



Universidad de Valladolid



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES

Grado en Ingeniería Mecánica

ANÁLISIS EXERGÉTICO DE REDES DE CALOR

Autor:

Llanos Blázquez, Miguel

Tutor:

Martín González, María del Carmen

Departamento:

**IEF MÁQUINAS Y MOTORES
TÉRMICOS**

Valladolid, diciembre de 2018.

*A Pablo Iribarren, por tantas horas juntos en la EII que me han dado una amistad que vale más
que cualquier título.*

Muchas gracias, amigo.

RESUMEN

En este TFG se ha hecho un recorrido a lo largo de las distintas políticas energéticas adoptadas en Europa y cómo éstas han afectado a la utilización de las distintas fuentes de energía por parte de la población para satisfacer sus necesidades.

Dicha política energética ha obligado a la búsqueda de sistemas energéticos más eficientes, y ha sido uno de los agentes más importantes en la impulsión y desarrollo de las redes de calor.

Una vez contextualizados en el ámbito de las redes de calor, hemos presentado cada uno de sus componentes y las distintas opciones que disponemos hoy en día para hacerlas funcionar, centrándonos en la producción de ACS a través de las energías renovables.

Por último, se ha realizado una revisión teórica al método exergético, para después aplicarlo al análisis de una red de calor y observar la variación del rendimiento exergético de cada uno de sus componentes.

Keywords: Redes de calor urbanas, eficiencia exergética, política energética, biomasa, método exergético.

SUMMARY

In this TFG, a journey has been made along the different energy policies adopted in Europe and how these have affected the use of different energy sources by the population to satisfy their needs.

This energy policy has forced the search for more efficient energy systems, and has been one of the most important agents in the promotion and development of urban District Heating.

Once contextualized in the field of District Heating, we have presented each of its components and the different options available to us today to make them work, focusing on the production of hot water through renewable energy.

Finally, a theoretical review of the exergy method has been carried out, to then apply it to the analysis of a District Heating and observe the variation of the exergy efficiency of each of its components.

Keywords: District Heating, exergy efficiency, energy policy, biomass, exergy method.

ÍNDICE

RESUMEN 1

CAPÍTULO 1

1.1 MOTIVACIÓN Y JUSTIFICACIÓN DEL TFG 8

CAPÍTULO 2

2.1 POLÍTICA ENERGÉTICA EN ESPAÑA Y EN LA UNIÓN EUROPEA 12

2.2 ESTRATEGIA Y EJES DE ACCIÓN. 12

2.3 PLANES NACIONALES: CONTENIDOS, OBJETIVOS Y LOGROS 13

- 2.3.1 *Plan de acción de Energías Renovables (PER) 2005-2010* 13
- 2.3.2 *Plan de acción de Energías Renovables (PER) 2011-2020* 14
- 2.3.3 *Plan de Acción Nacional de Energías Renovables (PANER) 2011-2020* 14
- 2.3.4 *Plan de Acción Nacional de Eficiencia Energética (PAEE) 2017-2020* 15

2.4 LOGROS DE LA POLÍTICA ENERGÉTICA: ENERGÍAS RENOVABLES. 16

2.5 LOGROS DE LA POLÍTICA ENERGÉTICA: EFICIENCIA ENERGÉTICA. 18

CAPÍTULO 3

3.1 TEORÍA DEL MÉTODO EXERGÉTICO. 23

- 3.1.1 *¿Qué entendemos por Exergía?* 23
- 3.1.2 *Balance exergético a un sistema cerrado.* 23
- 3.1.3 *Balance exergético a un sistema abierto.* 25

3.2 CARACTERÍSTICAS Y VENTAJAS DEL ANÁLISIS EXERGÉTICO. 27

CAPÍTULO 4

4.1 REDES DE CALOR, CALEFACCIÓN POR DISTRITO Y DISTRICT HEATING. 33

- 4.1.1 *Introducción y contexto actual.* 33
- 4.1.2 *¿Qué son las redes de climatización urbana?* 34
- 4.1.3 *¿Qué ventajas tiene?* 34

4.2 COMPONENTES DE LA RED DE DISTRITO 35

4.3 CONFIGURACIÓN DE LAS SUBESTACIONES 40

4.4 CLASIFICACIÓN DE LAS REDES DE CALOR SEGÚN EL TRAZADO. 43

4.5 BENEFICIOS DE LAS REDES DE CALOR URBANAS. 45

CAPÍTULO 5

5.1 FUENTES DE CALOR EN REDES URBANAS DE CLIMATIZACIÓN 52

- *5.1.1 Biomasa 52*
 - 5.1.1.2 Fuentes más comunes de la biomasa 53
 - 5.1.1.3 Usos y aplicaciones: Energía térmica 54
 - 5.1.1.4 Economía y biomasa. 55
 - 5.1.1.5 Biomasa y medioambiente 56
- *5.1.2 Geotermia 57*
 - 5.1.2.1 Obtención de la energía. 58
 - 5.1.2.2 La energía geotérmica en España 60
 - 5.1.2.3 Uso de energía geotérmica en el District Heating. 61
 - 5.1.2.4 Conclusiones acerca de la Geotermia. 63
- *5.1.3 Energía solar 64*
 - 5.1.3.1 Funcionamiento y aplicación a la energía térmica. 65
 - 5.1.3.2 Clasificación de las instalaciones solares según el sistema de distribución. 66
 - 5.1.3.3 La energía solar en las redes urbanas (SDH). 69
- *5.1.4 Cogeneración y calores residuales 70*
 - 5.1.4.2 Calor útil en una planta de cogeneración. 71
 - 5.1.4.3 Equipos de cogeneración 72
 - 5.1.4.4 Ventajas e inconvenientes de la cogeneración. 76
 - 5.1.4.5 Impacto medioambiental de las plantas de cogeneración. 79

CAPÍTULO 6

6.1 ANÁLISIS EXERGÉTICO DE UNA RED DE CALOR 83

- *6.1.1 Descripción de la red 83*
- *6.1.2 Volúmenes de control, estado ambiente e idelizaciones 84*
- *6.1.3 Análisis con el Primer Principio de la Termodinámica. 86*
- *6.1.4 Análisis exergético 86*
- *6.1.5 Rendimiento exergético 88*

6.2 PRESENTACIÓN DE RESULTADOS 91

- *6.2.1 Balance exergético a los elementos de la red 91*
 - 6.2.1.2 Balance exergético a la cámara de combustión. 92
 - 6.2.1.3 Balance exergético al intercambiador de calor de la caldera. 94
 - 6.2.1.4 Balance exergético al multicitación. 97
 - 6.2.1.5 Balance exergético a la bomba. 98

- 6.2.1.6 Balance exergético a la subestación de intercambio. 99

6.3 ANÁLISIS CUANTITATIVO DE LA DESTRUCCIÓN DE EXERGÍA DE LA RED DE CALOR 102

CAPÍTULO 7

7.1 CONCLUSIONES 109

ANEXOS

AX 1 CÁLCULOS REALIZADOS EN LA RED DE CALOR 114

- *AX 1.1 Cálculos en la cámara de combustión. 114*
- *AX 1.2 Cálculos en el intercambiador de la caldera. 116*
- *AX 1.3 Cálculos en el multiclón. 117*
- *AX 1.4 Cálculos en la bomba. 118*
- *AX 1.5 Cálculos en la subestación de intercambio. 119*

BIBLIOGRAFÍA 122

CAPÍTULO 1.

MOTIVACIÓN Y JUSTIFICACIÓN DEL PRESENTE TFG

1.1 MOTIVACIÓN Y JUSTIFICACIÓN DEL TFG

Actualmente en Europa nos encontramos en una etapa de grandes cambios en el ámbito energético ante la creciente preocupación de la población acerca de los efectos negativos para la salud y el medio ambiente de la generación de calor a través de los métodos convencionales.

Esta demanda social se ha traducido en la creación de un marco regulatorio y legislativo que pretende impulsar la utilización de fuentes de energía más limpias, así como la implantación de instalaciones para el reparto de dicha energía más eficientes que las habituales instalaciones individuales utilizadas en las viviendas.

Con este objetivo en mente, se han ido implantando en numerosos distritos una red de calor común a distintos edificios cuyo objetivo es, además de ofrecer un servicio de agua caliente sanitaria (ACS) a los habitantes de estos, hacerlo de una manera en la que se garantiza una mayor eficiencia energética y una mayor calidad en el servicio.

En la misma línea de trabajo, se ha promovido la utilización de sistemas de generación de calor mediante energías renovables a través de las distintas administraciones de los gobiernos de la UE. El objetivo en este caso es abastecer las redes de calor a través de métodos con una baja huella de carbono, una reducción efectiva en la emisión de Gases de Efecto Invernadero y una mejora en la calidad del aire en las ciudades.

A día de hoy parece muy difícil que el camino marcado por la actual política energética de España y la UE (la cual veremos a continuación) tenga vuelta atrás, de forma que el crecimiento que va a experimentar la implantación de redes de calor en distintos distritos va a ser muy grande.

A raíz de este último párrafo, creemos en la necesidad de realizar un estudio exegético que esclarezca cuál es la verdadera eficiencia de estos nuevos sistemas y compararla con la de las instalaciones convencionales.

Este TFG nace con la idea de dar respuesta a las preguntas que surgen ante la aparición de estas nuevas formas de gestionar el suministro energético, y pretende servir como guía a aquel que desee conocer las ventajas e inconvenientes de las redes de distrito y en qué casos puede ser interesante la elección de estas frente a las instalaciones individuales.

CAPÍTULO 2.

POLÍTICA ENERGÉTICA EN ESPAÑA Y EN LA UNIÓN EUROPEA.

2.1 POLÍTICA ENERGÉTICA EN ESPAÑA Y EN LA UNIÓN EUROPEA

La evolución de los precios del petróleo y la distribución geográfica de las reservas de energía han condicionado las opciones energéticas de los países desarrollados desde hace más de tres décadas. De manera más reciente, las preocupaciones ambientales, el intenso proceso de crecimiento de los países emergentes, con el consiguiente efecto inflacionario sobre las fuentes de energía primaria y la liberalización del sector de la energía en Europa, han venido caracterizando el nuevo marco de referencia para la instrumentación de la política energética.

España se ha alineado a los ejes comunes marcados por la UE acerca de la política energética del continente, pero también ha debido tomar decisiones singulares para dar solución a una serie de problemas que se identifican con las peculiaridades de nuestro modelo energético, distinto al de los otros países europeos. En resumen, estas características pueden sintetizarse en:

- ✓ **Un consumo energético por unidad de producto interior bruto más elevado.**

Por cada unidad del PIB producida, España necesita más energía que los demás países europeos (de media), incluso si solo nos comparamos con aquellos países que cuentan con una estructura industrial y productiva similar. Para reconducir esta situación, durante los últimos años, se ha dado lugar a grandes esfuerzos en el ámbito del ahorro y la eficiencia energética, los cuales han logrado acercarnos a los valores medios de la UE en **intensidad energética**, camino que es necesario recorrer en los próximos años.

- ✓ **Elevada dependencia energética.**

Esta ha sido una máxima a lo largo de nuestra historia debido a la ausencia de yacimientos de energía primaria fósil. Esta citada dependencia genera riesgos económicos e incertidumbre sobre los procesos productivos, debido a la posibilidad de quedarte sin suministro, o a la exposición frente a la volatilidad de los precios.

- ✓ **Elevadas emisiones de gases de efecto invernadero**

Impulsadas fundamentalmente por el fuerte incremento en la producción de electricidad y de la demanda de transporte durante las últimas décadas.

2.2 ESTRATEGIA Y EJES DE ACCIÓN.

El camino tomado por España y el resto de la UE para afrontar los retos señalados, tiene como base el desarrollo de estrategias que permitan atacar estos 3 problemas de forma simultánea: para ello España ha priorizado en su política energética la liberalización y el fomento de la transparencia en los mercados, la inversión en el desarrollo de las infraestructuras energéticas y la apuesta por las energías renovables y del ahorro y la eficiencia energética.

La promoción que se ha realizado del ahorro y la eficiencia energética constituye un pilar fundamental en la política española desde finales del siglo XX hasta nuestros días. Esta

supone un valor neto positivo a la sociedad desde su origen, ya que simplemente se trata de producir la misma cantidad invirtiendo menos recursos. Conscientes de esto, esta idea supuso el pilar fundamental sobre el que se asienta el Plan Nacional de Acción de Eficiencia Energética 2017-2020 (PAEE) que se desarrollará más adelante.

Finalmente, el segundo eje de acción está representado por el desarrollo de las energías renovables. Éstas últimas tienen múltiples efectos positivos sobre el conjunto de la sociedad: entre otros, la sostenibilidad de sus fuentes, la reducción en las emisiones contaminantes, el cambio tecnológico, la posibilidad de avanzar hacia formas de energía más distribuidas, la reducción de la dependencia energética y del déficit de la balanza comercial, el aumento del nivel de empleo y el desarrollo rural. Lógicamente, estas ventajas implican la asunción de un mayor esfuerzo económico, que tiende a remitir en el tiempo gracias al desplazamiento de las tecnologías a lo largo de sus curvas de aprendizaje.

En general, los análisis realizados para el sistema español indican que los beneficios de las energías renovables son elevados y estables mientras que los mayores costes son limitados y tienden a remitir con el tiempo. Por tanto, los beneficios futuros en su conjunto exceden ampliamente a los costes presentes y justifican el marco regulatorio de apoyo a las energías renovables [1].

Esta segunda vía de acción está guiada por los Planes de acción de Energías Renovables (PER) 2005-2010 y 2011-2020 a nivel comunitario y por el Plan de Acción Nacional de Energías Renovables (PANER) a nivel nacional.

2.3 PLANES NACIONALES: CONTENIDOS, OBJETIVOS Y LOGROS

De forma genérica, los objetivos de los principales planes estatales se pueden resumir en los siguientes párrafos. Más adelante analizaremos sus logros en los sectores que a nosotros nos conciernen.

▪ 2.3.1 Plan de acción de Energías Renovables (PER) 2005-2010

El Plan de Energías Renovables en España (PER) 2005-2010, constituyó la revisión del Plan de Fomento de las Energías Renovables en España 2000-2010 hasta entonces vigente. Con esta revisión, se trató de mantener el compromiso de cubrir con fuentes renovables al menos el 12% del consumo total de energía en 2010, objetivo que informa las políticas de fomento de las energías renovables en la Unión Europea desde la aprobación del Libro Blanco en 1997, y que en España fue establecido por la Ley del Sector Eléctrico y dio lugar al mencionado Plan de Fomento. Así mismo, este PER 2005-2010 incorpora los otros dos objetivos indicativos para el año 2010 —29,4% de generación eléctrica con renovables y 5,75% de biocarburantes en transporte— adoptados con posterioridad al anterior plan.

En definitiva, durante la evaluación realizada para la elaboración del PER 2005-2010, se trató de reforzar la coordinación en los tres ámbitos de planificación hasta ahora mencionados —energías renovables, eficiencia energética y lucha contra el cambio climático— buscando en todo momento la máxima eficacia y coherencia de objetivos e instrumentos y manteniendo en lo posible los compromisos anteriormente adquiridos [2].

▪ 2.3.2 Plan de acción de Energías Renovables (PER) 2011-2020

Fue aprobado por el Consejo de Ministros el 11 de noviembre de 2011 y los objetivos que plantea son de consenso con la **Directiva 2009/28/CE** del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de abril de 2009, relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables [1].

Finalizado el periodo de vigencia del PER 2005-2010 y atendiendo al mandato establecido en la legislación vigente procede, por lo tanto, la elaboración de un nuevo Plan, el cual establece objetivos mínimos vinculantes para el conjunto de la Unión Europea y para cada uno de los Estados miembros, y la necesidad de que cada Estado miembro elabore y notifique a la Comisión Europea (CE), a más tardar el 30 de junio de 2010, un Plan de Acción Nacional de Energías Renovables (PANER) para el periodo 2011-2020, con vistas al cumplimiento de los objetivos vinculantes que fija la Directiva.

Dicha Directiva establece como objetivos generales, conseguir una cuota mínima del 20% de energía procedente de fuentes renovables en el consumo final bruto de energía de la Unión Europea [1].

▪ 2.3.3 Plan de Acción Nacional de Energías Renovables (PANER) 2011-2020

El Plan de Acción Nacional de Energías Renovables (PANER), que aquí se presenta, responde a los requerimientos y metodología de la Directiva de energías renovables y se ajusta al modelo de planes de acción nacionales de energías renovables adoptado por la Comisión Europea.

Mientras que los objetivos a nivel europeo quedan recogidos en el PER 2011-2020, la Directiva asigna una serie de medidas a cumplir por cada Estado, de forma que todas ellas de en conjunto hagan cumplir los objetivos de la UE. Los objetivos de España en este ámbito quedan recogidos en el PANER y se traducen en que las fuentes renovables representen al menos el 20% del consumo de energía final en el año 2020 —mismo objetivo que par a la media de la UE—, junto a una contribución del 10% de fuentes de energía renovables en el transporte para ese año [3].

▪ 2.3.4 Plan de Acción Nacional de Eficiencia Energética (PAEE) 2017-2020

El objeto del presente Plan Nacional de Acción de Eficiencia Energética 2017-2020 es responder a la exigencia del artículo 24.2 de la Directiva 2012/27/UE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 25 de octubre de 2012, relativa a la eficiencia energética, que exige a todos los Estados miembros de la Unión Europea la presentación de estos planes.

Dentro de numerosos capítulos que hay en este Plan, el tercero se centra en la presentación de los objetivos de eficiencia energética y el grado de avance en la consecución de estos.

El *primero de los apartados* del capítulo presenta el objetivo orientativo establecido por España conforme al artículo 3 y analiza la coherencia de dicho objetivo con el de la Unión Europea en su conjunto, cuantificado en el propio texto de la Directiva en un nivel de consumo de energía primaria de 1.474 Mtep en 2020 o de 1.078 Mtep, en términos de energía final.

El *segundo apartado* está referido al cálculo del objetivo de ahorro a 2020 de acuerdo con el artículo 7, que obliga a los Estados miembros al establecimiento de un sistema de obligaciones de eficiencia energética que garantice la consecución de un nuevo ahorro cada año, desde el 1 de enero de 2014 hasta el 31 de diciembre de 2020, del 1,5% de las ventas anuales de energía a clientes finales de todos los distribuidores de energía y empresas minoristas de venta energía.

El *tercer apartado* de dicho capítulo evalúa el cumplimiento del objetivo de ahorro de la Directiva 2006/32/CE, del Parlamento Europeo y del Consejo, de 5 de abril de 2006, sobre la eficiencia del uso final de la energía y los servicios energéticos. Esta Directiva fue derogada por la Directiva 2012/27/UE salvo en su artículo 4, esto es, en aquél en el que se establecía un objetivo orientativo nacional de ahorro de energía final del 9% en 2016 [4].

2.4 LOGROS DE LA POLÍTICA ENERGÉTICA: ENERGÍAS RENOVABLES.

A continuación, vamos a analizar qué impacto ha tenido en los distintos sectores energéticos la aplicación de las siguientes políticas tanto a nivel general como particular.

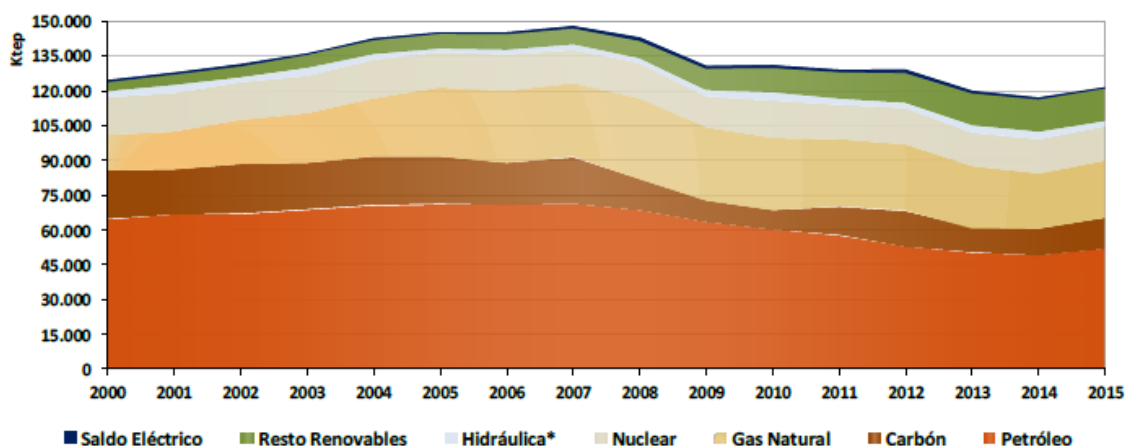


Figura 1. Consumo de Energía Primaria por Fuentes Energéticas, 2000-2015 [3].

En este primer gráfico observamos como a lo largo de los primeros 15 años de este siglo el consumo de energía primaria se ha ido diversificando hasta llegar a una estructura donde las energías renovables y el gas natural han incrementado notablemente su papel, en detrimento del petróleo y el carbón, si bien este primero aún sigue siendo el de mayor importancia. Esta tendencia se acentúa a partir de 2008 debido a los efectos de la crisis económica, y si bien se aprecia un repunte (-del petróleo-) al final debido a la recuperación de los distintos sectores industriales, se puede ver como las energías renovables crecen a un ritmo bastante superior y que su aportación al sistema energético dista mucho de ser algo simbólico.

A continuación, en la tabla 1, se observa con más detalle la evolución del consumo de los distintos tipos de energía en los últimos 8 años de este periodo.

Tabla 1. Estructura de Consumo de Energía Primaria (ktep) por Fuentes. 2007-2015 [4]

Fuentes ktep	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Carbón	19.748	13.979	10.609	8.159	12.455	15.395	10.860	11.487	13.238
Productos Petrolíferos ⁽¹⁾	70.983	68.031	63.171	60.610	57.905	53.091	50.510	49.270	52.254
Gas	31.826	34.954	31.264	31.163	28.939	28.576	26.163	23.667	24.538
Nuclear	14.214	15.212	13.610	15.991	14.889	15.856	14.633	14.782	14.782
Energías Renovables	10.008	10.552	12.569	15.048	14.832	16.135	17.744	17.768	16.619
Biomasa ⁽²⁾	5.142	5.351	6.297	6.553	7.142	7.690	6.943	6.802	6.754
Hidráulica	2.348	2.009	2.271	3.638	2.631	1.767	3.170	3.368	2.420
Eólica	2.370	2.833	3.278	3.807	3.690	4.254	4.785	4.472	4.241
Solar Fotovoltaica	43	220	513	552	640	704	716	707	711
Solar Térmica B.T & Termoeléctrica	95	1299	1989	482	713	1.703	2.1120	2.401	2.474
Geotermia	9	11	14	16	17	18	18	19	20
Saldo (Imp-Exp)	-495	-949	-697	-717	-524	-963	-581	-293	-11
TOTAL	146.284	141.779	130.527	130.253	128.496	128.090	119.329	116.681	121.418

Esta evolución sirvió para cumplir los objetivos del **Plan PER 2005-2010** en el cual se pedía que al menos un 12% del consumo final de energía fuese a través de las EERR

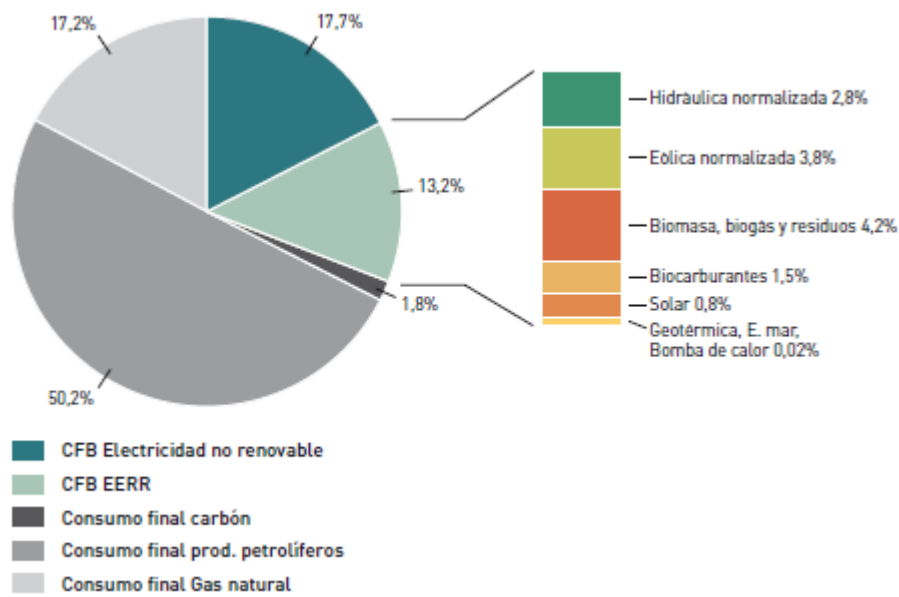


Figura 2. Consumo final bruto de energía en 2010 [1]

El efecto que el cumplimiento de este Plan tiene sobre el medioambiente se cuantifica a través de las estimaciones realizadas de la reducción de CO₂ emitido a la atmósfera debido al menor uso del carbón y el petróleo.

Tablas 2 y 3. Emisiones de CO₂ evitadas en el año 2010 por el incremento de fuentes renovables entre 2005-2010 y el total acumulado desde 2005 respectivamente [3].

	Emisiones de CO ₂ evitadas (t CO ₂ /año)
Energías Renovables-Generación de electricidad	
EERR sustituyen a CT carbón	24.574.272
EERR sustituyen a CT petrolíferos	2.041.677
EERR sustituyen a CCGT	2.403.954
Total áreas eléctricas	29.019.902
Energías Renovables-Calefacción/refrigeración	
Solar	405.242
Biomasa	515.762
Total áreas térmicas	921.004
Biocarburantes-Transportes	
Biodiésel	3.710.418
Bioetanol	339.809
Total área transporte	4.050.227
Total CO₂ evitado en el año 2010 (toneladas/año)	33.991.133

	Emisiones de CO ₂ evitadas (t CO ₂ /año)
Energías Renovables-Generación de electricidad	
EERR sustituyen a CT carbón	48.482.763
EERR sustituyen a CT petrolíferos	3.011.373
EERR sustituyen a CCGT	19.486.556
Total áreas eléctricas	70.980.692
Energías Renovables-Calefacción/refrigeración	
Solar	1.194.235
Biomasa	1.132.835
Total áreas térmicas	2.327.070
Biocarburantes-Transportes	
Biodiésel	9.113.640
Bioetanol	467.633
Total área transporte	9.581.273
Total CO₂ evitado en el año 2010 (toneladas)	82.889.035

A través del Plan PER 2011-2020 se ha mantenido la misma línea de acción, incrementándose la importancia de las energías renovables en nuestro consumo año tras año, para cada vez estar más cerca del 20% que se marcó como objetivo para 2020. En la siguiente imagen podemos ver el incremento del peso de las renovables desde 2009.

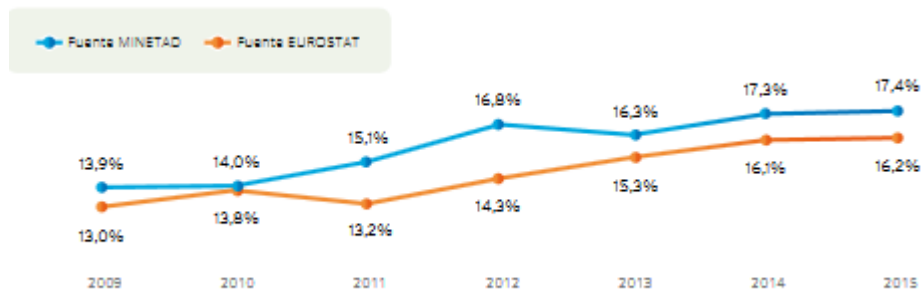


Figura 3. Consumo final bruto de energía en 2009-2016 [5]

2.5 LOGROS DE LA POLÍTICA ENERGÉTICA: EFICIENCIA ENERGÉTICA.

Para analizar los beneficios de las EERR se ha clasificado el consumo de esa energía en sus distintas fuentes, y comparando que porcentaje que recaía sobre las EERR en comparación frente a las no renovables, sin importar que cantidad de energía total se consumía. Para determinar los beneficios de la política energética en relación con la eficiencia energética se cuantifica el consumo de energía en términos absolutos-, evaluando qué cantidad de energía, sin importar su procedencia, se ha dejado de consumir sin afectar a la producción. La relación entre **consumo energético** y el volumen de la actividad económica es lo que conocemos como **intensidad energética** y se calcula como el cociente entre el **consumo energético y el producto interior bruto (PIB)** [6].

Dentro de los objetivos de consumo de energía primaria y final del PAEE se observa como la tendencia ha sido a la baja desde 2007, situándose en 2015 ambos valores ya por debajo de los objetivos mínimos para 2020, no obstante, la crisis económica hizo que se redujera de forma notable el consumo de energía, y ya en 2015 se apreciaba una ligera subida asociada a la recuperación económica.

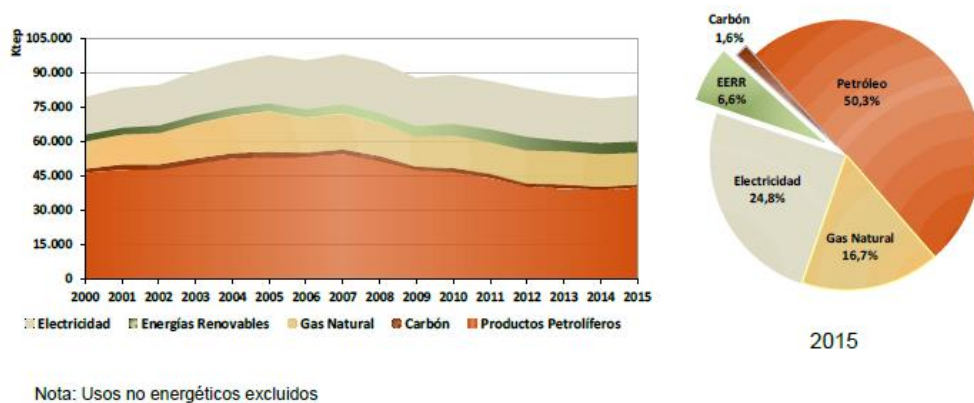


Figura 4. Consumo de Energía final por Fuentes Energéticas, 2000-2015 [3]

Pero si hay un parámetro que muestra el éxito de la política de la eficiencia energética, ese es el de la **intensidad energética**; ya que nos muestra el aprovechamiento de la energía.

En la figura 5 puede verse como tanto en España como en la UE se ha reducido notablemente este parámetro, es decir, necesitamos menos energía para producir los mismos bienes.

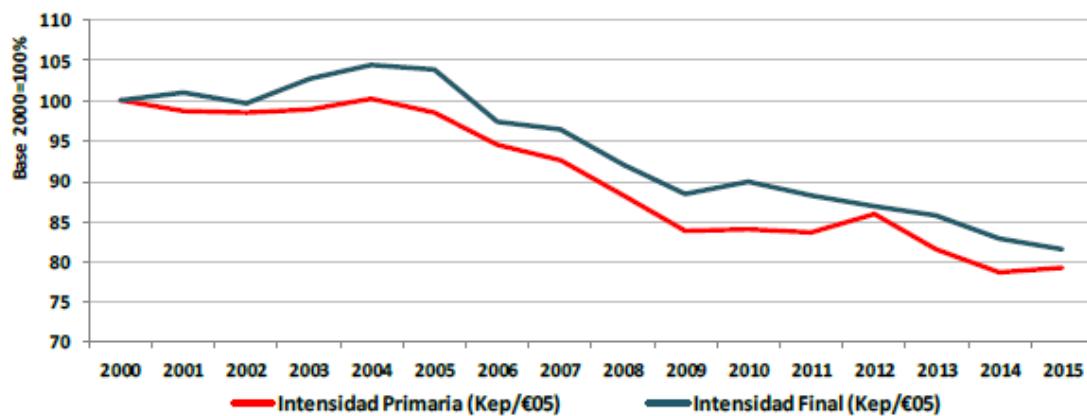


Figura 5. Comparativa Intensidades Energía Primaria y Final España, 2000 -2015 [7]

Una vez visto como la eficiencia energética y el uso de energías renovables han marcado la política energética a lo largo del siglo XXI, estudiaremos que influencia ha tenido dentro de la calefacción de edificios tanto la primera (creación de redes de calor) como la segunda rama de esta política (generación de calor a través de EERR).

Antes de empezar a analizar los componentes de la calefacción por distrito citados anteriormente, veamos cuál es el método teórico sobre el que sustentaremos dicho análisis.

CAPÍTULO 3.

TEORÍA DEL MÉTODO EXERGÉTICO.

3.1 TEORÍA DEL MÉTODO EXERGÉTICO.

▪ 3.1.1. ¿Qué entendemos por Exergía?

La exergía es una magnitud que nos indica la calidad de la energía, es decir, que cantidad de la energía disponible en un sistema es transformable en trabajo útil (ya sea mecánico, eléctrico...etc) en unas condiciones ambiente. Las limitaciones acerca del trabajo que podemos obtener a partir de una cierta cantidad de energía están dictadas por el Segundo Principio de la Termodinámica, según el cual

“ La cantidad de entropía del universo tiende a incrementarse en el tiempo.”

Este aumento de entropía puede entenderse como la degradación que sufre la energía en cada una de sus transformaciones. La energía va perdiendo calidad en cada proceso, debido a las irreversibilidades, hasta llegar a un punto donde su capacidad de producir trabajo es nula. Entonces decimos que el sistema ha alcanzado un estado muerto.

A continuación, desarrollaremos más esta idea.

Hay algunas formas de energía como por ejemplo, la energía cinética o la energía potencial, que pueden transformarse íntegramente en trabajo útil, de forma ideal. Sin embargo, la energía térmica cuando se intenta transformar en trabajo útil de forma continua, como ocurre en un motor térmico, el Segundo Principio nos limita esta transformación energética, y sabemos que el rendimiento energético siempre es menor del 100% y no puede superar el de un motor de Carnot que funcione entre los mismos focos (funcionamiento ideal). Desde el punto de vista exergético, ese trabajo útil máximo obtenible sería la exergía de la energía térmica de partida.

▪ 3.1.2 Balance exergético a un sistema cerrado.

La preocupación creciente por el ahorro de energía ha fomentado el desarrollo de técnicas de análisis basadas en el Segundo Principio, y en particular en el concepto de exergía.

El balance de exergía de una instalación nos permite localizar y cuantificar las irreversibilidades con que se desarrolla el proceso productivo, e identificar qué equipos y por qué causas, son responsables de su ineficiencia. Las pérdidas de exergía y la exergía destruida localizadas a través de este balance son representadas mediante diagramas de Sankey. Dicho balance consiste en “traducir” el balance de energía en términos de exergía, pero teniendo en cuenta que, mientras la energía se conserva, la exergía, debido a la irreversibilidad de los procesos no se conserva y, por tanto, en el balance añadimos el término de la exergía destruida [10].

Un sistema cerrado puede interactuar con el entorno mediante transferencias de energía en forma de calor o trabajo, que implican una transferencia de exergía entre el sistema y el entorno. Esta exergía transferida no coincide necesariamente con la variación de exergía del sistema, ya que la exergía también se destruye como consecuencia de la generación de entropía (todos los procesos reales con transferencia de energía en forma de calor conllevan, además de una transferencia de entropía, una generación de entropía debida a procesos irreversibles dentro del sistema [11]).

Así pues, el balance exergético para un sistema cerrado permite calcular la exergía destruida como la diferencia entre la exergía inicial y final, más la transferencia de exergía asociadas a los flujos de calor y trabajo:

$$E_2 - E_1 = \int_1^2 \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) \cdot d'Q - [W - p_0 \cdot (V_2 - V_1)] - E_d$$

Ecuación 3.1

$$E_2 - E_1 = E_Q - E_W - E_d$$

Ecuación 3.2

$$E_d = E_1 - E_2 + E_Q - E_W$$

Ecuación 3.3

Donde E_Q representa la transferencia de exergía asociada a un flujo de calor que llega o parte de un foco a temperatura T . Esta exergía representa el máximo trabajo teórico que se podría obtener del flujo de calor cuando es intercambiado con el ambiente (T_0), por tanto, está relacionado con el rendimiento de Carnot.

$$E_Q = \dot{W}_{util\ max} = \int_1^2 \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) \cdot d'Q$$

Ecuación 3.4

Y E_W representa la transferencia de exergía asociada al trabajo; es decir, el máximo trabajo aprovechable de todo el flujo de trabajo que se pone inicialmente en juego. En el trabajo de cambio de volumen durante el proceso, parte del trabajo deberá ser empleada en desplazar al aire ambiente que ejerce una presión p_0 , y así queda reflejado en la ecuación siguiente:

$$E_W = \dot{W}_{util\ max} = [W - p_0 \cdot (V_2 - V_1)]$$

Ecuación 3.5

Inmediatamente se observa que, si no existe variación de volumen, la transferencia de exergía asociada al trabajo es igual a este mismo, como por ejemplo el trabajo intercambiado a través de un eje.

Otro objetivo del método exergético, como el que se realizará más adelante en este mismo trabajo, es conocer la eficiencia de una instalación a través del concepto de rendimiento exergético que se puede definir como:

$$\varepsilon = \frac{\textit{Exergía útil}}{\textit{Exergía consumida}}$$

Ecuación 3.6

Aunque esta expresión parezca muy sencilla a simple vista, la dificultad radica en cuantificar sus dos términos para un sistema o una instalación particular, ya que muchas veces se dependerá de interpretaciones sobre si los flujos residuales de exergía son o no aprovechados para dar trabajo en esa misma o en otra instalación. A diferencia del rendimiento energético, este parámetro siempre está acotado a la unidad, de forma que en una transformación reversible su valor sería uno.

Para conocer la exergía destruida, es decir, la cantidad de trabajo que dejamos de obtener debido a las irreversibilidades del proceso, se puede utilizar **el Teorema de Gouy-Stodola**, el cual, relaciona la generación de entropía (calculada con un balance de entropía) con la exergía destruida a través de la temperatura del ambiente [9].

▪ **3.1.3 Balance exergético a un sistema abierto.**

A diferencia de los sistemas cerrados, los cuáles solo pueden intercambiar trabajo con el entorno, los sistemas abiertos permiten también el intercambio de masa. La mayoría de los procesos industriales tienen lugar en sistemas abiertos, al igual que las redes de calor. De esta forma, existirán unas corrientes de entrada a través de nuestro volumen de control que interaccionarán con nuestro sistema dando lugar a intercambios energéticos de tipo mecánico y térmico con el exterior, así como la aparición de flujos másicos de salida, inexistentes en los sistemas cerrados.

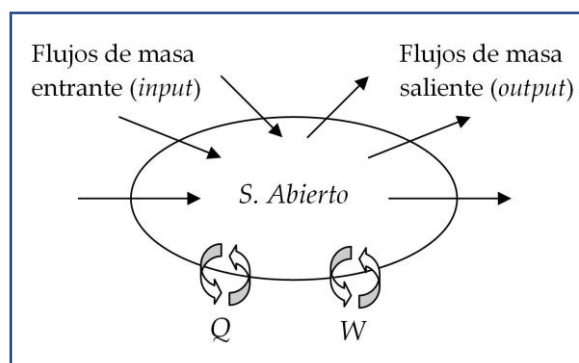


Figura 6: Esquema sistema abierto [12]

- Hipótesis del equilibrio local: Por norma general, un sistema abierto no presenta un estado de equilibrio interno, es decir no presenta unos valores de presión y temperatura únicos definidos para todo el sistema, sino que existen puntos dentro de la frontera con distintos valores de estas magnitudes. Al no ser esta situación la más común, se supondrá que existe una cierta región (volumen de control) dentro del sistema que, si presenta esas condiciones, y que las variaciones de temperatura y presión ocurren de manera uniforme a lo largo del sistema abierto. Se dice que esta región presenta un estado de equilibrio local [12].

Si partimos de un sistema abierto no estacionario, procederíamos de igual forma que en el caso del sistema cerrado, añadiendo los términos referentes a los flujos másicos de entrada y salida.

Variación de exergía en el volumen de control= Transferencia de exergía asociada a flujos de materia, calor y trabajo - Exergía destruida [9]

$$\frac{dE}{dt} = \sum_j \int \left(1 - \frac{T_0}{T_j}\right) \cdot d'\dot{Q}_j - \left[\dot{W} - p_0 \cdot \frac{dV}{dt}\right] + \sum_e (\dot{m}_e \cdot \dot{e}_e) - \sum_s (\dot{m}_s \cdot e_s) - \dot{E}_d$$

Ecuación 3.7

Si a partir de este caso genérico, particularizamos para el caso de un sistema estacionario desaparecerán los términos que presentan variación en el tiempo (las derivadas de la exergía y el volumen) ya que un sistema estacionario se caracteriza por no tener variación de sus propiedades en el tiempo. Esto no quiere decir que sea un sistema uniforme, puede haber puntos con distintos valores de presión, temperatura...etc, pero cada uno de esos puntos mantiene su valor constante en el tiempo [12].

$$0 = \sum_j \int \left(1 - \frac{T_0}{T_j}\right) \cdot d'\dot{Q}_j - \dot{W} + \sum_e (\dot{m}_e \cdot \dot{e}_e) - \sum_s (\dot{m}_s \cdot e_s) - \dot{E}_d$$

Ecuación 3.8

$$0 = \dot{E}_Q - \dot{W} + \sum_e (\dot{m}_e \cdot \dot{e}_e) - \sum_s (\dot{m}_s \cdot e_s) - \dot{E}_d$$

[9]

Ecuación 3.9

Por último, si el sistema es estacionario y solo tiene una entrada y una salida como el mostrado en la imagen, la expresión final quedaría como se ve abajo, ya que

lógicamente para que no varíen las propiedades del sistema, el flujo másico que entra por la única entrada ha de ser exactamente igual al de salida.

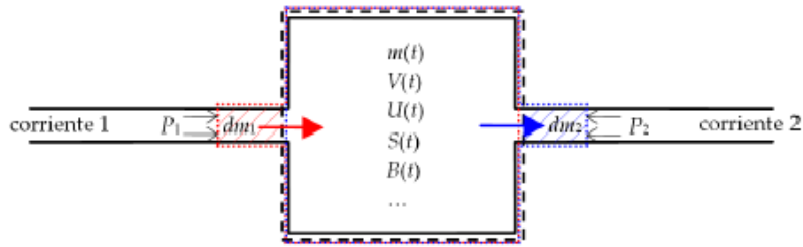


Figura 7: Sistema estacionario abierto [12].

$$0 = \dot{E}_Q - \dot{W} + (\dot{m}_e \cdot e_e) - (\dot{m}_s \cdot e_s) - \dot{E}_d \quad [9]$$

Ecuación 3.10

3.2 CARACTERÍSTICAS Y VENTAJAS DEL ANÁLISIS EXERGÉTICO.

Como ya se mencionó anteriormente, la exergía, a diferencia de la energía, no está ligada a ninguna ley de conservación, sino que puede ser destruida a medida que la calidad de la energía se degrada debido a las irreversibilidades del proceso. Esta característica ha dado lugar a una metodología que combina las leyes de conservación de la masa y la energía con el **Segundo Principio de la Termodinámica**. Dicha metodología es conocida como “análisis exergético” y es de gran utilidad en el diseño de sistemas energéticos. Sus principales ventajas son las siguientes:

- ✓ Valora la parte cualitativa de la energía, y no solo la cuantitativa. Por ejemplo, si comparamos la misma cantidad de energía en forma de calor y electricidad, la segunda tendrá mucha más capacidad de convertirse en trabajo, con lo cual su exergía será mucho más alta [13].
- ✓ Este análisis también permite determinar cuál es el mínimo consumo de exergía que satisface la demanda. Si se consigue reducir la demanda exergética, implicará una disminución de la necesidad de energía de alta calidad, con lo que seremos capaces de abastecernos con fuentes de baja calidad energética (por ejemplo, los calores residuales). De este modo, el balance exergético apoya tanto la eficiencia energética como el uso de EERR [14].
- ✓ Nos permite determinar el consumo de exergía de cada sector dentro del sistema. De esta forma, cuantificando la destrucción de exergía en cada eslabón

de la cadena energética se conoce cuáles son los potenciales puntos de mejora en la eficiencia energética, los cuales no pueden ser conocidos mediante el método energético. Esto es debido a que las eficiencias (rendimientos) basados en la exergía, a diferencia de los basados en la energía, informan de si nos aproximamos en mayor o menor medida al proceso ideal (reversible) suministrando información más cualitativa de cara a evaluar el comportamiento de los sistemas energéticos [15].

Si expusiésemos las ventajas del balance exergético en relación con otras disciplinas como las instalaciones de calor o la termoeconomía, podríamos añadir las siguientes ventajas:

- ✓ La localización en la instalación de las pérdidas y destrucciones de exergía identifican los lugares y las causas de las ineficiencias de un sistema, así como el incremento en el consumo de combustible consecuencia de dichas ineficiencias. Dichas identificaciones favorecen mucho la toma de decisiones efectivas de cara a mejorar el rendimiento de un sistema.
- ✓ En sistemas complejos con varios productos, el balance exergético permite evaluar el valor termodinámico de esos subsistemas, pese a que estos cuenten con características dispares.
- ✓ A raíz del balance exergético existen métodos termoeconómicos para determinar los costes de los distintos procesos de una planta, y poder entonces optimizar el diseño de sus equipos e instalaciones, así como la distribución de los mimos.
- ✓ En el ámbito medioambiental, la destrucción de exergía producida en un ambiente limpio cuando es degradado por la contaminación que sufre es equivalente al trabajo (exergía) que habría que aportar para limpiarlo y volver entonces al estado inicial (sería el trabajo necesario para volver al estado inicial en un proceso que por sí solo es irreversible). Esto ha dado lugar en los últimos años a una nueva corriente de estudio denominada “Environomics” (análisis exergoambiental) para el análisis y posterior optimización de los sistemas energéticos dentro de un marco medioambiental. La combinación del análisis exergoeconómico y exergoambiental converge en la aparición del análisis exergoeconómico ambiental [16].

Esta suma de ventajas ha propiciado que el análisis exergético se alce como el impulsor de los esfuerzos para la mejora de la eficiencia energética en el ámbito de la ingeniería. Se trata de una herramienta utilizada en la industria desde hace décadas que ha permitido la optimización en los procesos de producción, lo cual genera un ahorro

termoeconómico que finalmente reduce los costes del producto final en cuestión, saliendo el usuario beneficiado de ello [17].

CAPÍTULO 4.

REDES DE CALOR Y CALEFACCIÓN POR DISTRITO (DISTRICT HEATING)

4.1 REDES DE CALOR, CALEFACCIÓN POR DISTRITO Y DISTRICT HEATING.

▪ 4.1.1 Introducción y contexto actual.

Las ciudades debido a que concentran gran parte de la actividad energética de un país son los principales focos donde trabajar para llevar a buen puerto el cambio del actual modelo energético hacia uno más sostenible que dé lugar a una economía baja en carbono. Uno de los protagonistas de este cambio ha sido la promoción de redes de climatización por distrito como línea de trabajo para lograr una reducción efectiva de los GEI.

Las redes de climatización urbana han crecido tanto en cantidad como calidad en los últimos años; debido a las ventajas que estas infraestructuras ofrecen en el ámbito medioambiental como una mayor eficiencia energética, la posibilidad de utilizar energías renovables, la mejora de la calidad del aire, la reducción de la contaminación atmosférica, etc....

En Europa están experimentando desde hace décadas su construcción, gestión y mantenimiento, especialmente aquellas dedicadas a llevar a los barrios el agua caliente. Aunque en España su uso aún dista de ser algo habitual, nuestro país presenta unas condiciones climáticas y constructivas que ofrecen numerosos alicientes para la implantación de dichas redes, ya que permite el desarrollo de redes mixtas (calefacción y refrigeración) en función de las necesidades del momento o el municipio.

Para la implantación de estas redes, son las distintas administraciones las que han de llevar la voz cantante en tanto que son las encargadas de la planificación y ordenación del suministro energético. La apuesta por estas instalaciones dará lugar a un cambio de modelo organizativo más sostenible y eficiente que traerá crecimiento económico y bienestar para los ciudadanos de los distintos distritos [18].

Actualmente en España los modelos de District Heating/District Heating & Cooling (DH/DHC) están compuestos por un sistema mixto de empresas públicas y privadas. También intervienen agencias, asociaciones e institutos de la energía cuando se trata de promover las tecnologías más eficientes en el ámbito energético, así como el reparto de los caudales públicos para la implantación de dichas tecnologías en los planes energéticos de municipios y CCAA.

Estos sistemas mixtos público-privados serán los encargados de conseguir la financiación necesaria que para llevar el proyecto a buen puerto. Una vez construidas las instalaciones, su gestión y uso será llevado a cabo por empresas de servicios energéticos, las cuales cuentan con la preparación, conocimientos y medios necesarios para desarrollar dicha tarea de forma eficaz [19].

▪ 4.1.2 ¿Qué son las redes de climatización urbana?

Los sistemas centralizados de climatización (producción de calor y/o frío), basados en redes de distrito, están esencialmente compuestos por un sistema de tuberías subterráneas que transportan el calor desde la fuente de generación hasta los puntos de consumo. Pese a que el calor puede ser generado de forma convencional a través del uso de combustibles fósiles, la principal ventaja de las redes de distrito es el aprovechamiento de la energía térmica residual, la cual de otro modo sería malgastada. Esta energía puede provenir de las centrales de cogeneración y del aprovechamiento de recursos como: el calor residual de procesos industriales, fuentes naturales geotérmicas, o la utilización de fuentes de energía renovables como la solar a través de colectores y las calderas de biomasa [19].

▪ 4.1.3 ¿Qué ventajas tiene?

- ✓ Incrementa la seguridad energética frente a la de las instalaciones individuales convencionales.
- ✓ Se mejora la fiabilidad y flexibilidad del suministro de combustible gracias al uso de la biomasa y energía residuales.
- ✓ Se reduce la demanda de electricidad al suministrar calefacción o refrigeración a través de las redes urbanas gracias a la cogeneración.
- ✓ Gracias a las fuentes de calor residual, se incrementa la eficiencia energética reduciéndose así el consumo, con lo que a su vez la emisión de GEI disminuye. Además, el logro de los objetivos de los planes de ahorro, emisiones y eficiencia son mucho más fáciles de controlar si tenemos un gran productor de energía, en vez de su equivalente en varios pequeños productores. Esta mejora en la calidad del aire sucede incluso cuando la central utiliza los mismos combustibles que las instalaciones convencionales descentralizadas, gracias al aprovechamiento de las economías de escala y al uso de equipos industriales con mayor tecnología para el control de emisiones.
- ✓ También fomentan la competitividad entre las distintas fuentes de energía, ya que el uso de la energía residual, renovables o cogeneración son fundamentales para que este sistema ofrezca ventajas económicas y ambientales de mayor grado. Todo esto ofrece una nueva oportunidad a las empresas encargadas de dar el servicio [19].

4.2 COMPONENTES DE LA RED DE DISTRITO

La estructura más básica en la que se puede esquematizar una red urbana de climatización se compone de 3 elementos básicos.

Central de generación térmica: se trata de grandes grupos de generación de calor o frío que sustituyen a los equipos individuales ubicados en los puntos de consumo centralizando la producción. Además, de esta forma es posible mejorar la eficiencia energética gracias al aprovechamiento de las energías comentadas anteriormente, a los factores de escala y a la gestión profesional de las instalaciones.

Para abastecer a los consumidores la central precisa de la construcción de un edificio exclusivo para tal fin. Dicho edificio alberga los medios para la generación de calor y frío, los cuales pueden pertenecer a numerosas fuentes de energía diferentes, como se verá más adelante, además de los sistemas de acumulación y bombeo necesarios. La central térmica funciona de forma automatizada regulándose para abastecer la demanda de la forma más eficiente.

Si clasificamos las centrales por su forma de obtener la energía distinguimos las siguientes instalaciones [18]:

- Calderas: combustibles fósiles (gas, fueloil, etc.) o biomasa.
- Centrales solares.
- Cogeneración: mediante turbina de gas o motores alternativos (de biogás o de vapor).
- Aprovechamiento geotérmico (bombas de calor).
- Aprovechamiento térmico residual de procesos industriales.

Sistemas de acumulación: además de los generadores de calor (o frío) que se analizarán posteriormente con más detalle, en la central de generación térmica se encuentran unos depósitos de acumulación de agua que permiten:

- Optimizar el diseño de las centrales ajustándolo a la demanda.
- Facilitar el funcionamiento a plena carga durante más tiempo mejorando el rendimiento energético.
- Garantizar el suministro en el caso de parada de máquinas.
- Compensar las diferencias de caudales que se den entre la producción y la demanda.
- Facilitar el aprovechamiento de la energía procedente de renovables o calores residuales.

- Trasladar la producción a las horas más favorables económicamente, en vez de a las horas de mayor demanda, en sistemas de cogeneración o en el uso de enfriadoras eléctricas (las cuales se pueden beneficiar de la tarifa nocturna)

El principal objetivo de estos depósitos es actuar como “depósito de inercia” de forma que la central tenga asegurado poder abastecer cualquier demanda que se produzca de forma instantánea por muy grande que sea. Por el contrario, se necesita mayor espacio en la central para su colocación [18].

Existen sistemas de acumulación tanto para agua caliente como fría. Dentro de los sistemas de acumulación de agua caliente se distingue entre la acumulación de calor latente y sensible.

Sistemas de acumulación calor sensible: Se basa en el almacenamiento de calor a través de la capacidad térmica de un fluido, es decir, en la relación (directamente proporcional) entre la variación de su energía térmica y su temperatura. El agua es el medio preferido para este tipo de almacenamiento, ya que tiene una alta capacidad térmica, no es inflamable ni tóxica y además es muy sencillo tener acceso a ella. Por el contrario, si se quiere almacenar energía térmica con temperaturas superiores a 100°C, se precisan fluidos con mayor punto de ebullición, como aceites térmicos.

Los depósitos suelen ser de acero, un material capaz de soportar las mismas presiones a las que se ven sometidos los otros puntos de la red. Se cubre el depósito con una funda aislante (normalmente poliuretano extruido) que permite una mejor conservación del calor. Para el diseño de estos depósitos se tiene en cuenta que, si se guarda una relación 2/1 entre la altura y la forma del depósito, se favorece la estratificación, dificultando que el agua fría se mezcle con el agua caliente de la parte superior.



Figura 8: Depósitos de acumulación calor sensible [18]

Sistemas de acumulación de calor latente: en este caso, las variaciones de energía térmica producidas no se deben a las variaciones en la temperatura, si no a los cambios de fase sólido-líquido o líquido-vapor (que absorben calor) o los procesos inversos (que liberan calor), a temperatura constante.

Los materiales más adecuados para este tipo de acumulación son los que tengan una entalpía de fusión elevada, y que ésta se produzca a temperaturas cercanas a la de operación. Dichos materiales se denominan PCM (Phase Change Materials) y los más comunes en el intervalo de 20°C a 80°C son las ceras parafinas, sales hidratadas y ácidos grasos [18]

Red de distribución: Consiste en un entramado de tuberías encargadas de transportar mediante el grupo de bombeo el fluido calo portador (agua y a veces vapor) a los puntos de consumo. Para evitar las pérdidas térmicas en el recorrido (llega a ser de varios kilómetros) los tubos están forrados con material aislante. En cada punto de consumo se dispone de un intercambiador de calor donde el agua de la red principal cede calor al primario de la vivienda (en el caso de calefacción) o bien lo absorbe (refrigeración), para más tarde volver a la central por la segunda tubería (la de retorno). Estos circuitos se encuentran en zanjas subterráneas que siguen el trazado de las calles.

El diseño de las ramificaciones que parten de la tubería principal a los distintos puntos de consumo dependerá de diversos factores como la situación en planta de la central, el número de consumidores, su localización, el terreno y las pérdidas de carga. Si la distribución es errónea podría echarse a perder los beneficios aportados por una instalación de este tipo.

Otra pérdida de energía se produce cuando el aislamiento presenta un estado defectuoso, por ello, es habitual la utilización de tuberías preaisladas.

Si analizamos la red de tuberías por partes podemos diferenciar 3 integrantes:

- **Red troncal:** es la encargada de impulsar el fluido desde la central hasta las redes locales de distribución.
- **Red local:** Recogen el calor (o frío) en la red troncal y lo transportan hasta las tuberías de servicio. Normalmente siguen el recorrido de las calles bajo tierra.
- **Acometidas o ramales de servicio a clientes:** Pequeñas tuberías de interconexión dese la red de distribución al edificio o subestación.

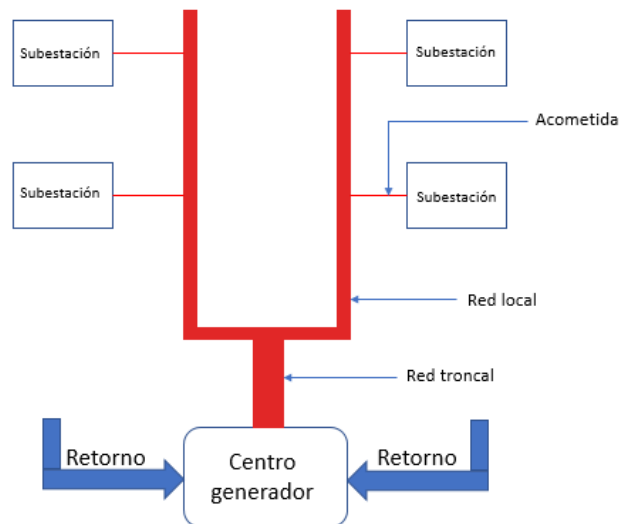


Figura 9: Distribución de los grupos de tuberías en una red de DH/DHC.

Sistema de bombeo: dentro de la red de distribución (pese a encontrarse también en la central) incluimos el sistema de bombeo, encargado de impulsar el fluido a través de la red y de regular el caudal para ajustarlo a la demanda. Para ello se disponen de 4 tipos de configuraciones diferentes en función de las necesidades demandadas [19].

- Bombeo centralizado. Un único grupo de bombeo es el encargado de impulsar el fluido desde la central hasta el punto de consumo.
- Bombeo primario-secundario estándar. Dos sistemas de bombeo (uno para el circuito primario y otro para el secundario) forman esta eficiente configuración; el primero de ellos se encarga de impulsar el fluido por la central, y el segundo lo hace por las redes de distribución (tanto la troncal como los ramales). En su contra juega la dificultad de hacer funcionar a ambos grupos de bombeo en su punto óptimo de forma simultánea.
- Bombeo primario-secundario-terciario estándar. Similar a la configuración anterior, pero añadiendo un tercer grupo para cada una de las redes que salen de la red troncal, de forma que se evitan posibles sobrecargas que si ocurrían en las configuraciones anteriores.
- Bombeo distribuido. Se coloca un grupo de bombeo para cada central generadora y para cada edificio de consumo, de forma que los distintos grupos de bombeo no presentan interacciones entre sí. Es un método económico que se utiliza en las redes de grandes dimensiones.

Acometida y subestaciones de clientes: Se trata del lugar donde se une la red de distribución con los consumidores. Para tal fin se disponen unas tuberías de conexión entre la red y la subestación, las cuales por norma general entran en el edificio por debajo del nivel de la calle. Las subestaciones son las encargadas de controlar todos los parámetros de la instalación (presión, temperatura...) así como de gestionar la demanda de consumo, garantizando para ello los saltos de temperatura, los cuales se pueden producir de las siguientes dos maneras:

- Por conexión directa: no hay separación entre circuitos de forma que el agua caliente del circuito de distribución circula por el sistema de calefacción del edificio hasta los emisores.
- Por conexión indirecta: En este caso, si existen dos circuitos (red de distribución y el primario del edificio) independientes donde la cesión de calor del primero al segundo (en caso de calefacción) tiene lugar a través de un intercambiador de calor (normalmente de placas)

El método más utilizado es el de la subestación indirecta a través de un intercambiador. A continuación, se presenta el balance de ventajas e inconvenientes que han hecho de esta configuración la más utilizada [18].

- Ventajas

- La separación entre circuitos permite reducir el riesgo de que la red del usuario se vea afectada por la contaminación.
- En caso de fuga, ésta queda aislada en el circuito en el cual se produzca.
- Los radiadores (emisores) no deberán ser sometidos a presiones y temperatura tan elevadas, con lo que su dimensionamiento será más sencillo.
- El riesgo de corrosión en los circuitos es menor.

- Desventajas

- La adición de un tercer elemento (intercambiador) supone un coste adicional, además de incrementar las pérdidas de carga y las pérdidas térmicas durante el salto térmico.
- Disminuye la temperatura de utilización [18].

En la figura 10, se muestra a modo de ejemplo una fotografía de la subestación con intercambiador de placas situado en la instalación de calefacción de distrito de la Universidad de Valladolid.



Figura 10: Subestación con intercambiador de placas, Valladolid [26].

4.3 CONFIGURACIÓN DE LAS SUBESTACIONES

Existen tres formas distintas de configurar las conexiones de una subestación indirecta; la configuración en paralelo, en dos etapas y la alemana, cuyos esquemas se muestran en la figura 11. Las dos primeras tienen eficiencias similares, si bien la configuración en paralelo presenta una mayor robustez y sencillez.

Por otra parte, la configuración alemana es una variante de la conexión en paralelo, pero en ésta los circuitos de calefacción y ACS no son independientes el uno del otro. El agua al ceder previamente calor en el primer intercambiador llega con menor temperatura a intercambio con el agua fría de consumo, con lo que se reduce la fatiga térmica al haber un menor gradiente de temperaturas en el intercambiador. Además, la destrucción de exergía en el intercambio se reduce, al producirse entre focos con menor diferencia de temperaturas [18].

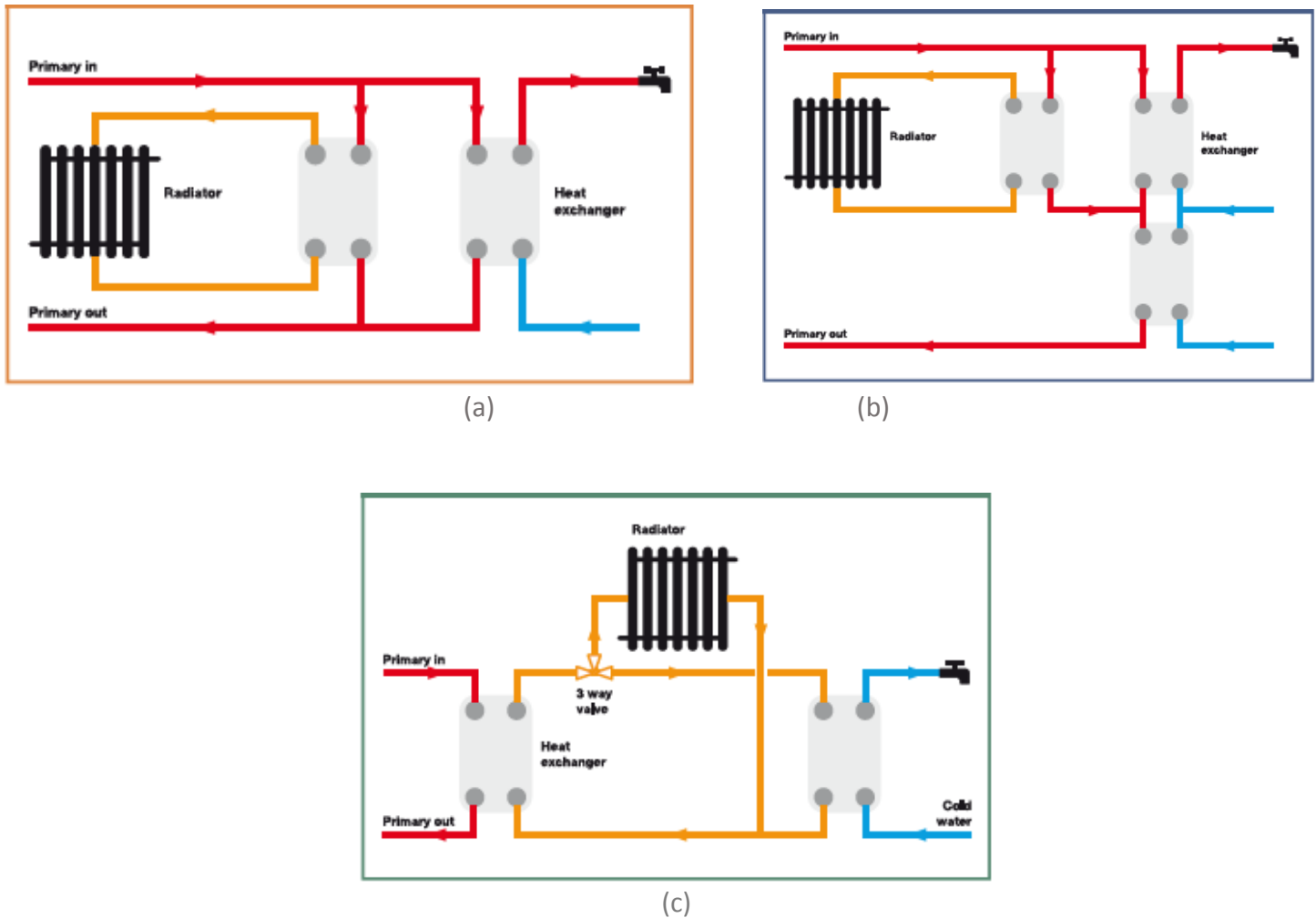


Figura 11: Esquemas de las diferentes configuraciones de las subestaciones de distribución: (a) disposición en paralelo, (b) disposición en dos etapas y (c) disposición alemana [21].

Se observa que en la disposición en paralelo, respecto a la disposición en dos etapas, se renuncia a un intercambiador de calor, con el debido ahorro que eso supone, pero no se puede aprovechar el calor restante a la salida del intercambiador de la red de calefacción para dárselo al agua de consumo a baja temperatura, sino que directamente es enviado a la central por el circuito de retorno. El análisis del comportamiento de ambas disposiciones concluye que el poco ahorro conseguido con la disposición en dos etapas no es suficiente para amortizar un tercer intercambiador, dando lugar a un dominio de la disposición en paralelo.

En la Figura 11 (c), se observa que el salto de temperatura en el intercambiador de ACS es pequeño, reduciendo el esfuerzo en el intercambiador. Esta disposición, aunque requiere de un mayor número de componentes, ofrece una mayor regulación, como por ejemplo poder interrumpir la circulación por los radiadores para poder disponer de un ACS con mayor temperatura; o al revés, cortar el suministro de ACS para pasar todo el agua caliente por el radiador y calentar la vivienda con mayor facilidad.

En cuanto a las temperaturas de funcionamiento, lógicamente presentan variaciones en cada instalación, pero se pueden tomar las siguientes temperaturas (según DISTRICLIMA) [22] como base para el diseño y dimensionamiento de los intercambiadores de calor.

Para el suministro de calor, la temperatura del fluido caloportador de la red primaria entraría a un mínimo de 90°C y saldría a un máximo de 60°C mientras que el fluido de la red secundaria entraría al intercambiador a una temperatura máxima de 55°C saliendo a una temperatura máxima de 85°C, tal como se muestra en la figura 12:

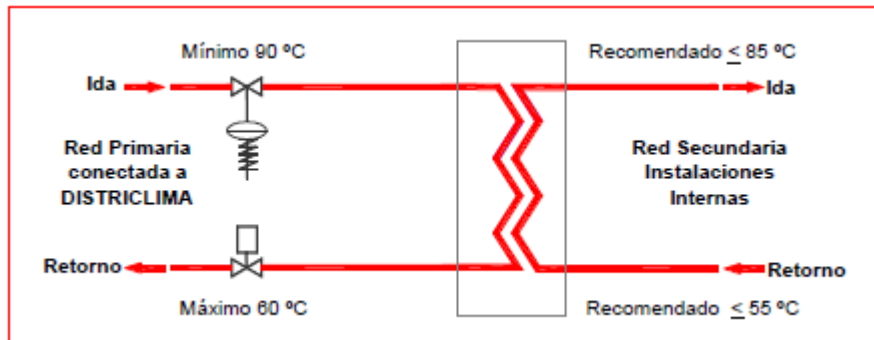


Figura 12: Saltos térmicos en instalación de calefacción [22]

Para el suministro de frío (figura 13), las temperaturas recomendadas en el circuito primario son entrada a un máximo de 5,5 °C y retorno de un mínimo de 14°C mientras que para la red secundaria las temperaturas mínimas recomendadas son de 15,5°C y 7°C para la entrada y salida, respectivamente.

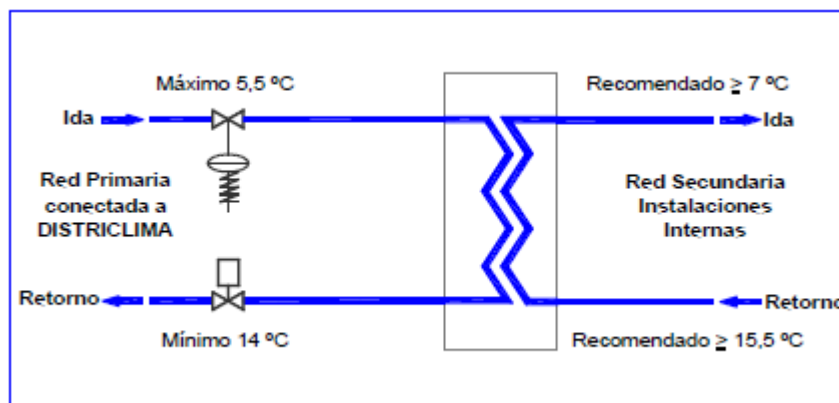


Figura 13: Saltos térmicos en instalación de refrigeración [22]

Señalar que cuando se produzcan mayores saltos térmicos, menor será el volumen de agua necesitado para satisfacer las necesidades del consumidor, reduciéndose el diámetro necesario de las tuberías y logrando un ahorro en energía eléctrica debido al menor consumo de las bombas. Sin embargo, desde un punto de vista exergético, siempre será más favorable minimizar el salto térmico a costa de incrementar los caudales, de tal forma que se disminuye la exergía destruida, al tender el valor de $\ln(T_2/T_1)$ a cero. También La proximidad entre las temperaturas de ambas corrientes hace que el rendimiento exergético aumente [22].

En la figura 14, se muestra el esquema completo de una red de climatización urbana

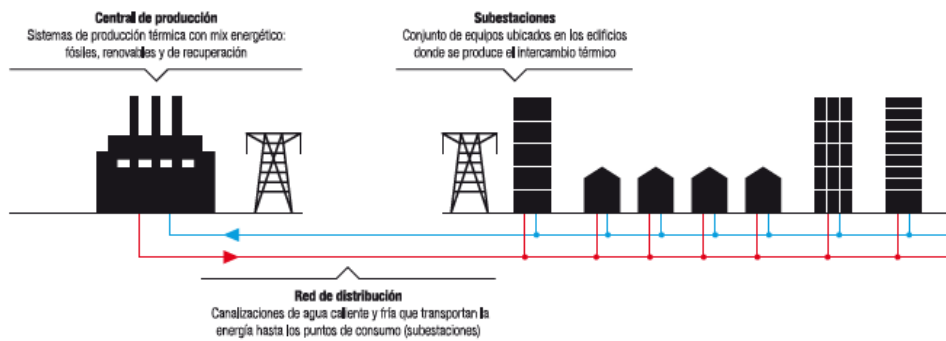


Figura 14: Esquema de una red de climatización urbana [20]

4.4 CLASIFICACIÓN DE LAS REDES DE CALOR SEGÚN EL TRAZADO.

Una red de calor se puede configurar de tres formas distintas atendiendo al trazado que tomen sus tuberías.

- **Trazado ramificado:** adoptan el esquema de una “espina de pescado”, derivando de la tubería central diversas tuberías más pequeñas que conectan cada edificio a una única central. Es una organización muy sencilla, pero tiene baja capacidad de respuesta en caso de avería, además de la dificultad añadida de incorporar nuevos edificios a la red una vez ésta ha sido construida.
- **Trazado en malla:** en este caso cada punto de consumo cuenta con más de una central abastecedora. Evidentemente la complejidad de este tipo de red es mayor, así como su coste de funcionamiento, pero presenta una mayor fiabilidad en el caso de averías en alguna de las centrales. Solo se recomienda su construcción cuando no se pueda correr el riesgo de quedarse sin abastecimiento en caso de avería, o para redes de calor muy grandes.
- **Trazado en anillo:** se trata de un sistema a medio camino entre los dos anteriores donde la tubería de la red, de la cual parten las ramificaciones, se encuentra conectada a la central tanto en su punto inicial como final.

A continuación, en las figuras 15 a 17 se muestran ejemplos de las configuraciones mencionadas.



Figura 15: Red Urbana con trazado ramificado, Barcelona [23].

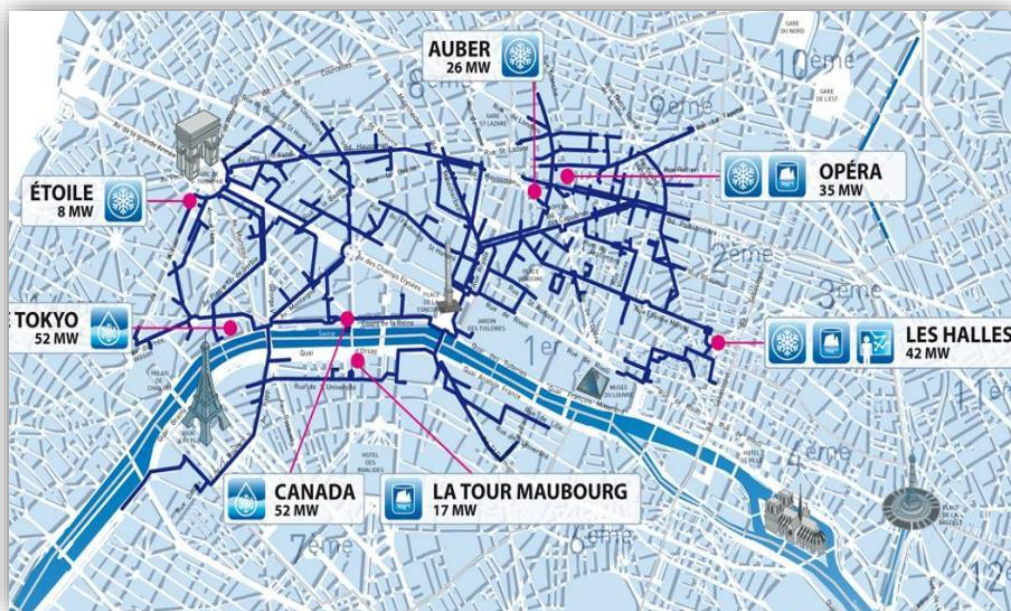


Figura 16: Red urbana de calor en malla, Sainte-Genève à Nanterre (Francia) [24].

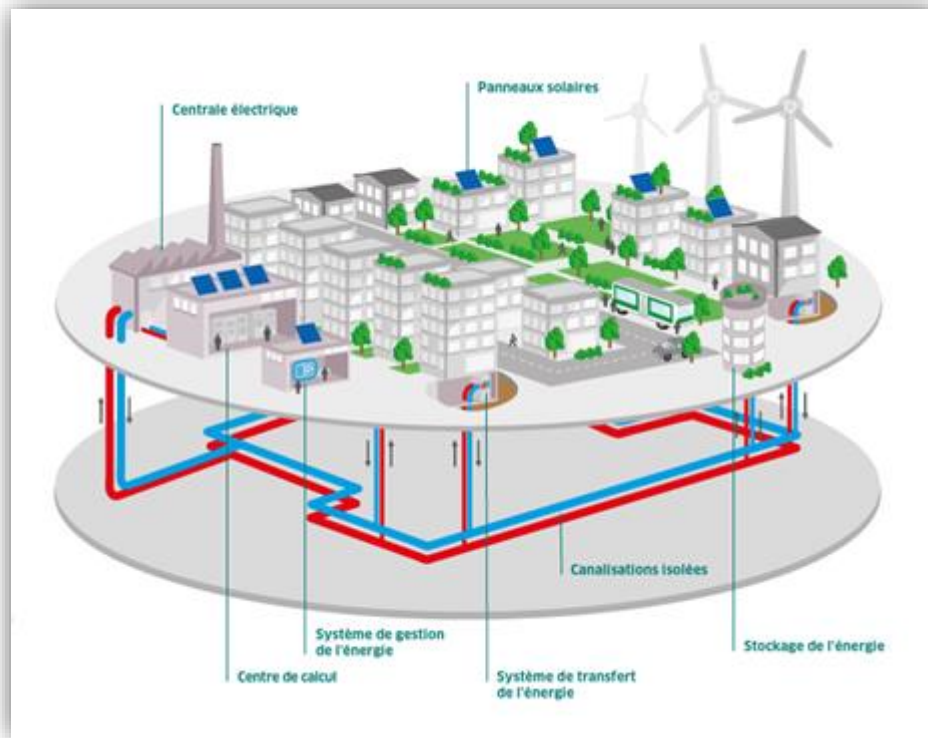


Figura 17: Red de calor en anillo [25].

4.5 BENEFICIOS DE LAS REDES DE CALOR URBANAS.

Las ventajas de la construcción de este tipo de redes son de diversa índole, y por supuesto los beneficiarios de las mismas no son solo un mismo colectivo, si no que recaen sobre diferentes grupos/organismos, como vemos en la siguiente imagen.

- Beneficios para la sociedad: el uso de estas redes favorece al conjunto de la sociedad, especialmente en temas sanitarios y ambientales, al ver reducida la contaminación en el núcleo de las ciudades provocada por las calefacciones de carbón y gasoil.
 - Se reducen las emisiones de GEI, debido a que disminuye la producción de dióxido de carbono gracias a la eficiencia energética (se reduce el consumo de combustible), el aprovechamiento de las energías renovables y al aprovechamiento de los calores residuales.
 - Las emisiones a la atmósfera de gases refrigerantes (por fugas) y metano (uso de residuos forestales que de otra forma se pudrirían) también disminuyen, favoreciendo el no calentamiento de la tierra.

- Se reduce la emisión de óxidos de nitrógeno y azufre y material particulado gracias a unas instalaciones más eficientes, con mejor control de la contaminación y que además suelen estar alejadas de los núcleos de población, favoreciendo la limpieza del aire en el centro de las ciudades.
 - Disminuye el riesgo por legionelosis al desaparecer las instalaciones de refrigeración de los edificios
 - Se respeta la fachada arquitectónica al no ser necesaria la colocación de splits individuales de aire acondicionado en el exterior.
 - Se incrementa la actividad económica local.
- Beneficios para las administraciones públicas: normalmente son ellas quienes impulsan y promueven este tipo de obras, ya que son parte beneficiaria de las mismas. Algunas de las ventajas para las APs son:
 - La marca de la ciudad mejora debido a la actual escasez de este tipo de redes, frente a los modelos convencionales, la ciudad que opta por la red de calor da una imagen de innovación y respeto por el medio ambiente.
 - Se incrementa la calidad urbana de aquellos barrios que gozan de este tipo de climatización.
 - Se abre una nueva vía de ingresos fiscales gracias a la actividad económica surgida a raíz de la construcción de la red.
 - Aumentan las posibilidades de acceder a la financiación pública gracias a las partidas destinadas a cumplir con los planes medioambientales y la promoción de la eficiencia energética.
- Beneficios para los usuarios: lógicamente se trata (o debería tratarse) de uno de los colectivos más beneficiados de esta obra, veamos los motivos.
 - Se produce un ahorro energético unitario gracias a la mayor eficiencia energética de la red de calor y a la gestión de ésta por profesionales.
 - Se externaliza el suministro energético como servicio, al igual que pasa con la electricidad, y nos ahorramos costes ocultos como las averías de la caldera, sustitución, revisiones etc...
 - Se reduce la incertidumbre acerca de la variación de precio anual que vayamos a sufrir en nuestra factura, ya sea por variaciones del precio de los combustibles convencionales o con la aplicación de posibles "impuestos medioambientales" futuros, los cuales empiezan a ser reclamados desde diversas organizaciones y partidos políticos. En la gráfica podemos ver como la variación del precio en el DH es mucho más plana que en los combustibles fósiles.

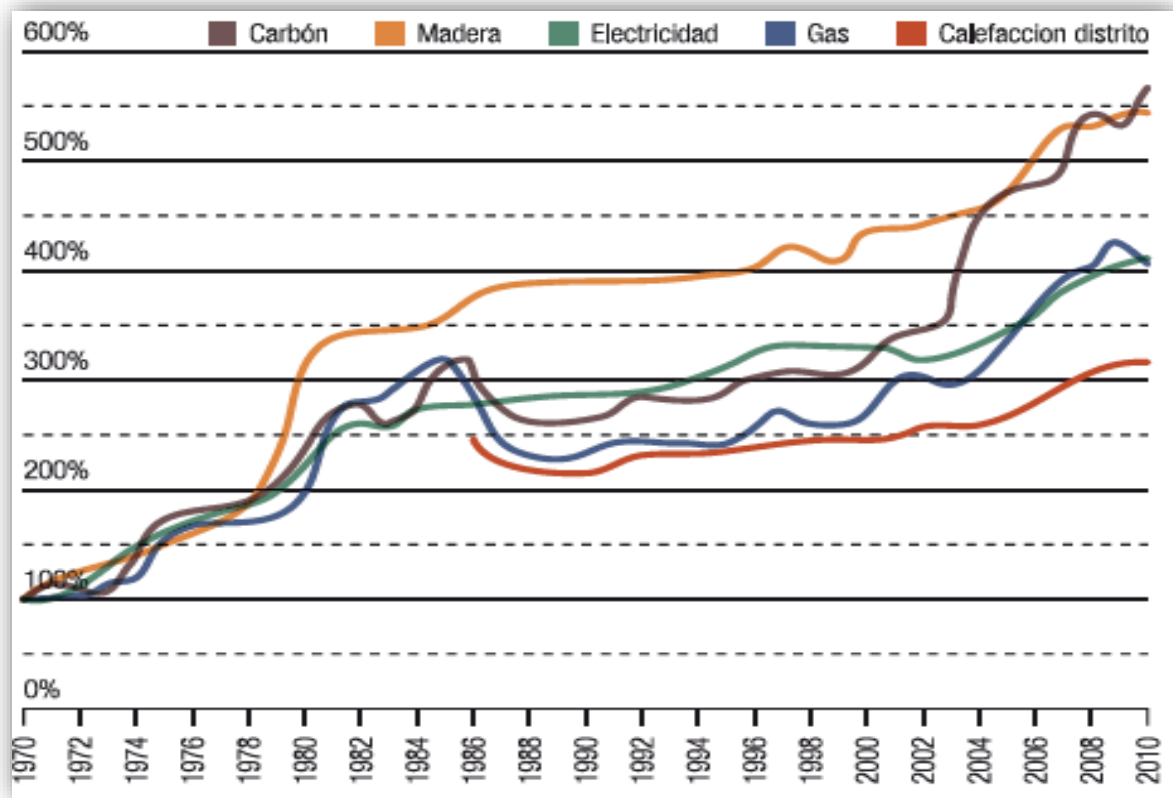


Figura 18: Evolución del precio de diversos combustibles en Austria [27]

- Reducción de los costes de mantenimiento de la instalación.
 - Tienen la garantía de disponer de ACS y calefacción ante cualquier incidencia, cosa que no ocurriría en el caso de tener una instalación individual.
- Beneficios para los promotores: desarrollar edificios que disponen de red de calor urbana es una forma de diferenciarse de la competencia y atraer clientes, estas son sus principales ventajas:
 - Ofertar edificios más innovadores frente a los más tradicionales, además de contar con una mejor estética (por falta de unidades exteriores) como argumento de ventas.
 - Sus edificios cuentan con una elevada categoría en el certificado de eficiencia energética.
 - Disponer en el edificio del abastecimiento de la red de calor urbana libera mucho espacio útil que puede ser aprovechado para otros fines, dando valor añadido al edificio.

- Beneficios para las empresas de servicios energéticos: por último, los otros beneficiarios de las redes de calor son las empresas energéticas, ya que la gestión y explotación de estas instalaciones corre a cargo de ellas. Veamos cuáles son las más importantes.
 - La creación de una nueva línea de negocio, que actualmente cuenta con una baja tasa de implantación, pero que su promoción y potencial hará que crezca mucho más en los próximos años.
 - Mejora la imagen de la empresa, su marca y su prestigio comercial frente a la competencia que no proporciona este tipo de servicios.
 - Apoyo financiero a través de las administraciones públicas dentro de su política de promoción de estas infraestructuras.
 - Frente a la configuración individual tradicional, el abastecer de forma conjunta a un número grande de usuarios genera un factor de simultaneidad, que unido a que ya no es necesario la sobredimensión de la instalación para garantizar el consumo (como ocurría en las individuales), da lugar a que la potencia instalada necesaria ahora es menor, derivando en un ahorro energético [18].

CAPÍTULO 5.

FUENTES DE CALOR EN REDES URBANAS DE CLIMATIZACIÓN.

5.1 FUENTES DE CALOR EN REDES URBANAS DE CLIMATIZACIÓN

Entre los diversos mecanismos para la obtención de energía térmica con la que abastecer a los clientes, la primera clasificación sería entre aquellas fuentes que no son renovables y las que sí lo son. Las no renovables (o convencionales) son las que derivan de combustibles fósiles, o éstos directamente. Así pues, dentro de este grupo encontramos el Gas Natural (el menos contaminante de este grupo), propano, butano, gasoil y carbón. Para las redes de DH/DHC no son especialmente utilizados por una parte por el elevado coste de transporte y dificultad de almacenaje, y por la otra debido a su alto nivel contaminante, que sitúa a este tipo de combustibles en las antípodas del principal objetivo de las redes de calor urbanas. Debido a esto no prestaremos especial importancia a las fuentes convencionales, para centrarnos en las renovables.

Estas últimas mencionadas alimentan a las redes de calor a través de biomasa (pese a no ser considerada completamente renovable), energía solar y la geotérmica. También pueden considerarse energías renovables aquellos calores residuales aprovechados de procesos industriales que de otra forma se disiparían, echando a perder su exergía, como por ejemplo el calor liberado en una central eléctrica, el cual es aprovechado para calentar agua mediante un proceso de cogeneración [19].

▪ 5.1.1 Biomasa

Se podría definir la biomasa como aquel conjunto de productos obtenidos a partir de materia orgánica para obtener energía. Las materias primas pueden tener diversos orígenes como residuos de aprovechamientos forestales y cultivos agrícolas, residuos de podas de jardines, residuos de procesos industriales o restos de humanos y animales. Esta heterogeneidad es una de las características más visibles de esta fuente de energía.

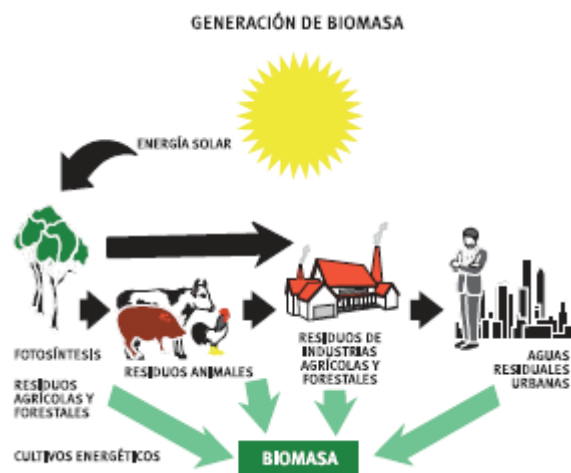


Figura 19: fuentes de biomasa [28]

▪ **5.1.1.2 Fuentes más comunes de la biomasa**

Debido a la heterogeneidad de recursos que forman la biomasa distinguimos multitud de fuentes de energía, a continuación, se muestran los más típicos.

- **Residuos forestales:** se trata de los residuos inservibles que se producen en la limpieza, poda, corte de las masas vegetales cuyo objetivo es la obtención de madera, resinas...etc para el sector forestal. Estos residuos tienen excelentes propiedades como combustibles. Además, si se cuenta con la maquinaria necesaria podemos astillarlos hasta hacer una masa más homogénea de combustible, pero su dispersión en el terreno y la elevada humedad que suelen presentar ha hecho que no sean los biocombustibles más utilizados.
- **Residuos agrícolas leñosos:** provenientes de la poda de viñedos, olivos y árboles, los residuos generados en estas actividades suponen una buena fuente de energía, que al igual que sucedía con los residuos forestales, es conveniente homogeneizarla a través de un astillado. Se recomienda la implantación de centros para su almacenaje y distribución debido a la no disponibilidad de este recurso a lo largo de todo el año, debido a la estacionalidad.
- **Residuos industriales forestales y agrícolas:** Se trata de aquellos deshechos de procesos industriales tanto de transformación de madera (astillas, cortezas, serrín) como de la agroalimentaria (huesos, cáscaras). Estos biocombustibles sólidos también se ven afectados por la estacionalidad debido a las variaciones que presentan los procesos industriales que generan dichos deshechos.

Tabla 3: potencial total disponible de biomasa no industrial en España [3]

Biomasa potencial disponible (t/año) y coste medio de obtención				
Procedencia		Biomasa (t/año)	Biomasa (tep/año)	Coste medio (€/t)
Masas forestales existentes	Restos de aprovechamientos madereros	2.984.243	636.273	26,59
	Aprovechamiento del árbol completo	15.731.116	3.414.158	43,16
Restos agrícolas	Herbáceos	14.434.566	6.392.631	19,98
	Leñosos	16.118.220		
Masas herbáceas susceptibles de implantación en terreno agrícola		17.737.868	3.593.148	45,62
Masas leñosas susceptibles de implantación en terreno agrícola		6.598.861	1.468.173	34,73
Masas leñosas susceptibles de implantación en terreno forestal		15.072.320	1.782.467	42,14
Total biomasa potencial en España		88.677.193	17.286.851	

▪ 5.1.1.3 Usos y aplicaciones: Energía térmica

Pese a que la biomasa también puede ser utilizada en la producción de electricidad, su principal uso, y el que de nuestro interés en tanto que va en relación con la realización de este trabajo, es su aplicación para la generación de calor.

Su desarrollo en esta materia tiene tres niveles diferentes. El más pequeño de los tres sería el uso de este biocombustible para calderas individuales de biomasa. Actualmente las estufas de pellets son una opción común entre muchos usuarios, así como las calderas individuales de biomasa para su uso en radiadores y ACS.

Por otra parte, y de forma menos habitual estarían las calderas comunes a una comunidad/edificio en sustitución de los métodos convencionales de calefacción central (gasóleo C o gas natural). La necesidad de disponer de un espacio amplio y seco para el almacenaje de la biomasa genera un problema para la implantación de dichas calderas, sin embargo, en edificios de nueva construcción es una opción cada vez más demandada. La conversión de las calderas tradicionales a biomasa también es posible, además de contar con el visto bueno de los vecinos de la comunidad debido al ahorro económico que esto les puede suponer.

El tercer nivel sería la aplicación de estos biocombustibles a gran escala mediante la implantación de redes urbanas de climatización (DH/DHC), las cuales están muy extendidas en el centro y norte de Europa, y cada vez más en España. Como ya sabemos, estas redes precisan de una central térmica, la cual puede estar a kilómetros de los puntos de consumo, con lo que el espacio para la colocación de las calderas y los silos de almacenamiento del combustible no suponen un problema, como si ocurría en los dos niveles inferiores. Este esquema es el adoptado por la Universidad de Valladolid, la cual es abastecida de calor a través de 4 calderas de biomasa [28].



Figura 20: calderas de biomasa e la red de calor de la Uva [30]

▪ 5.1.1.4 Economía y biomasa.

Aunque las ventajas medioambientales (las cuales veremos más adelante) que presenta este tipo de combustible son parte protagonista en la promoción de la biomasa, no hay que olvidar los aspectos económicos de su uso, ya que este puede inclinar la balanza en las decisiones de los consumidores a la hora de optar por un combustible u otro.

Actualmente, el coste fijo que supone el desarrollo e implantación de una instalación de biomasa son superiores a las que tendríamos que afrontar en el caso de decidimos por una instalación convencional. Esto es debido a las complejas características que han de tener las calderas para hacer funcionar la instalación de biomasa de forma eficiente. El alto coste de la instalación es el principal causante de que el consumidor particular no opte por una caldera de este tipo.

En cuanto a los costes variables (es decir, de explotación) estos pueden ser inferiores o superiores a los de los combustibles fósiles dependiendo de múltiples factores como la aplicación, el transporte, el tratamiento que haya que aplicar al combustible (secado, astillaje...etc, una biomasa muy húmeda en su origen por ejemplo no es interesante desde el punto de vista económico), la estacionalidad y la variación de precios (aunque estos últimos también se producen, y con mayor frecuencia, en los combustibles fósiles).

Existe una gran diferencia entre los costes dependiendo si el uso va a ser industrial o particular. Ya que el precio del combustible aumenta cuanto mejor sea su elaboración, envasado, limpieza y facilidad de transporte, requisitos más demandados para el uso doméstico que para el industrial, el cuál al usar unas calderas menos automatizadas pero más robustas, se conforma con un combustible de peor calidad, pudiendo adquirirlo a 35€/t, mientras que el hueso de aceituna molido o pelet (combustibles de mayor eficacia y rendimiento) se acotan entre los 110-200 €/t para un particular dependiendo de si lo compra directamente en la fábrica, o en un supermercado/gasolinera [28].

- Caso particular: Ahorro energético y económico en la EII.

Ya que la biomasa es uno de los grandes músculos dentro de una red de distrito, es interesante analizar cuánto ahorro, tanto energético como económico se puede obtener al sustituir por biomasa tu caldera de gas natural. En un estudio energético reciente a la red de calor de la UVa (a la parte correspondiente a la EII) fue realizado para tratar de averiguar qué beneficios se han obtenido [31].

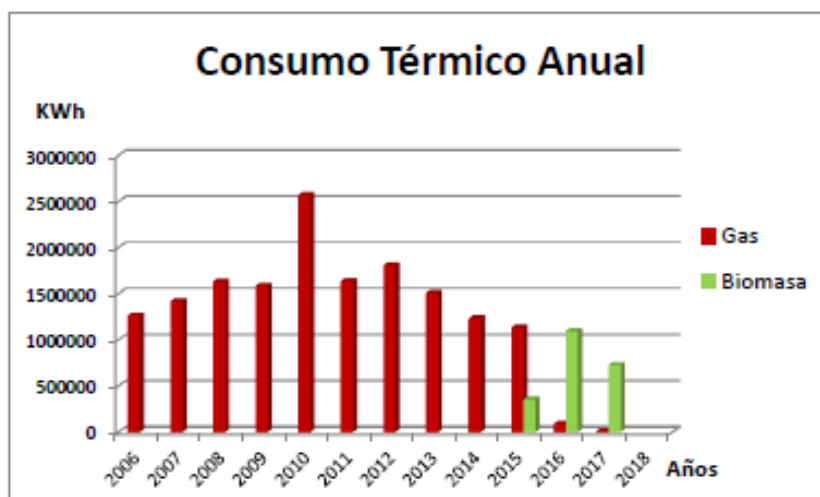


Figura 21: Consumo térmico anual en la EII 2018

El estudio recogió datos reales de consumo del invierno 2016/2017 y a partir de la información disponible, realizó un modelado para calcular mediante una simulación el gasto energético que se hubiera realizado ese mismo año con gas natural, y así poder comparar uno con otro. Los resultados fueron esclarecedores.

Según dicho cálculo, con el sistema de red de calor se obtuvo un 19.9 equivalente a casi 290.000 kWh.

Evidentemente este ahorro energético tiene su traducción a euros, ya que a menor consumo se produce un menor gasto económico.

Veamos ahora que beneficios medioambientales supone una reducción en el consumo energético.

▪ 5.1.1 5 Biomasa y medioambiente

Es bien conocido los beneficios que traen las energías renovables en relación con la disminución de la carga contaminante respecto a los combustibles fósiles, pero en el caso de la biomasa además promueve el desarrollo de zonas rurales y la correcta gestión de los residuos (los cuales después se usarán como combustible y que en algunos casos son contaminantes) y la recogida de los desechos de las podas, que de no realizarse sería un factor de riesgo adicional de cara a la propagación de incendios.

En cuanto a su aplicación térmica, la quema de biomasa en las nuevas calderas no produce humos comparables a las antiguas chimeneas de leña, y sus emisiones son similares a las de gasóleo C o gas natural. Una ventaja sobre estas dos últimas es la baja generación de compuestos con nitrógeno y azufre como los NO_x y SO_x, ya que la mayor parte de sus emisiones se basan en CO₂ (no contaminante, pero es un GEI) y éstas a su vez presentan un balance neutro, ya que se trata del cierre del ciclo que comenzaron las plantas al absorber de la atmósfera el CO₂ necesario para su crecimiento [28].

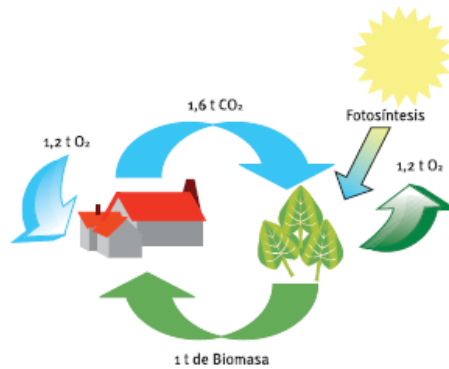


Figura 22: Ciclo del dióxido de carbono [28]

De esta forma, en el PER 2005-2010 calculaban las toneladas ahorradas de CO₂ gracias a la biomasa tanto para energía térmica como eléctrica. Para la parte eléctrica se tomó como referencia una central de generación eléctrica de ciclo combinado con gas natural, con un rendimiento del 54% (372 tCO₂ por GWh producido). Los resultados quedan recogidos en la siguiente tabla.

Tabla 4: Toneladas CO₂ evitadas por el uso de biomasa [2].

		ÁREA BIOMASA
EMISIONES CO ₂ EVITADAS BIOMASA ELÉCTRICA	(t CO ₂)	7.364.191
EMISIONES CO ₂ EVITADAS BIOMASA TÉRMICA	(t CO ₂)	1.788.326

▪ 5.1.2 Geotermia

Por todos es conocido que la tierra en su interior está más caliente, y aunque normalmente no notemos esa disipación de energía térmica desde el interior hacia la superficie, a medida que vamos adentrándonos en el subsuelo iremos encontrándonos con capas de tierra con mayor temperatura. La geotermia no es otra cosa que esa energía térmica que la Tierra transmite desde su interior hasta la capa más externa.

La variación de la temperatura a medida que nos acercamos al centro de la tierra (es decir, el gradiente térmico) es de aproximadamente 2.5-3°C cada 100 metros, aunque existen zonas muy específicas donde el valor del gradiente es superior. Este cálculo ha sido realizado a través de mediciones indirectas ya que el ser humano no ha podido adentrarse hasta los 6000kms de profundidad que tiene el globo terrestre obviamente.

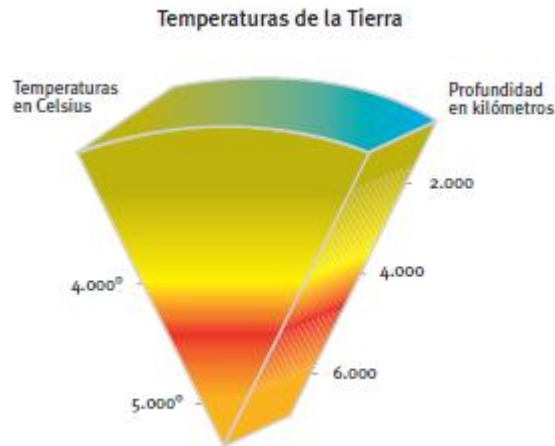


Figura 23: Gradiente térmico terrestre [32]

▪ 5.1.2.1 Obtención de la energía.

Ya sabemos que la geotermia se basa en la energía que la tierra nos transfiere desde su interior, pero para poder aprovecharla, es necesario algún medio del interior de la corteza terrestre que la almacene. Normalmente de esta tarea se encargan las aguas subterráneas presentes en el interior de los poros y huecos de las formaciones rocosas presentes en la litosfera. Esta agua adquiere las condiciones de temperatura y presión gracias a la energía recibida de la Tierra, además de enriquecerse con sales minerales gracias a los procesos fisicoquímicos que se dan lugar al estar en contacto con el entramado rocoso de la litosfera. De esta forma ya disponemos de un fluido geotérmico (agua con sales minerales) encargado de almacenar y transportar la energía para su posterior aprovechamiento.

Las condiciones ideales para que se forme un foco geotérmico serán la presencia de un material permeable lleno de agua capaz de interceptar el flujo de calor proveniente del centro de la Tierra, y este material permeable a su vez esté recubierto de un material impermeable, de forma que esa masa de agua caliente quede sellada, localizando así la energía térmica [32].

El cumplimiento de estas condiciones es lo que conocemos como yacimiento geotérmico, y los hay de 3 tipos diferentes:

- **Yacimientos de alta entalpía:** la “bolsa” donde se almacena el fluido cumple las características descritas anteriormente. Además, debido a la presencia de un fuerte foco de calor, el agua alcanza unas altas presiones y temperaturas (no inferiores a los 150°C). Este tipo de yacimientos son destinados a producción de electricidad.

- **Yacimientos de media entalpía:** mismo caso, pero ahora las temperaturas están acotadas entre los 100-150 °C, con lo que se producirá electricidad mediante ciclos binarios, obteniendo un menor rendimiento que en los de alta entalpía.
- **Yacimientos de baja entalpía:** En este caso, la temperatura que alcanza el agua no llega a los 100 °C, y son estos yacimientos los que son destinados a usos de calefacción (cuando superen los 50 °C) o para instalaciones balnearias (temperaturas inferiores a 50 °C no aptas para calefacción). Este tipo de yacimientos son mayoritarios al encontrarse en zonas estables de la corteza, y no en zonas anómalas con altos flujos de calor (como si ocurre para media y alta entalpía)
- **Yacimientos de muy baja entalpía:** Se forman cuando el flujo de calor atraviesa la capa permeable, dejando al agua en un estado térmico estable entre los 15-22 °C. Esta masa de agua templada puede ser utilizada para calefacción/climatización a través del uso de bomba de calor. En ocasiones en ausencia de acuíferos, es el terreno quien se encarga de aportar el calor al hacer circular un fluido en contacto con él. La estabilidad térmica permite que a menos de 10 metros de profundidad la temperatura de los terrenos se mantenga estable. Cuando aprovechamos este foco para su uso con bomba de calor, el terreno actúa como foco caliente en invierno y foco frío en verano, absorbiendo calor del terreno en los meses fríos, y cediendo el calor de la vivienda al terreno en los más calurosos [32].

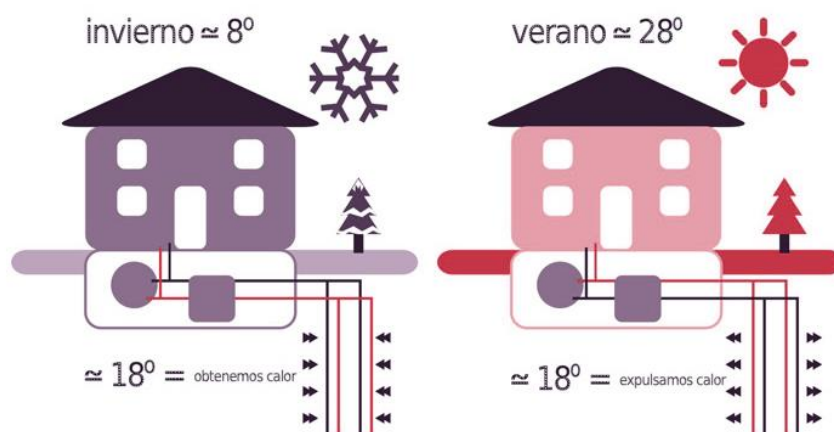


Figura 24: Esquema de instalación geotérmica con bomba de calor [33]

Tabla 5: Tipos de yacimientos geotérmicos y sus aplicaciones [32]

Recursos geotérmicos		Temperaturas	Tecnología	Aplicación
Convencionales	Muy baja entalpía	5-25°C	Utiliza bomba de calor	Usos directos Climatización
	Baja entalpía	25-50°C	Puede precisar bomba de calor	Usos directos
		50-100°C		Usos directos
	Media entalpía	100-150°C	Ciclos binarios	Electricidad Procesos
Alta entalpía	>150°C		Electricidad	
No convencionales	EGS - HDR	>150°C	Ciclos binarios	Electricidad
	Supercríticos	>300°C		Electricidad Hidrógeno

▪ 5.1.2.2 La energía geotérmica en España

Pese a ser una fuente limpia de energía y tener gran potencial, la realidad es que en España juega un papel testimonial, tanto para uso doméstico como industrial, debido en parte a que la parte centro-oeste del país no cuenta con grandes focos de calor que den lugar a yacimientos de alta entalpía con los que generar energía eléctrica. En el plano del consumo individual, el alto coste de la inversión inicial hace que esta no retorne hasta pasados 5-15 años. Esta falta de rentabilidad a corto plazo desincentiva al consumidor particular a decidirse por una instalación de este tipo.

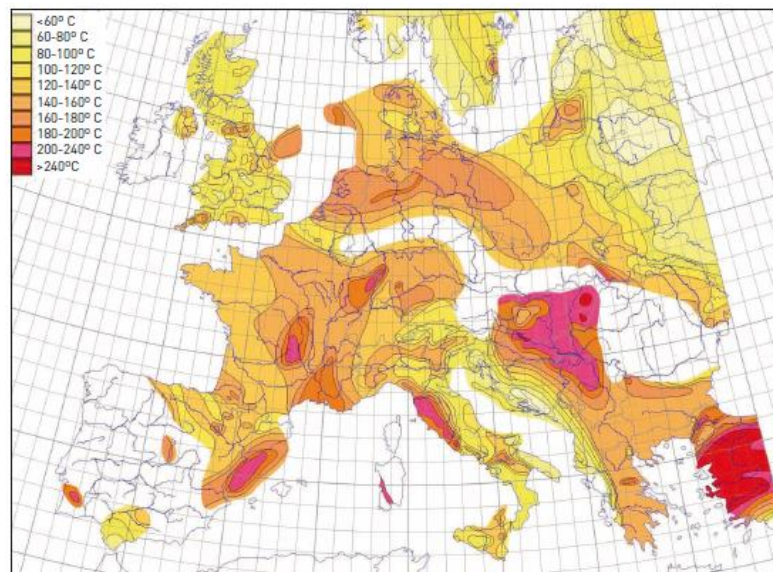


Figura 25: Extrapolación de temperaturas a 5 km de profundidad [34].

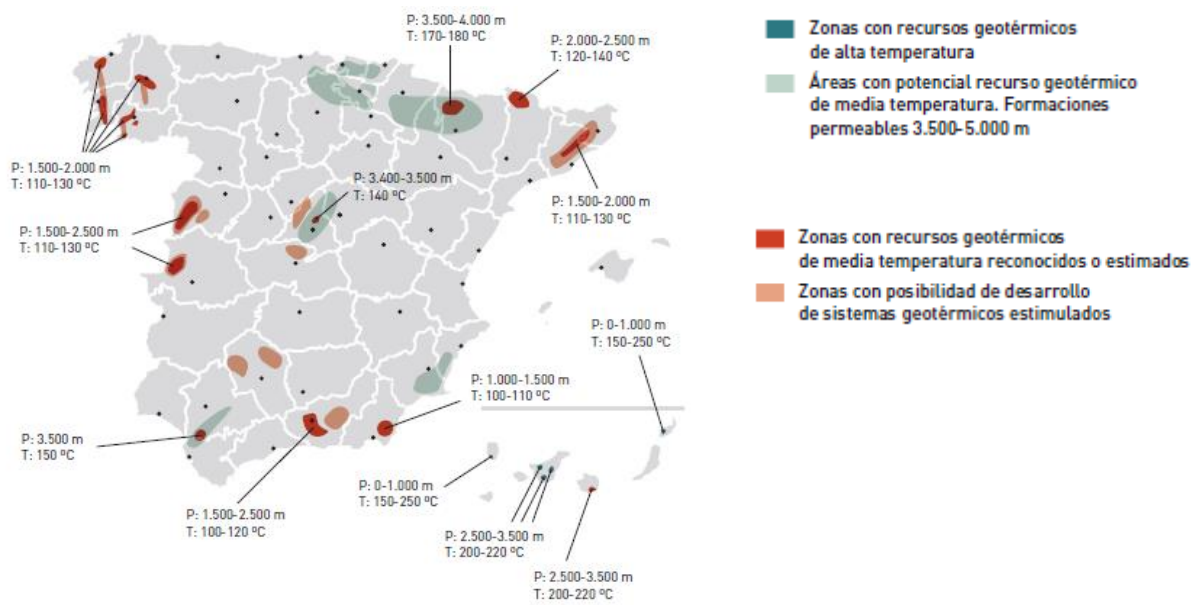


Figura 26: Mapa de los recursos geotérmicos de media y alta temperatura y posibles sistemas geotérmicos estimulados [35]

5.1.2.3 Uso de energía geotérmica en el District Heating.

Pese a que la mayor parte de los usos térmicos de la energía geotérmica en Europa corresponden a usos de calefacción/climatización con bomba de calor, donde aprovechamos el flujo de calor proveniente del interior de la Tierra, también tienen importancia las aplicaciones de esta energía a las redes de distrito, siendo la tercera aplicación más demandada, ya que en el centro-norte de Europa el uso de las redes de distrito es mucho más frecuente que en nuestro país.

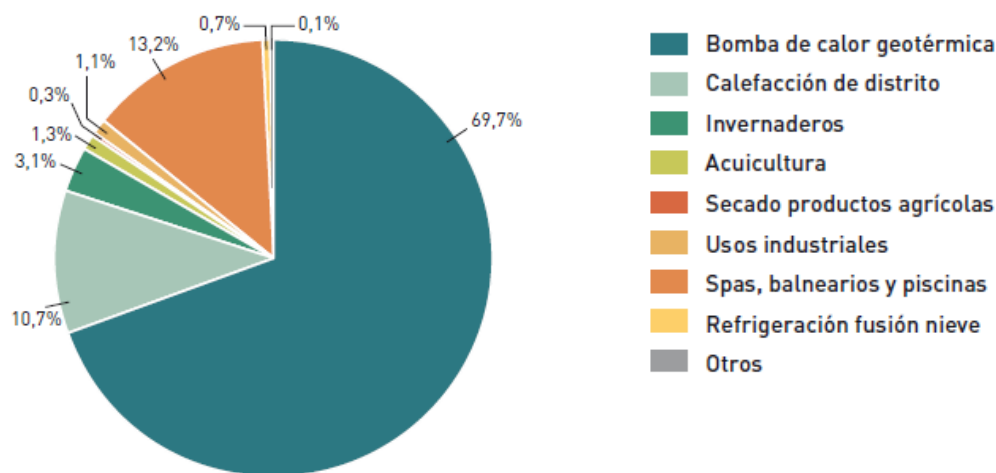


Figura 27: Distribución de la energía geotérmica en usos térmicos [36]

Normalmente en las instalaciones de calefacción particulares, el calor se obtiene utilizando un circuito cerrado donde el agua absorbe el calor del terreno a través de un intercambiador de calor, el cuál puede estar colocado horizontal o verticalmente en función de las características del terreno, espacio o flujo de calor que queramos obtener. En el caso de las redes urbanas de climatización trataremos de abastecer a los clientes mediante la búsqueda de acuíferos de baja entalpía (menor de 100°C) extrayendo directamente el agua subterránea (75-90°C), formando así un circuito abierto de uso directo en el que podemos prescindir del intercambiador de calor y de la bomba de calor. Los acuíferos con mayor temperatura suelen ser destinados para generación de energía eléctrica [37].

Algunas de las múltiples redes urbanas que abastecen sus necesidades a través de la explotación de pozos y acuíferos se encuentran en Idaho (EEUU), donde disponen de una gran cantidad de recursos geotérmicos (aproximadamente 800 MW).

Estos recursos son explotados gracias a la construcción de 6 sistemas de calefacción por distrito, de los cuales, 4 de ellos recogen directamente agua proveniente de los acuíferos a una temperatura entre 60 y 80 °C para suministrar calor a 200 viviendas y 85 edificios empresariales y gubernamentales. La temperatura del agua depende de la profundidad de los pozos utilizados en cada instalación, la cual varía entre los 120 y los 950 metros. Lógicamente el agua de mayor temperatura y por lo tanto mayor entalpía, se encuentra en la zona más profunda.

Los otros dos sistemas solo cuentan con yacimientos de baja entalpía, donde el agua no se encuentra a más de 38°C, lo que hace necesaria la implantación de una bomba de calor que permita obtener la máxima energía de estas aguas.

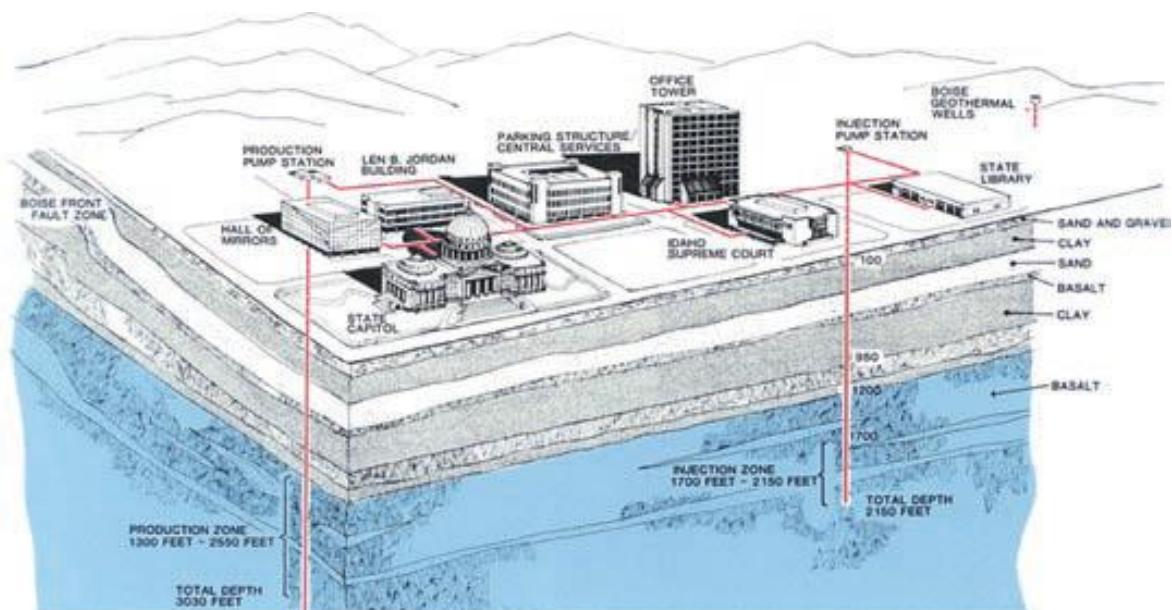


Figura 28: Sistema de calefacción urbana geotérmica en Boise, Idaho [38]

Al otro lado del Atlántico, en Europa, contamos con el proyecto GEO-DH, cuyo objetivo es promover y acelerar la implantación de los sistemas de calefacción por distrito abastecidos con energía geotérmica (GEO-DH) en detrimento de los combustibles fósiles, garantizando una mayor sostenibilidad del suministro a largo plazo. Para ello se ha propuesto eliminar barreras tanto administrativas como financieras, simplificando los procedimientos y trámites burocráticos que hoy se requieren para la ejecución de un proyecto de geotermia urbana; y realizar una fuerte actividad divulgativa a lo largo de 14 países de la UE acerca de las ventajas que tiene el uso de una instalación de este tipo.

Hoy día las redes urbanas de climatización ya están consolidadas dentro de la UE, especialmente en los países nórdicos, satisfaciendo el 12% de la demanda total de calor. Sin embargo, la gran mayoría aún funcionan con combustibles fósiles. El 1% que representan las energías renovables tiene como principal agente la biomasa, con lo que la geotermia solo representa un pobre 0.001% del total. El objetivo de este proyecto será incrementar este porcentaje, ya que la mayoría de los países de la UE tienen una importante actividad geotérmica que no está siendo aprovechada en todo su potencial.

▪ 5.1.2.4 Conclusiones acerca de la Geotermia.

Está demostrado que la existencia de un yacimiento geotérmico supone una buena oportunidad a nivel local de obtener una fuente de energía eficiente que disminuye la dependencia energética del municipio.

Su desarrollo se ha visto coartado debido a las pocas facilidades burocráticas a la hora de emprender este tipo de proyectos combinadas con la débil inversión en el desarrollo de tecnologías de este tipo; especialmente en España donde estos problemas se acentúan más que en el resto de la UE.

Debido a esto, estamos renunciando a una fuente de energía 100% limpia y renovable, la cual otorga mucha autonomía energética a la ciudad, que es segura y que no requiere de apenas consumo ya que solamente precisa del uso de una bomba de calor para la obtención de la energía. Gracias a esto, proporciona un ahorro de hasta el 50-60% de energía en comparación con los métodos tradicionales, posicionándose como una de las mejores opciones a nivel económico a medio-largo plazo.

Su punto negativo son las fuertes inversiones iniciales en implantación y construcción, así como los estudios necesarios para el descubrimiento de los yacimientos geotérmicos.

A nivel de mantenimiento también destaca frente a sus competidoras, siendo el costo de éste prácticamente nulo. Haciendo un balance de los beneficios de la instalación una vez se encuentra operativa, frente a los altos costes de construcción, el retorno de la inversión dependerá de la escala de actuación y de las características del sistema [39].

▪ 5.1.3 Energía solar

La tercera fuente de energía que vamos a estudiar es la energía solar, la cual ha experimentado un desarrollo tecnológico en los últimos años que le ha permitido ser partícipe en la producción de agua caliente sanitaria, tanto a nivel de usuario como en las redes de calefacción por distrito.

Esta energía, la cual es bastante conocida, aprovecha la radiación proveniente de los rayos solares que inciden en la superficie terrestre, siendo una fuente inagotable de energía limpia. Lógicamente no toda la radiación proveniente del exterior puede ser captada, ya que aproximadamente un tercio de ésta es devuelta al espacio por la atmósfera, de forma que mantiene la temperatura terrestre en unos valores estables. Además, no en todos los lugares se recibe la misma radiación, siendo los trópicos la zona que mayor flujo energético recibe, y los polos la que menos. Esto es debido a la inclinación de la esfera terrestre respecto al sol ($23,5^\circ$).

Debido a esta inclinación las latitudes que se encuentran perpendiculares a los rayos solares son las que están por encima y por debajo de los trópicos de Cáncer y Capricornio, en vez del Ecuador, el cual sería la zona que más radiación recibiría en el caso de no existir la inclinación del planeta.

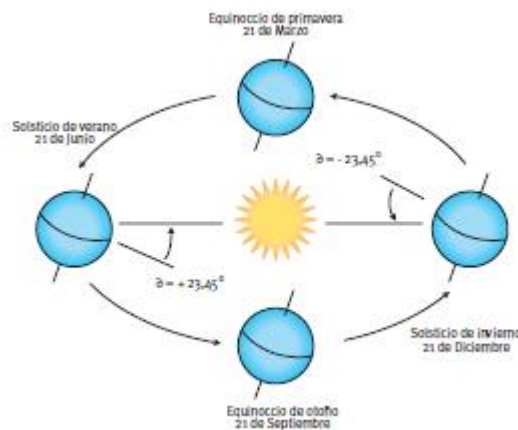


Figura 29: Inclinación del planeta respecto del Sol [40]

Pero no es la latitud el único factor determinante en la energía que recibe cada zona de la Tierra, la estación del año en la que nos encontremos, la hora del día y muy especialmente las condiciones atmosféricas son elementos de suma importancia a la hora de cuantificar la radiación recibida.

La suma de estas variables nos permite confeccionar un mapa que clasifique las regiones según la cantidad de energía solar que reciben. En este mapa España se encuentra como uno de los países con mayor capacidad de Europa para recoger energía solar, ya que combina una posición óptima ($36-44^\circ$ latitud norte) con una gran cantidad de días de sol al año. De esta forma la energía media que recibe España procedente del Sol es de 1500

kWh/m², un 50% más de lo que reciben ciudades como Berlín, Hamburgo y Zúrich, y el equivalente a unos 160 litros de gasolina por año y m².

A la hora de utilizar los rayos solares para obtener energía térmica mediante captadores solares (y no eléctrica, con paneles fotovoltaicos) es muy importante que esta radiación se reciba de forma directa, y es en este tipo de energía donde España despliega un gran potencial, gracias a su media de 2500 horas de sol anuales, el clima seco, la baja humedad ambiente y la poca nubosidad, especialmente en las regiones situadas al sur de la nación.

Pese a todo, no se llega a aprovechar ni el 10% de toda esta energía, con lo que hay mucho margen para poder conseguir resultados mucho más positivos que los obtenidos hasta ahora.

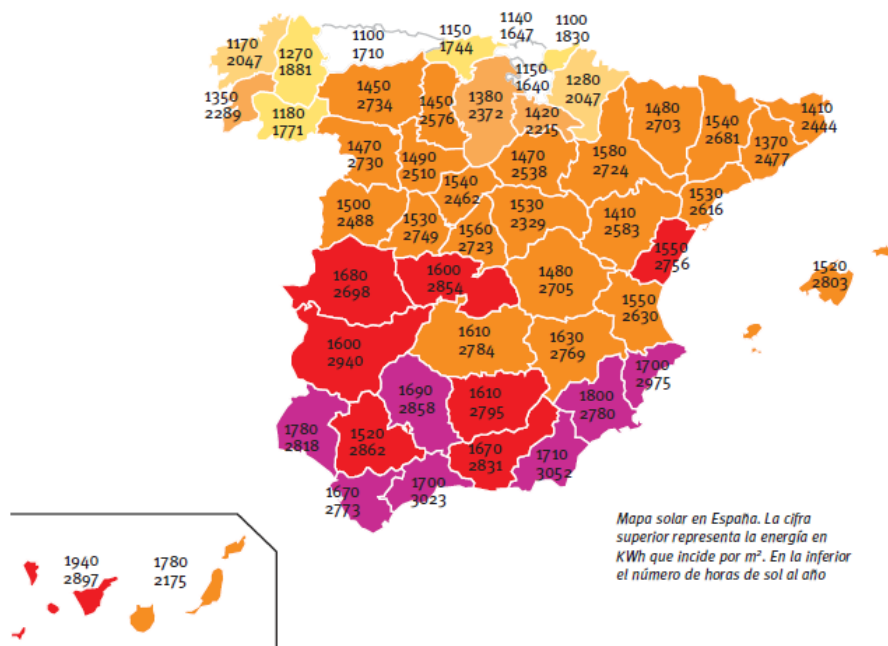


Figura 30: Mapa solar en España por provincias [40].

▪ **5.1.3.1 Funcionamiento y aplicación a la energía térmica.**

Debido a la temática de este trabajo vamos a centrarnos en la aplicación de la energía solar a la obtención de agua caliente sanitaria, tanto a nivel de usuario como su uso en redes urbanas de climatización.

El principio de funcionamiento de un captador solar es similar al “efecto invernadero” que realiza la atmósfera, dejándose atravesar por radiación de longitud de onda corta, pero no por las ondas de mayor longitud (las que se producen cuando la Tierra “devuelve” parte de la radiación incipiente a la atmósfera), las cuales son reflejadas de nuevo a la Tierra, haciendo que la temperatura de ésta no sea 30 o 40 grados inferior a lo que es ahora.

Este efecto, también conocido como “efecto de cuerpo negro”, se produce de idéntica forma en los cristales de un captador solar, de forma que éste no deja escapar la radiación solar una vez que ha atravesado el cristal del panel, facilitando así el incremento de temperatura del fluido que recorre el interior del captador.

Esta energía captada por el panel solar es transferida al agua a través de un intercambiador de calor, y almacenada en un depósito aislado térmicamente, de forma que haya energía acumulada en el momento en el que se demande. El correcto aislamiento del agua en el depósito en este tipo de instalaciones cobra mucha importancia, ya que a diferencia de instalaciones donde se quema combustible, el momento de mayor producción de agua caliente no tiene por qué ser así, es más, es probable que en verano (baja demanda) se den lugar las mayores obtenciones de energía (más horas de sol). Debido a esto a veces es preciso acumular el agua durante largos periodos de tiempo, no obstante, se intenta dimensionar la instalación para que la acumulación de agua coincida con la demanda a lo largo de un día, ya que no es posible almacenar la energía térmica sin apenas pérdidas al exterior durante largos periodos de tiempo.

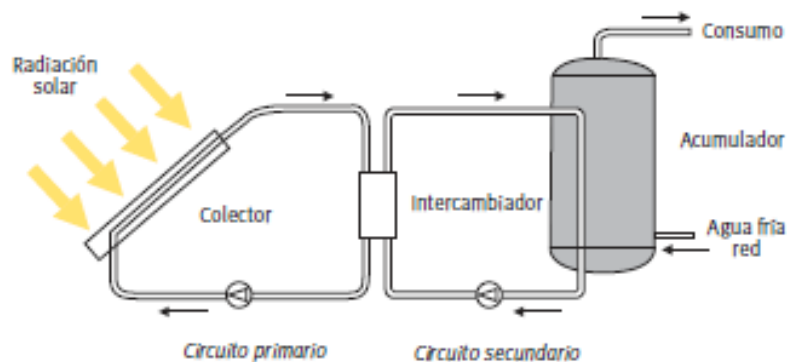


Figura 31: Esquema básico funcionamiento instalación de energía solar [40].

Por otra parte, cuando nos encontramos en la situación contraria, es decir cuando la radiación solar disminuye consecuencia de las condiciones climáticas y la demanda supera a la producción de agua caliente, la instalación solventará este déficit energético con la ayuda de elementos auxiliares convencionales (gas, electricidad, gasóleo ... etc.).

- **5.1.3.2 Clasificación de las instalaciones solares según el sistema de distribución.**

Como en cualquier instalación térmica, el sistema de distribución se encarga de transportar la energía calorífica obtenida hasta el punto de consumo. Existen distintos tipos de sistemas de distribución en función de la demanda que queramos satisfacer o de las condiciones ambiente del lugar donde se encuentra nuestra instalación solar.

El sistema más utilizado en España para las instalaciones de este tipo es el de circuito cerrado, aquel donde un circuito cerrado primario cede el calor contenido en el fluido

caloportador (que no debe ser necesariamente agua) al agua de consumo a través de un intercambiador de calor. Sin embargo, existen otro tipo de sistemas de distribución igualmente válidos.

- Sistema de distribución abierto: En este tipo de configuración, el agua que circular por el captador es la misma que pasará después al depósito de acumulación, de forma que no es necesario contar con un intercambiador de calor entre el captador y el depósito. La circulación del agua puede ser o natural (termosifón) o forzada, cuando es movida por una bomba circuladora.

El principal inconveniente de este tipo de sistema es que el fluido que circular por el captador ha de ser necesariamente agua, con lo que corremos el riesgo de rotura de tubos en invierno debido a las heladas. Para evitar esto, se puede disminuir el volumen de agua que circular por los captadores durante las épocas más frías del año, con el fin de compensar el incremento de volumen producido al helarse el agua.

Se trata de un sistema recomendado para aquellos lugares donde las temperaturas mínimas a lo largo del año no produzcan heladas de forma frecuente.

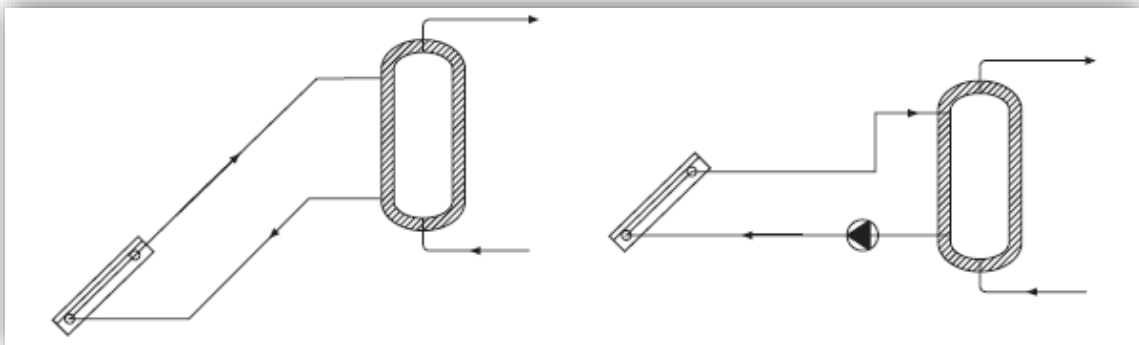


Figura 32: Esquema sistema distribución abierto (natural y forzado) [40].

- Sistema de distribución cerrado: En este caso al existir dos circuitos cerrados no es necesario que el fluido que circula por el captador sea agua, pudiendo utilizar otros fluidos con propiedades anticongelantes que eviten la rotura de los tubos en las noches más frías. Será preciso instalar un intercambiador de calor para calentar el agua de consumo (circuito secundario). Al igual que en la configuración abierta, la circulación puede ser natural o forzada.

Este sistema es utilizado de forma mayoritaria en aquellas zonas que cuentan con un clima más frío [40].

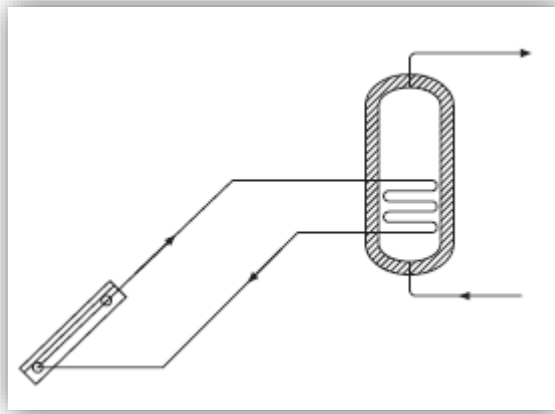


Figura 33: Esquema básico funcionamiento instalación de energía solar [40].

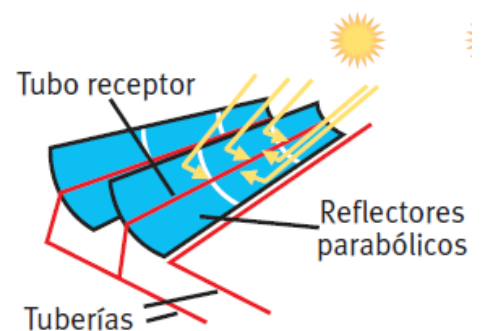
Además, también podemos clasificar las instalaciones solares según la temperatura del fluido caloportador. De esta forma diferenciamos entre dos tipos:

- Sistemas de baja temperatura: en ellos la temperatura de servicio es inferior a los 80 °C y se usan para la producción de ACS, climatización de piscinas o sistemas de calefacción de baja temperatura.

El tipo de generadores utilizado en estos sistemas son captadores de placa plana, donde el absorbedor está situado bajo una placa de metal, y suele estar formado por un serpentín de cobre. Además, se cuenta con una cubierta de vidrio para minimizar las pérdidas al exterior mediante la utilización del "efecto invernadero".



(a)



(b)

Figura 34: Esquemas de un captador solar de placa plana (a) y de un captador solar cilíndrico-parabólico (b) [41].

- Sistemas de media temperatura: donde la temperatura está acotada entre 80 y 250 °C. Se usan para calefacción, climatización y procesos industriales de media temperatura.

Los captadores utilizados para tal fin consisten en tubos de vidrio en los que el absorbedor (tubo de cobre con placa de metal para absorber la energía solar) se encuentra en su interior de forma concéntrica, y se realiza el vacío entre ellos para disminuir las pérdidas por conducción. Es necesario concentrar toda la radiación sobre el tubo para alcanzar temperaturas tan elevadas que con un captador plano no serían posibles. Para ello se coloca el tubo dentro de una semi-carcasa de reflectores parabólicos con forma cilíndrica que reflejan toda la radiación sobre el tubo por el que circula el fluido [41].

▪ 5.1.3.3 La energía solar en las redes urbanas (SDH).

Las redes urbanas solares consisten en grandes superficies de colectores que pueden estar agrupados en el exterior o bien colocados sobre las azoteas de los edificios a los que abastecen de agua caliente y dotando de independencia energética a sus usuarios.

Las SDH pueden estar conectadas junto con una planta de generación (por ejemplo, biomasa) contribuyendo ambas a calentar el depósito de acumulación (sistema centralizado) o estar conectados los colectores directamente a la red de distribución, sin acumulación de agua caliente (sistema descentralizado).

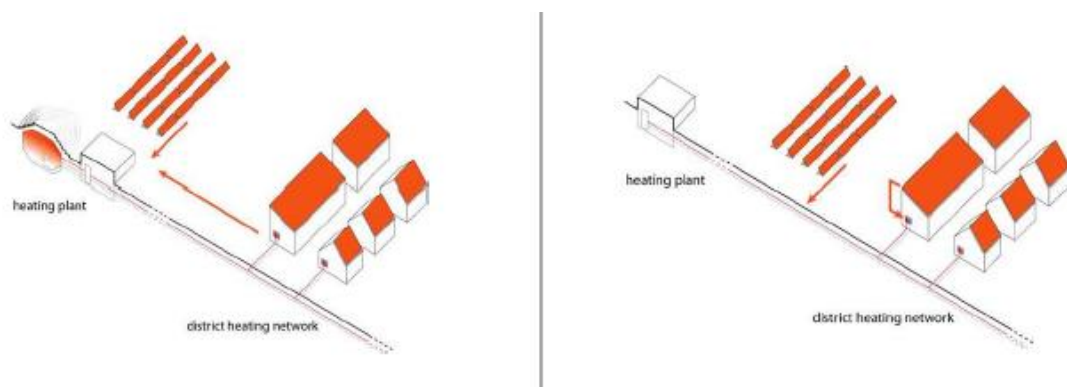


Figura 35: Sistema solar centralizado y descentralizado [42].

Independientemente del sistema elegido, las SDH no suelen ser capaces de abastecer ellas solas toda la demanda de agua caliente, especialmente en invierno, necesitando la colaboración de otras fuentes de energía como la biomasa, la geotermia o los combustibles fósiles [42].

Las principales ventajas de esta energía frente a los combustibles fósiles u otras renovables son:

- No emite gases perjudiciales para la salud.
- No produce GEI, con lo que no colaboran con calentamiento global.
- No produce ningún tipo de residuo de difícil eliminación.
- No corre peligro de agotarse a largo plazo.
- El impacto medioambiental es muy pequeño, y de producirse únicamente sería en la fase de fabricación [40].

▪ 5.1.4 Cogeneración y calores residuales

La cogeneración se trata de la producción conjunta de electricidad y calor, con el objetivo final de ahorrar energía primaria. Cuando en una central se produce energía eléctrica, solo el 35% de la energía original es transformada en electricidad, el otro 65% restante es disipado en calor. El aprovechamiento de este calor para otros fines es lo que se entiende como cogeneración, y puede elevar el rendimiento energético de la planta hasta el 90%, reduciendo de esta forma el consumo de energía primaria.

Aunque el principal objetivo de cualquier planta de cogeneración es el ahorro de combustible, y con ello la reducción de emisiones nocivas para la atmósfera, no todas las plantas consiguen los mismos niveles de ahorro, ya que este ahorro depende del tamaño de la planta, el combustible utilizado y el ajuste de la producción a la demanda de calor. Por ello, y de cara a mostrar los resultados de la forma más realista, se tiene a mostrar el ahorro en términos relativos y comparativos (como índices de eficiencia) dejando de lado los parámetros puramente cuantitativos.

De esta forma, distinguimos dos términos que nos van a dar mucha información acerca del rendimiento de un ciclo combinado.

- Rendimiento global (η): es un parámetro que relaciona la producción conjunta de electricidad y calor, de forma que se obtiene al sumar el rendimiento térmico η_t (calor producido/consumo de combustible) más el rendimiento eléctrico η_e (electricidad producida/consumo de combustible). El valor de este rendimiento puede rondar el 90%.
- Rendimiento eléctrico equivalente (REE): Es el término más utilizado para mostrar la eficiencia de una planta de cogeneración, ya que, a diferencia del anterior, éste se trata de un valor comparativo. Se trata de mostrar el rendimiento eléctrico del ciclo combinado como si fuese el de una central eléctrica sin cogeneración. Para ello se divide la energía eléctrica generada entre el combustible utilizado, pero restando a este último la parte de combustible que sería necesaria para obtener el flujo de calor que recuperamos en nuestra planta

de cogeneración. De esta forma queda un rendimiento que puede superar el 60%, muy superior al 30-35% que tiene una central sin cogeneración [43].

Los valores mínimos exigidos para este rendimiento son:

Tabla 6: Valores REE exigidos según tipo de combustible [43].

Tipo de combustible	REE mínimo
Combustibles líquidos en centrales con calderas	49 %
Combustibles líquidos en motores térmicos	56 %
Combustibles sólidos	49 %
Gas natural y GLP en motores térmicos	55 %
Gas natural y GLP en turbinas de gas	59 %
Otras tecnologías y/o combustibles	59 %
Biomasa incluida en los grupos b.6 y b.8	30 %
Biomasa y/o biogás incluido en el grupo b.7	50 %

A esto hay que añadirle el ahorro producido por la disminución de las pérdidas de tensión durante el transporte, ya que la electricidad generada en una planta de cogeneración se consume muy cerca del centro productor, a diferencia de las plantas convencionales que pueden estar operando a distancias mucho más grandes, y necesitan de líneas de alta tensión para su transporte.

▪ 5.1.4.2 Calor útil en una planta de cogeneración.

La mayor parte de los centros de consumidores necesitan de ambas energías (térmica y eléctrica) para satisfacer sus necesidades (mecánicas, accionamiento de equipos, calefacción, climatización...etc.). Una forma de satisfacer esta demanda es con la implantación de una central de cogeneración cercana a la zona donde se ubican los consumidores. Existen cuatro condiciones básicas que cualquier planta de este tipo ha de cumplir si quiere dar los beneficios que se espera de ella.

- Que el calor generado en la combustión para producir energía eléctrica sea después aprovechado para satisfacer demanda de energía térmica (ACS, calefacción...). Ahorrando de esta forma el combustible que se hubiera necesitado para la producción de dicha energía térmica [43].
- Que la producción eléctrica en la planta evite que ésta sea producida en otras donde no se dispone de esta tecnología.
- Que exista una red de conexión entre todas las plantas de cogeneración para poder aprovechar toda la electricidad a través de la red de distribución, evitando así las pérdidas por transporte que se producirían al tener que llevarla por líneas de alta tensión desde plantas más alejadas de los centros de consumo.
- Que la demanda de calor de los centros consumidores esté en sintonía con el tamaño y producción de la planta, de forma que la demanda y la producción de calor se encuentren en equilibrio.

▪ 5.1.4.3 Equipos de cogeneración

Hay diferentes sistemas que permiten realizar procesos de doble ciclo, entre ellos se encuentran:

- Turbinas y microturbinas de gas: son máquinas rotativas que funcionan bajo un ciclo Brayton. El funcionamiento consiste en un compresor rotativo que introduce aire a presión en la cámara de combustión, donde es mezclado con el combustible. Una vez se produce la combustión (a la presión de salida del compresor), se generan unos gases de combustión calientes que a medida que pasan por los escalonamientos de la turbina, ceden parte de su entalpía haciendo rotar a ésta, la cual es solidaria a un generador eléctrico. A la salida de la turbina, los gases se encuentran aproximadamente a 500°C, y pueden ser utilizados para procesos industriales de alta temperatura. En el caso de no ser necesaria tanta energía (como por ejemplo, si se quisiese satisfacer demandas de ACS en viviendas) los gases de escape son utilizados para



Figura 36: Turbina de gas ciclo Brayton [41].

precalentar el aire de combustión (reduciendo así el consumo de combustible) y después utilizar la energía remanente para producir agua caliente. Cuando se produce este precalentamiento de aire lo llamamos ciclo regenerativo.

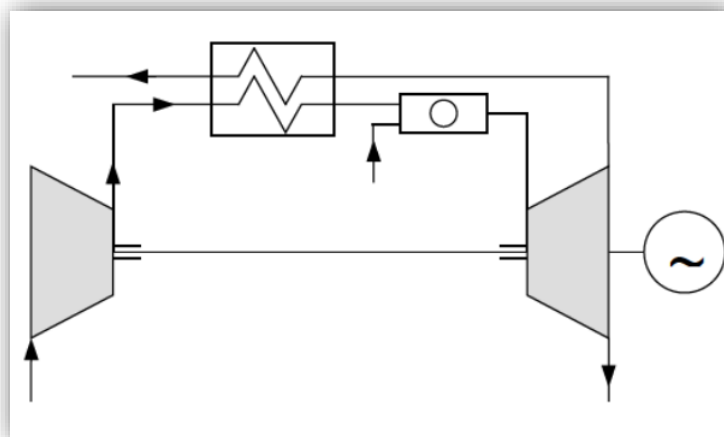


Figura 37: Esquema ciclo Brayton con regeneración [44].

Conceptualmente, se puede plantear la instalación de microturbinas a lo largo de la red de distrito, obteniendo así un sistema distribuido. Esta idea está pensada para redes urbanas de pequeño tamaño, ya que las más grandes suelen contar con un centro de cogeneración centralizado [41].

- MCI: Los motores de combustión interna alternativos también son utilizados en los ciclos de cogeneración, los cuales tienen la ventaja, frente a las turbinas, de mostrar un buen rendimiento en un amplio rango de rpm.

La energía térmica en este caso se obtiene de dos fuentes distintas; por un lado están los gases de escape, con una temperatura cercana a los 400 °C, y por el otro los elementos refrigerantes del motor (circuito de anticongelante, intercooler y aceite de lubricación) que rondan los 85°C.

El hecho de que parte de la energía térmica recuperada sea a baja temperatura puede limitar la capacidad de esa corriente de abastecer la demanda energética, ya que se destruye mucha exergía en la cesión de calor entre dos focos en los que existe un amplio salto de temperatura. Sin embargo, este fluido a 85°C si será válido en redes de calor urbanas, ya que las temperaturas de operación de estas redes son relativamente bajas respecto a las temperaturas que se dan en los procesos industriales.

Dentro de los MCI distinguimos dos tipos según el ciclo termodinámico que desarrolla cada uno.

- Encendido por compresión (MEC) o ciclo Diesel: se alimentan con gasóleo y la explosión es producida debido a las altas presiones a las que se somete el combustible dentro de la cámara de combustión. Se tratan de motores de 4T equipados con turbocompresores e intercoolers.

Sus sistemas de refrigeración presentan una mayor complejidad frente a los de gasolina, y permiten obtener agua hasta 85°C. Los rendimientos que dan están entre el 35 y 50%, pudiendo desarrollar potencias de hasta 15 MWe.

Los inconvenientes que presentan estos motores son las altas producciones de NO_x y la presencia de partículas sólidas en los gases de escape, que dificultan la recuperación de la energía térmica contenida en éstos, a la par que aumentan los gastos en mantenimiento de los equipos [41].

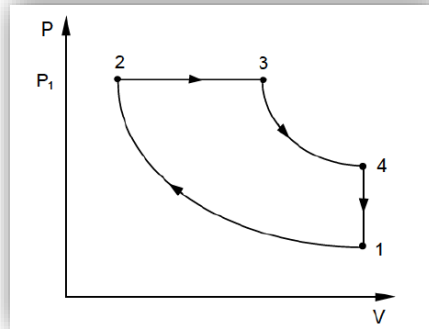
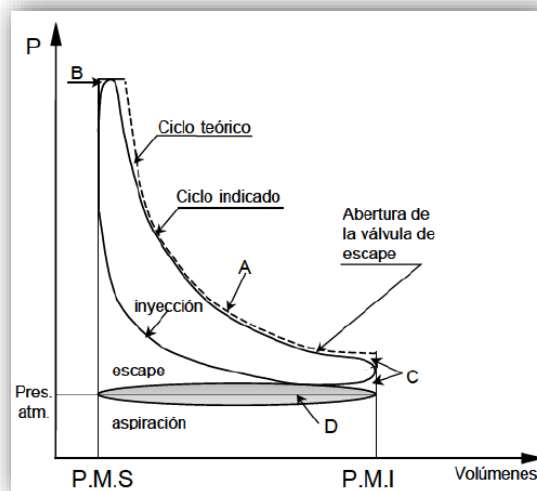


Figura 38: Esquema ciclo Diesel (MEC) [44].

- Encendido provocado (MEP) o ciclo OTTO: Son alimentado mediante gas natural y la combustión es producida por un chispazo de la bujía cuando el motor se encuentra en el punto muerto superior. Debido a la volatibilidad del combustible, su resistencia a la auto detonación es menor que la del gasóleo, con lo que la relación de compresión del motor ha de ser más baja para evitar que se denote la mezcla aire-combustible a lo largo de la carrera ascendente del motor, lo que provocaría el famoso picado. Debido a esta menor relación de compresión, su rendimiento disminuye frente al ciclo Diesel, estando acotado entre el 30-35%.

La potencia máxima que desarrollan (9 MW) también es menor, con lo que este tipo de motores será utilizado en plantas de cogeneración más pequeñas, utilizando para ello la energía del refrigerante y de los gases de escape.

Frente al Diesel, tiene la ventaja de tener unas emisiones más limpias que



Los combustibles utilizados en ambos ciclos pueden ser de diversos tipos (fueloil, carbón, biomasa...etc.) [41].

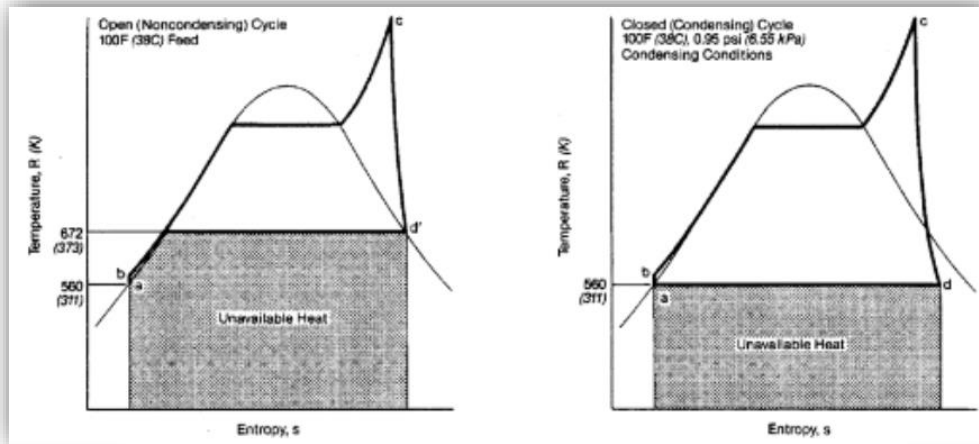


Figura 41: Diagramas T-s del ciclo Rankine por condensación y por contrapresión [45].

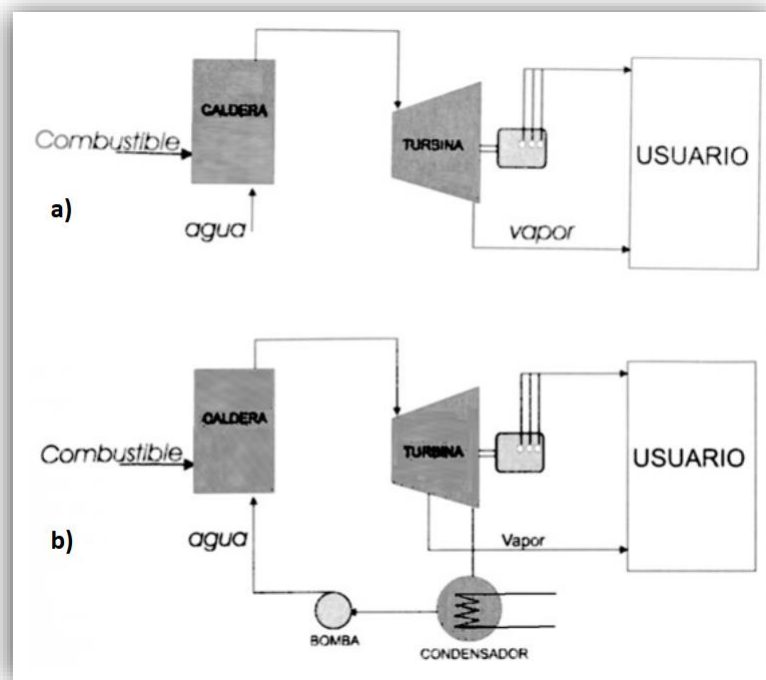


Figura 42: Comparativa ciclo Rankine a contrapresión con ciclo a condensación con extracción [46].

5.1.4.4 Ventajas e inconvenientes de la cogeneración.

Para analizar las ventajas que este sistema mixto ofrece frente a la producción separada de energía eléctrica y térmica, es necesario fijar el prisma desde el que se analizan estos beneficios e inconvenientes.

- Para un país: las ventajas e inconvenientes que puede causarle a un país se exponen a continuación.

VENTAJAS

- El ahorro de energía primaria gracias a la producción conjunta de calor y electricidad, además del aprovechamiento de calores residuales.
- Mayor diversidad energética, fomentada por el aprovechamiento de los calores residuales y el uso de combustibles derivados del proceso.
- Reducción de la contaminación como consecuencia del mejor aprovechamiento de la energía en la producción de electricidad al no disipar al ambiente grandes cantidades de calor, como si ocurre en las torres de refrigeración de las centrales térmicas.
- Ahorro económico al reducirse el consumo de energía primaria.

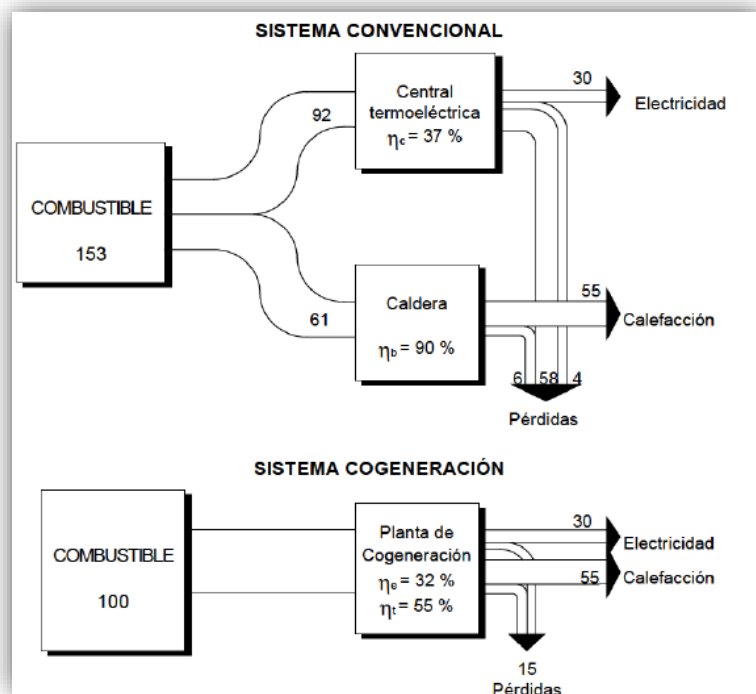


Figura 43: Ahorro de energía primaria debido al uso de la cogeneración [44]

INCONVENIENTES

- Es necesaria una fuerte normativa que regule las relaciones entre el cogenerador y la compañía eléctrica con el fin de evitar problemas entre ambos entes.

- Se requiere de una fuerte inversión en infraestructuras para el buen mantenimiento de las instalaciones.

- Para las compañías eléctricas

VENTAJAS

- Se incrementan la capacidad de garantizar el suministro eléctrico.
- Posibilidad de reducir la potencia de reserva, debido al incremento de las instalaciones generadoras, que descentralizan la producción.
- Se reducen los costes de producción, incrementando su competitividad frente a otras compañías.

INCONVENIENTES

- La conexión en paralelo de los equipos del cogenerador con la red de distribución puede crear problemas debido al intercambio de energía producido entre ellos, y como consecuencia de los posibles fallos de suministro de los equipos del auto generador.

- Para el usuario

VENTAJAS

- Ahorro en la factura, como consecuencia del menor coste de producción derivado de la reducción en el gasto de combustible.
- Mayor garantía en el suministro ante eventuales fallos en la red.

INCONVENIENTES

- Mayor contaminación local debido al acercamiento de la planta de cogeneración a los puntos de consumo, frente a la lejanía de las centrales eléctricas tradicionales.

▪ 5.1.4.5 Impacto medioambiental de las plantas de cogeneración.

Entendemos por impacto medioambiental las consecuencias de un proceso provocado por la acción humana, en el que se produce un intercambio de energía y recursos, favorables a los intereses del hombre en detrimento del resto de las especies.

Por orden de importancia, las consecuencias serían:

- Contaminación atmosférica: Debido a la combustión producida en las plantas de cogeneración se generan gases residuales como el CO₂, NO_x, CO, SO₂ y partículas en suspensión que son emitidas a la atmósfera.

La mayor parte de las instalaciones de este tipo funcionan con gas natural, el cual es considerado un combustible limpio, gracias a que no produce óxidos de azufre ni partículas sólidas en su combustión. Por lo tanto, el único producto al que hay que prestar atención son los NO_x. Los factores que pueden variar a la formación de estos óxidos son la temperatura de llama y la disponibilidad de oxígeno.

En las turbinas de vapor varían el diseño de la cámara de combustión, inyectan vapor o agua o tratan los humos en un catalizador con el objetivo de reducir estas emisiones.

En el caso de que la planta opere con un motor MEP alimentado por gas natural, se suele colocar un catalizador cuando el motor funciona con proporción estequiométrica, o bien hacerlo trabajar con exceso de aire.

En cualquiera de los casos, la contaminación es menor que en una planta sin cogeneración, debido al ahorro de energía primaria experimentado.

- Ruidos: Especialmente cuando se usan MCIA en vez de turbinas, ya que estos son más ruidos y producen mayores vibraciones. Se acepta un máximo de 70dB para los trabajadores del entorno (sin protección).
- Residuos: tales como lubricantes, cenizas y aguas residuales. Suelen tratarse de productos inocuos. Estos problemas se incrementan con el uso de combustibles sólidos [44].

CAPÍTULO 6.

ANÁLISIS EXERGÉTICO DE UNA RED DE CALOR POR BIOMASA.

6.1 ANÁLISIS EXERGÉTICO DE UNA RED DE CALOR

En el este capítulo vamos a realizar un análisis exergético a cada uno de los elementos que componen una red de calor. Para ello estudiaremos por separado dichos elementos en régimen estacionario obteniendo el rendimiento exergético de cada uno de ellos, así como la variación de ésta en función de ciertos parámetros (caudal, temperatura de humos, temperatura de agua, potencia producida...etc.).

▪ 6.1.1 Descripción de la red

Para modelar la red que vamos a analizar, se ha contado con la ayuda del Ayto. de Cuéllar (Segovia) el cuál ha puesto a nuestra disposición los datos necesarios para realizar dicho análisis. Partiendo de esta red, se han realizado algunas simplificaciones de cara a mostrar con mayor claridad como afectan las condiciones operativas de cada uno de los elementos básicos que componen dicha una red urbana de calor.

La red que ha sido modelada queda esquematizada en el siguiente diagrama.

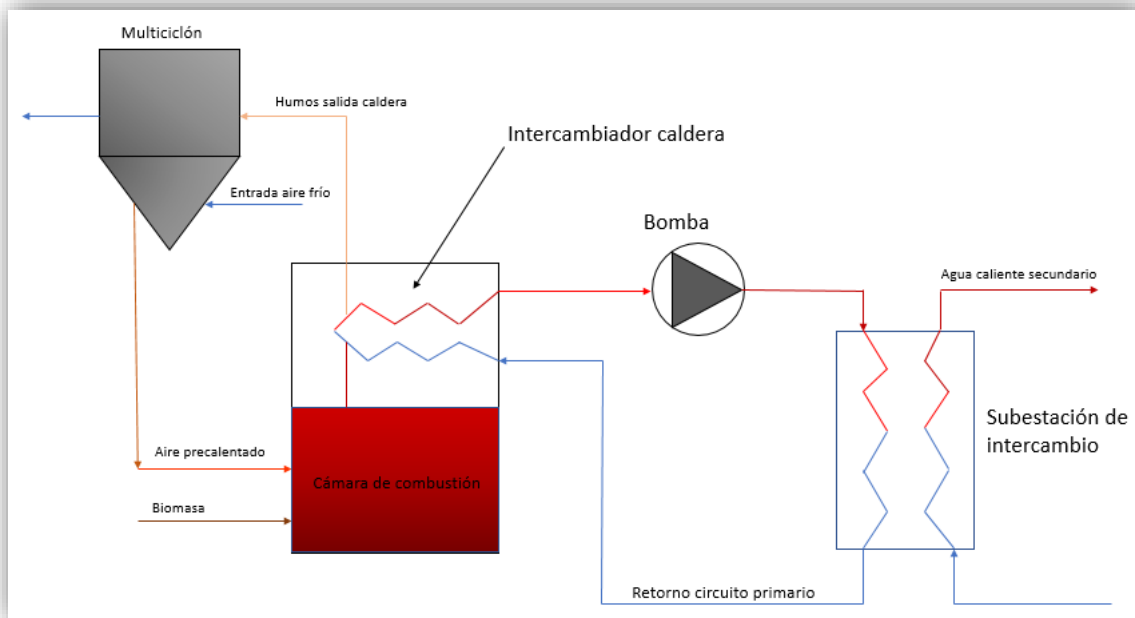


Figura 44: Esquema de la red urbana de climatización [Elaboración propia].

El equipo encargado de producir el agua caliente se trata de una caldera alimentada por biomasa capaz de generar hasta 5000 kW de potencia térmica. Para ello es alimentada con biomasa forestal en forma de astilla, junto con aire precalentado en un multiciclón, el cual aprovecha el calor residual de los humos para incrementar la temperatura del aire, dotándolo de mayor entalpía e incrementando la eficiencia térmica de todo el conjunto. Una vez el agua es calentada en el intercambiador de la caldera, es bombeada

por la red subterránea hasta la subestación de intercambio, donde cede su energía a través de un intercambiador de placas al circuito secundaria, encargado de abastecer a los usuarios de agua caliente.

▪ 6.1.2 Volúmenes de control, estado ambiente e idealizaciones

De cara a poder realizar un análisis exergético de la red, es necesario definir el volumen de control de cada elemento de estudio, así como el estado ambiente (exergía cero) y las idealizaciones que se han debido de tomar debido a la falta de información acerca de valores como pérdidas por convección, radiación o conducción en la caldera, inquemados, disipaciones de calor en la bomba...etc.

- Volumen de control: Para aplicar el método exergético a la red de calor es necesario dividir convenientemente la red en distintos volúmenes de control de forma que cada uno de ellos contenga a un elemento (cámara de combustión, intercambiador, multi-ciclón...etc).

La frontera del volumen de control puede ser tanto real como imaginaria. Se ha supuesto que no existe intercambio de calor entre los equipos y el ambiente, debido a la dificultad y a la falta de información acerca de dichas pérdidas.

- Estado ambiente: La exergía de un sistema es una propiedad inherente al ambiente donde éste se encuentra, de tal modo que la exergía que contenga una corriente de un fluido en unas condiciones P-T determinadas, varía en función de las condiciones de presión y temperatura en las que se encuentre dicha corriente.

Es común tomar como estado de referencia o ambiente las condiciones de 1 bar y 20 °C, sin embargo, dado que en la planta se recogía la temperatura ambiente a cada instante, se ha decidido tomar la temperatura en el exterior en cada instante como temperatura de referencia, la cual varía entre los 9 y los 15 °C a lo largo del día en el que se tomaron las mediciones. La presión ambiente es de 1 bar.

Aunque en un principio pudiese parecer que la temperatura ambiente no tiene tanta importancia como para tener que actualizar su valor en cada lectura de la caldera (en vez de tomar un valor medio fijo), lo cierto es que es tan importante como los otros parámetros medidos (temperatura de humos, aire de entrada, salto térmico del agua...); así pues una corriente de agua a 88 °C tiene un 36 % más de exergía cuando la temperatura ambiente es de 9 °C frente a cuando es de 20 °C (10.91 kJ/kg frente a 8.0244 kJ/kg), de forma que cuando lo multiplicamos por el gasto másico (muy alto en una red de estas dimensiones) para obtener los valores cuantitativos las diferencias en exergía por cada grado de diferencia en el ambiente no son para nada despreciables.

- Idealizaciones: los procesos de combustión, transmisión de calor, bombeo...que se dan lugar en una red de distrito son demasiado complejos, de forma que es necesario recurrir a ciertas idealizaciones y suposiciones que permitan crear un modelo termodinámico válido, que sea sencillo de modelar y que los resultados que se obtengan de dicho modelo sean lo suficientemente veraces.

Las idealizaciones hechas en este análisis son:

- Nos limitamos al estudio de la planta funcionando en estado estacionario, evitando así problemas de carácter dinámico.
- Se desprecian los efectos de la energía potencial y cinética de las corrientes fluidas, ya que las transformaciones de este tipo de energía que experimenta los flujos de agua en los distintos elementos de la red son insignificantes frente a las variaciones de entalpía totales, producidas en su mayor parte por los saltos térmicos.
- Se consideran que todos los elementos de la red operan adiabáticamente, limitando el único intercambio de energía con el exterior al experimentado al expulsar el calor residual contenido en los humos por la chimenea.
- El fluido que circula por la red es agua líquida que se comporta como fluido incompresible. El aire y los humos se consideran que se comportan como gas ideal.
- Los calores específicos del aire, el agua y los humos se mantienen constantes con la temperatura.
- El rendimiento isoentrópico de la bomba circuladora no varía con la altura que desarrolla en cada momento.
- El valor de la exergía del combustible es el equivalente a su poder calorífico superior.
- El rendimiento de la caldera y el índice de exceso de aire son valores constantes e independientes de la potencia que desarrolle la caldera en cada instante.

- **6.1.3 Análisis con el Primer Principio de la Termodinámica.**

Antes de realizar los balances exergéticos a cada equipo, se ha precisado la aplicación del primer principio de la termodinámica para conocer la energía liberada en el proceso de combustión en la caldera, el caudal de humos, la temperatura de los humos antes de la cesión del paso por el intercambiador de calor, el calor intercambiado en la subestación y en el multiciclón, y el trabajo consumido por la bomba.

Las ecuaciones utilizadas han sido los balances de masa y energía para un sistema estacionario. Debido a las idealizaciones que hemos tomado, los valores de la energía cinética y potencial son despreciados.

$$\sum \dot{m}_e = \sum \dot{m}_s$$

Ecuación 6.1

$$0 = \dot{Q}_{vc} - \dot{W}_{vc} + \sum \dot{m}_e \cdot \left(h_e + \frac{1}{2} \cdot V_e^2 + gz_e \right) - \sum \dot{m}_s \cdot \left(h_s + \frac{1}{2} \cdot V_s^2 + gz_s \right)$$

Ecuación 6.2

- **6.1.4 Análisis exergético**

Aplicando el análisis exergético conocemos la exergía destruida en cada elemento de la instalación, de tal forma que sea posible conocer en qué punto de la instalación, y bajo qué condiciones, la energía sufre su mayor degradación, y poder actuar en consecuencia.

La ecuación utilizada es la correspondiente a un balance de exergía a un volumen de control de un proceso estacionario.

$$0 = \sum_j \int \left(1 - \frac{T_0}{T_j} \right) \cdot d' \dot{Q}_j - \dot{W} + \sum_e (\dot{m}_e \cdot \dot{e}_e) - \sum_s (\dot{m}_s \cdot \dot{e}_s) - \dot{E}_d$$

Ecuación 3.8

$$0 = \dot{E}_Q - \dot{W} + \sum_e (\dot{m}_e \cdot \dot{e}_e) - \sum_s (\dot{m}_s \cdot \dot{e}_s) - \dot{E}_d$$

Ecuación 3.9

Para resolver la integral de la transferencia de exergía asociada a un flujo de calor (exceptuando la bomba, todas las transferencias en la red ocurren debido a dichos flujos), debemos expresar la integral de la siguiente manera:

$$dQ = Cp \cdot dT$$

Ecuación 6.3

$$\int_1^2 \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) \cdot dQ = \int_1^2 m \cdot Cp \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) dT$$

Ecuación 6.4

Desarrollando la integral obtenemos:

$$Eq = m \cdot Cp \cdot ((T_2 - T_1) - T_0 \cdot \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right))$$

Ecuación 6.5

Para calcular la exergía de cada flujo (kJ/kg) utilizamos la siguiente expresión:

$$e = (h - h_0) - T_0(s - s_0)$$

Ecuación 6.6

Donde el valor de la exergía para el fluido incompresible es:

$$e = c(T - T_0) + v \cdot (P - P_0) - T_0 c \ln\left(\frac{T}{T_0}\right)$$

Ecuación 6.7

donde T_0 , varía entre los 9 y los 15 Celsius según el momento del día como dijimos anteriormente.

Para el gas ideal (humos o aire) la expresión de la exergía de flujo es:

$$e = m \cdot Cp \cdot \left((T - T_0) - T_0 \cdot \ln\left(\frac{T}{T_0}\right) \right) + mRm \ln\left(\frac{P}{P_0}\right)$$

Ecuación 6.8

Conviene recordar que las condiciones del estado de entalpía cero para el agua (T_0 (en kelvin) y P_0) difieren de las de exergía cero (T_0 y P_0), de forma que una corriente de agua cuya entalpía es 0 kJ/kg si posee cierta cantidad de exergía.

▪ 6.1.5 Rendimiento exergetico

Cuando obtenemos los términos de exergía destruida en los distintos equipos, estamos obteniendo un valor cuantitativo del comportamiento exergetico de ese proceso, el cual está influenciado lógicamente por el gasto másico, el cual no es constante a lo largo de las mediciones debidos a las variaciones en la demanda de agua caliente que se producen a lo largo del día. Por lo tanto, el valor de la exergía destruida no es válido a la hora de comparar el proceso entre distintas condiciones operativas.

Se precisa el uso de un término que nos permita comparar la calidad (desde el punto de vista exergetico) del proceso cuando este varía las condiciones de funcionamiento.

El término “eficiencia exergetica, o rendimiento exergetico” es el término utilizado para expresar el nivel de degradación que experimenta la energía al ser transformada en un proceso. A diferencia de la eficiencia energética, la cual cuantifica los flujos de energía sin hacer referencia a la calidad de esta, la exergía si nos informa acerca de la calidad de los flujos de energía con los que estamos trabajando, además el rendimiento exergetico siempre está acotado a uno a diferencia de la eficiencia energética que dependiendo del tipo de instalación puede tener valores máximos menores que uno (como en los motores térmicos), iguales a uno o mayores que uno (bomba de calor).

Una forma de definir el rendimiento exergetico es el cociente entre la exergía del producto (efecto útil) entre la del recurso (gasto):

$$\varepsilon = \frac{\dot{E}_p}{\dot{E}_r}$$

Ecuación 6.9

Es importante aclarar que la exergía del recurso no es necesariamente toda la exergía que entra en el VC, del mismo modo que la del producto no es toda la que sale. Por ejemplo, para una bomba que trabajase con el mismo rendimiento isoentrópico, si cuantificásemos como E_r y E_p las exergías totales de entrada y salida, obtendríamos diferentes valores del rendimiento exergetico si el fluido bombeado es agua o gasolina, ya que no estaríamos cancelando la exergía química de cada fluido (lógicamente mayor en la gasolina). Una forma alternativa más adecuada de expresar el rendimiento exergetico es como el cociente entre la exergía neta útil y la exergía neta gastada, de modo que para cada elemento de la instalación estudiado se requiere identificar cada una de ellas.

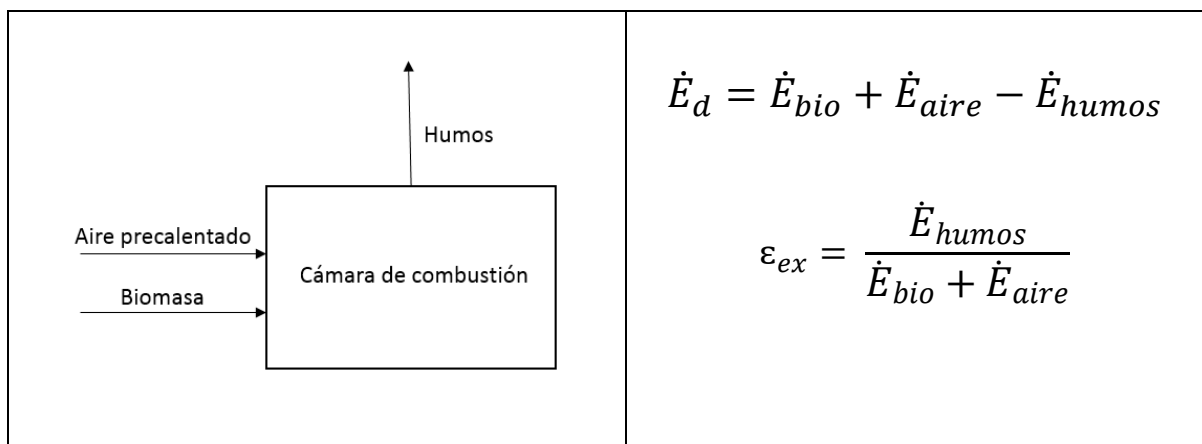
Para cada componente de la red que hemos modelado para nuestro estudio se define el término de rendimiento exergetico, a continuación, comentaremos como calcularlo en cada caso.

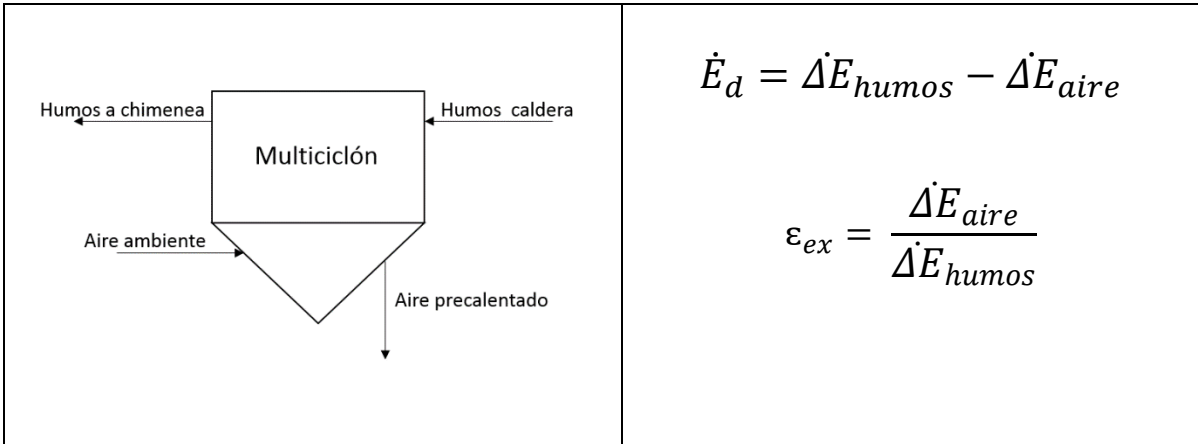
La caldera está dividida en dos volúmenes de control, uno para la cámara de combustión y otro para el intercambiador de calor agua-humos. Sus eficiencias exergeticas son:

- Cámara de combustión: la ε_{ex} es el cociente entre la exergía de los humos y la suma de las exergías entrantes (aire precalentado y biomasa). La exergía de la biomasa la aproximamos a su exergía química mediante el valor de su poder calorífico.
- Intercambiador caldera: la ε_{ex} se define como la exergía absorbida por el agua entre la cedida por los humos. Para ello contamos con la medición del salto térmico del agua y de la temperatura de humos a la salida de la caldera. Para conocer dicha temperatura antes de la cesión de calor realizamos un balance energético.

La eficiencia del resto de elementos que componen la red se define a continuación

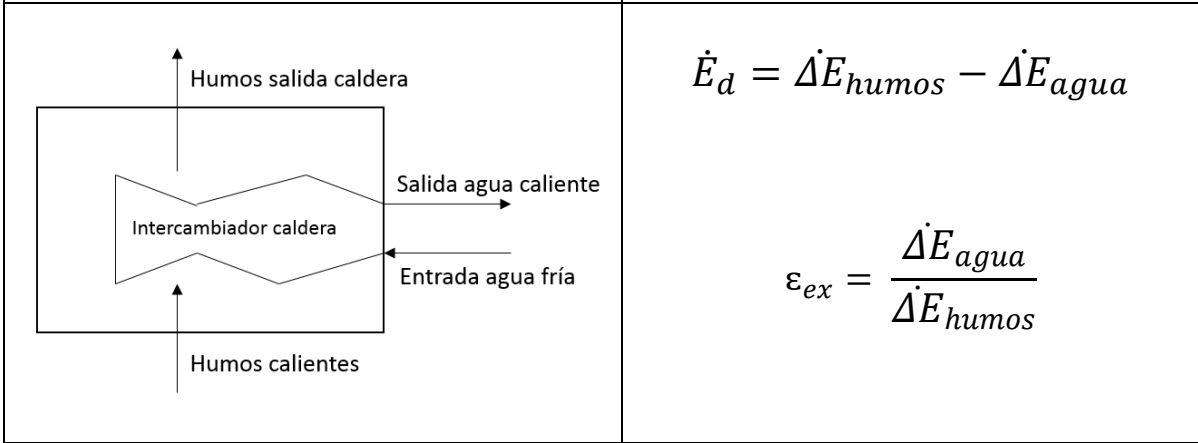
- Multi-ciclón: Su ε_{ex} equivale a la exergía absorbida por el aire precalentado entre la exergía cedida por los humos. Para ello se dispone de dos sondas, una a la salida de la caldera y otra en la chimenea, de forma que podamos saber el salto térmico de los humos en el multi-ciclón. También se dispone de una tercera sonda para mediar la temperatura del aire precalentado.
- Bomba: la exergía absorbida por el agua en la bomba entre el trabajo que ésta ha transmitido al fluido nos da su ε_{ex} . El trabajo desarrollado por la bomba lo calculamos haciendo un balance energético a su VC con el primer principio.
- Subestación de intercambio: En este caso, el cociente entre la exergía absorbida y cedida por cada una de las corrientes de agua nos dará la ε_{ex} . Para calcular cada una de estas exergías se ha tenido en cuenta una pérdida de presión para cada corriente a lo largo del intercambiador de 25 kPa.





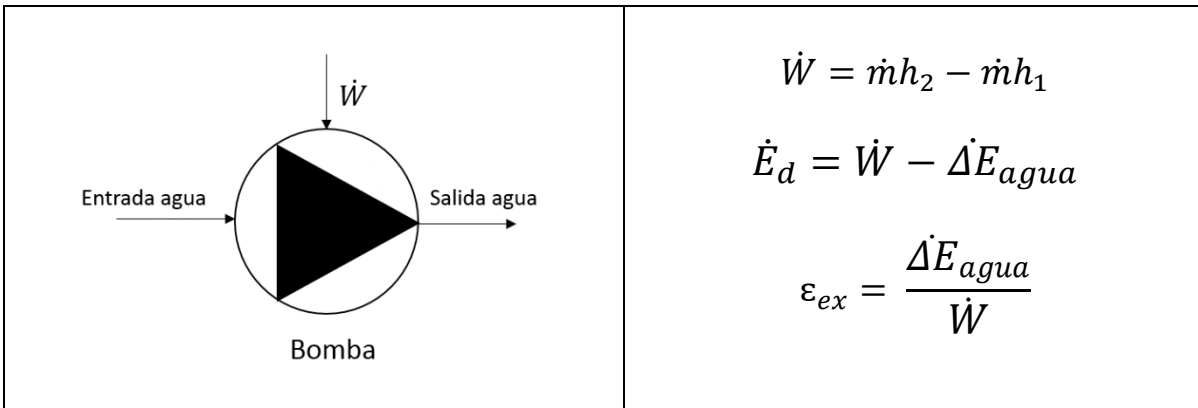
$$\dot{E}_d = \Delta \dot{E}_{humos} - \Delta \dot{E}_{aire}$$

$$\varepsilon_{ex} = \frac{\Delta \dot{E}_{aire}}{\Delta \dot{E}_{humos}}$$



$$\dot{E}_d = \Delta \dot{E}_{humos} - \Delta \dot{E}_{agua}$$

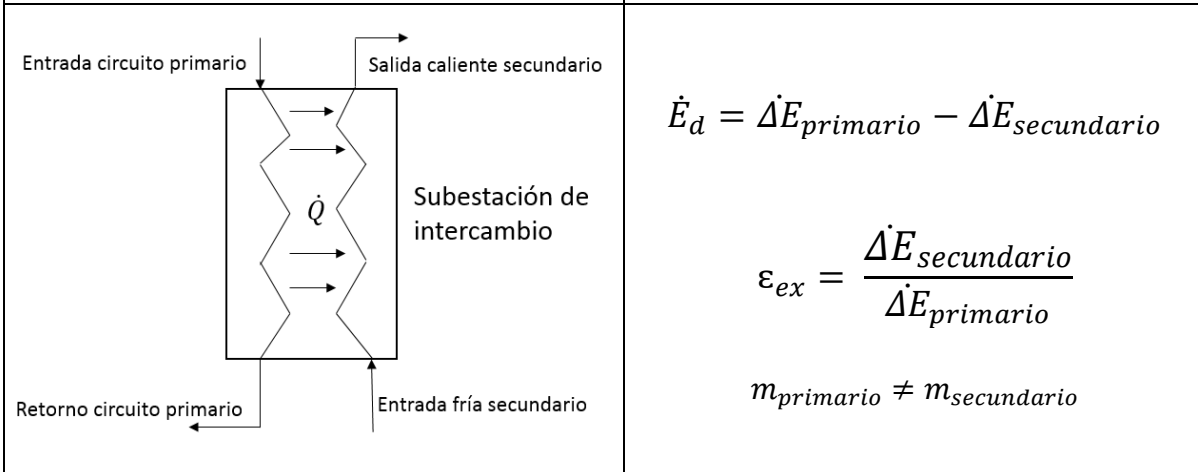
$$\varepsilon_{ex} = \frac{\Delta \dot{E}_{agua}}{\Delta \dot{E}_{humos}}$$



$$\dot{W} = \dot{m}h_2 - \dot{m}h_1$$

$$\dot{E}_d = \dot{W} - \Delta \dot{E}_{agua}$$

$$\varepsilon_{ex} = \frac{\Delta \dot{E}_{agua}}{\dot{W}}$$



$$\dot{E}_d = \Delta \dot{E}_{primario} - \Delta \dot{E}_{secundario}$$

$$\varepsilon_{ex} = \frac{\Delta \dot{E}_{secundario}}{\Delta \dot{E}_{primario}}$$

$$m_{primario} \neq m_{secundario}$$

Otro parámetro comparativo entre los distintos elementos de la red es el ratio de destrucción de exergía, el cual compara la exergía destruida en un elemento, con el total de aporte de exergía realizado sobre el sistema.

$$Y_{E_d} = \frac{\dot{E}_{d_j}}{\dot{E}_s}$$

Ecuación 6.10

En su defecto, el denominador puede ser sustituido por la exergía destruida en todo el ciclo, lo que equivalente a restarle el valor de la exergía residual al término \dot{E}_s .

$$v_{E_d} = \frac{\dot{E}_{d_j}}{\dot{E}_{d_s}}$$

Ecuación 6.11

6.2 PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

Los resultados obtenidos serán tabulados, y se presentarán mediante gráficos para facilitar su interpretación. El análisis de los datos ha servido para sacar conclusiones tanto a nivel local de cada elemento, como global de la instalación.

Por una parte, hemos podido conocer cómo afectan las condiciones de operación de la caldera al rendimiento exergético de cada elemento, analizando esta eficiencia en función de la temperatura de humos, salto térmico del agua, potencia suministrada...etc.

Una vez analizado cada elemento según sus condiciones de funcionamiento, hemos analizado la red de calor en su conjunto para unas condiciones concretas. En este caso ha sido para cuando la caldera está suministrando 2000 kW de potencia calorífica, ya que es una cifra cercana a la demanda modal.

Al analizar la caldera en su totalidad, podemos comparar la destrucción de exergía en cada elemento, y localizar los puntos de la red donde habría que focalizar los esfuerzos si queremos disminuir de forma sensible esta destrucción de exergía, aumentando de esta forma el rendimiento exergético global de la red.

- **6.2.1 Balance exergético a los elementos de la red**

Como se comentaba anteriormente, se ha realizado un balance exergético a cada uno de los elementos que conforman nuestra red de calor, de forma que podamos analizar la variación de su rendimiento exergético con en función de distintos parámetros (potencia, temperatura de humos, salto térmico...etc)

Debido a la ausencia de ciertos datos de la red (consumo de biomasa, exceso de aire en la combustión, rendimiento) ha sido necesario realizar ciertas suposiciones para poder completar todos los cálculos, los cuales se mostrarán en el anexo final.

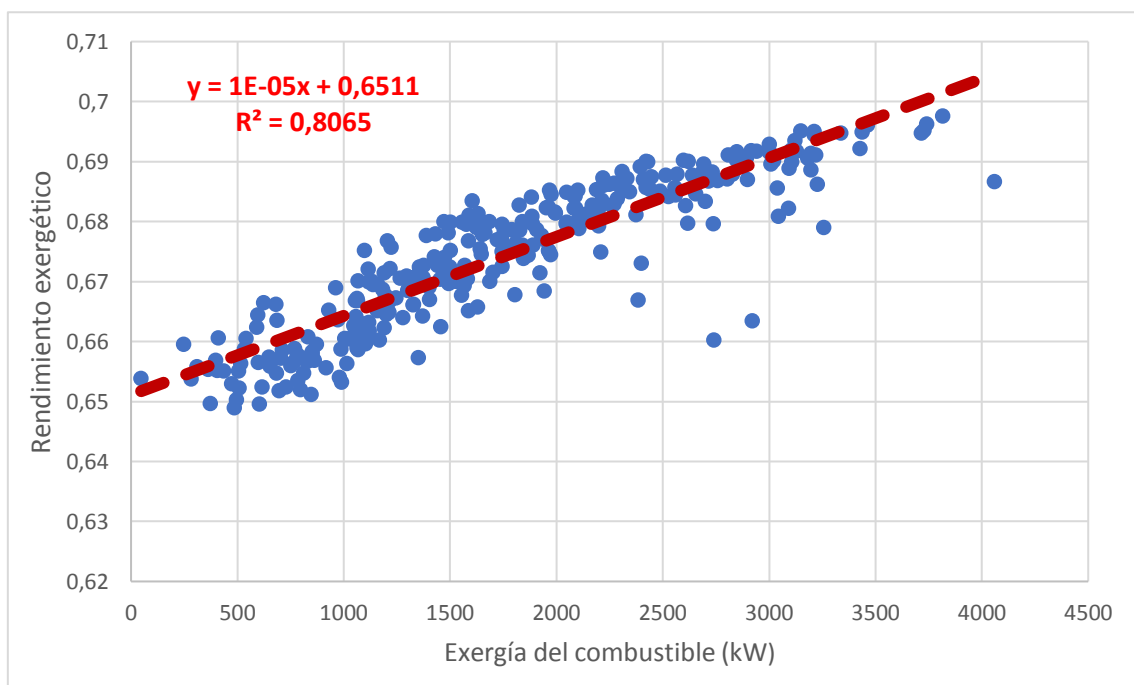
Para analizar cada uno de los elementos se han ido definiendo los volúmenes de control mostrados en la tabla anterior, operando todos ellos en régimen estacionario.

▪ 6.2.1.2 Balance exergético a la cámara de combustión.

En este volumen de control (VC) contamos con dos entradas (aire, biomasa) y una salida (humos). Para poder realizar este balance, era necesario conocer los flujos másicos de la biomasa y el aire (el de humos es la suma de los dos, por la Ley de conservación de la masa), la temperatura del aire a la entrada (medida con una sonda) y la temperatura de los humos después de la combustión.

En los anexos posteriores se mostrarán qué cálculos han sido necesarios para obtener los valores que no son medidos directamente en la red mediante sondas, y qué idealizaciones se han supuesto para poder llevarlos a cabo.

En las siguientes gráficas podemos observar la variación del rendimiento exergético en función de la potencia otorgada por la caldera, y en función de la temperatura de humos en la cámara de combustión. Como no podía ser de otra forma, ambas siguen la misma tendencia (la eficiencia es directamente proporcional a la



potencia/temperatura humos), ya que el incremento de la temperatura de humos es inherente al aumento de la potencia.

Figura 45: Variación del rendimiento exergético de la combustión adiabática en la caldera en función de la exergía del combustible consumido.

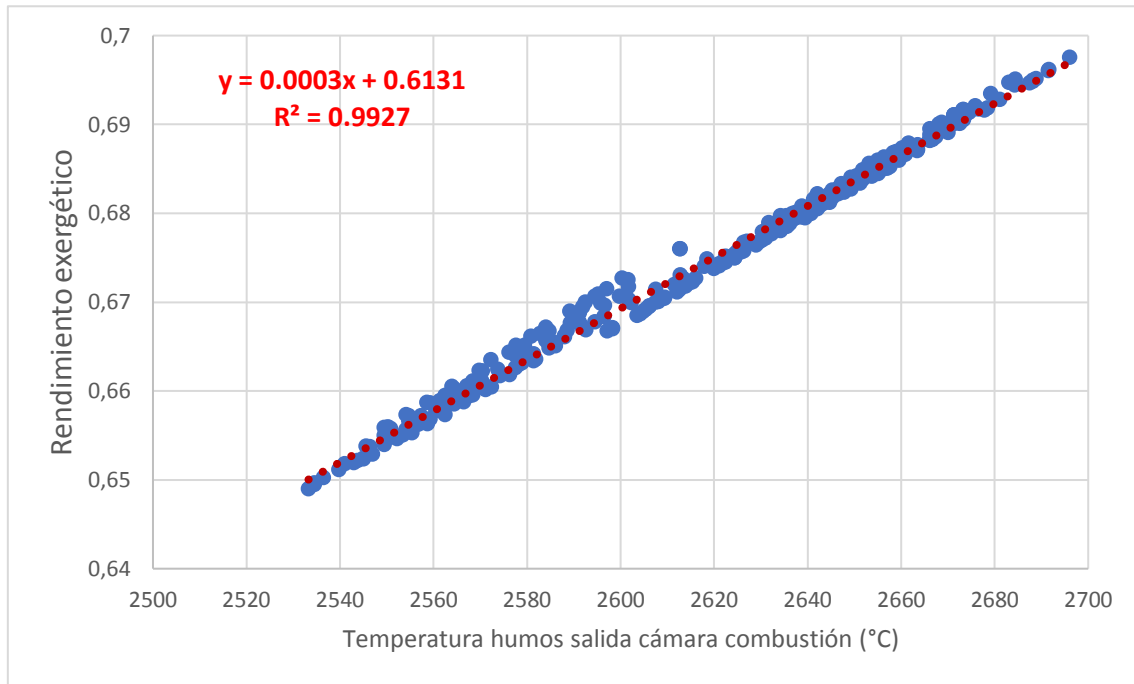


Figura 46: Variación del rendimiento exergético de la combustión adiabática en la caldera en función de la temperatura de los humos producidos.

En ambas gráficas se observa una correlación muy fuerte entre la eficiencia y los parámetros de estudio, especialmente cuando se analiza dicha eficiencia en función de la temperatura de humos en la cámara de combustión, donde la nube de puntos prácticamente forma una recta exacta.

Este incremento del rendimiento exergético se debe a que el aumento de la exergía de los humos a medida que aumenta la potencia es mucho más pronunciado que el de la destrucción de exergía (la cual lógicamente también aumenta debido al mayor consumo de biomasa)

En la siguiente gráfica podemos comparar las pendientes de estos dos parámetros, donde la correlación de la nube de puntos es muy próxima a 1.

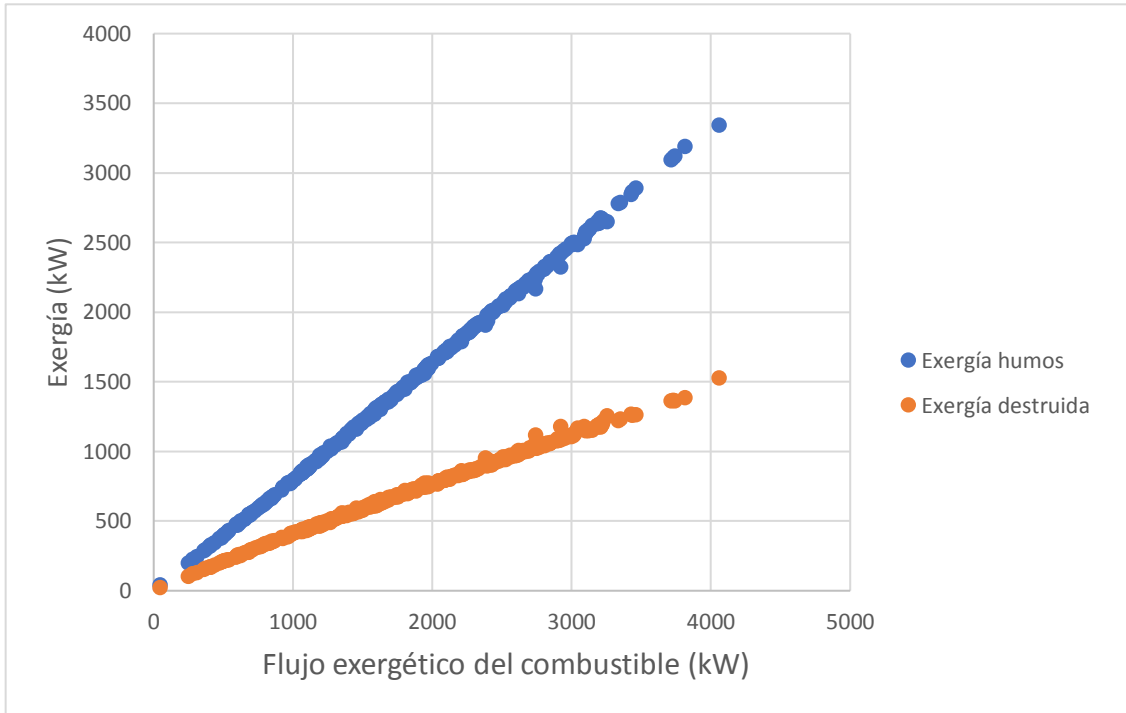


Figura 47: Comparativa entre la exergía de los humos y la exergía destruida en función del flujo exergético del combustible.

6.2.1.3 Balance exergético al intercambiador de calor de la caldera.

El volumen de control tomado para este análisis (esquemático anteriormente en la tabla) consta de dos entradas (humos, agua fría) y dos salidas (humos de salida de caldera y chimenea).

De los datos necesitados (temperaturas entrada-salida de humos y agua), solo la temperatura a la entrada del intercambiador no es medida a través de sondas en la propia red, los otros 3 valores son registrados en el ordenador de Cuéllar cada dos minutos. Conociendo los valores de la temperatura del agua, y la temperatura de los humos a la salida de la caldera, solo es necesario realizar un balance energético (ver anexos), suponiendo un intercambiador adiabático que no disipa calor al exterior (idealización). Una vez obtenidos todos los valores necesarios, calculamos la variación de la exergía para ambas en corrientes tanto en la entrada como en la salida para poder conocer el rendimiento exergético del intercambiador.

Se ha analizado la variación del rendimiento exergético en función de la potencia demandada por los consumidores (flujo de calor cedido al agua del secundario), y pese a que las correlaciones obtenidas no son muy fuertes, se observa una tendencia a disminuir la eficiencia del intercambiador a medida que la potencia se incrementa.

En el siguiente gráfico podemos ver dicha tendencia

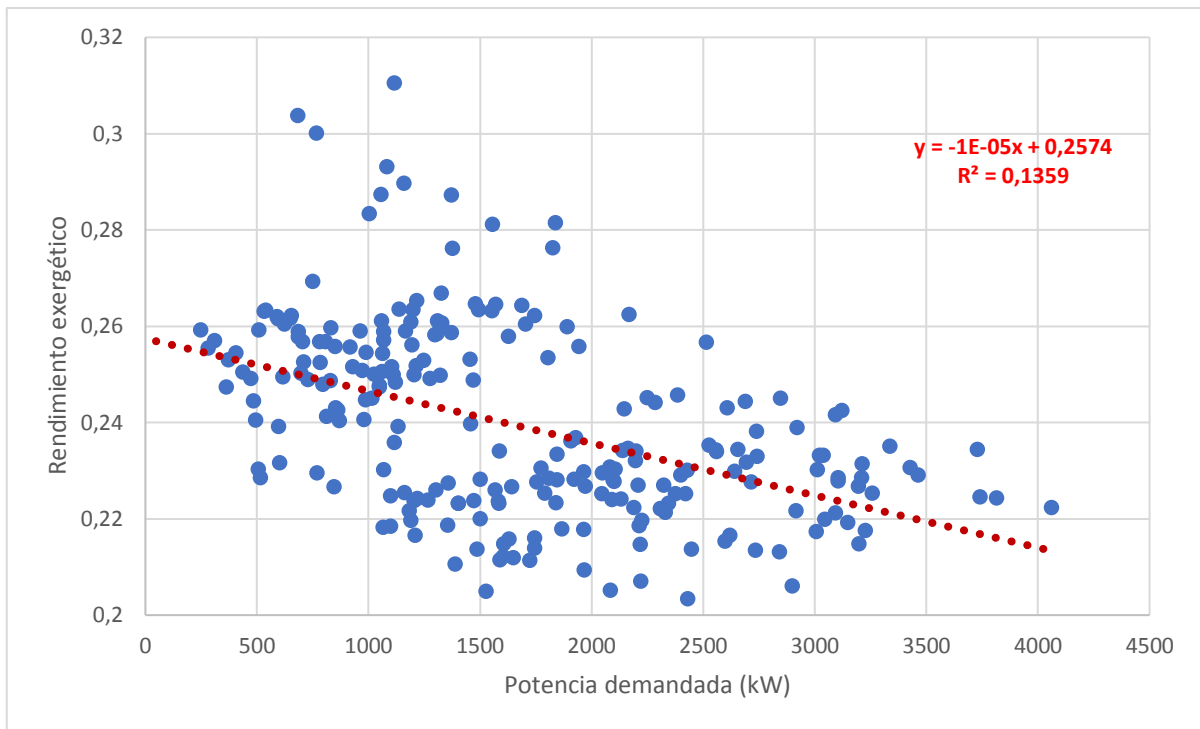


Figura 48 Variación del rendimiento exergético del intercambiador de calor en función de la potencia demandada.

En esta gráfica podemos observar dos cosas, la primera es el bajo rendimiento exergético del intercambiador de calor de la caldera para cualquier potencia y, además, se hace aún más pequeña a medida que aumenta la potencia demandada (y con ello el salto de humos).

Vayamos con la primera: Si por ejemplo, nosotros queremos transferir una potencia térmica al agua, podemos hacerlo elevando la temperatura 10 grados de un flujo másico de 20kg/s, o realizando un salto térmico de 20 grados para un flujo de 10 kg/s. En ambos casos la potencia transferida es la misma (836 kW), sin embargo, la ganancia de exergía será mayor en el segundo caso, ya que para una misma potencia, el incremento de exergía se ve favorecido cuanto más alto sea el aumento de temperatura (en detrimento del flujo másico) debido a la variación del término $\ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right)$ frente al del flujo másico.

Como en nuestra caldera, la transferencia de potencia calorífica se realiza desde un fluido con muy poco flujo másico y gran salto térmico, frente a una corriente de agua de gran caudal y una variación térmica 200 veces más pequeña; la exergía cedida por los humos es muchísimo más grande que la absorbida por el agua, dando lugar a una gran destrucción de exergía, y al consecuente disminución del rendimiento exergético.

La segunda observación (la disminución del rendimiento con la potencia) se justifica en que para un flujo másico concreto que sufre un salto térmico, la variación de exergía será mayor cuanto mayor sean las temperaturas que dan lugar a dicho salto.

Es decir, requiere la misma potencia calentar 10 kg/s de agua de 30°C a 50 °C, que calentarla desde los 50°C hasta los 70 °C, sin embargo la ganancia de exergía (o cesión, en el proceso inverso, el enfriamiento) será mayor en el segundo caso debido a que el término $\ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right)$ se aproxima a cada vez más a cero debido a que el cociente T_2/T_1 cada vez está más próximo a 1.

Volviendo a nuestro caso particular, en la siguiente gráfica podemos ver como para un salto térmico constante de 2400 °C para cualquier potencia, la exergía cedida por los humos crece cuanto mayores son las temperaturas entre las que se da lugar dicho salto. Para que los distintos valores de caudal de humos no falseen la gráfica, los resultados se presentan en exergía específica (kJ/kg)

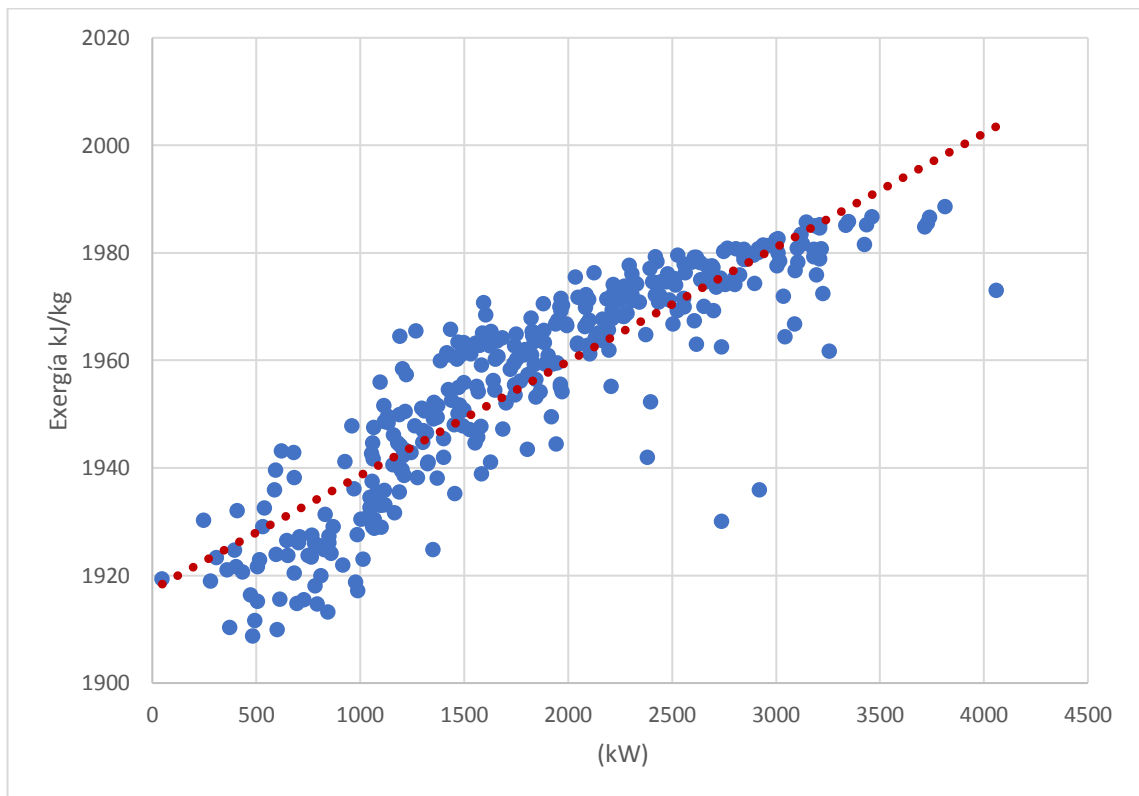


Figura 49: Variación de la exergía específica cedida por los humos en el intercambiador de calor de la caldera en función del flujo exergético del combustible.

Como el aumento de la exergía cedida por los humos a medida que aumentan su temperatura (es decir, cuando aumenta la potencia), no se refleja en la misma medida en un aumento de la exergía absorbida por el agua, de forma que el rendimiento exergético se hace aún más pequeña.

6.2.1.4 Balance exergético al multiciclón.

El siguiente elemento analizado de nuestra red ha sido el multi-ciclón, el cual se utiliza para recuperar el calor residual de los humos antes de que estos salgan por la chimenea al ambiente. De esta forma conseguimos precalentar el aire antes de entrar en la cámara de combustión, dotándole de una mayor entalpía y exergía, de forma que el consumo de biomasa se ve reducido, con el consecuente ahorro económico.

El volumen de control consta de dos entradas (humos procedentes del IC, aire ambiente) y dos salidas (humos a chimenea, aire precalentado) las cuales se disponen de forma que las corrientes formen un flujo cruzado, aumentando así la eficacia del intercambio de calor.

Debido a que en el multi-ciclón disponíamos de las mediciones de temperatura de ambas corrientes tanto a la entrada como a la salida, no ha sido necesario realizar la idealización de que sea adiabático el multiciclón.

Los resultados obtenidos del balance exergético al multi-ciclón quedan reflejados en la siguiente gráfica

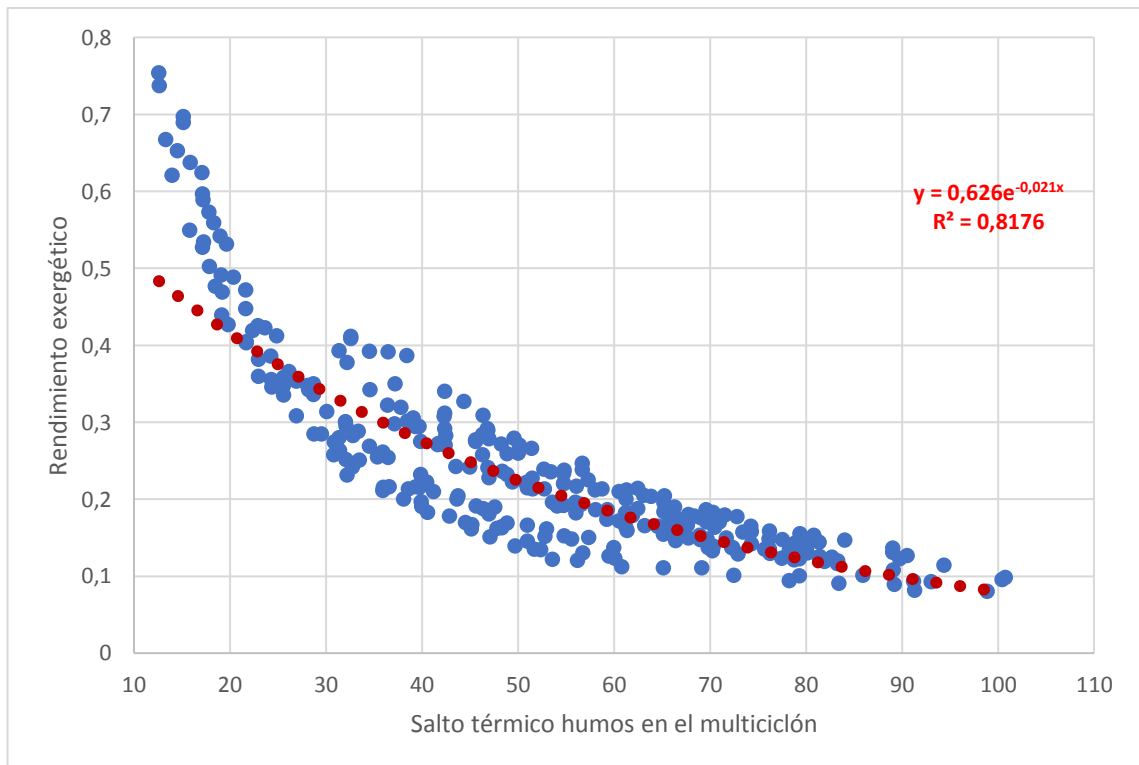


Figura 50: Rendimiento exergético multiciclón en función del salto térmico de los humos.

Cuando el salto térmico de los humos no es muy elevado el rendimiento exergético presenta valores más altos que para el intercambiador de la caldera, esto es debido a que la transferencia de potencia calorífica al aire se realiza desde una corriente de

humos de menor temperatura que cuando el salto térmico es más alto, de forma que la exergía residual que contienen esos humos ya es de por sí muy baja, de forma que la destrucción de exergía es mucho menor que cuando esa cesión de calor al aire se realiza desde temperaturas mucho más altas, siendo así el rendimiento exergético más alto. Además, hay que tener en cuenta que cuanto más baja sea la temperatura de entrada de los humos, menor serán las pérdidas de calor disipadas al exterior, las cuáles son exergía 100% destruida.

A medida que incrementa el salto térmico de los humos, la eficiencia disminuye, esto es a consecuencia de que como el multi-ciclón no es adiabático, las pérdidas al exterior se incrementan a medida que los humos entran con más temperatura. En la siguiente gráfica se puede ver que el salto térmico del aire se mantiene más o menos constante a medida que el de los humos crece, eso es debido a que parte del calor está disipándose al exterior y no se transfiere en su totalidad al aire que pasa por dentro del multi-ciclón, de forma que ese flujo de calor da lugar a una destrucción de exergía bastante sensible que hace disminuir la eficiencia del multi-ciclón cuando los humos entran más calientes.

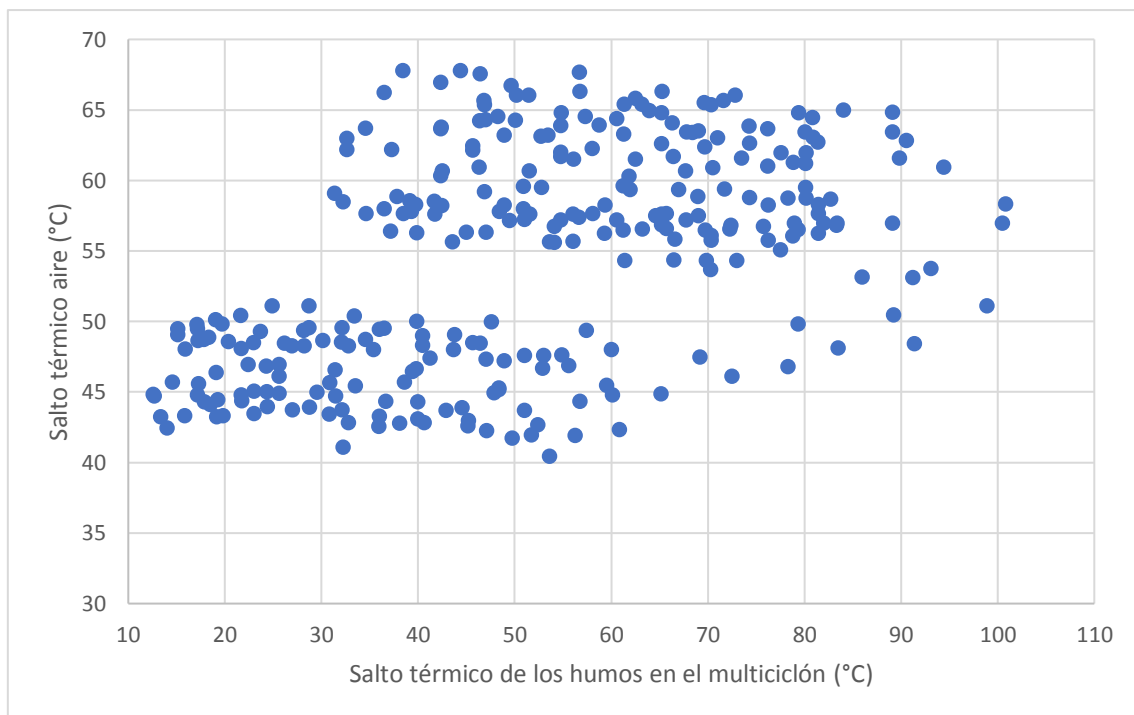


Figura 51: Variación temperatura aire en función de la de humos (multiciclón).

▪ 6.2.1.5 Balance exergético a la bomba.

A continuación, comentaremos los resultados obtenidos del análisis realizado a la bomba circuladora, la cual se encarga de transportar el agua desde la caldera hasta la subestación de intercambio. Al tratarse de un circuito cerrado, la bomba no tendrá que vencer ninguna altura, únicamente las pérdidas por fricción producidas en la tubería de 16 cm de diámetro a lo largo de una longitud equivalente de 1700 metros, las cuales pueden ser consultadas en los anexos finales.

El volumen de control es muy simple, solo cuenta con una entrada y una salida, trabajando en régimen estacionario.

Debido a la ausencia de información acerca de la bomba, hemos tenido que suponer que ésta opera de forma adiabática. Para el rendimiento isoentrópico se han tomado distintos valores, acotados entre 0.7 y 0.9, los cuales no varían en función de la potencia desarrollada por la bomba.

Como el rendimiento isoentrópico mide las irreversibilidades en la bomba debido a las fricciones del fluido con los álabes, está íntimamente ligado al rendimiento exergético de la bomba, ya que, sin irreversibilidades la exergía destruida sería nula.

Como puede verse en la gráfica inferior, el valor del rendimiento exergético es ligeramente superior al rendimiento isoentrópico y ambos se aproximan más a valores más altos, además no varía con la potencia, ya que en nuestra bomba el rendimiento isoentrópico η_{iso} tampoco lo hace (idealización).

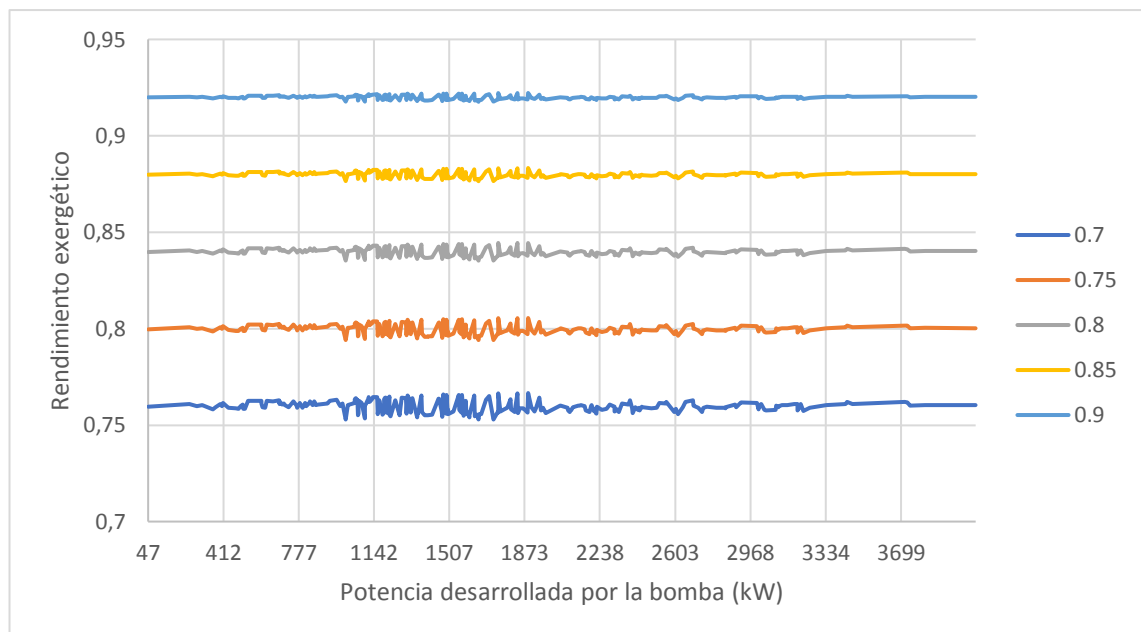


Figura 52: Rendimiento exergético bomba según η isoentrópico.

▪ 6.2.1.6 Balance exergético a la subestación de intercambio.

El último elemento analizado de la red es el intercambiador de calor situado en el edificio donde habitan los consumidores del agua caliente. El volumen de control abarca un intercambiador de calor a contracorriente con dos entradas y dos salidas, de forma que el calor es transmitido desde la red troncal al circuito cerrado del edificio a través de las placas del intercambiador.

La exergía destruida en el intercambiador será la diferencia entre la cedida por la red principal y la absorbida por el circuito cerrado del edificio, las cuales dependerán del caudal, el salto térmico y las temperaturas en las que tiene lugar dicho salto.

De la red troncal conocemos el caudal y el salto térmico en cada instante, sin embargo, no ha sido posible acceder a la información del circuito cerrado del edificio, con lo que ha sido necesario suponer unos valores típicos de caudal y temperatura, y a partir de ellos, ver como varía el rendimiento exergético según la variación de alguno de estos parámetros.

Suponiendo un caudal y temperatura de entrada al intercambiador del circuito cerrado del edificio, y disponiendo de los datos de la red troncal, podemos calcular la temperatura de salida de la subestación haciendo un balance energético, aunque es necesario suponer que el intercambiador se comporta como un elemento adiabático que funciona en régimen estacionario.

Para unos valores típicos de caudal y temperatura del circuito cerrado del edificio ($Q=40$ L/s, Temperatura entrada subestación (retorno) = 55°C), podemos obtener la variación de rendimiento exergético en función del salto térmico de esta corriente, lo cual equiparable a la variación del rendimiento exergético en función de la potencia calorífica.

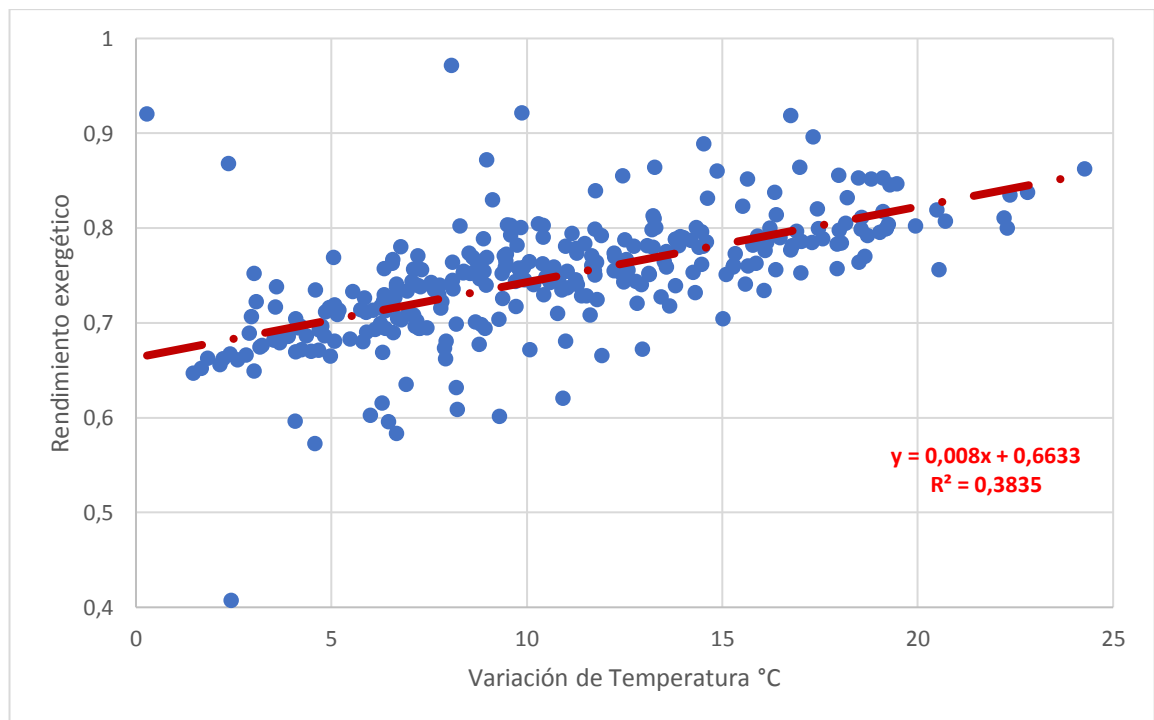


Figura 53: Rendimiento exergético subestación según la variación de temperatura del agua fría.

Podemos observar que el rendimiento aumenta a medida que crece el salto térmico de la corriente fría, esto es debido a que la destrucción de exergía en una transmisión de calor se reduce cuanto menor es la diferencia de temperatura entre el foco emisor y receptor. Al incrementar el salto térmico, la temperatura media durante el proceso de la corriente fría aumenta, en detrimento de la temperatura de la corriente caliente, que se ve reducida.

Asimismo, cabría esperar que si se incrementase la temperatura de entrada de la corriente fría, las temperaturas medias de las corrientes durante el intercambio se acercarian aún más, incrementado el rendimiento exergético del intercambiador. Hemos realizado el mismo análisis para distintas temperaturas de entrada, y efectivamente los resultados van acordes con lo esperado.

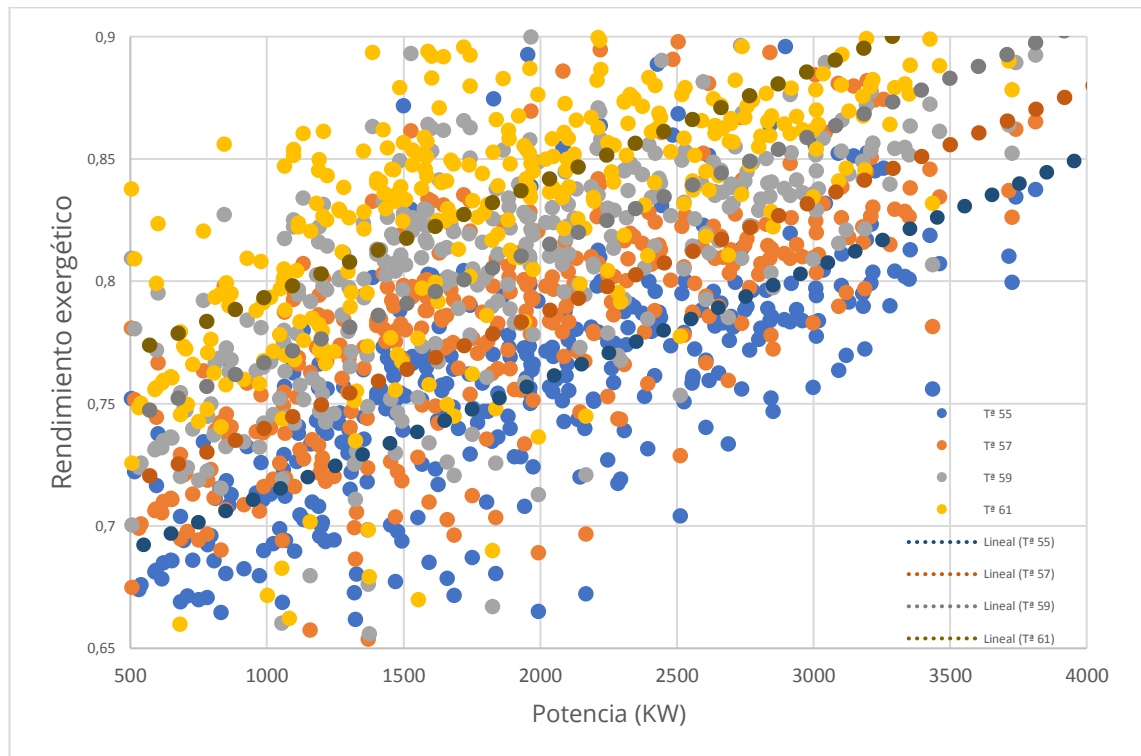


Figura 54: Rendimiento exergético subestación según variación de temperatura agua fría.

Si la temperatura de entrada de la corriente fría aumentase hasta equiparse a la de salida del agua caliente, el rendimiento exergético valdría uno, ya que la exergía cedida por una corriente sería igual a la absorbida por la otra (a igualdad de caudales), sin embargo, en un caso real, al disminuirse tanto el gradiente de temperaturas entre ambas corrientes, se dificultaría el proceso de transmisión de calor, incrementándose las pérdidas al exterior, y perdiendo eficacia en el intercambio.

El otro parámetro que podemos variar y que tiene plena influencia en el rendimiento exergético es el caudal. En este análisis hemos realizado un segundo experimento que consiste en transmitir la misma potencia desde el circuito primario, para diferentes caudales del circuito cerrado del edificio. Para ello hemos fijado la temperatura de agua de la corriente fría y hemos tomado distintos caudales (32, 34, 36 l/s...etc) de forma que, para la misma potencia transmitida, la corriente secundaria sufrirá distintos saltos térmico, que darán lugar a variaciones del rendimiento exergético. Los resultados de dicha eficiencia para estos caudales en función de la potencia transmitida por el primario en la subestación quedan reflejados en la siguiente gráfica.

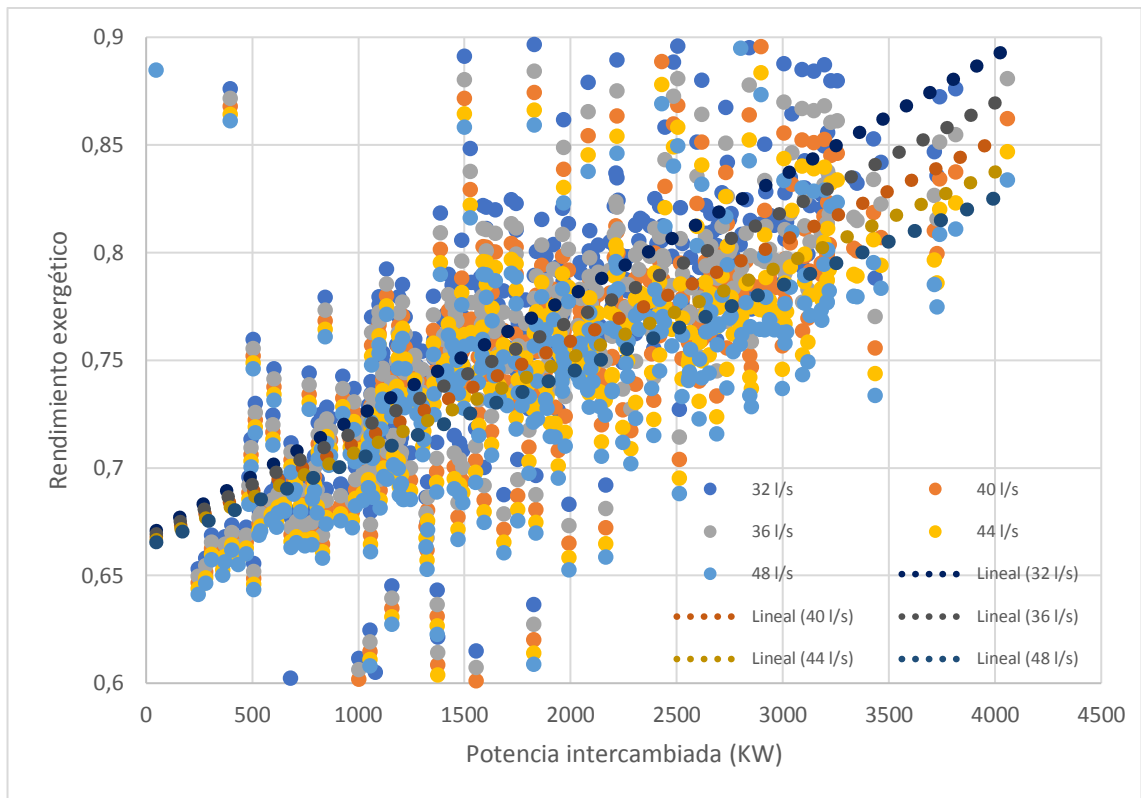


Figura 55: Rendimiento exergetico subestación para distintos caudales $f(W)$.

Pese a las fuertes fluctuaciones que presenta la eficiencia, se observa como para los caudales más bajos de la red secundaria la eficiencia se mantiene superior a los caudales más altos para cualquier valor de potencia determinado. Como ya se comentó anteriormente para casos similares, esto es debido a que la destrucción de exergía en una transmisión de calor disminuye cuanto más próximas son las temperaturas entre los focos. Si tomamos como temperatura de cada foco la temperatura media a lo largo de todo el proceso de intercambio de calor, podemos ver que, para los caudales más pequeños, la temperatura media será más alta (debido al mayor salto térmico que sufren, al poseer menor flujo másico) aproximándose así a la temperatura media del circuito primario, la cual se mantiene constante debido a que mantenemos fijas sus parámetros de operación.

6.3 ANÁLISIS CUANTITATIVO DE LA DESTRUCCIÓN DE EXERGÍA DE LA RED DE CALOR

A continuación, vamos a comparar la destrucción de exergía (no la eficiencia) de cada elemento de la red para un punto de funcionamiento concreto, de tal forma que veamos con una mayor perspectiva la red desde el punto de vista exergetico, y podamos determinar cuáles son los elementos donde se destruye la mayor parte de la exergía (aunque tengan mejor eficiencia que otros). Será en ellos donde habrá que centrar los esfuerzos de cara a conseguir un mejor resultado termo económico.

El análisis ha sido realizado para la potencia de 2000 kW, al tratarse del punto de funcionamiento modal.

En los siguientes gráficos podemos comparar las exergías destruidas en cada elemento, y también cual es la eficiencia de dicho elemento para ese punto de funcionamiento dado.

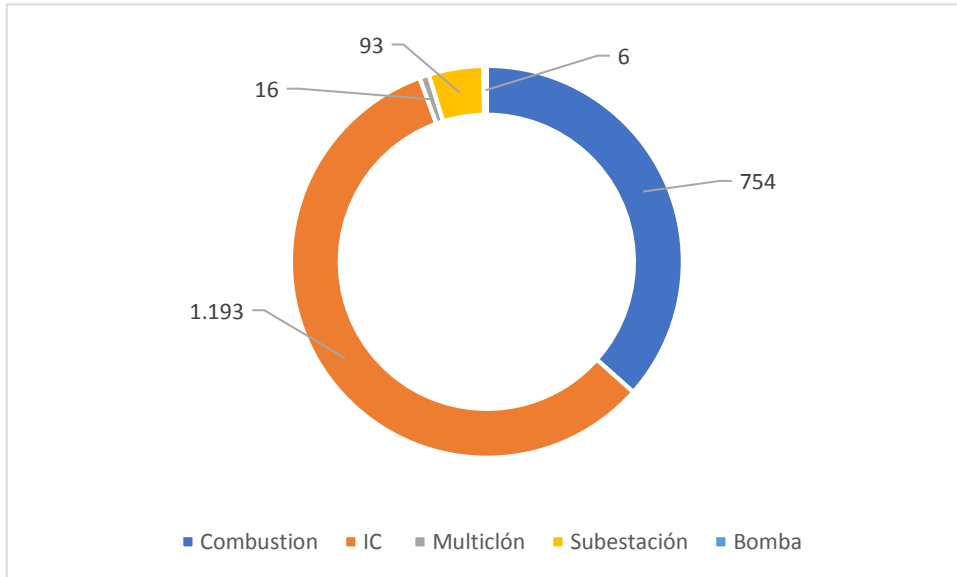


Figura 56: Exergía destruida en cada componente (kW).

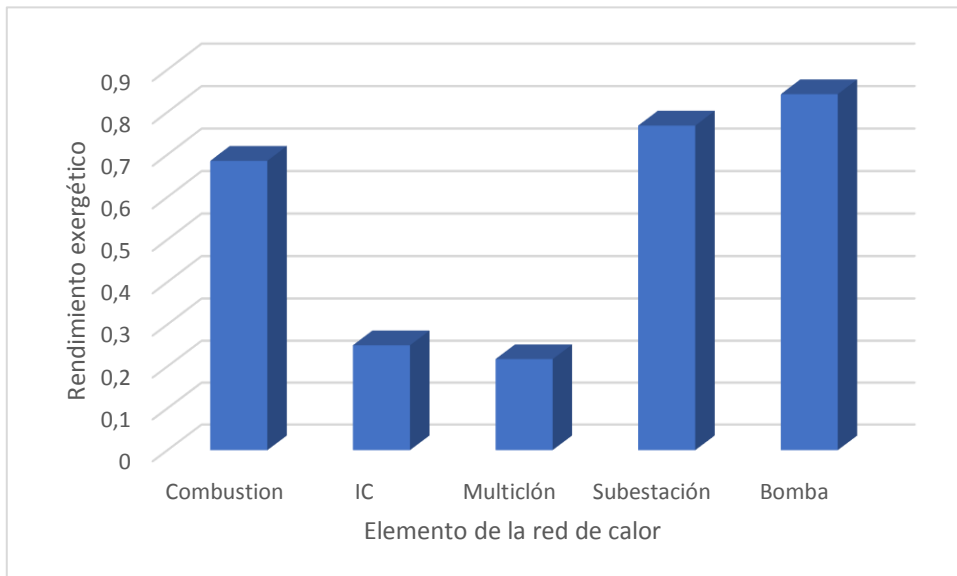


Figura 57: Rendimiento exergético de los componentes.

En la figura 56 podemos ver como dos elementos son los principales actores en la destrucción de exergía, y que de los tres restantes solo la subestación tiene ligera

importancia. La destrucción de exergía llevada a cabo en el multiciclón y la bomba realizan un papel testimonial en el balance total.

Esto es debido a que, en estos dos últimos elementos, los intercambios de calor y/o trabajo son mucho menores que los realizados en la caldera y la subestación, quedando muy reducida su influencia en el balance total, independientemente de que su eficiencia sea buena o muy mala, como en el caso del multi-ciclón. Esto último se ve con más claridad en la caldera; mientras la combustión goza de una eficiencia mucho más alta que el intercambiador de la caldera, la destrucción de exergía no dista tanto de la del IC como cabría esperar, debido a la mayor exergía puesta en juego (combustible).

Para mostrar de una forma más gráfica la variación de la exergía en todo el proceso que tiene lugar en la red, se ha realizado el siguiente diagrama de Sankey, en cuyo comienzo se muestra la exergía disponible inicial, la cual va destruyéndose hasta quedarnos únicamente con el 13% de la exergía inicial tras recorrer toda la red.

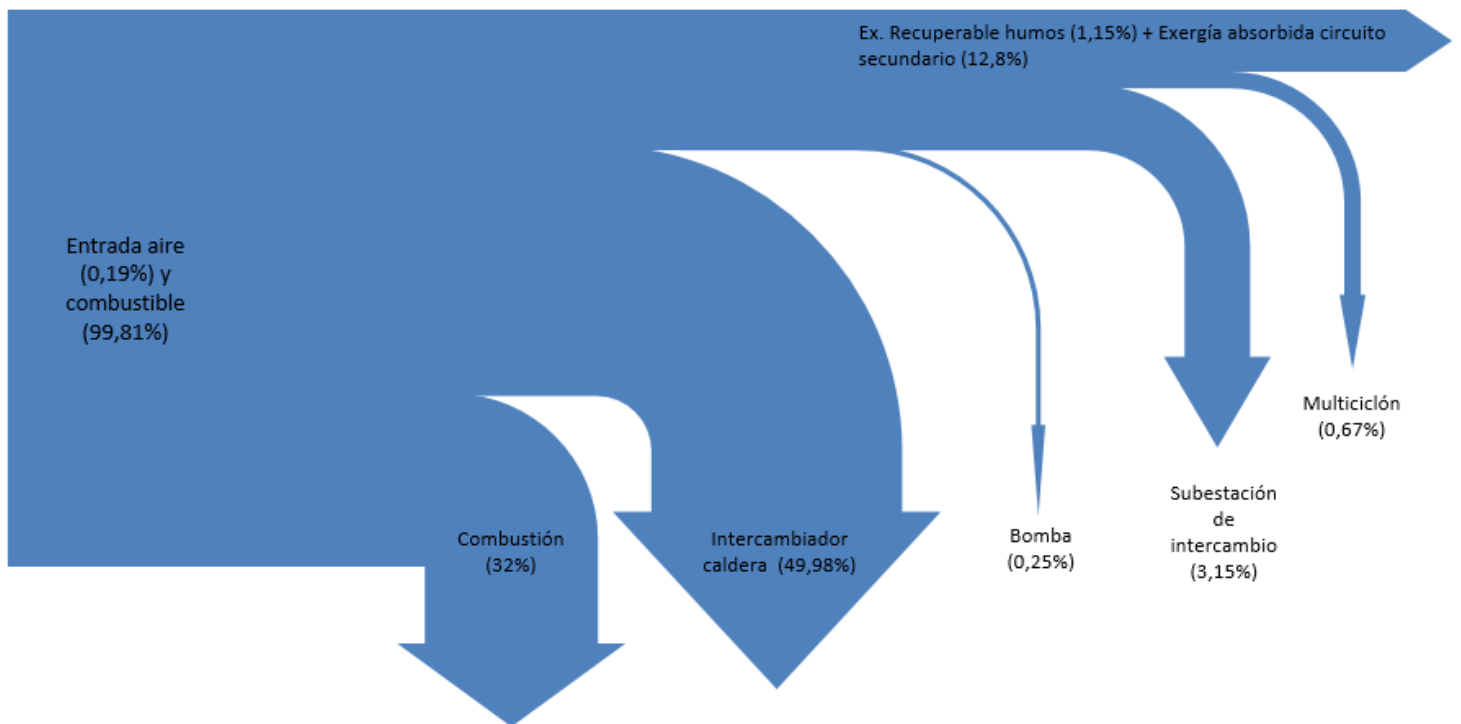


Figura 58: Diagrama de Sankey representando la destrucción de exergía del sistema.

Al estudiar la red en conjunto, vemos que las mejoras a aplicar sobre los dos elementos más importantes de la red son contraproducentes las unas con las otras, cuando el rendimiento exergético de la cámara de combustión mejora (al incrementar la potencia como vimos anteriormente), empeora la del IC de la caldera, y viceversa.

Esto nos obliga a encontrar un punto de equilibrio donde el producto de ambas eficiencias (tomando la del multiciclón, bomba y subestación constantes y poco influyentes) nos dé un valor máximo, el cual será el punto de la red más eficiente exergéticamente hablando.

Tras cruzar las gráficas en nuestra base de datos de la red, obtenemos la gráfica que se muestra más abajo, cuya regresión lineal se trata de una recta con pendiente prácticamente nula, indicándonos que no existe una variación de la exergía global del proceso con la eficiencia, sino que es independiente en que régimen trabaje la red respecto de la eficiencia de dicha red, ya que las variaciones que pueda sufrir la eficiencia de uno de los elementos importantes del conjunto, queda contrarrestado al 100% por el otro. Recordemos que la destrucción de exergía entre la cámara de combustión y el IC de la caldera representan el 95.3% de la destrucción total de exergía, con lo que la influencia del resto de elementos de cara a obtener un punto óptimo de funcionamiento es nula.

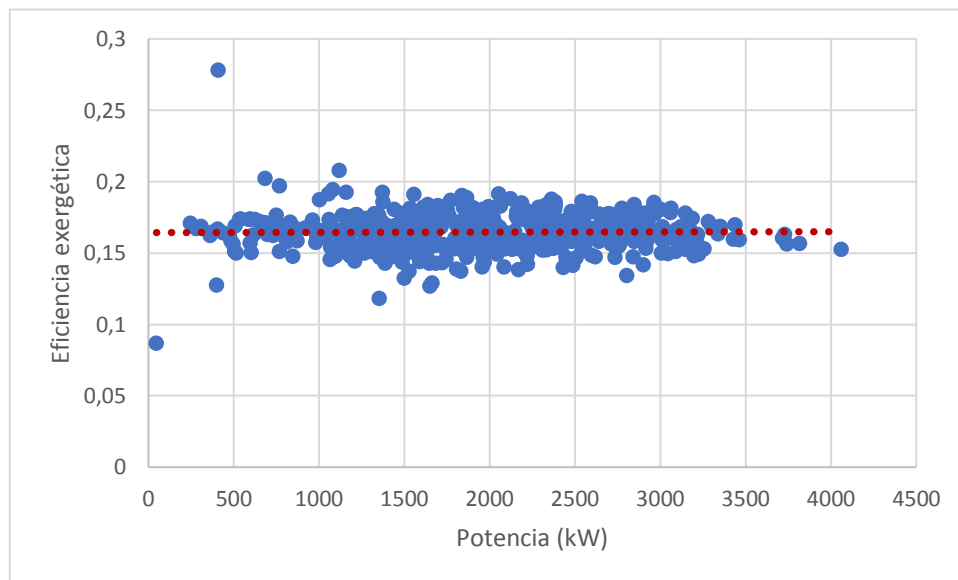


Figura 59: Eficiencia exergética combinada cámara combustión + IC caldera.

En definitiva, vemos que no es posible mejorar el rendimiento exergético del conjunto variando las condiciones operativas de la red de calor, si no que ésta solo podría mejorar mejorando la infraestructura de los elementos de la red (intercambiador, bomba, multiciclón) de forma que su funcionamiento se aproxime más a un proceso irreversible, así como la calidad del combustible y su proceso de combustión. Pese a que todo esto podría mejorar levemente el rendimiento exergético del proceso no hay que olvidar que a lo largo de la red de calor se produce una degradación energética muy grande, y que

aunque idealizásemos todos los procesos (rendimientos energéticos del 100%, todos los elementos operando de forma adiabática...) los procesos que se dan lugar en la red como la combustión, el intercambio humos-agua, o la cesión de calor a de una corriente a otra de menor temperatura, conllevan destrucciones inevitables de exergía, al intercambiarse la energía a lugares donde su potencial para dar trabajo es menor, que hacen que en la práctica resulte muy difícil poder mejorar la eficiencia global del proceso.

Una alternativa más eficiente exergéticamente en una red de calor sería la utilización de “calores residuales” con una temperatura lo suficientemente alta para poder después ser distribuidos a través de la red a los niveles térmicos típicos y evitar así la cámara de combustión. Dichos calores partirían otorgarían la cantidad de energía necesaria partiendo de una fuente de una calidad energética, exergía, mucho más baja que la biomasa, pero perfectamente válida para la obtención de agua caliente (la cual es una demanda energética de muy baja calidad) de forma que el rendimiento exergético que obtendríamos sería mucho más alto.

CAPÍTULO 7.

CONCLUSIONES

7.1 CONCLUSIONES

Para finalizar este TFG y a modo de resumen se comentan a continuación las conclusiones obtenidas de su realización en relación con el futuro de las redes de calor en el ámbito del abastecimiento energético y el punto de vista del método exergético en la evaluación de la eficiencia de estas instalaciones.

Del mismo modo que el mundo del transporte está inmerso en una revolución con la llegada no solo del vehículo eléctrico, si no con multitud de plataformas que cambian la forma de transportarnos, fomentando un transporte más cooperativo apoyado por las nuevas tecnologías, el sector energético tiene ante sí la posibilidad de transformarse y abandonar los métodos tradicionales de generación de calor que tantas desventajas tienen tanto a nivel local (contaminación en los núcleos urbanos) como global (emisiones de GEI).

Ese cambio en el modelo energético ha de ser sustentado, entre otras, por dos ideas clave: la distribución de energía mediante redes de calor urbanas, y la producción de ésta mediante fuentes de energía renovables o energías residuales.

De forma que este cambio pasaría por la sustitución progresiva de los tradicionales métodos de producción de ACS por otras alternativas que garantizaran abastecer la demanda de forma continua en el futuro.

Esta transición queda recogida en todos los Planes Energéticos que se publican con carácter decenal y que registran como poco a poco vamos hacia un modelo energético más sostenible y que trata de cumplir los compromisos de emisiones de CO₂ pactados con los socios europeos con la idea de ralentizar el cambio climático, en tanto en cuanto este sea causado por dichos GEI.

No hace muchos años que entre los miembros de la UE se acordó la creación de un comercio de derechos de emisión, el cual fija a cada país la cantidad máxima de CO₂ que puede emitir en su producción, y además permite la venta de dichos derechos de unos países (los que poseen más energía limpia y les sobran) a otros, que se ven obligados a comprar dichos derechos a un precio cada vez mayor que ha causado que en España (país demandante de derechos) estemos sufriendo un incremento en la factura mes a mes, y no parece que la situación vaya a cambiar a corto plazo.

La creación de estos derechos busca generar un incentivo económico que sumado a los dos anteriores haga incrementar la inversión (tanto pública como privada) en energías alternativas que garanticen a los ciudadanos un servicio más eficiente, sostenible, saludable y, además, a un menor coste que si mantuviésemos los niveles de emisiones actuales.

En este TFG se ha analizado, utilizando el método exergético, una red de biomasa (cuya emisión de CO₂ es considerada nula, al haber absorbido previamente ese CO₂ de la atmósfera durante la vida de los árboles usados en la combustión), pero las redes de calor pueden ser de una o más fuentes de diversa índole (geotermia, solar, cogeneración...etc) tal y como se ha presentado en este trabajo.

Como se señaló en capítulos anteriores, una de las principales razones para realizar un análisis de este tipo era evaluar la degradación de la calidad de la energía de los distintos procesos que configuran la red, es decir, determinar lo cerca que estamos del proceso ideal (reversible), a través del cálculo del rendimiento exergético y la exergía destruida.

Este rendimiento nos permite localizar los elementos de la red donde trabajamos de forma más irreversible, para focalizar los esfuerzos en mejorar esos procesos en concreto, aunque hay veces, que un elemento con mayor rendimiento, debido a su gran volumen de trabajo, la destrucción de exergía es mayor que otros donde el rendimiento es menor.

Este estudio ha puesto de manifiesto que a lo largo de la red de calor se produce una degradación energética muy grande, y que aunque idealizásemos todos los procesos (rendimientos energéticos del 100%, todos los elementos operando de forma adiabática...) los procesos que se dan lugar en la red como la combustión, el intercambio humos-agua, o la cesión de calor a de una corriente a otra de menor temperatura, conllevan inevitablemente destrucción de exergía por tratarse todos ellos de procesos muy irreversibles.

El análisis realizado muestra que la caldera, que ha sido analizada separando los procesos de combustión e intercambio de calor, es el elemento cuyo rendimiento conjunto es más bajo y donde se la exergía destruida es mayor puesto que representa aproximadamente el 95% de la exergía destruida total.

Una alternativa más eficiente exergéticamente en una red de calor sería la utilización de “calores residuales” con una temperatura lo suficientemente alta para poder después ser distribuidos a través de la red a los niveles térmicos típicos y evitar así la cámara de combustión.

ANEXO 1.

CÁLCULOS REALIZADOS EN LA RED DE CALOR.

AX 1 CÁLCULOS REALIZADOS EN LA RED DE CALOR

Para completar este TFG, se ha realizado el siguiente anexo donde se mostrará con más detalle todos los cálculos que ha sido necesario realizar para analizar cada elemento de la red de calor, así como las suposiciones e idealizaciones realizadas en cada ecuación para poder resolver sus incógnitas, sin las cuales no hubiera sido posible analizar los elementos por falta de información sobre éstos (mediciones de temperaturas, rendimientos isoentrópicos, transmitancia de los materiales, idoneidad del proceso llevado a cabo...etc).

Para poder analizar la red de calor, desde el Ayto. de Cuéllar se facilitó los siguientes datos, medidos cada dos minutos a lo largo de un día de invierno.

- Caudal del circuito primario (m^3/s)
- temperaturas de entrada y salida del agua en la caldera
- temperatura de humos a la salida de la caldera y de la chimenea
- temperatura ambiente
- temperatura del aire tras pasar por el multi-ciclón
- Combustible utilizado

Sin embargo, otros parámetros como los consumos de biomasa y aire, la composición y la temperatura de los humos, los rendimientos de los equipos, los materiales de las tuberías eran desconocidos, con lo que me he apoyado en otros estudios de biomasa y algunas idealizaciones para poder completar los cálculos requeridos en cada equipo. A continuación, vamos a desarrollar los cálculos realizados para los distintos elementos de la red, y las hipótesis tomadas en cada uno de ellos para poder resolverlos.

▪ AX 1.1 Cálculos en la cámara de combustión.

Para poder realizar el balance exergético a la cámara de combustión necesitábamos conocer los flujos másicos del aire, la biomasa y los humos (que sería la suma de los dos anteriores), y también la temperatura del aire precalentado y la de los humos después de la combustión.

Para conocer el consumo de biomasa, se realiza a partir del rendimiento energético de la caldera:

$$\dot{m}_{biomasa} = \frac{\dot{Q}_{cedido\ a\ agua}}{\eta_{caldera} \cdot PCI_{biomasa}}$$

Ecuación AX.1

La potencia calorífica cedida al agua ha sido calculada conociendo el flujo másico del agua y su salto térmico.

$$\dot{Q}_{cedido\ a\ agua} = \dot{m}_{agua} \cdot C_p \cdot \Delta T_{agua}$$

El rendimiento de la caldera lo hemos fijado en el 92% (hipótesis de cálculo) y para el PCI hemos tomado 18800 kJ/kg, conforme a datos del IDAE para este tipo de biomasa [28].

Una vez conocido el consumo de biomasa, nos hemos basado en un estudio realizado sobre la combustión de biomasa [47] donde se considera un exceso de aire del 30% y calculando las propiedades de los humos como gas ideal. De su estudio pudimos obtener las siguientes tablas, gracias a la cuales accedimos los datos que necesitábamos.

Conociendo las necesidades estequiométricas de aire para la combustión de la biomasa y su índice de exceso, podemos determinar fácilmente el flujo másico de aire y, por ende, el de los humos, el cual tiene que cumplir con el siguiente balance de masa

$$\dot{m}_{humos} = \dot{m}_{biomasa} + \dot{m}_{aire}$$

Para el cálculo de la temperatura de humos se ha supuesto que el intercambiador de calor de la caldera es adiabático, y se ha aplicado el primer principio:

$$\begin{aligned} \dot{m}_{humos} \cdot C_{p_{humos}} \cdot (T_{humos\ c.combustión} - T_{humos\ salida\ IC}) \\ = \dot{m}_{agua} \cdot C_{p_{agua}} \cdot \Delta T_{agua} \end{aligned}$$

Una vez conocida la temperatura de humos, a la salida de la cámara de combustión se procede al cálculo de la exergía física contenida en dichos humos con la siguiente fórmula, donde T_0 es la temperatura ambiente, la cual ha sido medida de forma constante cada dos minutos con una sonda, y se mantiene dentro de la horquilla de 9 °C a 15 °C

$$E_{ph,humos} = C_{p_{humos}} \cdot \left[(T_{humos\ CC} - T_0) - T_0 \cdot \ln \left(\frac{T_{humos\ CC}}{T_0} \right) \right]$$

En el caso de los humos hay además que calcular la exergía química de los mismos:

$$E_{ch,humos} = \sum x_i E_{ch,i} + \sum x_i RT_0 \ln x_i$$

Ecuación AX.2

y se han tomado los valores de la exergía química de los componentes de los humos de la bibliografía [48].

$$\dot{E}_{humos} = \dot{m}_{humos}(E_{ph,humos} + E_{ch,humos})$$

Ecuación AX.3

En el caso del aire, la exergía del aire sólo es debida a su exergía física puesto que la exergía química es cero.

$$\dot{E}_{aire} = \dot{m}_{aire} \cdot C_{p_{aire}} \cdot \left[(T_{aire\ precalentado} - T_0) - T_0 \cdot \ln \left(\frac{T_{aire\ precalentado}}{T_0} \right) \right]$$

Finalmente, se ha aproximado la exergía química específica de la biomasa a su PCS, ya podemos proceder al cálculo del rendimiento exergético de la CC

$$\varepsilon_{ex} = \frac{\dot{E}_{humos}}{\dot{E}_{bio} + \dot{E}_{aire}}$$

▪ AX 1.2 Cálculos en el intercambiador de la caldera.

Tras haber obtenido en el apartado anterior el valor de la temperatura de humos en la CC (antes de pasarlos por el IC) y conociendo las temperaturas del agua (entrada y salida) y de los humos (solo salida) gracias a las sondas colocadas en el IC de la caldera, el cálculo del rendimiento exergético será inmediato, solo debemos calcular la exergía cedida por los humos y la absorbida por el agua (suponiendo que no hay transferencias de calor al exterior en el IC).

$$\dot{E}_{cedida\ humos} = \dot{m}_{humos} \cdot C_{p_{humos}} \cdot \left((T_{salida\ humos\ IC} - T_{humos\ CC}) - T_0 \cdot \ln \left(\frac{T_{salida\ IC}}{T_{humos\ CC}} \right) \right)$$

$$\dot{E}_{\text{absorbida agua}} = \dot{m}_{\text{agua}} \cdot C_{p_{\text{agua}}} \cdot ((T_{\text{agua salida IC}} - T_{\text{agua entrada IC}}) - T_0) \cdot \ln \left(\frac{T_{\text{agua salida IC}}}{T_{\text{agua entrada IC}}} \right)$$

Quedando finalmente el valor del rendimiento exergético:

$$\varepsilon_{ex} = \frac{\Delta \dot{E}_{\text{agua}}}{\Delta \dot{E}_{\text{humos}}}$$

▪ **AX 1.3 Cálculos en el multiciclón.**

El multiciclón se trata del único elemento sobre el que no se ha tenido que realizar la hipótesis de un VC adiabático, ya que se dispone de 4 sondas que miden las temperaturas de ambos flujos (aire y humos) tanto a la entrada como a la salida. El hecho de que no haya sido idealizado es una de las razones fundamentales de su bajo rendimiento exergético, especialmente a altas temperaturas, donde aumentan las disipaciones al exterior.

El cálculo de su rendimiento exergético es idéntico al del IC, calculando la cesión de exergía por parte de los humos y la absorción de exergía por parte del aire.

Pese a tratarse de un elemento con un bajo rendimiento, toda su aportación al sistema es positiva, ya que de otra forma esa exergía iba a ser destruida completamente al expulsar los humos directamente por la chimenea.

$$\dot{E}_{\text{cedida humos}} = \dot{m}_{\text{humos}} \cdot C_{p_{\text{humos}}} \cdot ((T_{\text{salida humos chimenea}} - T_{\text{humos salida IC}}) - T_0) \cdot \ln \left(\frac{T_{\text{salida chimenea}}}{T_{\text{humos salida IC}}} \right)$$

$$\dot{E}_{\text{absorbida aire}} = \dot{m}_{\text{aire}} \cdot C_{p_{\text{aire}}} \cdot ((T_{\text{salida aire multiciclón}} - T_0) - T_0) \cdot \ln \left(\frac{T_{\text{salida IC}}}{T_0} \right)$$

$$\varepsilon_{ex} = \frac{\Delta \dot{E}_{\text{aire}}}{\Delta \dot{E}_{\text{humos}}}$$

▪ AX 1.4 Cálculos en la bomba.

Para el análisis exergético de la bomba han sido necesarias más idealizaciones que en otros elementos dada la ausencia de información del conjunto red-bomba. El primer paso para conocer el punto de funcionamiento de la bomba es calcular las pérdidas de carga de la red a lo largo de todo su recorrido. Para las pérdidas locales hemos tomado una $L_{equivalente}$ del 20% de la longitud de la red.

Conocido el diámetro de la tubería y la rugosidad de sus paredes, hemos sacado el factor de fricción a través del diagrama de Moody. Hemos supuesto que el valor de f se mantenga constante en 0.018, pese a que las ligeras variaciones de caudal provocarán la correspondiente variación en el Reynolds, debido a que calcular el factor para cada medición del caudal (más de 500) resultaría muy laborioso.

Una vez calculado el factor de fricción, calculamos las pérdidas de carga en la red con la siguiente formula:

$$\Delta p = \frac{8 \cdot Q^2}{\Pi^2 \cdot g} \cdot \left(\frac{L \cdot f}{D^5} + \sum \frac{K}{D^4} \right)$$

Ecuación AX.4

Conocida la presión que hay que requiere el fluido, ya podemos conocer los puntos de entrada y salida (h_1 y h_{2s}) si la bomba fuese isoentrópica. Como ninguna bomba se comporta de esa manera, suponemos un η_{iso} , (del 80% aproximadamente) el cual permanece invariable para los distintos puntos de funcionamiento de la bomba, debido a la falta de información de este aspecto. Con el rendimiento isoentrópico ya podemos calcular el punto final (real) del fluido, a su salida de la bomba, de la siguiente manera:

$$\eta_{iso} = \frac{h_{2s} - h_1}{h_2 - h_1}$$

Ecuación AX.5

Aplicando dicha fórmula podemos despejar el valor h_2 , el cual siempre será mayor que h_{2s} , debido al incremento de temperatura que sufre el fluido durante el proceso de compresión debido a las irreversibilidades que se dan lugar en dicho proceso, que en última instancia dan lugar a un mayor consumo de la bomba, generando un coste adicional en el consumo eléctrico.

Conocidas las condiciones a la entrada y salida del fluido en la bomba resulta sencillo calcular la potencia mecánica que consume la bomba a partir del balance de energía para la bomba adiabática:

$$\dot{W} = \dot{m}(h_2 - h_1)$$

Ya podemos calcular el rendimiento exergético de la bomba comparando la exergía ganada por el agua frente a la potencia consumida por la bomba

$$\varepsilon_{ex} = \frac{\dot{\Delta E}_{agua}}{\dot{W}}$$

Como vimos anteriormente en el análisis de la bomba, esta eficiencia va de la mano, y es directamente proporcional con el valor del rendimiento isoentrópico, siendo siempre un poco mayor la ε_{ex} que el η_{iso} , debido al pequeño incremento de exergía que aporta el incremento adicional de la temperatura en el agua que se produce como consecuencia de la irreversibilidad de la compresión

Dicha eficiencia sería menor si considerásemos la potencia consumida de la red eléctrica, ya que realmente es el precio que pagamos para obtener dicho incremento exergético en el fluido, pero para ello necesitaríamos conocer el $\eta_{eléctrico}$ de la bomba, el cual es desconocido.

- **AX 1.5 Cálculos en la subestación de intercambio.**

Se trata del último elemento de la red sobre el que hemos realizado un análisis exergético. En este volumen de control se produce un intercambio de calor entre los dos circuitos de agua que lleva asociado una transferencia de energía y exergía. Lógicamente, como en cualquier otro proceso termodinámico no reversible, se produce una destrucción de exergía, es decir la exergía cedida por la corriente primaria es mayor que la exergía ganada por la corriente secundaria.

De forma que para poder calcular el rendimiento exergético de este elemento lo primero que debemos hacer es conocer las variaciones de exergía de ambas corrientes, para lo cual necesitamos las temperaturas de entrada y salida del intercambiador en ambos circuitos.

Las temperaturas de entrada y salida del circuito primario las conocemos debido a las sondas de medición que hay colocadas en la red de calor. Es necesario suponer que no existen pérdidas de calor en la red subterránea ya que las sondas están colocadas en la impulsión y retorno de la central, no en la subestación de calor que se encuentra a un par de kilómetros.

Conociendo el caudal y el gradiente de temperatura en el caudal primario, es sencillo conocer la potencia calorífica cedida por dicho circuito en el intercambiador mediante el primer principio de la Termodinámica (tomando el sistema como estacionario)

$$\dot{Q} = \dot{m}_{agua} \cdot C_p \cdot \Delta T_{agua}$$

Para conocer los valores de la corriente secundaria y poder calcular el rendimiento exergético, hemos de dar un caudal y una temperatura de entrada (que como hemos visto anteriormente ambas variable pueden ser modificadas para estudiar cómo afecta su variabilidad al rendimiento exergético) e idealizar el intercambiador de forma que este opere de forma adiabática, y toda la potencia cedida por la corriente primaria sea absorbida por la secundaria, sin pérdidas de calor al exterior.

Una vez dados los valores de caudal y temperatura de entrada, solo queda despejar el valor de $\Delta T_{agua\ secundario}$ igualando la ecuación anterior a su homóloga en el circuito secundario.

$$\dot{m}_{agua\ primario} \cdot C_p \cdot \Delta T_{agua\ primario} = \dot{m}_{agua\ secundario} \cdot C_p \cdot \Delta T_{agua\ secundario}$$

Ahora que conocemos las 4 temperaturas (2 de salida y 2 de entrada) podemos calcular la exergía absorbida y cedida por cada corriente de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} \dot{E}_{abs.circuito\ 1} &= \dot{m}_{agua\ 1^e} \cdot C_{p\ agua\ 1^e} \cdot ((T_{salida\ IC} - T_{entrada\ IC}) - T_0 \\ &\quad \cdot \ln \left(\frac{T_{salida\ IC}}{T_{entrada\ IC}} \right) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{E}_{abs.circuito\ 2} &= \dot{m}_{agua\ 2^e} \cdot C_{p\ agua\ 2^e} \cdot ((T_{salida\ IC} - T_{entrada\ IC}) - T_0 \\ &\quad \cdot \ln \left(\frac{T_{salida\ IC}}{T_{entrada\ IC}} \right) \end{aligned}$$

Una vez despejados estos dos valores, el cálculo del rendimiento exergético es inmediato:

$$\varepsilon_{ex} = \frac{|\dot{\Delta E}_{agua\ circuito\ secundario}|}{|\dot{\Delta E}_{circuito\ primario}|}$$

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE). Plan de Energías Renovables (PER) 2011-2020. Página 10.
- [2] Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE). Plan de Energías Renovables (PER) 2005-2010. Páginas 7 y 8.
- [3] Ministerio de Economía, Turismo y Agenda Digital (MINETAD). Plan de Acción Nacional Energías Renovables (PANER) 2011-2020. Página 4.
- [4] Ministerio de Economía, Turismo y Agenda Digital (MINETAD). Plan de Acción Nacional Eficiencia Energética (PAEE) 2017-2020. Páginas 3 y 4.
- [5] Asociación de Productores de Energías Renovables (APPA). Estudio del impacto macroeconómico de las energías renovables en España. 2016.
- [6] <http://www.campusenergia.com/blog/item/432-%C2%BFqu%C3%A9-es-la-intensidad-energ%C3%A9tica?> Web Campus Energía.
- [7] Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE). Informe sintético de indicadores de eficiencia energética en España. 2015
- [8] http://laplace.us.es/wiki/index.php/Introducci%C3%B3n_a_la_exerg%C3%ADa Departamento de Física aplicada de la Universidad de Sevilla.
- [9] Michael Morán, Howard Shapiro *“Fundamentos de Termodinámica Técnica”*. 2ª ed. (4ª ed. original). Ed. Reverté. (Capítulo 7. Análisis exergético). 1987
- [10] Miguel Ángel Lozano Serrano *“Aplicaciones Termoeconómicas Del Método Exergético”*.1997. Universidad de Zaragoza, departamento de Ingeniería Mecánica.
- [11] http://www.equiposylaboratorio.com/sitio/contenidos_mo.php?it=3121 Equipos y Laboratorio de Colombia.
- [12] Elina González, Ignacio López, Ángel Jiménez y Rafael Nieto *“Descripción general de los sistemas abiertos”*. ETSI-Madrid. abril 2009
- [13] Marcel Schweiker y Masanori Shukuya *“Comparative effects of building envelope improvements and occupant behavioural changes on the exergy consumption for heating and cooling”*. Energy Policy 38(6):2976-86. 2010.
- [14] Iván Flores Abascal *“El método de análisis exergético en los edificios. Su aplicación en la caracterización en régimen dinámico de los cerramientos”*. Tesis Doctoral. Universidad del País Vasco, 2015.
- [15] Adrian Bejan. *“Advanced engineering thermodynamics”*. 2nd ed. John Wiley & Sons. 1997.
- [16] Christos Frangopoulos. *“A introduction to environomic analysis and optimization of*

energy intensive systems. *Proceedings of the international symposium on efficiency, costs and optimization and simulation of energy systems* (ECOS'92); 15-18 June; Cracovia, Polonia. 1992.

[17] Rene Cornelissen y Gerard Hirs. *“Energetic optimisation of a heat exchanger. Energy Conversion and Management; Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Aspects of Energy Systems”* departament of mechanical engineering University of Twente, 1997.

[18] FEMP & Red Española de Ciudades por el Clima *“Climatización urbana en las ciudades españolas”*. 2012.

[19] Institut Català d' Energí & Asociación de Empresas de Redes de Calor y Frío. *“ Guía básica de redes de calor y distrito”* 2011.

[20] Web Dalkia. <https://www.dalkia.fr/en>

[21] Web SWEP. <https://www.swep.net/applications/district-energy-systems/>

[22] DISTRICLIMA. *“Guía Técnica del Cliente: Acometidas, Subestaciones y Circuitos Interiores”*. 2016.

[23] Plano de red de Districlima,
http://www.districtlima.com/districtlima/uploads/NUESTRA%20RED/2018_01_Plano_red.png

[24] *“Mix énergétique et réseaux urbains d énergie, outils d aménagement urbain durable étude de cas de l éco-quartier Sainte-Geneviève à Nanterre”* (France).
<http://docplayer.fr/10624425-Mix-energetique-et-reseaux-urbains-d-energie-outils-d-amenagement-urbain-durable-etude-de-cas-de-l-eco-quartier-sainte-genevieve-a-nanterre-france.html>

[25] Web Engie, <https://www.engie.com/activites/reseaux-chaleur-froid/>

[26] CONAMA, *“ Calefacción de distrito urbana con biomasa de la Universidad de Valladolid: Objetivo 20/20/20”*. 2014.

[27] Source Statistic Austria; basada en cálculos realizados por la Agencia Austriaca de la Energía

[28] IDAE. Ministerio de Industria, Turismo y Comercio *“Manual de energías renovables: energía de la biomasa”*. Octubre de 2007.

[29] IDAE. Ministerio de Industria, Turismo y Comercio. *“Manuales de Energías Renovables 5”*. 1992.

[30] Web Energías renovables <https://www.energies-renovables.com/biomasa/premio-para-la-universidad-mas-bioenergetica-la-20170619>

- [31] Paloma Galindo Llorente. *“Estudio del consumo energético en un district heating (DH) de la Universidad de Valladolid”* Trabajo Fin de Grado, Universidad de Valladolid. 2018.
- [32] IDAE & Instituto Geológico y Minero de España *“Manual de Geotermia”* junio de 2008.
- [33] Web Arquitectura & Empresa
<https://www.arquitecturayempresa.es/noticia/geotermia-que-estas-dudando>
- [34] Agencia Internacional de la Energía
- [35] Tecnología y Recursos de la Tierra, S.A., TRT
- [36] Euroobserver
- [37] Alberto Albarrán Ordás *“Fases de un proyecto geotérmico de red de calefacción urbana”*. Abril de 2011.
- [38] Department of Energy U.S. *“Geothermal Technologies Program.”* 2004
- [39] María Jesús Sacristán de Miguel. *“Ciudades sostenibles con geotermia urbana”* 2014
- [40] Ministerio de Industria, Turismo y Comercio. IDAE. *“Manual de energías renovables: Energía solar térmica.”* Octubre de 2006.
- [41] Institut Català d' Energía & Asociación de Empresas de Redes de Calor y Frío. *“Guía integral de desarrollo de proyectos de redes de calor y frío”*. 2012.
- [42] TECNALIA. *“Planteamiento Urbano. Solar District Heating”*. 2013
- [43] Ministerio de Industria, Turismo y Comercio. IDAE. *“Guía técnica para la medida y determinación del calor útil, de la electricidad y del ahorro de energía primaria de cogeneración de alta eficiencia”* 2008.
- [44] José María Sala Lizarraga *“Termodinámica aplicada”*. Universidad de la Rioja. 1999.
- [45] <http://www.monografias.com/trabajos104/principios-fundamentales-ciclos-vapor/principios-fundamentales-ciclos-vapor.shtml>
- [46] José Ramón Aranda Sierra y Miguel Ángel Rodríguez Pozueta. *“Centrales termoeléctricas o eléctrica. Cogeneración”*. Universidad de Cantabria. 2011.

[47] Irene Esteban González, *“Análisis y caracterización de la combustión de pellets”* Trabajo Fin de Grado, Universidad de Valladolid, Julio 2014.

[48] Tadeusz Kotas. *“The Exergy Method of Thermal Plant Analysis”*. Department of Mechanical Engineering, Queen Mary College, University of London. 1995.

