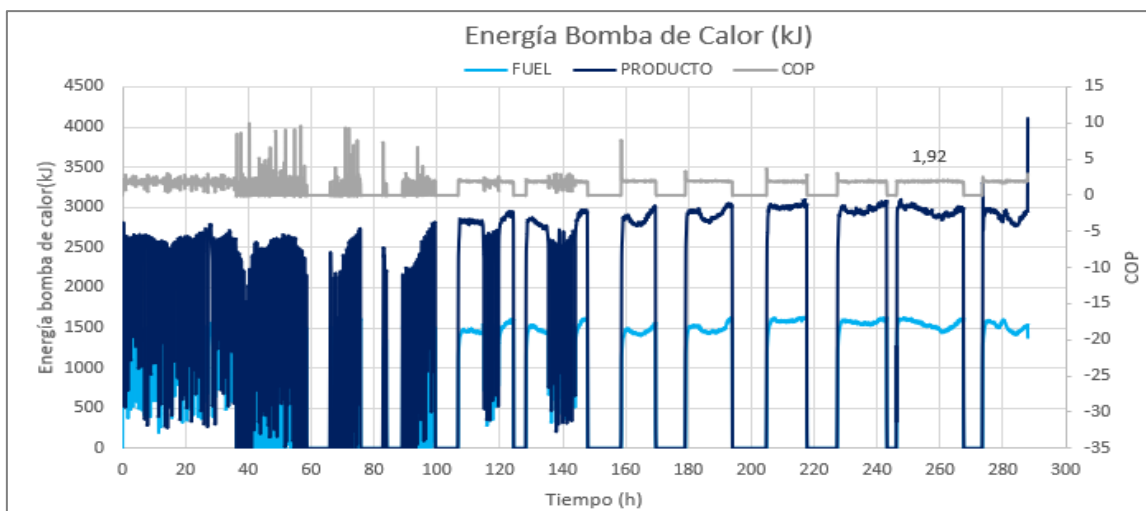


Imagen 12. Gráfico de valores energéticos y valor del COP de la BC

En el caso de la bomba de calor,

- El producto es mayor que el del flujo del fuel, debido a que su forma de funcionamiento se mide a través del COP, que tiene un valor mayor que la unidad. El COP de esta bomba de calor en estado estacionario es de 1,9, véase en la Imagen 12. Esto demuestra el buen funcionamiento de la bomba de calor a lo largo del ensayo.

8.1.3. Análisis exergético

Una vez obtenidos y tratados los datos del ensayo, se calculan los flujos exergéticos así como los F y P en base a la exergía de cada componente; de manera análoga al análisis energético, ver Imagen 13.

- En el caso de la caldera el rendimiento exergético es significativamente menor que el energético, siendo este inferior al 2%. Esto es así porque en la caldera se usa la energía química de la combustión del gas natural para calentar el agua a temperaturas cercanas al ambiente (entre 60-80°C). Por un lado, la exergía de un combustible fósil se calcula en base a su factor de calidad (siendo el del gas natural del 1.04); por otro lado, la exergía del flujo de agua calentado es proporcional a la temperatura T_0 del estado muerto (que es el ambiente). Como el flujo de calor está muy cerca de la temperatura ambiental, la capacidad de realizar trabajo útil, ergo su exergía, es muy bajita. Así, el ratio exergético entre el P y el F (el rendimiento exergético) es notablemente inferior al ratio energético.

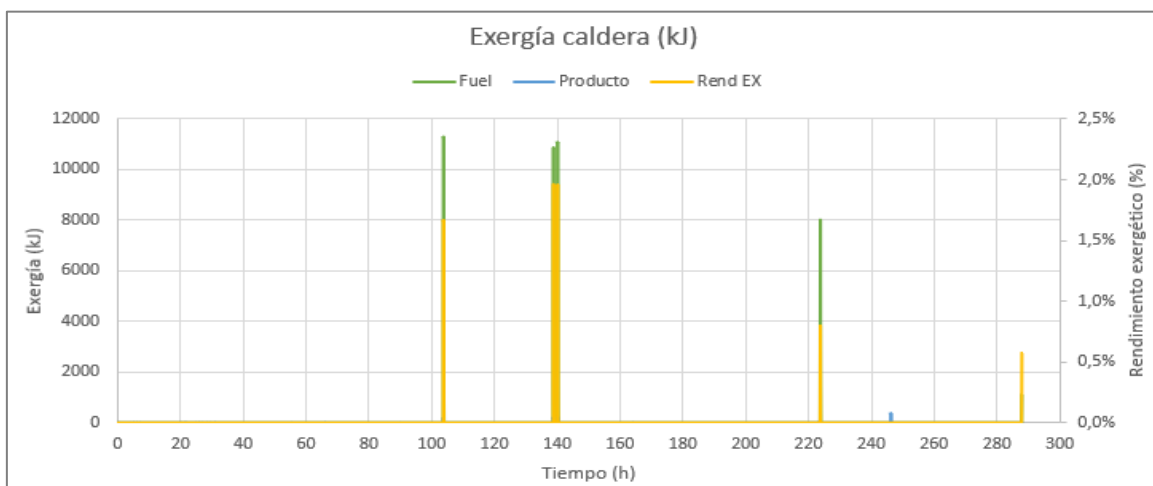


Imagen 13. Gráfico de valores exergéticos y rendimiento exergético de la caldera

- En el caso de la bomba de calor, aun teniendo un COP mayor que la unidad no ocurre lo mismo con el rendimiento exergético, el cual siempre es mejor que 1. Al fin y al cabo, la electricidad consumida en la bomba de calor (que tiene un factor de calidad del 100%) se transforma en calor (de una calidad inferior que la electricidad). Por ello, el rendimiento exergético es el que mejor caracteriza la eficiencia de conversión energética entre la electricidad y el calor; además, el rendimiento exergético del 100% es el máximo alcanzable, sea cual sea el equipo en análisis. Sin embargo, si únicamente atendemos al COP energético no se conoce, a priori, la capacidad máxima de esa bomba, ya que es preciso conocer el rendimiento de Carnot correspondiente.

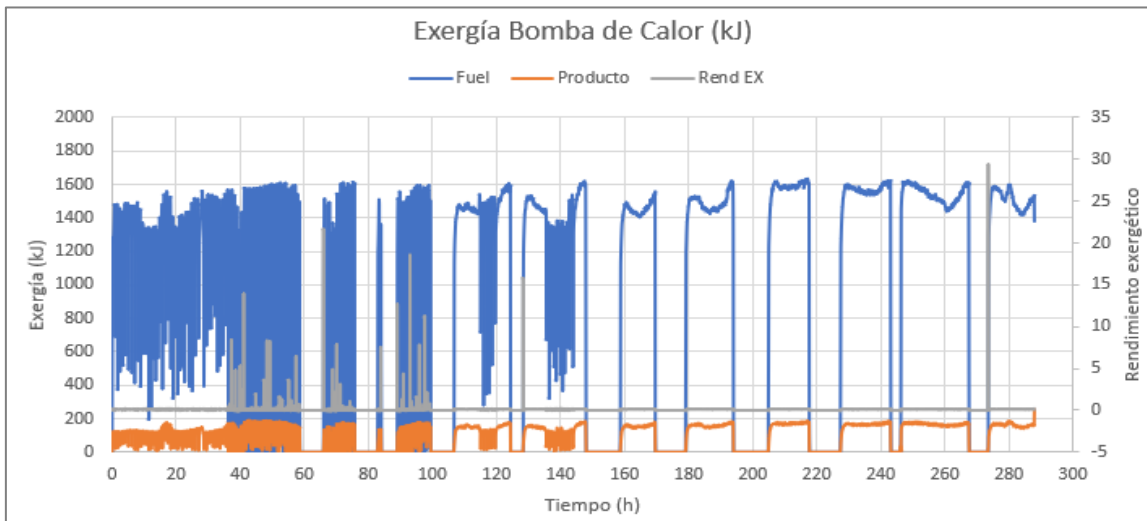


Imagen 14. Gráfico de valores exergéticos del fuel y producto de BC

8.2. Comprobación del sistema de control de BC

Los siguientes gráficos analizan la adecuación o no del control previamente establecido:

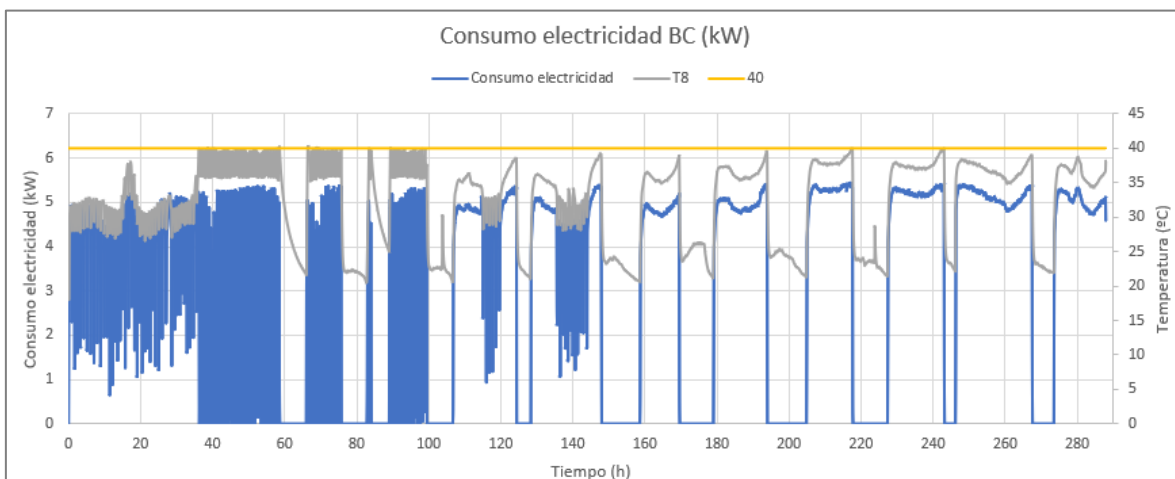


Imagen 15. Gráfico del control de la BC

En la Imagen 15 se muestra el consumo de electricidad de la bomba de calor y la temperatura del flujo de entrada al aerotermo (T8). Según el control establecido, si T8 es superior a 40°C la bomba de calor debe apagarse (estado 3).

- En este caso, se comprueba que la temperatura del flujo de entrada nunca llega a rebasar los 40°C de temperatura de consigna, por lo que la instalación no llega a pasar al estado 3 (solo funciona la bomba de alimentación y el aerotermo).
- Por ello, si uno de los objetivos fuera analizar el estado 3, la temperatura de consigna debería de ser menor a la establecida de 40°C.

8.2.1. Anomalía en la caldera

Tal y como se ha mencionado, la caldera tiene un comportamiento anómalo, demostrando a partir de los gráficos del control que se muestran a continuación:

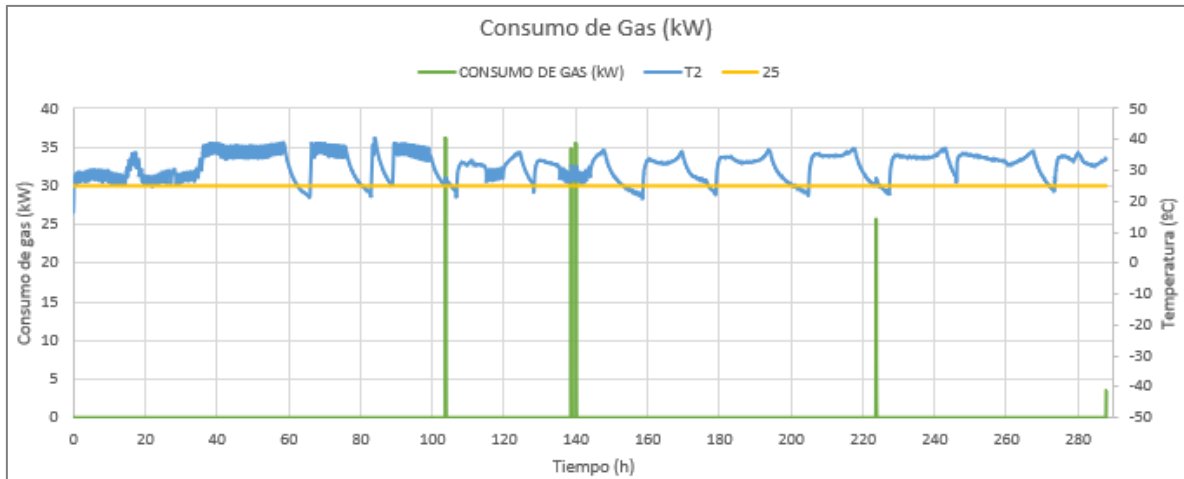


Imagen 16. Gráfico del control de la caldera

En esta gráfica se muestra el consumo de gas de la caldera a lo largo del ensayo, y la temperatura de entrada de la bomba de calor (T2) que es la temperatura que condiciona el funcionamiento de la caldera. El control está diseñado para que cuando la temperatura de consigna T2 sea menor a 25°C la caldera se encienda para dar apoyo a la bomba de calor y así poder suplir la demanda de calefacción. Como se aprecia en la Imagen 16, cuando esa temperatura desciende de 25°C, que sucede muy pocas veces durante poco tiempo, la caldera no se enciende. Por otro lado, el periodo que permanece encendida (cuando $T_2 > 25^\circ\text{C}$) es demasiado breve como para poder llegar a las condiciones estacionarias.

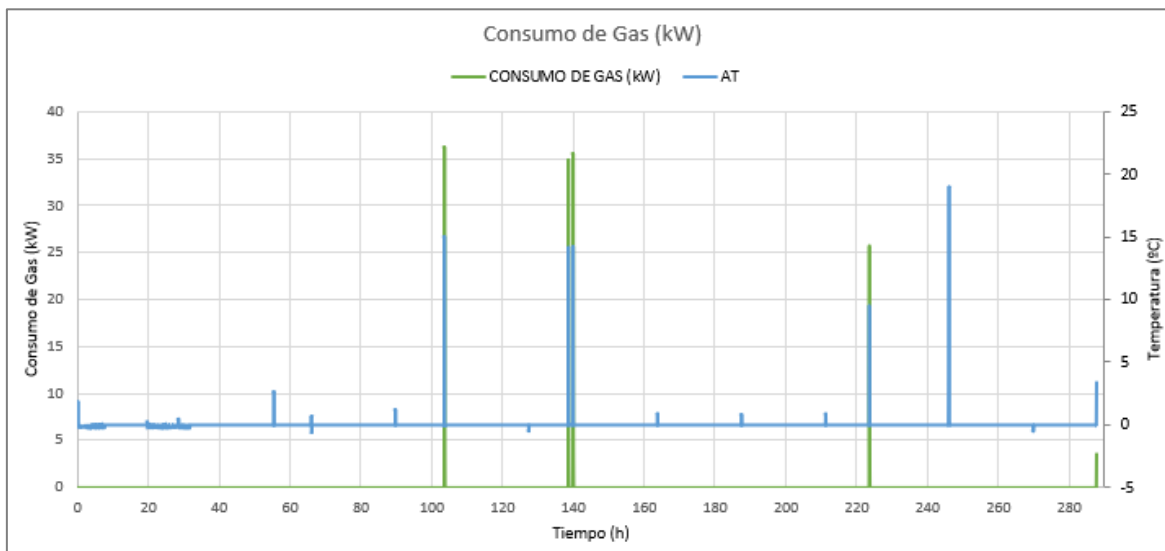


Imagen 17. Gráfico del consumo de gas e incremento de temperatura en la caldera

En la Imagen 17 se compara el consumo de gas que tiene la caldera con el incremento de temperatura entre el flujo de entrada y el flujo de agua de salida de la caldera, en donde sí se

observa un incremento de temperatura, aunque es mínimo tratándose de una caldera. Lo que hace pensar que igual se podría prescindir de la caldera y trabajar exclusivamente con la bomba de calor.

Por otro lado, se observan incrementos de temperatura cuando no existe consumo de gas. Estos son muy pequeños, cercanos a 1°C. Se puede pensar que estos valores son debidos a errores propios de las incertidumbres de los termopares; que corresponden a termopares Pt100, con una precisión de $\pm 0.01^\circ\text{C}$. Por lo tanto, estos valores habría que filtrarlos y considerarlos como ruidos.

8.3. Resultados termoeconómicos.

Para facilitar el análisis termoeconómico de la instalación, se define una estructura productiva, añadiendo equipos “virtuales” (equipos grises en la imagen) para ayudar la representación del fuel y producto de cada equipo. Además, se reenumeran los flujos (Imagen 18). Así se obtienen 14 equipos y 19 flujos.

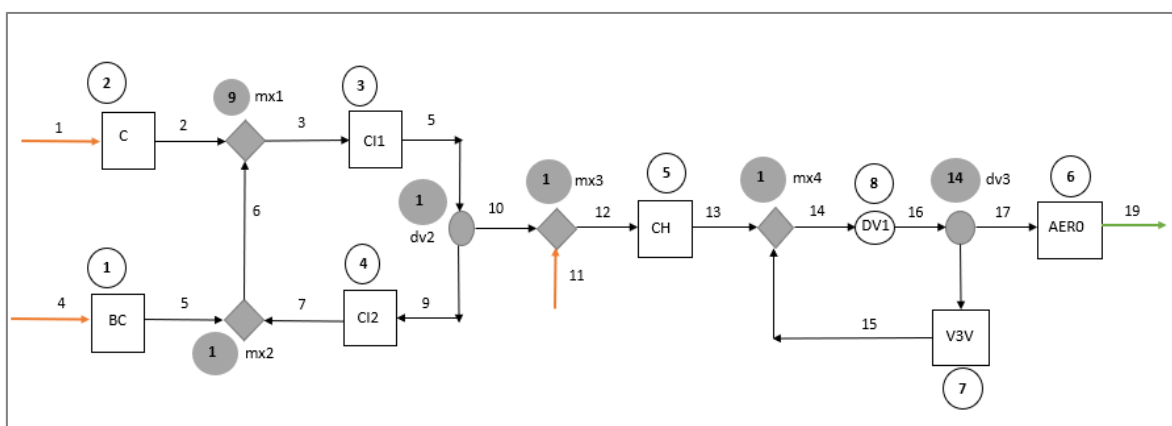


Imagen 18. Estructura productiva simplificada

Tabla 8. Estructura productiva simplificada

Nº	NOMBRE	FUEL	PRODUCTO
1	BC (Bomba de calor)	4	5
2	CA (Caldera)	1	2
3	CI 1 (Colector de impulso 1)	3	5
4	CI 2 (Colector de impulso 2)	9	7
5	CH (Compensador hidráulico)	12	13
6	AER-01 (Aerotermino)	17	19
7	V3V-05 (Válvula 3 vías)	18	15
8	DV 1 (Diverter 1)	14	16
9	mx1 (mixer 1)	2+6	3
10	mx2 (mixer 2)	5+7	6
11	dv2 (diverter 2)	5	10+9
12	mx3 (mixer 3)	10+11	12



13	mx4 (mixer 4)	13+15	14
14	dv3 (diverter 3)	16	17+18

8.3.1. Otros datos económicos

Además, se determinan otros datos económicos:

Por un lado, se define el coste unitario de los recursos externos (electricidad, gas natural), Tabla 9.

Tabla 9 Costes económicos unitarios de los recursos de entrada

C_{elec} [€/kWh _{ex}]	0,286
C_{GN} [€/kWh _{ex}]	0,081

Y por otra parte, se define el vector de los costes de adquisición, operación y mantenimiento, **Z**, de los componentes, según las horas de funcionamiento de los equipos y su precio de adquisición, operación y mantenimiento (Tabla 10), así como con datos como el interés efectivo o la vida útil de cada componente.

Tabla 10 Datos económicos de los componentes de la instalación

Nº	NOMBRE	Coste Adquisición Equipos (CAE) [€]	Costes Fijos (CF) [€/periodo]	[hON/periodo]
1	BC (Bomba de calor)	4396	15,21	196,75
2	CA (Caldera)	1899	6,57	0,75
3	CI 1 (Colector de impulso 1)	900	3,11	288,00
4	CI 2 (Colector de impulso 2)	900	3,11	288,00
5	CH (Compensador hidráulico)	1334	4,62	288,00
6	AER-01 (Aerotermo)	4502	15,58	212,43
7	V3V-05 (Válvula 3 vías)	80	0,28	288,00
8	DV 1 (Diverter 1)	80	0,28	288,00
9	mx1 (mixer 1)	0	0,00	288,00
10	mx2 (mixer 2)	0	0,00	288,00
11	dv2 (diverter 2)	0	0,00	288,00
12	mx3 (mixer 3)	0	0,00	288,00
13	mx4 (mixer 4)	0	0,00	288,00
14	dv3 (diverter 3)	0	0,00	288,00
TOTAL [€]		14091		

8.3.2. Costes exergéticos

La Tabla 11 contiene los resultados termoeconómicos a lo largo de las 288 horas que duró el ensayo, donde se obtienen las siguientes conclusiones:

Tabla 11 Resultados exergéticos de los componentes de la instalación

Nº	NOMBRE	F_{ex} [kWh _{ex}]	P_{ex} [kWh _{ex}]	k [$\frac{kWh_{ex}}{kWh_{ex}}$]	k_F^* [$\frac{kWh_{ex}}{kWh_{ex}}$]	k_P^* [$\frac{kWh_{ex}}{kWh_{ex}}$]
1	BC (Bomba de calor)	892,11	92,60	9,63	1,00	9,63
2	CA (Caldera)	13,80	0,20	69,88	1,00	69,88
5	CH (Compensador hidráulico)	276,85	166,11	1,67	3,94	6,57
6	AER-01 (Aerotermo)	73,76	15,04	4,90	14,78	72,50
7	V3V-05 (Válvula 3 vías)	260,62	168,27	1,55	14,78	22,90

- Como es de esperar, a medida que se avanza en la cadena energética: (1) la exergía disminuye entre los fueles y los productos de cada equipo (debido al rendimiento exergético), y (2) la exergía disminuye a medida que avanza entre los componentes aguas abajo, ver Imagen 19.

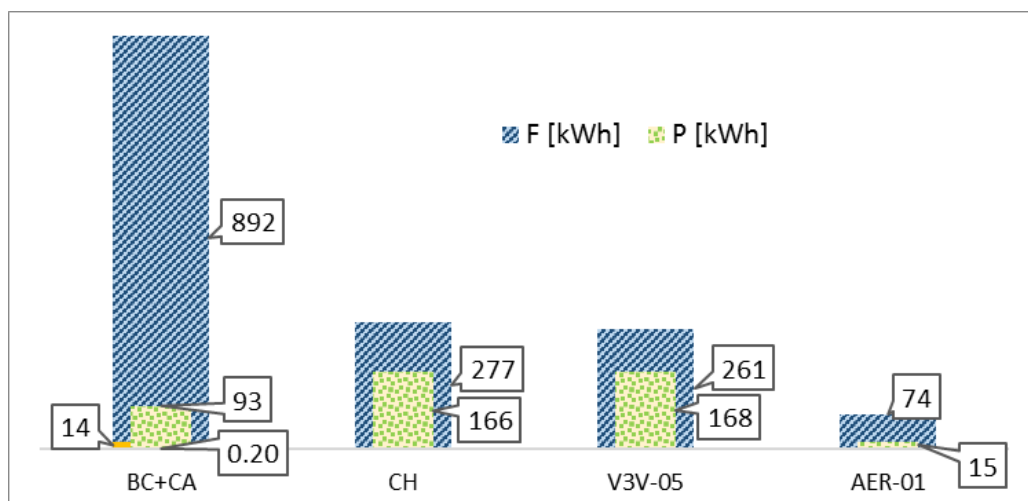


Imagen 19 Evolución de los Fuegos y Productos de cada equipo en la cadena energética

- Los equipos con el mayor consumo exergético unitario, k_i , son los equipos generadores, es decir la bomba de calor y la caldera, con valores de 9,68 [-] y 69,88 [-] respectivamente. Esto deja en evidencia que son los equipos generadores aquellos con mayores destrucciones de exergía en el sistema, siendo más elevados los de la caldera.
- Por otra parte, se observa que los costes exergéticos unitarios de los fueles, $k_{F,i}^*$, de los equipos generadores tienen el valor de 1, ya que estos dos flujos de entrada son flujos externos. Asimismo, se observa que la ratio entre estos costes exergéticos

unitarios de los fueles y los costes exergéticos unitarios de los productos de estos dos equipos, $k_{p,i}^*$, es proporcional a las irreversibilidades que surgen en los equipos generadores.

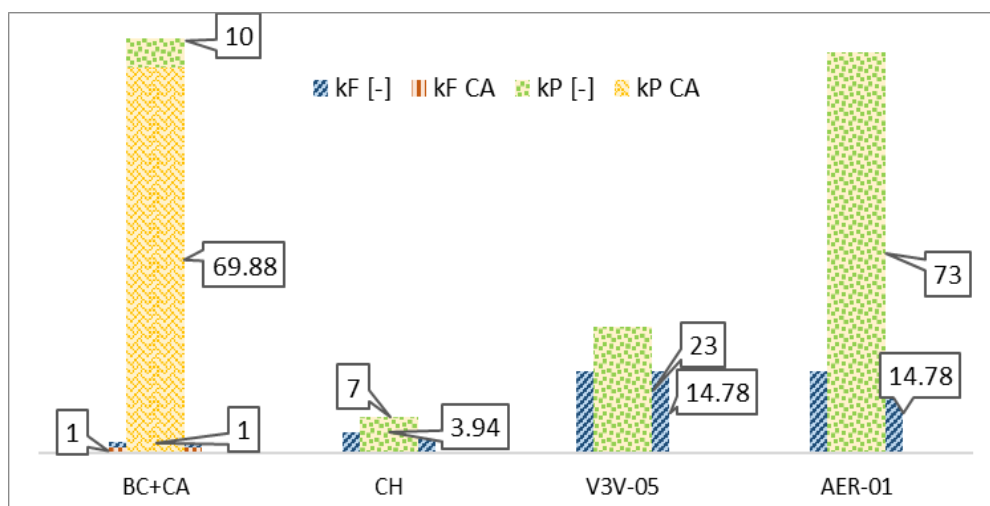


Imagen 20 Evolución de los costes exergéticos unitarios a lo largo de la cadena energética

- A medida que se avanza en la cadena energética los costes van aumentando debido a la acumulación de irreversibilidades, ver Imagen 20.
- Además, el producto total de la caldera, $P_{ex} = 0,20 \text{ [MWh}_{ex}]$, es bajo. Esto se debe a que la caldera ha estado en funcionamiento un 0,26 % del tiempo total.

8.3.3. Costes exergoeconómicos

Para los resultados exergoeconómicos de la instalación, se ha hecho un primer análisis sin tener en cuenta los costes de operación, adquisición y mantenimiento que se recogen en el vector Z ; esto es, únicamente se han considerado los costes debidos al consumo externo de gas y electricidad de la instalación, tal y como se muestra en la última columna de la Tabla 12. Así llegamos a las siguientes conclusiones:

Tabla 12 Resultados exergoeconómicos de los componentes de la instalación sin tener en cuenta los costes de Z

Nº	NOMBRE	C_F	C_P	C_Z
		$\left[\frac{c\text{€}}{\text{kWh}_{ex}} \right]$	$\left[\frac{c\text{€}}{\text{kWh}_{ex}} \right]$	$\left[\frac{c\text{€}}{\text{kWh}_{ex}} \right]$
1	BC (Bomba de calor)	21,81	210,11	0,00
2	CA (Caldera)	5,07	354,36	0,00
5	CH (Compensador)	70,53	117,55	0,00
6	AER-01 (Aerotermino)	264,74	1298,27	0,00
7	V3V-05 (Válvula 3 vías)	264,74	410,03	0,00



- Por una parte, los costes exergoeconómicos de los fueles, c_F , consideran las irreversibilidades acumuladas hasta ese punto de la cadena energética, así se aprecia como a medida que se avanza en la cadena energética esos costes aumentan.
- Por otra parte, en lo relativo a los costes exergoeconómicos de los productos solo se tienen en cuenta los costes unitarios debidos al consumo exclusivo de los recursos externos, c_P ; por ello, de la misma manera que ocurre con los costes exergoeconómicos de los fueles, los de los productos aumentan a medida que se avanza en la cadena energética.

La Tabla 13 incluye los datos de los costes exergoeconómicos de los fueles y productos de los componentes de la instalación teniendo en cuenta los costes de **Z** para este segundo ensayo:

Tabla 13 Resultados exergoeconómicos de los componentes de la instalación teniendo en cuenta los costes de **Z**

Nº	NOMBRE	c_F	c_P	c_Z
		$\left[\frac{c\text{€}}{\text{kWh}_{\text{ex}}} \right]$	$\left[\frac{c\text{€}}{\text{kWh}_{\text{ex}}} \right]$	$\left[\frac{c\text{€}}{\text{kWh}_{\text{ex}}} \right]$
1	BC (Bomba de calor)	21,81	210,11	16,42
2	CA (Caldera)	5,07	354,36	3327,55
5	CH(Compensador hidráulico)	80,65	117,55	19,64
6	AER-01 (Aerotermino)	309,72	1298,27	324,16
7	V3V-05 (Válvula 3 vías)	309,72	410,03	69,83

- Por una parte, los costes exergoeconómicos de los fueles, c_F , no consideran solamente las irreversibilidades acumuladas hasta ese punto de la cadena energética y el consumo de los recursos externos, sino además los costes de amortización, operación y mantenimiento, tal y como se refleja en el aumento de los valores con respecto al análisis anterior (Tabla 12), como por ejemplo en el caso del aerotermino que pasa de $c_{F,aer}^{sinZ} = 264,74 \frac{c\text{€}}{\text{kWh}_{\text{ex}}}$ a $c_{F,aer}^{conZ} = 309,72 \frac{c\text{€}}{\text{kWh}_{\text{ex}}}$.
- Por otra parte, para este caso, los costes exergoeconómicos de los productos se dividen en dos costes unitarios:
 - Los costes unitarios debidos al consumo exclusivo de los recursos externos, c_P .
 - Los costes debidos a los costes de amortización, operación y mantenimiento que se contemplan en el vector **Z**, c_Z .

Así, el c_Z de la caldera resulta muy elevado debido a sus pocas horas de funcionamiento y repercute al resto de equipos; ya que estos costes exergoeconómicos están ligados a la estructura productiva previamente establecida y la caldera es uno de los primeros equipos en la cadena energética. Por ello, tanto el c_Z como el c_F aumenta en el resto de los equipos aguas abajo.

Dados los elevados costes que incluye el escaso uso de la caldera y su bajo aporte energético, se ha analizado el caso en el que no existe caldera; esto es y se sacrifica el confort térmico en el edificio por falta del aporte de la caldera durante el 0,26% del tiempo total.

Tabla 14 Resultados exergoeconómicos teniendo en cuenta los costes de Z con y sin caldera de apoyo

Nº	NOMBRE	CON CALDERA			SIN CALDERA		
		C_F [$\frac{c\text{€}}{\text{kWh}_{\text{ex}}}$]	C_P [$\frac{c\text{€}}{\text{kWh}_{\text{ex}}}$]	C_Z [$\frac{c\text{€}}{\text{kWh}_{\text{ex}}}$]	C_F [$\frac{c\text{€}}{\text{kWh}_{\text{ex}}}$]	C_P [$\frac{c\text{€}}{\text{kWh}_{\text{ex}}}$]	C_Z [$\frac{c\text{€}}{\text{kWh}_{\text{ex}}}$]
1	BC (Bomba de calor)	21,81	210,11	16,42	21,81	210,11	16,42
2	CA (Caldera)	5,07	354,36	3327,55	0,00	0,00	0,00
5	CH (Compensador)	80,65	117,55	19,64	78,02	117,13	15,68
6	AER-01 (Aerotermino)	309,72	1298,27	324,16	299,86	1293,61	280,47
7	V3V-05 (Válvula 3 vías)	309,72	410,03	69,83	299,86	408,56	56,04

La Tabla 15 compara los costes exergoeconómicos con y sin caldera de apoyo. Como se ha comentado, se vuelve a destacar el aumento considerable de los coste unitarios de los equipos debido al coste de amortización, operación y mantenimiento de la caldera $C_{z,CA}$.

Tabla 15 Comparación del coste total del producto del sistema

		C_P
SIN TENER EN CUENTA Z (solo coste de combustible)	CALEFACCIÓN	195,27 [$\frac{\text{€}}{12 \text{ días}}$]
TENIENDO EN CUENTA Z	CALEFACCIÓN	244,02 [$\frac{\text{€}}{12 \text{ días}}$]
TENIENDO EN CUENTA Z, SIN CALDERA	CALEFACCIÓN	236,75 [$\frac{\text{€}}{12 \text{ días}}$]

La Tabla 15 recoge los costes de la producción de calefacción, para los tres casos analizados. Por una parte, es evidente que los costes de adquisición, mantenimiento y operación suponen un sobrecoste en las instalaciones térmicas. Por la otra parte, se refleja como el no utilizar la caldera y “sacrificar” el 0,26% del tiempo total del confort térmico del edificio, supone un ahorro de 7,27 € en 12 días, que equivale a un ahorro del 3% del total.

9. Problemas a la hora de ejecutar el ensayo

Durante este trabajo se han encontrado ciertas dificultades que han ralentizado el estudio.:

- La primera dificultad consistió en cambiar la demanda de calefacción del edificio de Burgos calculada respecto a la que estaba establecida en los archivos internos del programa Winzip del laboratorio experimental del LCCE, ya que no leía la demanda del edificio deseado. Inicialmente, la demanda de calefacción programada pertenecía a una pequeña vivienda, por lo que la demanda no era lo suficientemente elevada como para que la caldera se encendiera, siguiendo el control establecido en este trabajo.



- El segundo problema se encontró analizando el control diseñado de la instalación, ya que la caldera no se encendía el tiempo suficiente como para que los datos fueran relevantes, y se volvió a realizar el ensayo.
- Una vez resueltos los problemas, se quiso iniciar un ensayo de larga duración, exactamente de 12 días. Esta vez los problemas eran debidos a que los datos de la demanda los comenzaba a leer desde la mitad del archivo, por lo que el laboratorio no representaba la curva de demanda programada. Por ello, se dejó que el ensayo terminara y comenzar de nuevo. Esto puede resultar un problema sería si el archivo fuera muy extenso, ya que acabar el ensayo tardaría mucho tiempo.



CONCLUSIONES

Este trabajo analiza experimentalmente en el LCCE el funcionamiento de una instalación de bomba de calor y caldera para calefacción de un bloque de viviendas en Burgos.

En cuanto al control, se concluye lo siguiente:

- Caldera
 - Se debería de estudiar, en un futuro trabajo, el control interno de la caldera, ya que parece que tiene prioridad sobre el control diseñado en el laboratorio, ya que con el control externo no se consigue influir en su funcionamiento.
 - La instalación está sobredimensionada, ya que el aporte de la caldera es tan mínimo que el sistema podría funcionar sin ella y únicamente con la bomba de calor. Para poder hacer que la caldera entrara más, se debería aumentar la demanda incluyendo nuevas viviendas.
- Bomba de calor
 - La bomba de calor se activa y se desactiva únicamente siguiendo la curva de demanda de calefacción. Sin embargo, el control integra un comando el cual desactiva la bomba si $T_8 > 40^\circ\text{C}$; consigna que parece que nunca se da.

En cuanto a los datos extraídos del análisis termoeconómico:

- En la caldera y en la bomba de calor, equipos generadores, se encuentra el mayor consumo exergético unitario, por lo que estos equipos tienen la mayor destrucción de exergía del sistema. Siendo el consumo exergético unitario de la bomba de calor $9,68[-]$ y el de la caldera $69,88[-]$ respectivamente.
- En estos mismos equipos, se observa que los costes exergéticos unitarios de los productos y de los fueles son proporcionales a las irreversibilidades que surgen en los equipos generadores; caldera y bomba de calor.
- La caldera es el equipo que menos tiempo está en funcionamiento, exactamente un $0,26\%$ del tiempo total, lo que provoca que el producto total de la caldera sea $P_{ex} = 0,71 [MWh_{ex}]$, que es un valor bajo.
- Los costes de amortización, operación y mantenimiento de la caldera (c_Z) resulta muy elevado debido a sus pocas horas de funcionamiento. Esto repercute al resto de los equipos debido a la relación existente en la estructura productiva establecida, ya que la caldera es uno de los primeros equipos en la cadena energética.
- No incluir la caldera en el sistema genera un 3% de ahorro en 12 días, a costa de no garantizar el confort térmico en el edificio durante $0,26\%$ del tiempo total.



En definitiva, se ha demostrado que un análisis termoeconómico es capaz de identificar las irreversibilidades y sobrecostes en una instalación térmica. Además, el software termoeconómico utilizado dota de flexibilidad al usuario a la hora de poder realizar diferentes casuísticas de las instalaciones y es avance dentro del campo del mantenimiento de las instalaciones térmicas de los edificios.

METODOLOGÍA SEGUIDA EN EL DESARROLLO DEL TRABAJO

10. Descripción de tareas, diagrama de Gantt.

Con el fin de cumplir los objetivos planteados al inicio de este trabajo, se describen las tareas a cumplir, con un posterior diagrama de Gantt. El trabajo tiene una duración total de 400 horas que han sido divididas en diferentes tareas a realizar:

- Tarea 0: Coordinación y gestión del trabajo.
- Tarea 1: Estudio bibliográfico de la termoeconomía.
 - Tarea 1.1: Desglose de métodos termoeconómicos.
 - Tarea 1.2: Planificación del trabajo.
- Tarea 2: Análisis de la instalación del laboratorio experimental del LCCE.
 - Tarea 2.1: Estudio de los equipos de la instalación y modos de funcionamiento.
 - Tarea 2.2: Diseño del ensayo experimental de una instalación de calefacción.
- Tarea 3: Iniciar el ensayo.
 - Tarea 3.1: Obtención de variables termodinámicas.
 - Tarea 3.2: Obtención de variables termoeconómicas.
 - Tarea 3.3: Cálculo de las estructuras productivas.
- Tarea 4: Análisis de resultados termoeconómicos.
 - Tarea 4.1: Elección de los mejores métodos termoeconómicos.
- Tarea 5: Redacción del documento de memoria del TFM.
- Tarea 6: Obtención y redacción de las conclusiones.
 - Tarea 6.1: Discusión de los resultados.
 - Tarea 6.2: Detección de puntos de mejora y de investigación.
- Tarea 7: Presentación del TFM.

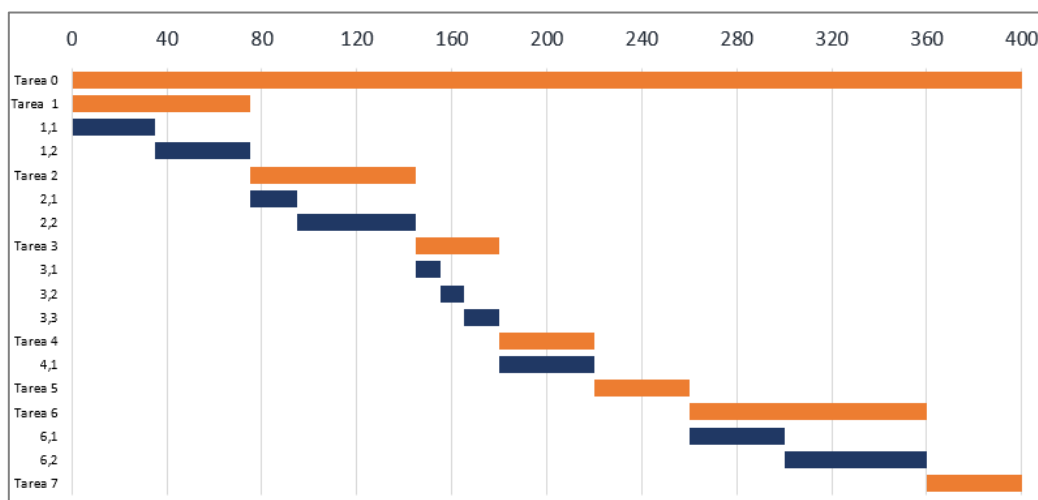


Imagen 21. Diagrama de Gantt

ASPECTOS ECONÓMICOS

11. Descripción del presupuesto

En este apartado se muestra lo referente a los gastos económicos que ha supuesto realizar este trabajo. Se divide el gasto en horas trabajadas y en la depreciación del material utilizado.

11.1. Horas trabajadas

A continuación, se muestran las horas trabajadas por cada persona que ha formado parte en este trabajo y el coste correspondiente a estas, Tabla 16.

Tabla 16. Coste de las horas trabajadas

	Número de horas	Coste por hora (€/h)	Coste total (€)
Estudiante	400	15	6000
Director	90	40	3600
Doctorando	80	30	2400
TOTAL			12000

En la Tabla 16 se ven las horas dedicadas a este trabajo por cada persona que ha intervenido, teniendo cada uno un coste diferente por hora, siendo así el coste total de 120000€.

11.2. Depreciaciones

Aquí se presentan los costes relacionados con el ensayo experimental del laboratorio, aunque no se muestren los gastos relacionados a licencias de software, ya que se ha utilizado el programa del mismo ordenador del laboratorio del LCCE.

Tabla 17. Coste de las depreciaciones del ensayo experimental del laboratorio

	Precio (€)	Vida útil (h)	Coste por hora (€/h)	Tiempo de uso (h)	Depreciación (€)
Costes de ensayos y amortización de los equipos	1100	5200	0,212	400	84,615
TOTAL					84,615

En la Tabla 17 se muestra el valor de la depreciación de los costes de ensayos y amortización de los equipos. La depreciación expresa la pérdida de valor de la maquinaria por su uso, por lo que el uso del laboratorio ha devaluado su precio en 84,615€.



BIBLIOGRAFÍA

- [1] CHEN AUSTIN, Miguel; BOYA, Carlos; MORAL, Dafni. Mejoras al desempeño energético en edificaciones abordando los desafíos actuales del lado de la demanda: Una revisión de contribuciones de Latinoamérica. Revista Digital Novasinergia, 2020, vol. 3, no 2, p. 124-142.
- [2] CÓRDOBA HERNÁNDEZ, Rafael; HERNÁNDEZ-AJA, Agustín. Revisión de la best practice” red española de ciudades por el clima”, desde la estrategia europea medioambiental. Revista INVI, 2013, vol. 28, no 77, p. 229-237.
- [3] GONDRES TORNÉ, Israel; LAJES CHOY, Santiago; DEL CASTILLO SERPA, Alfredo. Gestión del mantenimiento a interruptores de potencia. Estado del arte. Ingeniare. Revista chilena de ingeniería, 2018, vol. 26, no 2, p. 192-202.
- [4] PICALLO-PEREZ, Ana, et al. Reflexiones sobre la termoeconomía como una herramienta metodológica para la sostenibilidad en edificios. DYNA-Ingeniería e Industria, 2021, vol. 96, no 1.
- [5] MAZZARELLA, Livio. Energy retrofit of historic and existing buildings. The legislative and regulatory point of view. Energy and Buildings, 2015, vol. 95, p. 23-31.
- [6] NOUICER, Athir; MEEUS, L. The EU clean energy package. Florence School of Regulation, 2019.
- [7] BOE-A-2021-8447
- [8] DIRECTIVA (UE) 2018/844 DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 30 de mayo de 2018
- [9] URRIOL, JJ Eliçabe; BELLUCCIA, H. A. Propuesta de un parámetro de eficiencia exergética para edificios y viviendas. Energías Renovables y Medio Ambiente, 2020, vol. 35, p. 27-31.
- [10] PICALLO-PEREZ, Ana; SALA-LIZARRAGA, José M.; PORTILLO-VALDES, Luis. Development of a tool based on thermoeconomics for control and diagnosis building thermal facilities. Energy, 2022, vol. 239, p. 122304.
- [11] M. BENEDICT y E. P. GYFTOPOULOS, «Economic Selection of the Components of an Air Separation Process», en Thermodynamics: Second Law Analysis, vol. 122, 0 vols., AMERICAN CHEMICAL SOCIETY, 1980, pp. 195-202. doi: 10.1021/bk-1980-0122.ch012.
- [12] KEENAN, J.H. A steam chart for second Law analysis. Mechanical Engineering, 1932, vol. 54, p. 195-20.
- [13] EVANS, R. B.; TRIBUS, M. A Contribution to the Theory of Thermoeconomics, UCLA, Dept. of Engr. Report, 1962.
- [14] EL-SAYED, Y.; TRIBUS, M. Strategic use of thermoeconomics for system improvement. 1983.



- [15] TSATSARONIS, Georgios; WINHOLD, Michael. Exergoeconomic analysis and evaluation of energy-conversion plants—I. A new general methodology. *Energy*, 1985, vol. 10, no 1, p. 69-80.
- [16] VON SPAKOVSKY, Michael R. Application of engineering functional analysis to the analysis and optimization of the CGAM problem. *Energy*, 1994, vol. 19, no 3, p. 343-364.
- [17] MORAN, M. J.; SCIUBBA, E. *Exergy analysis: principles and practice*. 1994.
- [18] CUADRA, Cesar Torres. *Exergoeconomía simbólica: metodología para el análisis termoeconómico de sistemas energéticos*. 1991. Tesis Doctoral. Universidad de Zaragoza.
- [19] SERRA, L. *Optimización exergoeconómica de sistemas térmicos*. Universidad de Zaragoza, 1994.
- [20] LOZANO, M. A.; VALERO, A. Theory of the exergetic cost. *Energy*, 1993, vol. 18, no 9, p. 939-960.
- [21] TSATSARONIS, George; MORAN, Michael J. Exergy-aided cost minimization. *Energy Conversion and Management*, 1997, vol. 38, no 15-17, p. 1535-1542.
- [22] TSATSARONIS, George; LIN, Lan; PISA, J. Exergy costing in exergoeconomics. 1993.
- [23] LAZZARETTO, Andrea; TSATSARONIS, George. On the calculation of efficiencies and costs in thermal systems. En *Proceedings of the ASME advanced energy systems division*. AES, 1999. p. 421-430.
- [24] FRANGOPOULOS, Christos Athanasios. *Thermoeconomic functional analysis: a method for optimal design or improvement of complex thermal systems*. 1983. Tesis Doctoral. Georgia Institute of Technology.
- [25] VON SPAKOVSKY, M. R.; EVANS, R. B. *Engineering functional analysis—Part I*. 1993.
- [26] TSATSARONIS, G.; MOROSUK, T. Advanced thermodynamic (exergetic) analysis. En *Journal of Physics: Conference Series*. IOP Publishing, 2012. p. 012160.
- [27] GOROZABEL-CHATA, Francis B.; CARBONELL-MORALES, Tania. *Diseños experimentales aplicados a una bomba de calor de expansión directa con energía solar*. *Ingeniería Mecánica*, 2017, vol. 20, no 3, p. 160-168.
- [28] HERRERA-TOLEDO, R.; SÁNCHEZ, A.; SÁNCHEZ, G. Análisis de irreversibilidad de un ciclo de gas con compresión húmeda.
- [29] LEGUIZAMÓN ROBAYO, Adriana. *Análisis energético y exergético de un sistema de producción de energía a través de ciclos de potencia Brayton con interenfriamiento, recalentamiento y regeneración*. 2021. Tesis de Licenciatura. Fundación Universidad de América.
- [30]



- [31] RODRÍGUEZ HERVÁS, Gonzalo. Análisis exerético y exergoeconómico del ciclo Allam.
- [32] Producción de electricidad con cero emisiones. 2018. Tesis de Licenciatura.
- [33] ARANGO MENESES, Juan Fernando. Optimización de una planta piloto de aprovechamiento integral de naranja en términos energéticos y exeréticos. Tesis Doctoral. Universidad Nacional de Colombia.
- [34] VEGA CLAVIJO, Lili Tatiana. Módulo termoeconómico para su integración en un sistema de gestión energético, basado en la norma ISO 50001, para una planta de extracción de aceite de palma en el departamento del Meta, Colombia.
- [35] GARCÍA CUTILLAS, Clemente, et al. Energías renovables.-ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DEL SISTEMA DE CONDENSACIÓN EN EL CONSUMO DE AGUA Y PRODUCCIÓN DE ENERGÍA DE UNA PLANTA TERMOSOLAR. III Encuentro de Ingeniería de la Energía del Campus Mare Nostrum, 2020.
- [36] DIMRI, N.; RAMOUSSE, J. Thermoeconomic optimization and performance analysis of solar combined heating and power systems: A comparative study. Energy Conversion and Management, 2021, vol. 244, p. 114478.
- [37] MEDEROS, Rolando Naranjo. Determinación y evaluación de costos termoeconómicos y medioambientales en el sistema de aire y gases del generador de vapor de la Central Termoeléctrica Antonio Guiteras. 2018. Tesis Doctoral. Tesis de maestría en Tecnología Energética de la Universidad de Matanzas, Matanzas, Cuba.
- [38] JIMENEZ GARCIA, Juan Antonio, et al. Análisis exerético y termoeconómico de la Central Termoeléctrica, Villa de Reyes, operando a carga parcial.
- [39] URRIOL, JJ Eliçabe; BELLUCCIA, H. A. Propuesta de un parámetro de eficiencia exerética para edificios y viviendas. Energías Renovables y Medio Ambiente, 2020, vol. 35, p. 27-31.
- [40] SIMANCAS VARGAS, Jean Carlos. Análisis del uso de la energía eléctrica en edificios de capacitación, caso de estudio. 2017. Tesis de Maestría. Quito, 2017.
- [41] ZANDI, Sina, et al. Multi-objective optimization and thermoeconomic analysis of a novel CCHP with TES and hybrid cooling for residential complex. Thermal Science and Engineering Progress, 2020, vol. 19, p. 100656.
- [42] 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.