



Universidad
Zaragoza

TRABAJO FIN DE GRADO

Instalación y pruebas de
generadores termoeléctricos
en calderas de biomasa

Installation and testing of
thermoelectric generators in
biomass boilers

AUTOR:

JAVIER VAL IBARZO

DIRECTOR

FRANCISCO JAVIER ROYO HERRER

Escuela de Ingeniería y Arquitectura de
la Universidad de Zaragoza 2019-2020

RESUMEN:

La instalación de generadores termoeléctricos (TEG) en los sistemas de producción térmica convencionales permite convertirlos en sistemas de cogeneración, mejorando el rendimiento global del sistema y aportando ventajas tanto económicas como medioambientales, más aun si se utiliza la biomasa como fuente de energía primaria. No obstante, la utilización de este tipo de biocombustibles en ocasiones con alto contenido en cenizas, puede complicarse debido a problemas de ensuciamiento y corrosión de los sistemas que comprometen la fiabilidad y vida útil de los equipos.

Este Trabajo de Final de Grado tiene como objetivo mostrar la puesta en marcha de la caldera de condensación de un proyecto de investigación de mayor envergadura, llamado TEGBIOSOL donde se pretende instalar la tecnología TEG. Para ello se parte de una amplia revisión bibliográfica de las experiencias relacionadas con la integración de TEG en calderas de biomasa.

Durante la primera parte del trabajo se comentan brevemente las modificaciones que se van a realizar en la caldera de condensación doméstica de 25 kW de la marca BioCurve para facilitar el desarrollo de las pruebas experimentales y los combustibles que se utilizan, así como un estudio acerca la selección de la instrumentación para la toma de medidas de temperatura y caudal del aire, del agua y de los gases de combustión en diversas zonas del sistema.

Después se abordan diferentes protocolos de pruebas, que permiten garantizar la integridad de los instrumentos y del usuario que los maneja, así como alcanzar la repetibilidad y fiabilidad a la hora de medir y analizar los gases de combustión o las cenizas que se generan durante el desarrollo de las pruebas.

Por último, mediante pruebas experimentales preliminares, se obtienen algunas conclusiones a partir de los resultados acerca de las emisiones de gases de combustión a la atmósfera, el funcionamiento del analizador de gases o los rendimientos de la caldera en función del combustible empleado (pélets de madera de pino y pélets mezcla de vid y cebada).

Este trabajo es un primer paso en la integración de la tecnología TEG en calderas de condensación alimentadas por combustibles de biomasa. No existen muchos registros acerca de experiencias similares, por lo que es necesario mejorar el rendimiento de los sistemas ya existentes y adaptarlos a las nuevas tecnologías. El objetivo final no debe ser otro que preservar el medio ambiente y reducir la contribución del ser humano al cambio climático.

ABSTRACT:

The installation of thermoelectric generators in conventional thermal production systems allows them to be converted into cogeneration systems, improving the overall performance of the system by providing both economic and environmental advantages, even more if biomass is used as the primary energy source. However, the use of this type of biofuels, sometimes with a high ash content, can be complicated due to soiling and corrosion of the systems that compromise the reliability and useful life of the equipment.

This document intends to explain the start-up of the condensing boiler of a large-scale research project, called TEGBIOSOL, in which TEG technology will be installed. To do so, an extensive bibliographical review of experiences related with the integration of thermoelectric generators in biomass boilers is used as a starting point.

The first stage of the work briefly discusses the modifications made to the 25 kW domestic condensing boiler of the BioCurve manufacturer to enable the development of the experimental tests and the fuels used, as well as a study about the selection of the instrumentation used to take measurements of temperature and flow of air, water and combustion gases in various areas of the system.

Different test protocols are then addressed, which make it possible to guarantee the integrity of the measuring instrument and the user who operates it, as well as to achieve repeatability and reliability in the measurement of combustion gases or ashes that are produced during the performance of the tests.

Finally, based on preliminary experimental tests, the relevant conclusions are drawn from the results concerning emissions of combustion gases into the atmosphere, the performance of the gas analyser or the efficiency of the boiler with regard to the different fuels used (pine wood pélets and mixed vine/barley pélets).

This work is a first step in the integration of TEG technology in condensing boilers powered by biomass fuels. There are not many records of similar experiences, so it is necessary to improve the performance of systems that already exist and adapt them to new technologies. The target should be to preserve the environment and reduce the human contribution to climate change.

AGRADECIMIENTOS:

Quisiera expresar mi agradecimiento a todos los profesores de la Universidad de Zaragoza que he conocido a lo largo de estos cuatro años, especialmente a Francisco Javier Royo, por su valiosa ayuda a la hora de la realización de este Trabajo de Final de Grado. La etapa universitaria ha supuesto un periodo de aprendizaje intenso tanto a nivel académico como personal.

Finalmente me gustaría agradecer también a toda mi familia y amigos que han estado acompañándome a lo largo de estos años, especialmente en los momentos difíciles. Habéis sido un gran apoyo y un pilar fundamental.

¡Muchas gracias!

Javier Val Ibarzo

Zaragoza, 16 de noviembre de 2020

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	9
1.1 ANTECEDENTES Y OBJETIVOS DEL PROYECTO TEGBIOSOL	11
1.2 OBJETIVO Y ALCANCE	12
1.3 CONTENIDO DE LA MEMORIA	12
2. ESTADO DEL ARTE	14
2.1 CONTEXTO HISTÓRICO DE LAS TECNOLOGÍAS QUE SE UTILIZAN EN EL TRANCURSO DEL PROYECTO	14
2.1.1 Generadores termoeléctricos	14
2.1.2 Energía procedente de la biomasa agrícola	16
2.2 EXPERIENCIAS DE TEG EN SISTEMAS DE PRODUCCIÓN ENERGÉTICOS.....	18
3. INSTALACIÓN EXPERIMENTAL.....	21
3.1 DESCRIPCIÓN DE LA CALDERA E INSTALACIÓN AUXILIAR	21
3.2 COMBUSTIBLES	22
4. INSTRUMENTACIÓN	24
4.1 TERMÓMETROS.....	24
4.1.1 Selección de la instrumentación para la medición de la temperatura	25
4.2 CAUDALÍMETROS	26
4.1.2 Selección de la instrumentación para la medición del caudal	27
5. PROTOCOLOS DE PRUEBAS:	28
5.1 PROTOCOLO DE USO DEL ANALIZADOR DE GASES	28
5.2 PROTOCOLO DE USO DE LA SONDA DE DEPOSICIÓN Y PESADA DE ANILLOS	29
5.3 PROTOCOLO DE CLASIFICACIÓN DE CENIZAS.....	29
6. RESULTADOS Y ANÁLISIS	31
6.1 PRUEBAS EXPERIMENTALES CON AJUSTES DE FÁBRICA	32
6.1.1 Medición de la temperatura en las zonas de los TEG	32
6.1.2 Comprobación de medidas de O ₂ del analizador de gases MRU	34
6.1.3 Comparativa de emisiones de CO y NO _x	35
6.1.4 Análisis del rendimiento de la caldera	37
6.2 PRUEBAS EXPERIMENTALES CON AJUSTE MANUAL	39
6.2.1 Modificación de la potencia de los ventiladores de la caldera	39
6.2.2 Regulación del sistema de alimentación de biomasa a caldera.....	41
7. CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS	43
8. BIBLIOGRAFÍA	45
9. ÍNDICE DE IMÁGENES Y GRÁFICAS	47

9.1 ÍNDICE DE IMÁGENES.....	47
9.2 ÍNDICE DE GRÁFICAS.....	47
ANEXO I: SELECCIÓN DE LA INSTRUMENTACIÓN.....	48
I. TERMÓMETROS.....	48
Termopares	48
Termorresistencias.....	50
Tabla resumen y motivos de selección	51
II. CAUDALÍMETROS	53
Medición del caudal de agua en la instalación	53
Medición del caudal de aire en la instalación	55
Tabla resumen.....	55
ANEXO II: PROGRAMA DE CÁLCULO DE LA EFICIENCIA DE COMBUSTIÓN DE LA CALDERA	57
ANEXO III: PROTOCOLO DE USO DEL ANALIZADOR DE GASES.....	61
ANEXO IV: PROTOCOLO DE USO DE LA SONDA Y PESADA DE ANILLOS.....	64
I. PROCESO RELACIONADO CON EL PESAJE DE ANILLOS:.....	66
II. PROCESO DE INSERCIÓN-EXTRACCIÓN DE LA SONDA:	68
ANEXO V: PROTOCOLO DE CLASIFICACIÓN DE CENIZAS.....	71
I.DETERMINACIÓN DEL GRADO DE SINTERIZACIÓN	73
II. DETERMINACIÓN DE INQUEMADOS/CENIZAS.....	76
III. ANÁLISIS SEM y XRD.....	78

1. INTRODUCCIÓN

El considerable aumento de la población y la demanda de energía en el planeta, junto a la escasez prevista de los combustibles fósiles, lleva a la búsqueda de recursos sostenibles y respetuosos con el medio ambiente. Una alternativa a estos combustibles fósiles es la biomasa. La biomasa fue la fuente energética más importante para la humanidad hasta el inicio de la revolución industrial, cuando se quedó en un segundo plano dando paso al uso masivo de combustibles fósiles.

La energía almacenada en la biomasa proviene del Sol. Mediante la fotosíntesis, el dióxido de carbono que se encuentra en el aire se transforma en otras moléculas que contienen carbono (Ej. azúcares). Estas moléculas se almacenan en plantas, animales o en sus residuos y reciben el nombre de bioenergía. Esta fuente de energía se considera renovable puesto que los suministros son ilimitados. Siempre se puede cultivar árboles o cosechas y aprovechar los residuos de los mismos. Dicha energía se puede recuperar ya sea mediante la combustión directa, para obtener energía térmica o transformando la materia en biocombustibles ya sean líquidos o gaseosos. La generalización del uso de estos recursos, puede ser una solución sostenible a una parte de la demanda energética de la población.

Cuando la biomasa se quema o se utiliza después de convertirla en otros tipos de combustibles, el carbono procedente de esta fuente de energía reacciona con el oxígeno para formar CO_2 . Si se realiza el análisis del ciclo de vida de la biomasa (ACV), la cantidad de dióxido de carbono producido es prácticamente igual a la cantidad que el ser vivo eliminó de la atmósfera durante su etapa de crecimiento. Por lo tanto no hay una adición neta de CO_2 a la atmósfera. Esto se conoce como el ciclo de carbono. En cambio, cuando se realiza la combustión de combustibles fósiles, se produce una adición de dióxido de carbono al entorno. Además, si se deja la biomasa en la naturaleza, se descompone liberando lentamente el dióxido de carbono y por lo tanto su reserva de energía es desaprovechada.

Las ventajas de la biomasa son muy diversas. Cuando se utiliza de forma adecuada, es una fuente de combustible renovable e inagotable, es un recurso relativamente barato y además la utilización de diferentes fuentes de energía permite la diversificación del suministro y alcanzar una seguridad energética superior, reduciendo la dependencia hacia los combustibles tradicionales. Pese a que las ventajas son destacables, existen limitaciones tecnológicas y económicas en comparación a los combustibles convencionales. De ahí la importancia de seguir con el desarrollo y mejora de los combustibles procedentes de la biomasa para que compitan con los utilizados en la actualidad.

Además de la búsqueda de nuevas fuentes de energía, es necesaria la constante investigación con el fin de mejorar las formas de aprovechamiento de estos combustibles, así como lograr la conversión más eficiente de los mismos. Uno de los principales problemas en la actualidad respecto a la producción de electricidad, calor o ambos (a partir de sistemas de cogeneración), es el aprovechamiento del calor generado, además de la gestión de los residuos y emisiones. Los generadores termoeléctricos (TEG) suponen un avance en dichos campos, ya que a través de gradientes térmicos, provenientes del calor residual (tubos de escape, chimeneas, circuitos de refrigeración de diversas centrales eléctricas, etc.) o las altas temperaturas de los gases a la salida de la cámara de combustión, se genera energía eléctrica aumentando el rendimiento global del sistema respecto a los ya existentes.

El TEG básico, se basa en el efecto Seebeck. El mecanismo está compuesto de dos materiales termoeléctricos diferentes (normalmente semiconductores dopados tipo P y N) conectados eléctricamente en sus extremos, formando así una unión. Una fuente de calor se aplica en uno de los dos lados. Como consecuencia de esta acción, el calor que fluye hace que aparezca la diferencia de temperatura ΔT entre las dos partes del dispositivo. Debido a esta diferencia de temperatura, los electrones del semiconductor tipo N, se mueven a los huecos que existen en el semiconductor P, moviéndose desde el foco caliente al foco frío. La corriente que fluye es directamente proporcional al ΔT . Esto implica que mientras se mantenga esa diferencia de temperatura, el dispositivo TEG generará electricidad.

Un alto coeficiente de Seebeck es necesario para desarrollar TEG de alto rendimiento. Otros factores como la conductividad eléctrica y térmica son determinantes para aumentar la eficiencia de estos sistemas. Aumentando la conductividad eléctrica, se consigue reducir la resistencia interna del generador, que mejora el rendimiento final del dispositivo. Otro objetivo es reducir la conductividad térmica, enfocado en mantener de forma eficiente el ΔT generado para la producción eléctrica.

El uso de los generadores termoeléctricos es muy amplio y la selección adecuada de los TEG depende de variables como los rangos de temperatura en los que va a trabajar o el rendimiento mínimo que se busca de los mismos. Este Trabajo de Final de Grado aporta la información necesaria para la selección de la tecnología TEG que mejor se adapte a la caldera. Las experiencias anteriores se han realizado en la mayoría de los casos con fuentes de energía poco problemáticas en cuanto a ensuciamiento. Existen experiencias con combustibles como el gas natural o con combustibles de biomasa poco problemáticos como los pélets de pino, con altos rendimientos sobre el PCI y con unas emisiones tanto de gases como partículas muy reducidas (Zhao et al., 2017).

Debido al aumento de la demanda de los últimos años, es necesario la incorporación de fuentes de energía de biomasa procedente de otros orígenes. Una posible solución sería incorporar la biomasa residual agrícola, que engloba los residuos de cultivos herbáceos y podas de cultivos leñosos permanentes.

Por lo tanto, uno de los primeros retos a superar es hallar la correcta adaptación de los equipos en función del combustible utilizado. Algunos de estos combustibles contienen altas concentraciones de elementos que favorecen la sinterización de las cenizas, la deposición o la corrosión, causando problemas en la conversión térmica. Estos acontecimientos hacen disminuir el rendimiento de la caldera, además de que aumentan los costes tanto de operación como mantenimiento, poniendo en riesgo la operatividad del sistema e incluso reduciendo su esperanza de vida útil (Royo et al., 2020). Además, los gases de combustión procedentes de la biomasa, arrastran partículas en suspensión que pueden llegar a depositarse en los TEG reduciendo su capacidad para la generación de energía eléctrica.

También se estudiará la selección de la instrumentación complementaria a la caldera y los TEG más adecuada. Estos instrumentos permiten además de realizar un correcto análisis de lo que ocurre en la cámara de combustión de la caldera, prevenir los problemas que se han comentado anteriormente. Los combustibles utilizados para este trabajo son pélets de madera de pino y pélets de procedencia de residuos agrícolas (mezcla de vid y cebada).

Detrás de esta primera etapa de la investigación se encuentra el objetivo de continuar la búsqueda y el desarrollo de fuentes de energía limpias, la mejora del rendimiento de los sistemas ya existentes y la adaptación de los mismos a las nuevas tecnologías que están en

constante evolución, con el fin de preservar el medio ambiente y reducir la contribución del ser humano al cambio climático.

1.1 ANTECEDENTES Y OBJETIVOS DEL PROYECTO TEGBIOSOL

Este Trabajo de Final de Grado se encuadra en la línea de trabajo del proyecto TEGBIOSOL, donde su origen supone la continuación de varios proyectos de investigación realizados en la Universidad de Zaragoza en los últimos años, realizados por el grupo de investigación ABIES (Agua, Biomasa, Integración y Emisiones) del Instituto Universitario Mixto CIRCE.

La biomasa es una fuente de energía renovable con un amplio potencial de desarrollo. Uno de los sectores donde su contribución puede ser mucho mayor de la que constituye actualmente, es el sector residencial, donde se utiliza en calderas de pequeña y media potencia (<500 kW). El uso de la biomasa está experimentando un crecimiento en el sector doméstico español en los últimos años. La tecnología más expandida en la península está basada en una parrilla fija que usa como combustible pélets de madera. Debido al aumento de la demanda, es necesario la incorporación de fuentes de energía de biomasa, como por ejemplo, la biomasa agrícola residual.

En las cámaras de combustión de las calderas y sus zonas cercanas se alcanzan altas temperaturas. Donde los gases pueden llegar hasta temperaturas próximas a los 1400 °C. Implantando la tecnología TEG se puede generar electricidad aprovechando estas altas temperaturas de los gases y aumentar el rendimiento global del sistema respecto a los sistemas convencionales, puesto que la energía consumida es la misma, pero el potencial de la energía eléctrica es mayor que el de la energía térmica. Los módulos TEG se adaptan perfectamente a calderas domésticas, por lo menos de forma teórica. Aunque dada la tecnología y avances que se disponen en la actualidad acerca de los TEG, existen barreras para su instalación de forma masiva y comercial debido a los costes y su escasa eficiencia.

Con el proyecto de investigación TEGBIOSOL se pretende hacer frente a diversos problemas que aparecen durante la instalación de la tecnología TEG en calderas. Es necesario asegurarse de que en la zona donde se van a integrar los dispositivos TEG se produzca el intercambio de calor deseado. Además existe un conflicto de intereses relacionados con el sistema TEG y el ensuciamiento producido durante la combustión. En la cámara de combustión o sus zonas convectivas próximas, se alcanzan las máximas temperaturas de la caldera pero son altamente problemáticas en cuanto a términos de ensuciamiento, esto reduce la eficiencia de los TEG.

Se pondrá en marcha una instalación experimental de una caldera doméstica de biomasa de 25 kW adaptada a la utilización de pélets mezcla, donde se incorporarán 9 módulos TEG en distintas zonas (zonas radiantes y convectivas de la caldera). La finalidad no es otra que alcanzar el equilibrio entre conseguir una elevada potencia (para la que se necesitan altas temperaturas del foco caliente) y un bajo nivel de ensuciamiento.

El impacto del proyecto es a nivel global, ya que contribuye a proporcionar soluciones tecnológicas al planteamiento de edificios residenciales con las nuevas políticas de bajo consumo, pero se puede aplicar al ámbito regional, puesto que en Aragón existen abundantes recursos biomásicos e importantes demandas térmicas debido a las condiciones de su clima.

1.2 OBJETIVO Y ALCANCE

El principal objetivo de este Trabajo de Fin de Grado es avanzar en el estudio de la instalación de TEG en una caldera de biomasa de 25 kW, incluyendo la selección e instalación de la instrumentación necesaria. También se elaboran protocolos relacionados con la puesta a punto y las pruebas del conjunto, necesarios para un correcto funcionamiento del sistema.

Se ha partido de una amplia revisión bibliográfica de las experiencias anteriores sobre la utilización de TEG en sistemas de producción de calor, electricidad o ambas (cogeneración) y después particularizado en calderas de biomasa, con el fin de conocer los problemas y limitaciones que han existido en el ámbito donde se desarrolla el proyecto TEGBIOSOL.

Se ha llevado a cabo la búsqueda de la instrumentación más conveniente para la toma de medidas durante la realización de las pruebas con el objetivo de regular la caldera para un óptimo funcionamiento, además de conseguir el máximo rendimiento del sistema y garantizar su fiabilidad con combustibles de biomasa problemáticos en cuanto a ensuciamiento. De esta manera se pueden obtener en el futuro conclusiones de forma experimental respecto a la adaptabilidad de los TEG y de la caldera a diferentes combustibles de biomasa, donde existen factores que se comentan durante el trabajo, que deterioran o limitan su rendimiento.

Es necesaria la elaboración de protocolos para alcanzar la repetibilidad durante el proceso de toma de muestras en la caldera y garantizar la seguridad de la persona que manipule las diferentes herramientas del conjunto.

Este TFG está enfocado en la primera etapa de un proceso de investigación en el que se quiere comprobar la rentabilidad económica y energética de los TEG en calderas de biomasa. No se pueden obtener conclusiones generales, pero sí unas primeras impresiones acerca de los combustibles que mejor se adaptan.

Con la realización de este Trabajo de Final de Grado se pretenden obtener conclusiones acerca de:

- La selección de la instrumentación necesaria y descripción general de la instalación experimental.
- La obtención de las primeras pruebas de ajuste y puesta a punto de la caldera según el combustible utilizado.
- La evaluación e interpretación de los resultados obtenidos, así como la obtención de primeras conclusiones genéricas.

1.3 CONTENIDO DE LA MEMORIA

En este apartado se muestra el contenido de los diferentes capítulos del Trabajo de Final de Grado, así como todas las acciones realizadas para alcanzar los objetivos anteriormente marcados. El documento queda estructurado de la siguiente forma:

- Capítulo 2: Estado del arte de los TEG y de combustibles experimentales de la biomasa, así como las experiencias anteriores relacionadas.

- Capítulo 3: Descripción de la instalación experimental y combustibles utilizados.
- Capítulo 4: Selección de la instrumentación que mejor se adapta a la caldera.
- Capítulo 5: Descripción de los protocolos de pruebas relacionados con el Trabajo de Final de Grado (uso del analizador de gases, manejo de la sonda de deposición y clasificación de cenizas).
- Capítulo 6: Resultados e interpretación de las pruebas experimentales preliminares realizadas.
- Capítulo 7: Conclusiones y perspectivas futuras.
- Capítulo 8: Bibliografía utilizada para la realización del Trabajo de Final de Grado.
- Capítulo 9: Índice de Imágenes y Gráficas.
- Anexos I, II, III, IV y V profundizando los temas tratados a lo largo de este trabajo.

2. ESTADO DEL ARTE

En la primera parte de este capítulo, se mostrará una información para poner en un contexto histórico, las tecnologías que se van a emplear a lo largo de este Trabajo de Final de Grado.

Durante la primera parte se repasarán los orígenes de la aparición de una tecnología relativamente reciente, hasta llegar a las aplicaciones que existen en la actualidad para los TEG. Como la biomasa es una de las fuentes de energía más antiguas, puesto que lleva utilizándose desde la aparición del fuego como fuente de energía térmica y sus orígenes son más que conocidos, se tratarán temas de la actualidad relacionados con la mejora de las tecnologías existentes para hacerlas competitivas con el objetivo de convertir la biomasa en una alternativa a los combustibles fósiles, con todas las ventajas medioambientales que esto supone.

Por último, se partirá de una revisión bibliográfica de las experiencias existentes, explicando qué es lo que se ha hecho, cómo se ha hecho y los resultados obtenidos hasta la actualidad, con sus pros y sus contras.

2.1 CONTEXTO HISTÓRICO DE LAS TECNOLOGÍAS QUE SE UTILIZAN EN EL TRANSCURSO DEL PROYECTO

2.1.1 Generadores termoeléctricos

En 1794 un físico italiano llamado A. Volta observó que una varilla de metal con los extremos sometidos a diferentes temperaturas provocó una contracción en los músculos de una rana. La única razón para que se produjera ese fenómeno era la diferencia de temperatura, porque cuando la varilla de metal se encontraba a la misma temperatura no observó ningún espasmo muscular. De esta manera, Volta descubrió la termoelectricidad. La termoelectricidad, engloba los fenómenos en los que intervienen calor y electricidad.

Poco después, Thomas Johann Seebeck, en 1821 creó un circuito cerrado uniendo dos metales de dos materiales diferentes. De forma accidental descubrió que si calentaba una de las dos uniones, manteniendo el otro metal a temperatura ambiente se producía electricidad. Así, la conversión directa de calor a electricidad en la unión de dos conductores es llamado el efecto Seebeck. También puede producirse el efecto inverso, los materiales termoeléctricos sometidos a una corriente eléctrica son capaces de producir un gradiente térmico sin pasar por energía mecánica, tal y como lo descubrieron Peltier y Thomson, en 1834 y en 1851, respectivamente. La suma de estos procesos físicos, es la base de lo se conoce a día de hoy como la termoelectricidad.

No obstante, pasó mucho tiempo para que aparecieran las primeras investigaciones con el fin de adaptar este fenómeno a la vida cotidiana. En Bellucci et al., (2021) se tratan los orígenes de esta reciente tecnología.

Los primeros estudios datan de inicios de la década de 1910, donde se buscaron aplicaciones tanto civiles como militares, con el objetivo de desarrollar y aprovechar sus propiedades. La eficiencia de los TEG por aquella época era muy pobre. A inicio de los años 50, A.F. Ioffe

promovió el uso de semiconductores dopados para mejorar su rendimiento, lo que derivó en la fabricación del primer TEG comercial basado en semiconductores, donde la fuente de alimentación térmica era una lámpara de aceite y era capaz de alimentar una radio. A partir de ese momento, muchos científicos estaban convencidos del potencial de la termoelectricidad para sustituir los refrigeradores. El crecimiento exponencial del mercado de los semiconductores, junto con el progreso en el procesamiento de los mismos, llevó a los TEG a una mayor explotación comercial.

Sin embargo, durante los años sesenta el interés por la termoeléctrica se redujo, principalmente por razones científicas y comerciales. Con los medios que se disponía en esa época, los científicos eran incapaces de seguir aumentando el rendimiento de los TEG. Aunque el principal motivo fue el éxito de la difusión comercial de las pilas alcalinas. En consecuencia, los TEG y los sistemas de refrigeración termoeléctricos quedaron relegados a aplicaciones más específicas, como la generación de energía en el espacio o la refrigeración por Peltier en pequeños refrigeradores.

Un ejemplo de estas aplicaciones, son los TEG radioisotópicos que se han utilizado durante mucho tiempo en el ámbito aeronáutico. Han sido fuente de energía de satélites y sondas espaciales como las Sondas Voyager 1 y 2 o incluso para naves espaciales empleadas en misiones lunares como las de Apolo 12 y 13.

El nuevo milenio comenzó con un despertar respecto al interés en los TEG. Al igual que la crisis que ocurrió en los años 60, la motivación es doble: La necesidad en la búsqueda de fuentes de energía alternativa a escala mundial y la aparición de nanotecnologías que han permitido la aparición de materiales termoeléctricos complejos pero económicos, en los que las propiedades térmicas y eléctricas pueden optimizarse. Aun así, a día de hoy, las bajas eficiencias (que no son superiores al 10%) han limitado sus aplicaciones a determinados usos medicinales, militares y espaciales, en los que el precio no es el parámetro clave. Como se ha comentado, el abanico de uso de los TEG es muy amplio ya que solo basta con la existencia de un gradiente térmico entre dos puntos para poder beneficiarse de sus ventajas. Los usos actuales de los TEG, se pueden englobar en 5 categorías (Champier, 2017):

- Generación de electricidad en ambientes extremos: La producción de electricidad en ambientes extremos debe cumplir con un conjunto de especificaciones muy estrictas. Estas suelen ser aplicaciones críticas que requieren una fuente de energía altamente fiable durante períodos muy largos. El mantenimiento tiene que ser inexistente, puesto que el acceso a los lugares donde se instalan estos dispositivos es complicado. Las consideraciones económicas pasan a un segundo plano y para la selección de los módulos se tienen en cuenta otros factores como la fiabilidad. Como puede ser la producción eléctrica en el espacio a partir del calor liberado por materiales radioactivos (Jaziri et al., 2019).
- Recuperación del calor residual: El objetivo es optimizar las fuentes de calor convencionales que son generalmente motores de combustión internos alimentados por combustibles fósiles, con la intención de recuperar la energía térmica que es desaprovechada durante su conversión en electricidad o trabajo. La industria del transporte es uno de los sectores que más esfuerzos hace en incorporar el uso de los TEG, como puede ser el aprovechamiento del calor residual del radiador de un coche (Abderezak & Randi, 2020).

- Descentralización y cogeneración de calor y electricidad en sistemas de generación: Los ejemplos de este apartado se comentan en último apartado de este capítulo, ya que son objeto de estudio en este trabajo.
- Microgeneración para sensores y microelectrónica: Donde se pueden utilizar todas las fuentes de calor existentes puesto que las potencias demandadas son muy bajas. Un ejemplo de aplicación sería para uno de los grandes descubrimientos de este siglo, lo que se conoce como Internet of Things (Internet de las Cosas), que consiste en la recopilación de datos sin intervención humana a través de la comunicación de equipos inteligentes como sensores. Estos sensores pueden ser alimentados mediante la utilización de energía renovable procedente de los TEG (Pourkiaei et al., 2019).
- La utilización de los TEG junto a la energía solar: El objetivo consiste en aumentar el rendimiento del sistema como conjunto. La idea es simple, utilizar el calor del Sol como fuente de calor para los módulos TEG. Se pueden utilizar de diversas formas, como por ejemplo, concentrar el flujo solar utilizando concentradores térmicos u ópticos o acoplarlos en paneles híbridos (producción de electricidad y agua caliente) y aprovechar esos gradientes térmicos. Bhukesh et al., (2019) muestra el potencial acerca del uso de TEG en una central de energía solar en la India.

Las ventajas de la termoelectricidad hacen atractiva la utilización de TEG con el objetivo del máximo aprovechamiento térmico. Otros factores a tener en cuenta son el escaso mantenimiento que requieren, lo silenciosos que son o su adaptabilidad a cualquier clima. Sin embargo, su uso se encuentra limitado por el rendimiento de los materiales que se disponen en la actualidad, haciendo que sean menos rentables que otros sistemas de producción eléctrica. Además el elevado coste que conlleva la adquisición de los módulos, es otro factor a tener en cuenta. Estos problemas respecto al rendimiento y al precio, deberían ir atenuándose con la llegada de nuevas tecnologías.

2.1.2 Energía procedente de la biomasa agrícola

En la actualidad, los combustibles fósiles como el petróleo, el carbón y el gas natural representan las principales fuentes de energía del mundo. Sin embargo, se prevé que estas fuentes de energía se agoten en los próximos 40-50 años (Saidur et al., 2011). Además, los daños medioambientales esperados debido al abuso de los combustibles fósiles son desoladores. El aumento del calentamiento global, la lluvia ácida o el aire altamente contaminado de las grandes ciudades está a la orden del día.

Los proyectos relacionados con la biomasa están pasando el primer plano en los últimos años. Según la Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA), la biomasa se convertirá en la fuente de energía renovable más importante para 2030. Se piensa que el uso de la biomasa podría crecer entorno a un 3,7% anual de 2010 a 2030, lo que viene a ser dos veces más rápido de lo que ocurrió de 1990 a 2010. Según IRENA (2014) la demanda de biomasa en todo el mundo aumentaría de 56 EJ en 2010 a 108 EJ para 2030 (Bajpai, 2020).

El uso de la biomasa con fines térmicos, está sufriendo un crecimiento notable en el sector doméstico español. La tecnología usada actualmente está basada en una parrilla fija adaptada a la combustión de lo que se puede considerar biomasa de alta calidad (pélets de madera). Aparte de su alto rendimiento sobre el PCI, este combustible destaca por sus bajas emisiones tanto de material gaseoso como particulado, si se realiza la combustión correctamente.

El ser humano está constantemente buscando combustibles más baratos que el carbón, petróleo o gas. Debido al aumento de la demanda, es necesario la incorporación de fuentes de energía de biomasa procedente de otros orígenes. La Tierra tiene una gran variedad de biomasa que puede ser aprovechada para la producción energética y el aumento de la demanda puede ser suplido a través de los residuos que genera el sector agrícola.

A diferencia de los cultivos energéticos, cuando se habla de biomasa residual agrícola, se engloban los residuos de cultivos herbáceos y podas de cultivos leñosos permanentes que se crean de manera indirecta en una explotación agrícola. Esto quiere decir que se aprovecha para producción energética, elementos que hasta ahora no eran utilizados. Sin embargo, es cierto que la conversión térmica de la biomasa agrícola, principalmente de tipo herbáceo, muestra claras diferencias en comparación a la biomasa forestal, que es la fuente energética más expandida y de la que más datos acerca de la combustión se conocen.

En este Trabajo de Final de Grado se utilizan pélets de mezcla de vid y cebada. La caldera se comporta de forma diferente según los pélets utilizados. Será necesario hacer frente a problemas que pueden aparecer en las instalaciones de conversión debido a las cenizas que se generan (cantidad y composición).

Según Royo et al., (2020) y (2021) los problemas que aparecen con el uso biomasa de procedencia de residuos agrícolas son múltiples. Durante la combustión las cenizas sufren transformaciones tanto físicas como químicas que causan el fraccionamiento y puede llegar a sinterizar. Además la abundante presencia de compuestos metálicos alcalinos en el combustible provoca condensación por deposición en las superficies de los intercambiadores. También algunas de las fracciones más finas que se dan a cabo durante el proceso de combustión pueden ser emitidas en forma de aerosoles a la atmósfera, causando enfermedades respiratorias muy perjudiciales para los seres humanos. Estos fenómenos afectan negativamente en el sistema (emisiones descontroladas, reducción de eficiencia y vida útil de la caldera, etc.) y se deben tener en consideración.

No obstante, existen otros factores que afectan al comportamiento de las cenizas aparte de la composición química del combustible. Las condiciones de combustión en el lecho, relacionadas con el diseño o el modo de operación también influyen, especialmente en las calderas de parrilla, como es el caso para el proyecto TEGBIOSOL y este trabajo. Será necesario tener en cuenta, factores como el flujo de aire de entrada en la caldera, la cantidad de pélets con los que se alimenta la caldera, etc.

Durante las últimas décadas, se ha estado trabajando en la identificación de factores clave en la conversión de biocombustibles. Aunque la mayoría de las investigaciones publicadas hasta ahora se refieren a la biomasa forestal, que es mucho menos problemática en estos aspectos que la biomasa agrícola, en todos ellos se ha reconocido la influencia negativa de la composición química de las cenizas.

El objetivo principal no debe ser otro que maximizar la contribución de la biomasa al consumo total energético. Para ello es necesario trabajar en minimizar las pérdidas de conversión,

continuar con la búsqueda o el desarrollo de combustibles de biomasa cada más eficientes y reducir los costes de producción y tratamiento, compitiendo directamente con los combustibles fósiles.

2.2 EXPERIENCIAS DE TEG EN SISTEMAS DE PRODUCCIÓN ENERGÉTICOS

El aumento de la población conlleva un incremento de la demanda energética, que junto a la esperada escasez de los combustibles fósiles, hace necesaria la investigación y el desarrollo de recursos y sistemas de producción energéticos sostenibles. Las soluciones a estos problemas pueden ser entre otras, el uso de combustibles limpios (como es el caso de la biomasa) y el máximo aprovechamiento de la energía térmica producida (donde los TEG pueden ocupar un papel fundamental). Teniendo en cuenta la baja eficiencia actual de los TEG comerciales, no es la mejor opción utilizarlos como productor de energía independiente, sino como un sistema complementario. La mayoría de los proyectos actuales que se refieren al uso TEG en sistemas de producción energética (calor, electricidad o cogeneración), suponen un extra que se instala en los sistemas de generación con el fin de producir mayor cantidad de energía eléctrica a partir de un gradiente térmico.

El uso de TEG con la meta de producción eléctrica es muy amplio. Una experiencia de carácter industrial se relata en un estudio realizado por el departamento de Ingeniería Industrial de la Universidad de Bolonia (Bianchini et al., 2014), dónde se reproducen las condiciones de trabajo de una planta energética de biomasa, en la que se instalan TEG comerciales, con un rendimiento aproximado del 5%. Debido a la escasa eficiencia, no existe la posibilidad de generar energía eléctrica a partir de los TEG para el suministro externo, pero si se puede crear una planta energética de biomasa independiente. Se llegó a la conclusión de que la integración de estos sistemas en la planta energética no solo supone una mejora en el rendimiento general, sino que también se incrementa la seguridad del sistema ya que los sistemas auxiliares que necesitan electricidad del exterior para su funcionamiento, no se verían afectados si se corta el suministro de la red eléctrica general.

Chen et al., (2010), evalúa la eficiencia de la integración de los TEG en los sistemas de cogeneración. Existen tres zonas potenciales: La primera opción consiste en colocar los TEG entre el generador y la caldera de calor residual, aprovechando la diferencia de temperatura entre el gas de salida del generador y el refrigerante. Otro lugar en el que se puede posicionar es en la salida de la caldera, en este caso se aprovecha el gradiente de temperatura entre los gases y la temperatura ambiente. Por último, se pueden colocar los dispositivos en el condensador para aprovechar la diferencia de intercambiadores de calor tradicionales y producir electricidad aprovechando esas pequeñas diferencias de temperatura.

También se pueden utilizar en el ámbito doméstico, como muestra una investigación realizada acerca del uso de la tecnología TEG en una caldera de gas natural (Zhao et al., 2017). A lo largo de este documento se analizan diferentes alternativas de uso de los TEG en calderas de gas para la producción de electricidad a partir del aprovechamiento del calor residual y además proponen la humidificación de dicho gas (que es la fuente de calor residual) como una mejora para aumentar el rendimiento de los TEG.

Estos ejemplos muestran la aplicación de los TEG en diferentes ámbitos relacionados con la producción energética, ya sea para generar calor, electricidad o ambas, aunque no es el caso a

tratar en este Trabajo de Final de Grado. Este trabajo se centra en la combinación de una caldera doméstica alimentada mediante biomasa, con módulos termoelectricos para aprovechar las altas temperaturas que alcanzan los gases en su interior y producir electricidad, que además de no reducir la eficiencia en términos del objetivo principal (producción de energía térmica), proporcionan una energía eléctrica extra al sistema.

Antes de mostrar los ejemplos relacionados con calderas de biomasa en las que se han introducido TEG para la producción de energía eléctrica extra, es necesario mostrar las primeras experiencias que aparecieron con las estufas tradicionales puesto que son mecanismos más simples y han servido en muchos casos como referencia antes de adentrarse en la implantación de esta tecnología en calderas de biomasa. Son proyectos de mayor simplicidad y por lo tanto más abundantes en la base de datos

La primera estufa con TEG fue desarrollada en Suecia en 1990, por el KTH Royal Institute of Technology (Najjar & Kseibi, 2017). Se utilizaron estufas en zonas rurales del país, donde se instalaban TEG en las zonas de la caldera donde la temperatura fuera mayor para conseguir el mayor gradiente de temperatura posible y por lo tanto la máxima energía eléctrica. El mejor resultado se obtenía por la mañana con 10 W de potencia cuando la temperatura del ambiente era mínima. La salida media oscilaba entre los 4 y 7 W.

Gao et al., (2016) realiza una amplia evaluación tecnológica y económica en la instalación de la tecnología TEG en estufas de biomasa. El estudio analiza diferentes formas de implantación de los dispositivos en la estufa además de comentar las variantes de refrigeración del foco frío que supone uno de los principales problemas en este tipo de sistemas. Sornek et al., (2016) trata el alto potencial de los TEG en estufas con sistemas de acumulación de calor para proporcionar un funcionamiento autosuficiente.

La aplicación de estos sistemas en estufas tradicionales, tiene un alto potencial en países subdesarrollados, ya que las estufas para producir calor o agua caliente, están a la orden del día. El 77% de la población en la África Subsahariana y un 74% en el Oeste Pacífico y Sudeste Asiático utilizan este tipo de sistemas (Rehfuess et al., 2011). En muchos de esos lugares, no hay acceso a la electricidad y una posible mejora de la calidad de vida, es colocar estos generadores en diferentes partes de la estufa, que además de aumentar la eficiencia inicial de los sistemas convencionales, permiten la alimentación de dispositivos que en muchos lugares no se pueden utilizar ya que más del 20% de la población mundial de los países en desarrollo vive sin electricidad (Najjar & Kseibi, 2017). Proporcionar un mínimo necesario a las personas para cubrir las necesidades mínimas puede ser muy caro para estos países ya que se necesitarían centrales eléctricas y la construcción del tendido eléctrico para transportarlo a dichos lugares. La colocación de TEG en las estufas puede ser una solución muy interesante que permite almacenar la energía en baterías para alimentar aparatos básicos o alumbrado de casas y suplir algunas de las necesidades básicas.

La eficiencia de las estufas es menor que la de las calderas (alrededor del 30%). Debido a la combustión que se produce en su interior, la estufa alcanza temperaturas superficiales superiores a los 200°C. Kütt et al., (2018) señala que la instalación de los TEG en la superficie es relativamente sencilla y proporciona excelentes temperaturas para el foco caliente de los TEG. El problema viene cuando se desea alcanzar la refrigeración de la parte fría, puesto que supone un desafío. Mediante refrigeración pasiva, se necesitan grandes superficies en contacto con el aire y no se consigue una buena refrigeración de la parte fría (alrededor de 100°C). El uso de disipadores térmicos con refrigeración o una refrigeración por aire forzado mediante

ventiladores, aumenta el rendimiento de los generadores pero supone un aumento significativo en la complejidad y precio de las estufas.

Los estudios llevados a cabo en los que se combinan calderas comerciales con TEG no son muy abundantes, especialmente si el combustible utilizado es la biomasa.

Una experiencia que tiene muchas similitudes con el proyecto TEGBIOSOL es la investigación de Alanne et al., (2014), donde se realiza una simulación computacional de una caldera utilizada en una vivienda unifamiliar en Finlandia, con una potencia de 20 kW que se alimenta a base de pélets de madera. La cámara de combustión y los tubos de convección son sustituidos por una estructura termoeléctrica y se analiza el coste y las potenciales emisiones. Los resultados revelan que se puede satisfacer casi un 50% del consumo eléctrico del domicilio, además de reducir el uso de la energía primaria no renovable en un 11% y las emisiones de CO₂ en un 21% con respecto a las condiciones iniciales anteriores al experimento.

Aparte de las simulaciones, en Moser & Friedl, (2008) se realiza el diseño, construcción, montaje y puesta en marcha de un prototipo de caldera de biomasa en la que se le instala la tecnología TEG con el objetivo de mostrar el potencial de estos sistemas de forma experimental y respaldar los estudios teóricos. Obteniendo 168 W a partir de los TEG en una caldera de 11kW alimentada por pélets de madera.

Dentro de las calderas, la colocación de los TEG es fundamental a la hora de aprovecharlos al máximo. De ahí la importancia de las pruebas experimentales realizadas para la realización de este Trabajo de Final de Grado, ya que se obtienen datos que permiten posteriormente seleccionar el dispositivo TEG que mejor se adapta a las condiciones de trabajo de la caldera. Al igual que para las estufas, Kütt et al., (2018) muestra los mejores lugares donde situar los TEG en las calderas. Lo ideal sería la instalación en la superficie de la cámara de combustión, donde se alcanzaría el máximo rendimiento de los TEG puesto que es donde se encuentran las máximas temperaturas. Otra opción es la zona donde se expulsan los gases de combustión, que es la zona más fácil donde alojarlos pero también la de menor rendimiento puesto que el gradiente de temperaturas es menor que en otros sitios. Esto sería factible si la caldera no fuera como la del proyecto, que es una caldera de condensación. Ya que este tipo de calderas consiguen rendimientos superiores al 100% con respecto al Poder Calorífico Inferior (recuperando parte del calor latente del vapor de agua y que en las calderas convencionales se desperdicia) y por lo tanto no se puede aprovechar más energía en esa zona de la caldera. Por último, se pueden posicionar en la zona de los intercambiadores convectivos de calor de la caldera, donde las temperaturas no son tan altas como en la cámara de combustión abaratando costes, pero sí lo suficientemente elevadas para producir una potencia significativa.

3. INSTALACIÓN EXPERIMENTAL

3.1 DESCRIPCIÓN DE LA CALDERA E INSTALACIÓN AUXILIAR

La instalación experimental donde se va a realizar el Trabajo de Final de Grado consta de una caldera comercial de condensación de 25 kW alimentada por pélets de biomasa de diferentes composiciones (pélets de madera de pino y pélets de residuos de procedencia agrícola). La caldera utilizada ha de ser adaptada a los requisitos necesarios para las pruebas experimentales y pertenece a la marca BioCurve, concretamente el modelo BCH25.

En un uso tradicional, el calor que se genera en la caldera se utilizaría para la producción de agua caliente sanitaria (ACS) o para calefacción. Como la caldera del proyecto se encuentra en un laboratorio y no se busca utilizarla para las aplicaciones reales, se ha instalado un aerogenerador que disipa el calor producido en la caldera, simulando las transferencias de calor que se generan en el día a día ya sea por el consumo de agua caliente o en sistemas de calefacción. Al circuito inicial se le añadirá un caudalímetro, varios manómetros y unos termopozos, que serán de gran utilidad para la toma de datos a lo largo del desarrollo del proceso de pruebas. Además de una desviación en el tramo de agua refrigerada, que pasará por la zona fría de los dispositivos TEG y servirá de refrigeración.

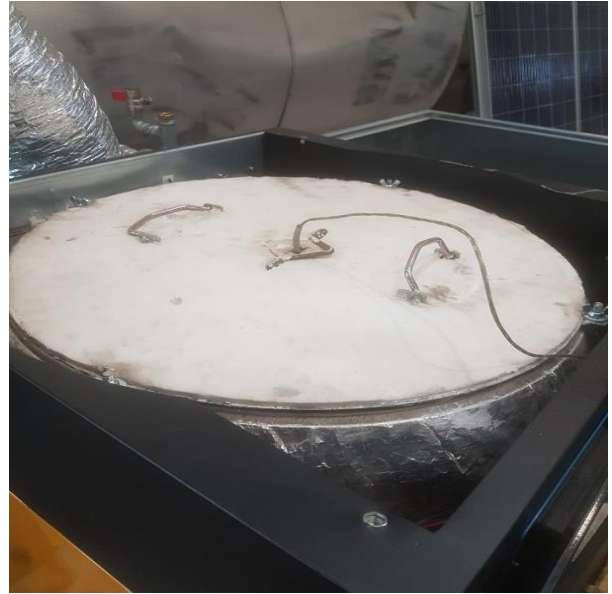
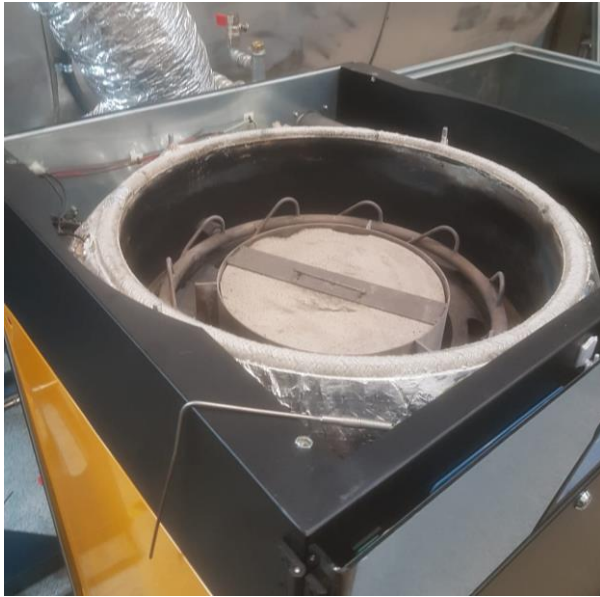
Aparte de los termopares y sondas que se disponen en la caldera, se instalarán termopares para la toma de datos que permitirán conocer de mejor forma el rendimiento de la instalación y comprobar que el rango de temperaturas a los que se someten los TEG no sean mayores a las que son capaces de soportar estos dispositivos.

La chimenea dispone de una abertura para introducir un analizador de gases que permitirá conocer datos más precisos acerca de la combustión y adaptar la caldera a los diferentes biocombustibles utilizados.

Se han determinado dos zonas de la caldera para la instalación de los TEG:

-Parte superior de la caldera: El foco caliente de los dispositivos TEG estará en contacto con los gases a altas temperaturas del interior mientras que el foco frío se refrigerará con agua del sistema de abastecimiento tras pasar por el aerogenerador a partir de una ramificación que se ha instalado en los conductos de agua del circuito de retorno (imágenes 1).

-Zona de alimentación: En la estructura de alimentación donde se alojan el tornillo sinfín, el encendedor y la caja de vientos, se instalarán generadores TEG con el foco caliente en contacto con los gases del interior de la caldera y el foco frío se refrigerará con el aire de combustión a temperatura ambiente (imágenes 2).



Imágenes 1 . Localización de los TEG parte superior de la caldera



Imágenes 2 . Localización de los TEG en el sistema de alimentación

3.2 COMBUSTIBLES

Los combustibles utilizados en las pruebas experimentales se fabrican a partir de biomasa con diferentes características relacionadas con la conversión térmica. La principal diferencia entre estos combustibles es la tendencia al ensuciamiento. Se utilizará como combustible pélets de madera de pino (PP) que tienen una tendencia al ensuciamiento relativamente baja y pélets de mezcla (PA) a partir de biomasa residual agrícola (vid y cebada) con alta predisposición. Será necesario adaptar diferentes parámetros de la caldera como el exceso de aire o la velocidad de

alimentación del tornillo sinfín para adaptarla a cada uno de los combustibles utilizados en el proyecto y en este trabajo. La composición química se puede observar en la tabla 1.

		PP	PA
Densidad aparente (kg·m⁻³)		674	562
Análisis aproximado (% m/m b.s)	Materia volátil	84.2	72.4
	Carbono fijo	15.4	21.7
	Cenizas	0.4	5.9
Humedad total (% m/m b.h.)		7.2	9.1
Análisis definitivo (% m/m b.s.)	Carbono	50.9	46.36
	Hidrógeno	6.1	5.77
	Nitrógeno	0.09	0.56
	Azufre	< 0.01	0.055
	Cloro	0.01	0.047
	Oxígeno	42.49	41.29
PCS (MJ·kg⁻¹)		20.43	18.54
PCI (MJ·kg⁻¹)		17.55	15.48

Tabla 1 Composición química de los pélets de pino (PP) y pélets de mezcla de vid y cebada (PA)

4. INSTRUMENTACIÓN

En cualquier proceso, la búsqueda de la eficiencia es indispensable. En el caso de las calderas, existen instrumentos de medición que permiten controlar una serie de parámetros que garantizan el correcto funcionamiento del sistema. Por estos motivos es importante el empleo de equipos de medición.

La supervisión de la temperatura (mediante termómetros) o el caudal de fluidos (utilizando caudalímetros) es una herramienta de diagnóstico y corrección fundamental para alcanzar la máxima eficiencia de la instalación, permitiendo la adaptación de la caldera a las características de cada combustible, reduciendo en la medida de lo posible, la sinterización de las cenizas, la deposición o la corrosión, que provoca problemas durante la conversión térmica y reduce la vida útil de los aparatos. Además, monitorizar una serie de parámetros críticos permite llevar un mantenimiento preventivo de la caldera, actuando antes o justo en el momento del posible fallo, garantizando la integridad de las personas que trabajan en su entorno y de los equipos que conforman la instalación.

El objetivo de este capítulo no es otro que analizar de forma genérica la instrumentación existente para el control de temperatura y caudal másico, de los gases, el agua y el aire que fluyen en distintas condiciones y zonas de la caldera. Se pretende finalizar con la selección de la tecnología que mejor se adapte a las necesidades y condiciones de trabajo.

Si se desea consultar con mayor profundidad los motivos de la selección de los instrumentos de medición se puede consultar el Anexo I.

4.1 TERMÓMETROS

La temperatura es uno de los parámetros más importantes que debe monitorizarse. En el caso de la caldera de biomasa, las temperaturas de los gases pueden alcanzar valores muy altos. Estos dispositivos no solo tienen que soportar las altas temperaturas sino que como se ha comentado en otros apartados, el combustible utilizado es potencialmente problemático y favorece la deposición de elementos indeseados en zonas críticas del sistema que son responsables de la aglomeración, el ensuciamiento, la corrosión y la erosión. Es importante que el aparato que se escoja tolere de forma adecuada este entorno de trabajo.

Para realizar el seguimiento y la toma de datos de las temperaturas que se alcanzan en distintos puntos de la caldera, existen dos soluciones comerciales. Los termopares y las termorresistencias. No se puede recomendar un tipo de sensor específico, ya que existen numerosos factores a tener en cuenta para escoger el adecuado. Las características de un sensor que para un proceso son ventajosas, para otro son limitantes o perjudiciales. Lo primero es conocer las condiciones de trabajo a las que van a ser sometidos. Una vez que se conozcan estos requisitos, se estará en posición de escoger el instrumento que mejor se adapte a la caldera de condensación.

4.1.1 Selección de la instrumentación para la medición de la temperatura

Mediciones de la temperatura del agua:

Para la selección de termopares que tendrán como función medir la temperatura del agua, es necesario tener en cuenta que la presión del circuito es la de red (máximo 4 bares) y los rangos de temperatura no son lo excesivamente elevados como para ser una característica limitante. En este caso, existe un recubrimiento para proteger el sensor, llamado termopozo ideal para la utilización de sensores de medición sumergidos en agua. Se ha decidido el uso de esta funda puesto que protege el instrumento de medida contra los daños provocados por la corrosión, aumentando su vida útil.

Los termopozos se clasifican según el diseño del vástago. Existen dos tipos, pueden ser rectos conservando el mismo diámetro en toda su longitud de inserción y los escalonados tienen una reducción del diámetro cerca de la punta. El área reducida de superficie permite velocidades más suaves y respuestas más rápidas de los dispositivos de detección térmica. Los termopozos se conectan a un termopar de diferentes formas, algunas de las más utilizadas son el termopozo roscado, el soldable, para conexión soldable, junta tórica o el termopozo bridado.

El material de este dispositivo de protección es una característica importante a tener en cuenta. En este caso en particular, se va a destinar su uso en agua donde las temperaturas no son excesivas (de 5-90 °C). Se ha decidido utilizar el acero inoxidable, ya que es económico, tiene buenas prestaciones y cumple con las necesidades de proteger el termopar.

Otro factor a tener en cuenta respecto a los termopozos, es la longitud de inserción. Es necesario que sea lo suficientemente larga para que toda la parte sensible del sensor se encuentre en el medio a medir.

Medición de la temperatura del aire:

Es el ambiente menos restrictivo de los tres donde se van a proceder a realizar mediciones. En este caso cualquier termopar puede servir. Las temperaturas se encontrarán en todo momento en un rango de 5 a 50 °C.

Medición de la temperatura de los gases:

Es el entorno en el que mayores dificultades y limitaciones se encuentran. Las temperaturas de los gases que se desean medir van desde los 200°C a los 1400 °C. En experiencias previas y debido a las condiciones de combustión que se dan en la caldera, este tipo de termopares han acabado siendo fungibles, puesto que aproximadamente cada 20 horas de uso era necesario cambiarlos. Si se quiere seguir en esa misma línea, es importante encontrar un sensor que se adapte bien a las condiciones de la caldera pero sobre todo tiene que ser barato, porque si se necesita cambiarlo en cortos periodos de tiempo, es un importante gasto a tener en cuenta. La otra opción es buscar un termopar que aguante mejor las condiciones concretas para este tipo de usos y realizar una inversión más costosa pero también más duradera a lo largo del tiempo.

Se han visto los principios de funcionamiento de los dos tipos de termómetros que a priori son útiles para la toma de datos de temperatura en diferentes zonas de la caldera. Después de haber realizado un amplio estudio sobre las posibilidades existentes, el uso de termopares es el más adecuado para monitorizar las temperaturas de distintas zonas de la caldera por varios motivos:

Las ventajas de estos dispositivos son varias, destacan por su bajo costo (diseño simple) y su larga vida útil (ausencia de conjuntos complejos y elementos de fricción). Además el amplio rango de medidas que ofrecen y su fácil montaje y desmontaje en la instalación los convierten en una opción interesante. Su versatilidad es otro factor a tener en cuenta ya que existen termopares con diámetros muy pequeños (1 mm o incluso inferiores) permitiendo su instalación en zonas en las que existen restricciones de espacio.

También existen razones económicas. El coste de las termorresistencias suele ser de 2 a 3 veces mayor que los termopares. Esto se debe a que las termorresistencias son dispositivos con diseños más complejos y, por tanto, más caros.

Su principal limitación está en la exactitud, pues es fácil obtener errores del sistema cuando se trabaja con precisiones inferiores a 1°C, aunque esto no supone un problema para las necesidades concretas de este Trabajo de Final de Grado.

Después de analizar la instrumentación comercial disponible para monitorizar la temperatura de distintos fluidos de la caldera, se puede concluir que la mejor decisión sería comprar un mismo tipo de termopar para la medición en los tres ambientes. Esto se debe a que se simplifica el proceso de compra y de inventario. La selección se realiza teniendo en cuenta las necesidades para el registro de la temperatura de los gases, ya que es el entorno limitante. Los termopares tipo K o tipo N son los que mejor se adaptan a la caldera de condensación.

4.2 CAUDALÍMETROS

El caudal de fluidos como gas, aire y agua en circuitos primarios de calderas es un parámetro a tener en cuenta. Un caudalímetro es un instrumento usado para medir caudal volumétrico o másico de un gas o líquido que circula a través de un conducto o tubería. Para su correcta selección es necesario conocer los requisitos generales del sistema.

A la hora de instalarlos, existen una serie de consejos y consideraciones que son aplicables de forma genérica a la mayoría de los instrumentos. Sirven de guía para evitar problemas en la toma de datos y en ningún momento tienen que sustituir a las recomendaciones del fabricante que vienen en el manual de instrucciones. Respecto a la ubicación de los medidores de flujo, muchos de ellos para su correcto funcionamiento se deben encontrar en tramos rectos a una distancia determinada de elementos que perturben el paso del fluido como son los codos o estrechamientos. Además, es recomendable que no estén expuestos a fuertes temperaturas o vibraciones, porque son factores que pueden influir negativamente en la toma de datos.

4.1.2 Selección de la instrumentación para la medición del caudal

Medición de caudal de agua en la instalación:

Se ha decidido el uso del caudalímetro electromagnético para la medición del flujo de agua en la instalación experimental. Son muy precisos a la hora de realizar mediciones en sustancias conductoras. Además no causan problemas de pérdida de carga porque no obstaculizan el paso del flujo. La deposición en el interior de los tubos no es un factor a tener en cuenta en la instalación experimental ya que es un circuito cerrado. La tubería debe estar siempre llena de fluido y se puede utilizar tanto en tuberías verticales como horizontales. El mantenimiento que requiere este dispositivo es nulo aunque es necesaria una inspección periódica.

Medición del caudal de los gases y el aire:

Para medir el caudal de los gases y el aire, la mejor opción es el uso de anemómetros de hilo caliente. Tienen un amplio rango de uso y sirven para tubos de todo tipo de diámetros. Su instalación es muy sencilla, simplemente hay que atornillarlo en la tubería y que quede alineado con el centro de la misma. Otros de los motivos por los que se ha seleccionado es que carece de partes móviles, lo que elimina prácticamente todo tipo de mantenimiento y problemas de envejecimiento con estos mecanismos.

5. PROTOCOLOS DE PRUEBAS:

Este capítulo está destinado a mostrar en líneas generales el modo de operación de algunas de las acciones experimentales que se desarrollan a lo largo del proyecto TEGBIOSOL. La realización de los protocolos tiene gran importancia puesto que muestran la forma correcta de proceder o de manejar un instrumento con el objetivo de alcanzar la repetibilidad, asegurando que la toma de datos sea lo más exacta posible. Otra de las finalidades es garantizar la integridad de dichos instrumentos (ya que algunos son delicados), así como la seguridad de la persona que manipule las diferentes herramientas durante el proceso.

En este capítulo se tratan los aspectos generales a tener en cuenta a la hora de manipular instrumentos como el analizador de gases y la sonda de deposición. También se ha redactado un protocolo acerca de cómo se debe realizar la clasificación de cenizas.

Los protocolos de pruebas completos se encuentran en los Anexos al final del trabajo.

5.1 PROTOCOLO DE USO DEL ANALIZADOR DE GASES

En esta sección se comenta la forma de proceder para el correcto uso del analizador de gases. Se ha partido de un protocolo ya existente de una instalación similar (reactor experimental) y se ha adaptado a las condiciones de trabajo de la caldera de 25 kW. El objetivo no es otro que mostrar la forma correcta de manipular el analizador de gases para que los resultados de las medidas realizadas sean fiables y evitar que se vean afectadas por factores externos (contaminación de pruebas, errores de manipulación de la instrumentación, etc.)

Este protocolo trata del manejo de un analizador de gases que se va a utilizar en una caldera comercial, pero en términos generales es aplicable a cualquier mecanismo en el que se produzca una combustión y se desee analizar los gases de escape.

El procedimiento completo se encuentra en el Anexo III pero existen algunas consideraciones necesarias a tener en cuenta para evitar el dañado del equipo durante el transcurso de la operación.

Respecto a la preparación y comprobaciones previas, es necesario comentar que viene desmontado en una funda y se debe conectar las diferentes partes de la sonda al equipo con delicadeza, puesto que son instrumentos sensibles, así como comprobar el estado de los dos filtros que se disponen (en la manguera y en el analizador). Antes de usar el aparato, para evitar problemas de condensación de los gases, es necesario calentar el dispositivo que se va a introducir en la chimenea para analizar las emisiones durante aproximadamente 30 minutos.

Cuando se introduce la sonda del analizador en la chimenea, se intentará que quede el instrumento de medición en la parte media, se tendrá cuidado en evitar infiltraciones de aires alrededor de la sonda y además debe insertarse por el orificio de medición lo más recto posible.

5.2 PROTOCOLO DE USO DE LA SONDA DE DEPOSICIÓN Y PESADA DE ANILLOS

Para la realización de este protocolo se ha partido de 2 protocolos independientes (uso de la sonda de deposición y pesada de anillos) de una instalación con características similares (reactor experimental). Debido a que estas acciones son complementarias, se ha decidido elaborar 1 protocolo global en el que se trata el uso de la sonda de deposición y el proceso de pesaje de los anillos, con el fin de mostrar en un mismo documento de principio a fin cómo proceder en la recolección de muestras durante las pruebas en la caldera de condensación.

El objetivo no es otro que asegurar la correcta manipulación de la sonda y los anillos de deposición, para conseguir unos resultados fiables y reproducibles. Los datos que se obtienen de estas acciones permiten analizar y prever el comportamiento del combustible en función de las cenizas que se generan.

Respecto al protocolo de la sonda de deposición, es importante comprobar y verificar la instrumentación que se utilizará durante las pruebas de combustión. También se busca aclarar cualquier duda acerca de la manipulación y manejo de la sonda durante la inserción y extracción de la misma en las diferentes zonas de la caldera. La parte que está relacionada con el proceso del pesaje, tiene como objetivo la preparación de los anillos de cara a su utilización durante las pruebas de combustión, obteniendo un ratio de deposición para una prueba y condiciones concretas.

La sonda es introducida en los equipos de la instalación experimental en los orificios que han sido preparados para ello. Es necesario insertarla donde se quiere tomar la muestra con mucho cuidado ya que un roce o golpe puede desplazar los termopares o contaminar la zona de muestreo. Además el operario se debe asegurar de que la zona de acceso quede sellada para que el aire exterior no interfiera en la muestra tomada.

El tiempo de muestreo será del orden de 15-60 minutos y la regulación del aire se realizará mediante una válvula de la instalación de aire comprimido, para conseguir que la temperatura del casquillo del instrumento alcance las condiciones que se pretendan simular en función de la prueba. Durante el tiempo que se realiza la toma de muestras se debe conseguir que las condiciones de la combustión (entrada de combustible, caudal y temperatura de los gases, emisiones, etc.) permanezcan estables.

Al igual que la inserción, la retirada se debe realizar con el mismo cuidado. A los motivos anteriores comentados, se le suma el inconveniente de que cualquier roce puede invalidar la prueba. Los casquillos que contienen la muestra deben introducirse en un recipiente hermético numerado para diferenciar las diferentes condiciones de trabajo para el posterior análisis.

El protocolo detallado del procedimiento de manejo de la sonda de deposición y pesada de anillos se puede consultar en el Anexo IV.

5.3 PROTOCOLO DE CLASIFICACIÓN DE CENIZAS

Al igual que para los otros protocolos de este Trabajo de Final de Grado se ha partido de varios protocolos ya existentes del proyecto del reactor experimental (determinación del grado de sinterización, determinación de inquemados y análisis SEM y XRD) y se ha elaborado uno que

permite clasificar de forma completa las muestras de cenizas obtenidas durante las pruebas experimentales de este Trabajo de Final de Grado. El principal objetivo es mostrar cómo analizar y clasificar las cenizas obtenidas durante el proceso de combustión que permita prevenir los problemas relacionados con la deposición de cenizas en diferentes zonas de la caldera (corrosión, abrasión, etc.) y evitar la caída de rendimiento de los sistemas.

Este protocolo consta de tres apartados, en los cuales se trata de determinar el grado de sinterización de las cenizas y clasificarlas en función del mismo, analizar el contenido de inquemados en una muestra y por último la obtención de información de elementos inorgánicos de las cenizas a través de los métodos SEM y XRD.

Las cenizas que se generan durante la combustión y se depositan en el fondo de la caldera son clasificadas en 4 grupos de acuerdo a su grado de sinterización y a la cantidad de inquemados. Al igual que el protocolo de análisis de gases, este protocolo está centrado para una caldera de combustión de biomasa pero se puede aplicar a cualquier lugar en el que se produzca combustión de biomasa.

Como preparación previa, cabe destacar la importancia de algunas acciones como el pesado del tamiz y los cubos limpios antes del pesaje y es necesario comprobar que las balanzas estén niveladas.

En todo momento es necesario manipular las muestras de ceniza con guantes de vinilo para no contaminarlas.

El protocolo detallado acerca de la clasificación de cenizas se puede consultar en el Anexo V.

6. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Se han realizado pruebas experimentales con dos tipos de biomasa diferentes. La caldera BioCurve está diseñada y automatizada para el uso con PP de baja tendencia al ensuciamiento. Al estar configurada para este combustible, la combustión que se realiza está optimizada y los datos relacionados con la emisión de gases son los idóneos. El desafío llega con los PA con alta predisposición al ensuciamiento (elevada cantidad de cenizas y con una composición que favorece la sinterización y deposición), que poseen menor densidad energética y PCI. Es necesario variar diferentes parámetros de la caldera para obtener los resultados de combustión lo más parecidos posibles a los obtenidos con los PP, para lograr una correcta combustión y alcanzar la máxima eficiencia posible.

La caldera dispone de distintos programas de potencia (P1-P5), que van desde menor a mayor demanda energética. Todos los parámetros que intervienen en la combustión se encuentran automatizados. Dentro del menú del panel táctil que dispone la caldera, se puede variar el rango de potencia demandada, además de ajustar de forma manual a través de un variador de frecuencia la potencia de los ventiladores de tiro forzado e inducido o la cantidad de combustible que se introduce en la parrilla. Estos parámetros no se modifican para las pruebas con los PP, pero son un factor determinante para la correcta combustión de los PA.

Cada prueba consiste en encender la caldera y una vez que el proceso de arranque ha terminado, realizar la toma de datos de los gases de combustión emitidos y la temperatura en las zonas donde se pretende instalar los TEG, así como la temperatura del agua caliente que se está generando. Se parte del nivel de potencia 1 hasta el nivel de potencia 5, cambiando progresivamente una vez que la medida de la temperatura de los gases en la parte superior de la cámara de combustión se estabiliza. La toma de medidas es cada 3 minutos, y se utiliza una hoja en Excel para llevar el registro.

Se han realizado un total de cuatro pruebas experimentales:

En las dos primeras, se ha arrancado la caldera con cada uno de los combustibles (PP y PA) y se han anotado los resultados con el fin de comparar las diferencias que existen entre ellos (emisiones, temperatura del agua, temperatura en distintos puntos de la caldera, etc.). La configuración de los parámetros de combustión de la caldera para ambas pruebas es la de fábrica.

En la tercera se ha decidido modificar la potencia de los ventiladores de tiro forzado e inducido de la caldera (v1 y v3) para la potencia P4 con el fin de observar cuál es la dependencia de los datos que se registran en la hoja Excel con el flujo de aire en la cámara de combustión.

En la cuarta se busca modificar el tiempo de accionamiento del tornillo sinfín del sistema de alimentación para analizar la influencia que tiene respecto a los datos que se están midiendo en el Trabajo de Final de Grado.

Las dos últimas pruebas solo se llevan a cabo para los PA, ya que se busca a partir de la modificación de algunos parámetros de la caldera, conseguir los mismos valores de emisiones que los que se dan para la combustión con PP.

La realización de estas pruebas durante el Trabajo de Final de Grado ha permitido obtener unas primeras conclusiones acerca de los rangos a los que serán sometidos los TEG en diversas zonas

de la caldera, la comprobación de la medida de O₂, las emisiones de CO y NO_x, el rendimiento de la caldera y la dependencia de las emisiones de CO y NO_x en función del control de parámetros que intervienen en la combustión (control de potencia de ventiladores y tiempo de accionamiento del tornillo sinfín del sistema de alimentación). Este capítulo se divide en dos bloques:

En el primero se muestran las conclusiones obtenidas a partir de la realización de pruebas experimentales sin modificar los parámetros de combustión de la caldera de condensación alimentada por los PP y PA. Mientras que en el segundo apartado se muestran los resultados obtenidos mediante el control de los parámetros ya comentados, con el objetivo de intentar acercar las emisiones de CO y NO_x de la caldera alimentada con PA a los obtenidos con PP.

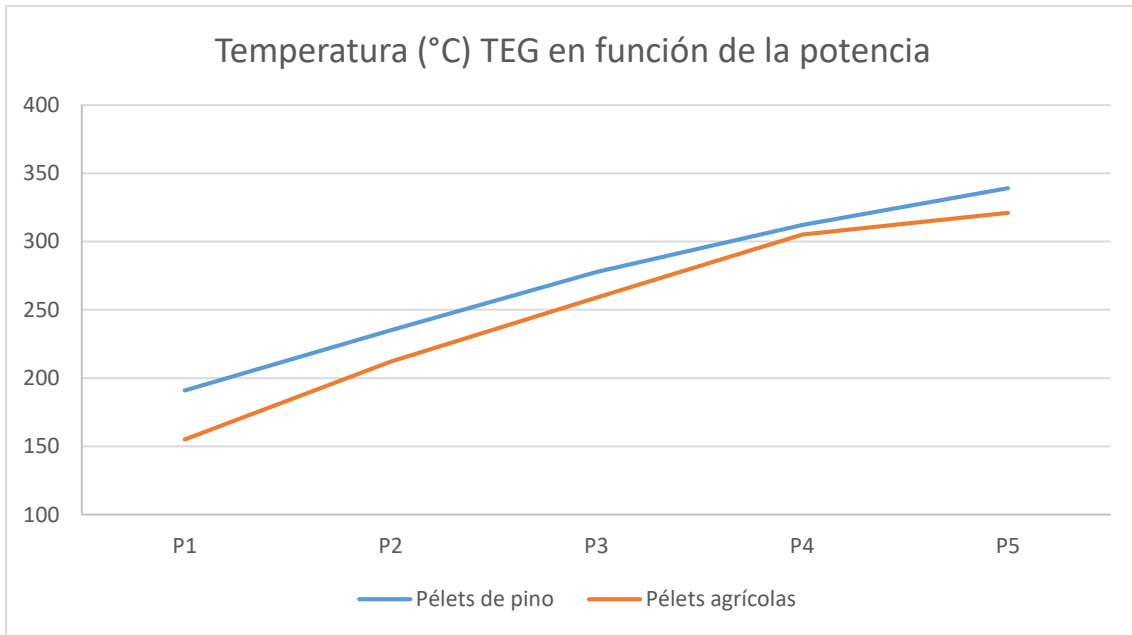
6.1 PRUEBAS EXPERIMENTALES CON AJUSTES DE FÁBRICA

6.1.1 Medición de la temperatura en las zonas de los TEG

Se han colocado termopares en dos zonas de la caldera donde se pretende instalar los TEG. Existe una sonda de temperatura instalada en la caldera comercial, en una zona próxima a uno de los dos emplazamientos de los TEG. Se ha recolocado en una zona de interés para obtener medidas más precisas y conocer los rangos de temperatura a los que estarán expuestos. El segundo lugar donde se quieren conocer las temperaturas que se alcanzan, es una pared lateral de la caldera. Los dispositivos se instalarán próximos al tornillo sinfín y la parrilla. Para ello, una vez que ha terminado el proceso de arranque y se ha encendido la llama, se desmonta el encendedor y se introduce por el orificio que queda, un termopar tipo K que debe ser sellado correctamente con papel de aluminio para reducir al máximo las alteraciones externas que se pueden generar debido a esa abertura.

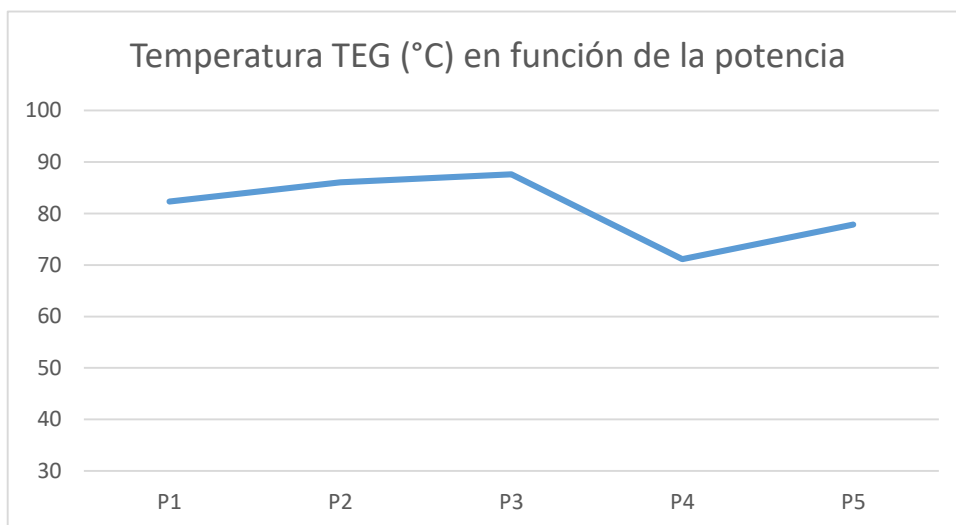
El objetivo no es otro que a partir de las temperaturas que se obtienen, seleccionar el dispositivo que mejor se adapte a las condiciones de trabajo para conseguir las mejores prestaciones posibles. Es imprescindible conocer la temperatura que se alcanza en esos lugares, puesto que aporta información que permite seleccionar el material con el que se construye el TEG.

Temperaturas obtenidas en la zona superior de la caldera: Este es el lugar donde se espera que los TEG alcancen las temperaturas más elevadas a los que serán sometidos durante el proyecto TEGBIOSOL. Los rangos de temperatura obtenidos para los diferentes programas de potencias son de 191 a 339 °C con el combustible de PP y de 155 a 321 °C para el caso del combustible de procedencia de residuos agrícolas y se pueden observar en la gráfica 1. Si no se adapta la cantidad de pélets con los que se alimenta la caldera en función del combustible, los rangos de temperatura para el caso de los PP son mayores que los que se obtienen con los de procedencia de residuos agrícolas puesto que además de ser más densos (se introduce mayor cantidad de energía), su poder calorífico es superior.



Gráfica 1. Temperatura media de los TEG en función de la potencia de la caldera alimentada PP Y PA en la zona superior de la caldera

Temperaturas obtenidas en la zona de alimentación de la caldera: Como ya se ha comentado, para la medición de temperatura se ha introducido un termopar por el orificio donde se encuentra instalado el encendedor una vez ha comenzado la combustión. El primer día de pruebas el instrumento no funcionaba correctamente y no fue posible realizar la toma de datos. Solo se tienen registros para la prueba con PA y se pueden consultar en la gráfica 2. Aun así es una buena referencia para conocer el rango de temperaturas al que se verán sometidos los TEG. Cabe la posibilidad que exista un fallo en la toma de temperaturas para las potencias 4 y 5 durante la realización de la primera prueba, ya que en posteriores ensayos se han obtenido valores entre los 90 y 100 °C que son más coherentes para esos niveles de potencia. El potencial de generación eléctrica en esta zona es mucho menor que en la parte superior de la caldera porque está ligado principalmente al gradiente de temperatura que se consigue entre el foco frío y el caliente.



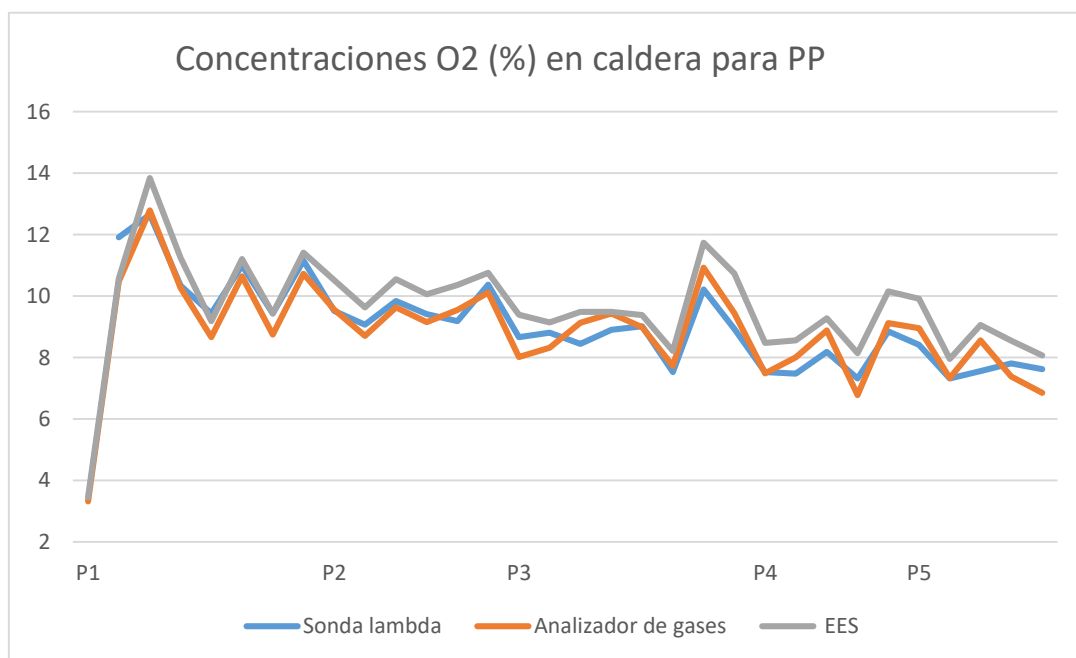
Gráfica 2. Temperatura media de los TEG en función de la potencia de la caldera alimentada con PA en la parte inferior de la caldera

6.1.2 Comprobación de medidas de O₂ del analizador de gases MRU

Se ha utilizado un analizador de gases para determinar las emisiones de gases que se producen durante las diferentes pruebas del Trabajo de Final de Grado. Uno de los objetivos es medir la concentración de O₂ en los gases de combustión. La caldera tiene instalada de fábrica una sonda lambda que muestra medidas en todo momento, aunque para calcular el rendimiento de la caldera de la forma más exacta posible, es necesario una elevada precisión, de ahí la decisión de usar este aparato. Por lo general, los sensores de medida de concentración de gases de estos instrumentos tienen una vida útil determinada y deben ser sustituidos cada cierto tiempo. Esto es particularmente crítico en el sensor de O₂. Como se encuentra en el límite de dicho mantenimiento, en este apartado se van a comparar los datos obtenidos acerca de la concentración de O₂ en los gases de combustión para asegurarse de que el analizador de gases que se utiliza en la prueba sigue funcionando correctamente.

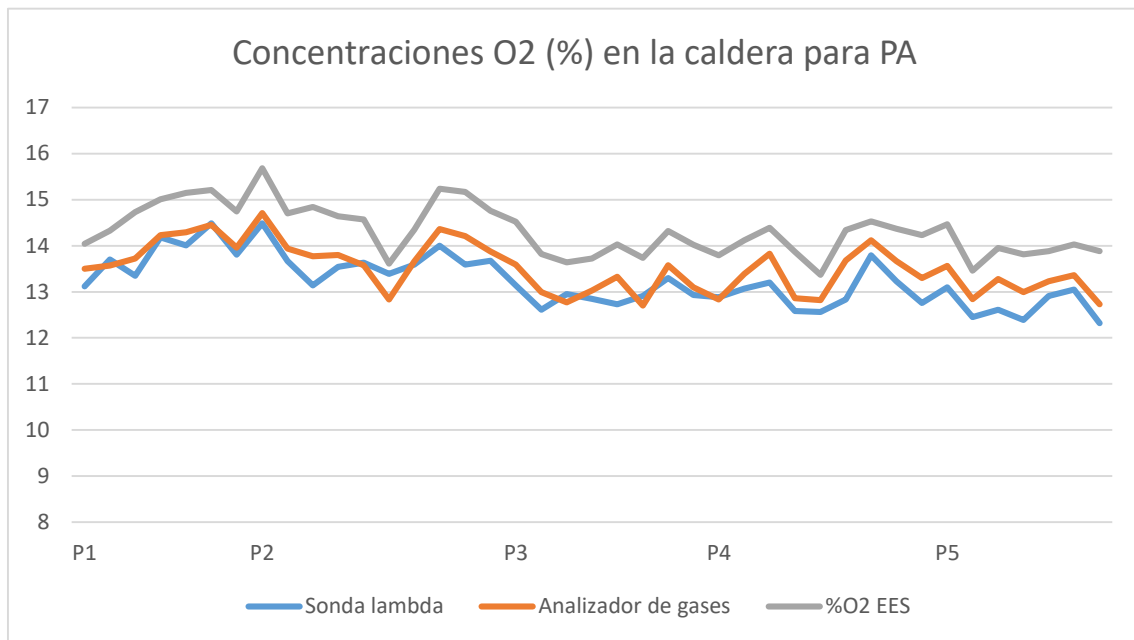
Se van a comparar para cada toma de medidas realizada en el laboratorio los datos de la sonda lambda, el analizador y el obtenido en el EES (mediante un balance de masa conociendo la composición del combustible) a partir del CO₂ que proporciona el analizador. Cabe destacar que para concentraciones de oxígeno inferiores al 5%, la sonda lambda comercial instalada en la caldera condensación deja de medir, mientras que los resultados que aporta el programa EES y el analizador son prácticamente idénticos. A partir de la gráfica 3 y 4, se puede concluir que el analizador de gases MRU funciona correctamente, ya que con los tres métodos de medida se consiguen resultados muy similares.

Comparación de medidas para PP:



Gráfica 3. Concentración de oxígeno en caldera alimentada con PP según los tres métodos de medida

Comparación de medidas para PA:



Gráfica 4. Concentración de oxígeno en caldera alimentada con PA según los tres métodos de medida

6.1.3 Comparativa de emisiones de CO y NO_x

El control y la reducción de las emisiones de gases contaminantes a la atmósfera cuando se están realizando procesos de generación energética, ya sea electricidad o calor, cada vez toma mayor importancia. Esto se debe a la concienciación acerca de proteger el medio ambiente, además de la aparición de legislación cada vez más restrictiva.

Se ha comentado en varias ocasiones, que la caldera comercial está configurada para la combustión de PP. Las emisiones de gases durante las pruebas con este combustible, no son potencialmente problemáticas. El problema llega cuando se realizan las medidas de emisiones de gases con el combustible experimental de mezcla de residuos agrícolas, ya que la caldera no está programada para las características de este combustible (posee mayor cantidad de cenizas, tiene menor poder calorífico y su densidad energética es más baja). Se van a analizar las emisiones tanto de CO como de NO_x de ambos combustibles en función del programa de potencia utilizado.

Comparativa de emisiones en función del programa de potencia:

Después de analizar las emisiones tanto de CO como de NO_x, los resultados que muestran las gráficas 5 y 6 son concluyentes.

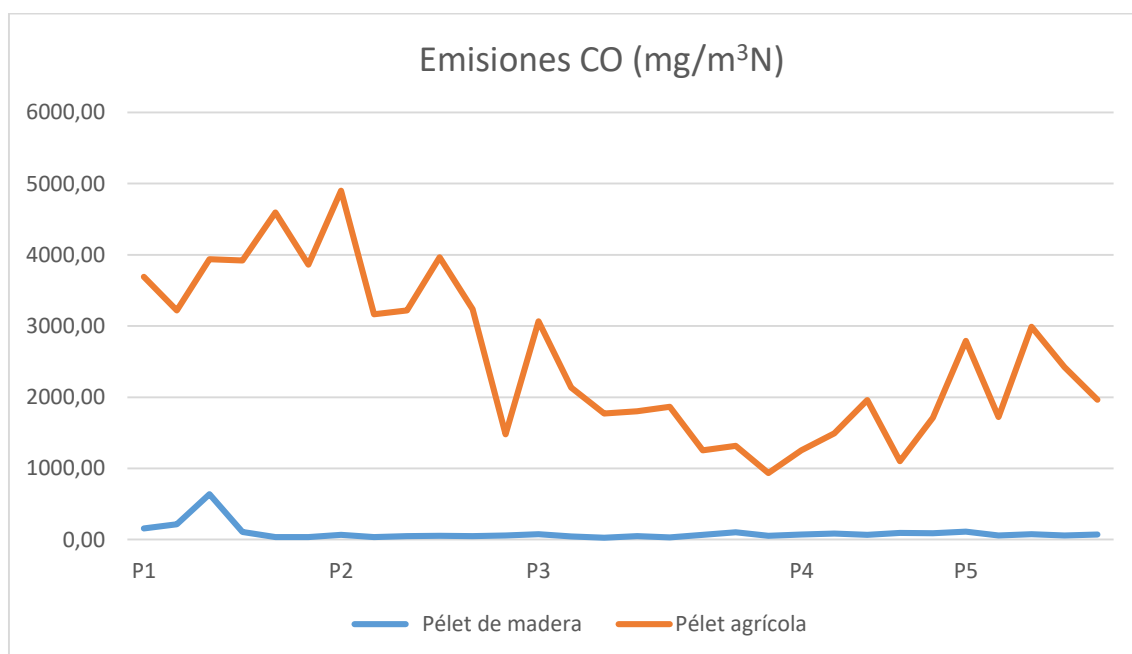
En cuanto a las emisiones de NO_x, se observa a través de la gráfica 6 que las diferencias entre ambos combustibles se hacen cada vez más notables a medida que se aumenta la potencia de la caldera. Mientras que los valores obtenidos para el combustible a partir de madera de pino son prácticamente constantes a lo largo de todas las pruebas, las emisiones de gases en las pruebas con el combustible de procedencia de residuos agrícolas aumentan progresivamente. Uno de los motivos puede ser que la caldera está correctamente configurada para realizar la

combustión de PP, en cambio aún se necesita mejorar la adaptación al combustible experimental.

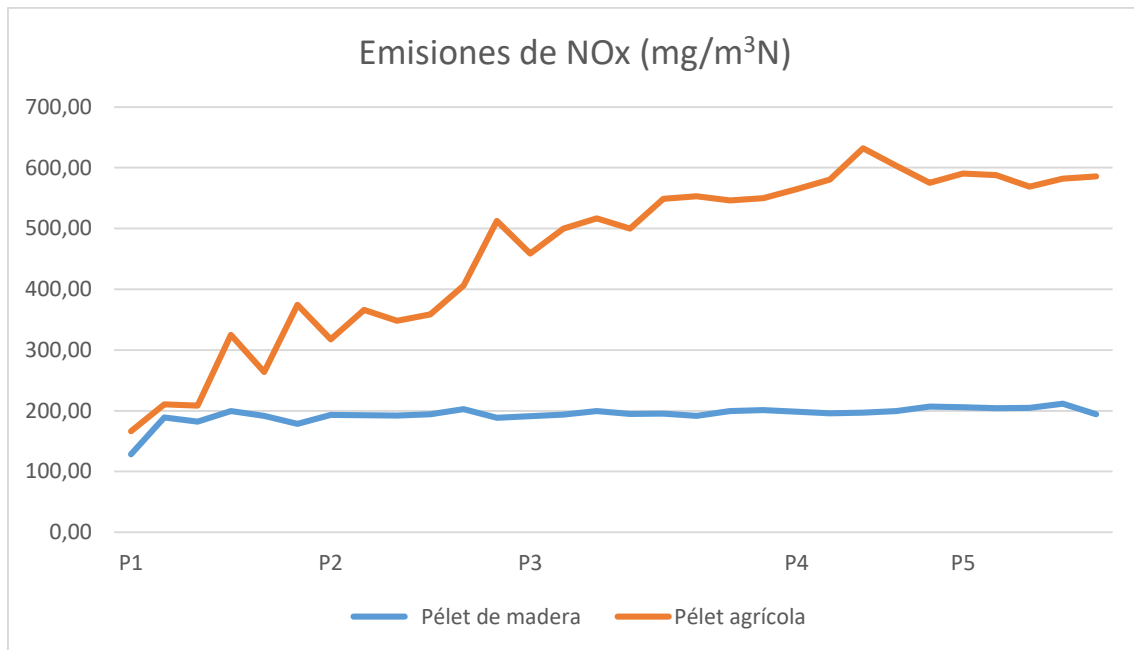
El principal problema aparece cuando se estudian las emisiones de CO a la atmósfera. Los valores para el combustible de residuos agrícolas son excesivos, más aún si se comparan los resultados obtenidos con los PP. Además resulta bastante complicado determinar un valor de emisiones para cada potencia puesto que son muy variables. La diferencia se nota especialmente para bajas potencias, aunque es un problema que se extiende a todos los niveles. Es necesario realizar alguna modificación en los parámetros relacionados con la combustión, para tratar de conseguir valores iguales o próximos a los que se dan en las pruebas con los PP.

En la norma UNE-EN 303-5: 2013 (“Calderas especiales para combustibles sólidos de carga manual y automática y potencia útil nominal hasta 50 kW”), se limitan las emisiones de CO. Mientras que las emisiones de NO_x se regulan en el Reglamento Europeo (UE) 2015/1189. Las medidas de emisiones que se han realizado en las diferentes pruebas, contienen diferentes concentraciones de oxígeno, por lo que antes de compararlas es necesario realizar una corrección al 10% de O₂. Además las medidas que se obtienen del analizador están en ppm y la norma marca los límites en (mg/m³N). Una vez hecha la corrección, para el cambio de unidades de ppm a mg/m³N simplemente hay que multiplicar por un factor de conversión de 1,25 para CO y de 2,05 para NO_x.

Los valores límites según la norma para los combustibles de biomasa utilizados son 500 mg/m³N para las emisiones de CO mg/m³N y 200 mg/m³N para las emisiones de NO_x. Como se puede observar en las gráficas 5 y 6, los PP cumplen dichos requisitos, mientras que las emisiones procedentes de la combustión de PA no. Por lo tanto es necesario el ajuste de ciertos parámetros de la caldera que influyen en la combustión para tratar de reducir dichos valores.



Gráfica 5. Emisiones de CO para ambos combustibles en función de la potencia



Gráfica 6. Emisiones de NOx para ambos combustibles en función de la potencia

6.1.4 Análisis del rendimiento de la caldera

Las pruebas experimentales, aportan datos que son necesarios para calcular el rendimiento de la caldera de condensación. Se ha diseñado un programa de EES que permite calcular el rendimiento de la caldera sobre el PCI y el PCS. La caldera del proyecto TEGBIOSOL y por consiguiente la de este trabajo, es capaz de recuperar energía que se encuentra en el calor latente del vapor de agua de los gases de emisión que en otro tipo de sistemas de generación es desaprovechada.

El cálculo del rendimiento se ha realizado mediante el método indirecto o método de pérdidas separadas, para conocer de forma individual el efecto de cada pérdida.

Se calculan las pérdidas por unidad de energía que aporta el combustible y se restan del total de energía que se introduce a partir del combustible. En este caso las pérdidas que se van a contabilizar son: las pérdidas por convección y radiación, las pérdidas por el calor sensible de los gases, las pérdidas procedentes de los residuos sólidos y las pérdidas originadas por la formación de carbono y dióxido de carbono durante la combustión.

No obstante, es necesario descontar a estas pérdidas la energía recuperada procedente del calor latente de los gases. Para ello, se calcula el vapor de agua presente en los gases de combustión que condensa (diferencia entre el agua producida en la combustión y el máximo de agua que puede contener los gases para la temperatura a la que se encuentran). Para ello es necesario calcular la presión parcial del agua y la presión parcial del agua máxima. Una vez que se tiene el agua que condensa, si se multiplica por su entalpía de vaporización y se divide para el PCI del combustible, se obtiene la energía recuperada.

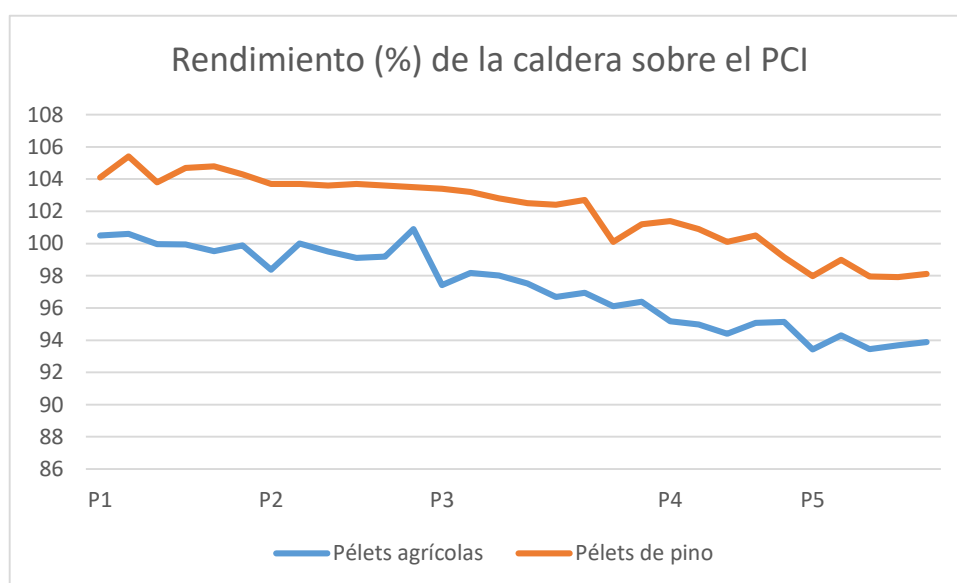
Los rendimientos sobre el PCI y sobre el PCS se pueden observar en las gráficas 7 y 8. Cuando la caldera es alimentada por PP los rendimientos se encuentran en rangos del 105,5% al 98% sobre el PCI y del 97,5% al 90,22% sobre el PCS. Mientras que los rendimientos sobre el PCI y sobre

el PCS cuando la caldera se alimenta con PA oscilan entre el 100,5% al 93,89% y el 92,4% y el 85,79% respectivamente.

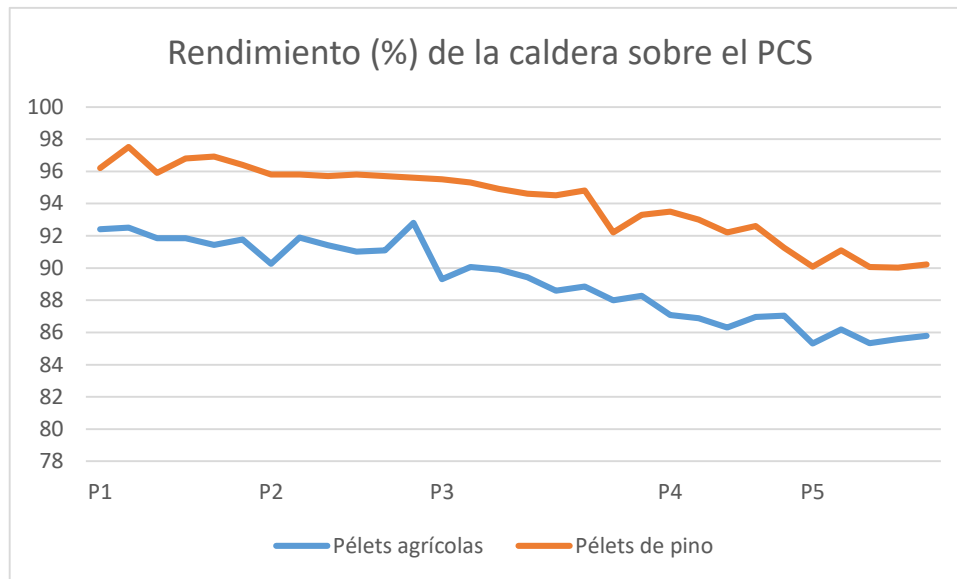
Se puede ver una disminución del rendimiento sobre el PCI conforme aumentan los niveles de potencia. Las calderas de condensación se caracterizan por tener mejor rendimiento a cargas parciales. Esto es debido a que las pérdidas por calor sensible son más significantes y la energía que se recupera a partir del sistema de condensación se ve limitada a medida que aumentan las temperaturas de los gases.

El rendimiento sobre el PCI y el PCS es mayor para los PP que para el de los PA, ya que los PP tienen mayor densidad y poder calorífico que el biocombustible experimental, además de que la caldera está configurada para su combustión. Si no se modifican algunos parámetros de combustión, se está introduciendo en la cámara de combustión más aire del necesario y se aumentan las pérdidas, especialmente las relacionadas con el calor sensible de los gases

El cálculo del rendimiento y las diferentes pérdidas se puede consultar con mayor profundidad en el Anexo II.



Gráfica 7. Evolución del rendimiento de la caldera sobre el PCI en función de la potencia para ambos combustibles



Gráfica 8. Evolución del rendimiento de la caldera sobre el PCI en función de la potencia para ambos combustibles

6.2 PRUEBAS EXPERIMENTALES CON AJUSTE MANUAL

6.2.1 Modificación de la potencia de los ventiladores de la caldera

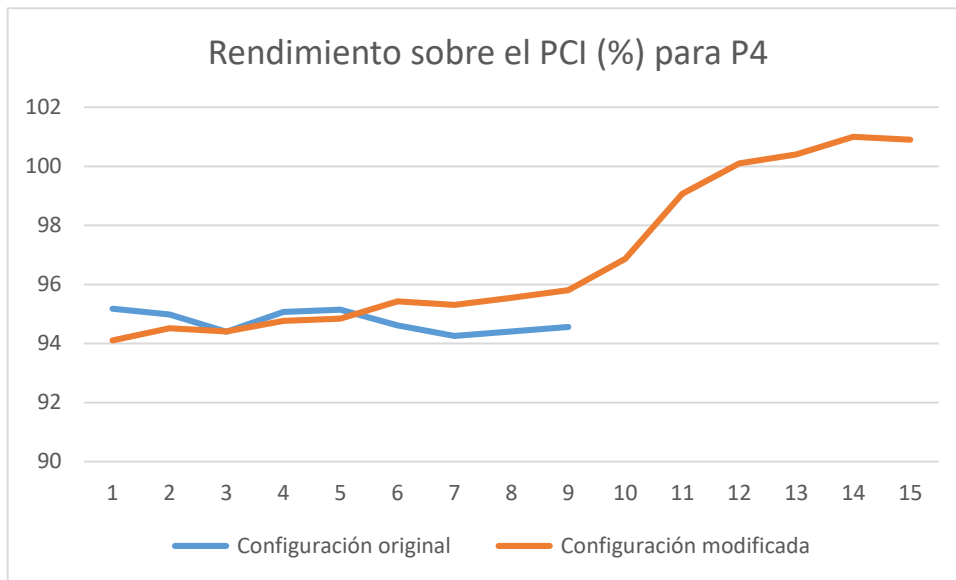
Se ha comentado anteriormente que se pueden controlar diferentes parámetros como el sistema de alimentación o los ventiladores que permiten crear un flujo de aire en la caldera. Se ha decidido regular los dos ventiladores que dispone la caldera comercial para observar su influencia en la combustión. El ventilador 1 (v1, causante del tiro forzado) introduce aire en la cámara de combustión mientras que el ventilador 3 (v3, que provoca el tiro inducido) contribuye a expulsarlo, creando un flujo de aire permanente. Modificando la potencia de los ventiladores, se puede mantener la depresión en caldera, a la vez que se controla el porcentaje de O₂ para lograr una mejor combustión y reducir el CO emitido. Como durante la toma de datos se ha podido observar un elevado valor de oxígeno, se ha optado por ir reduciendo progresivamente el uso de los ventiladores partiendo de los valores por defecto.

Este apartado solo es necesario para los PA ya que para los PP no existen complicaciones acerca de las emisiones de CO. Se ha observado a partir de las gráfica 5 que para el nivel P4 la diferencia de emisiones en función del combustible es la mínima obtenida. Aun así, sigue existiendo mucha disparidad. Como es la menor distancia a salvar, se van a modificar la potencia de los ventiladores para este rango de potencia.

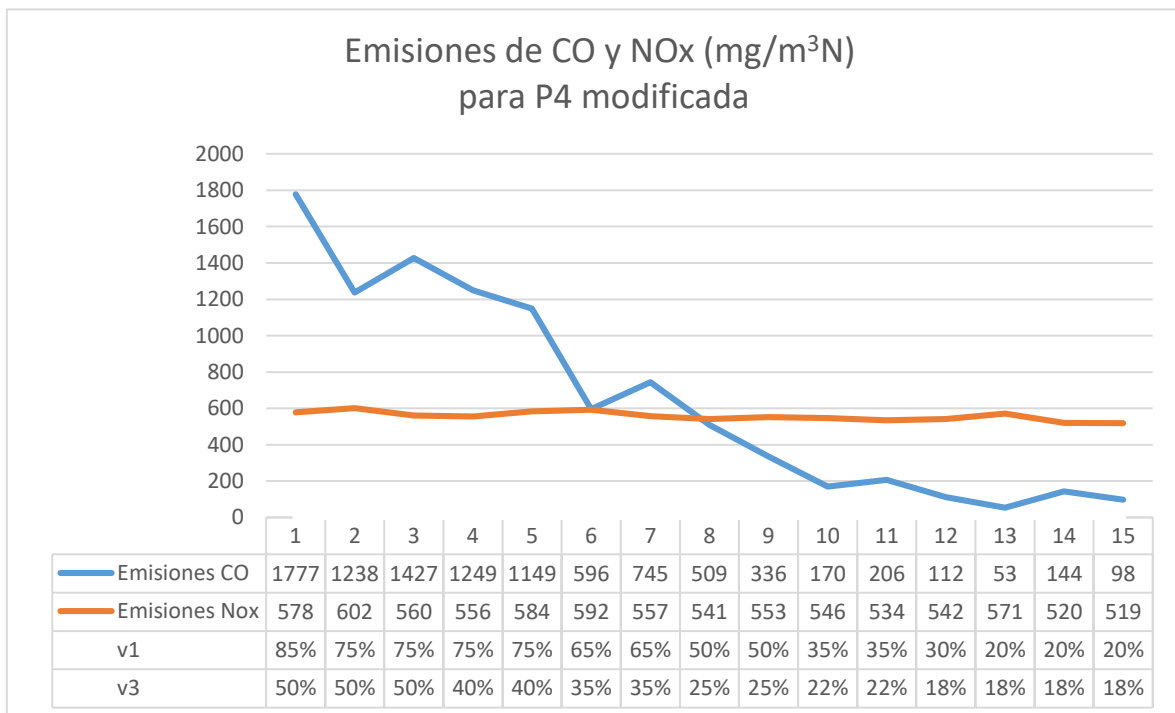
El objetivo no es otro que controlar la cantidad de aire que se introduce durante la combustión para conseguir las condiciones óptimas, reduciendo el CO emitido a la atmósfera y aumentar el rendimiento del sistema. En un principio se han reducido las potencias de ambos ventiladores progresivamente (partiendo de 85% para v1 y 50% para v3), pero al observarse que las mejoras han sido poco apreciables para valores próximos a los de la configuración para el biocombustible de madera de pino, se han reducido de forma más acusada. En la gráfica 10 se puede observar que disminuyendo la potencia de los ventiladores un 35% para v1 y un 25% para v3, se pueden conseguir las emisiones de CO perseguidas (inferiores a 200 mg/m³N), mientras que las

emisiones de NOx no sufren variaciones significativas respecto a la prueba con la configuración de la caldera de serie (ambas emisiones de NOx son próximas a los 600 mg/m³N) y se encuentran todavía por encima del límite que marca la norma (500 mg/m³N).

No solo se han conseguido los resultados de emisiones de CO buscados, sino que se ha aumentado el rendimiento de la caldera (gráfica 9). Las temperaturas de los gases de combustión y la del agua de red se han visto reducidas. Para contrarrestar esa bajada de temperaturas una posible solución sería aumentar el tiempo de funcionamiento del tornillo sinfín de alimentación, elevando la cantidad de pélets que se queman en la parrilla.



Gráfica 9. Evolución del rendimiento de la caldera alimentada con PA en función de la potencia de los ventiladores para P4 con la configuración original y la configuración modificada



Gráfica 10. Evolución de las emisiones de gases en función de la potencia del ventilador de la caldera alimentada por PA para P4

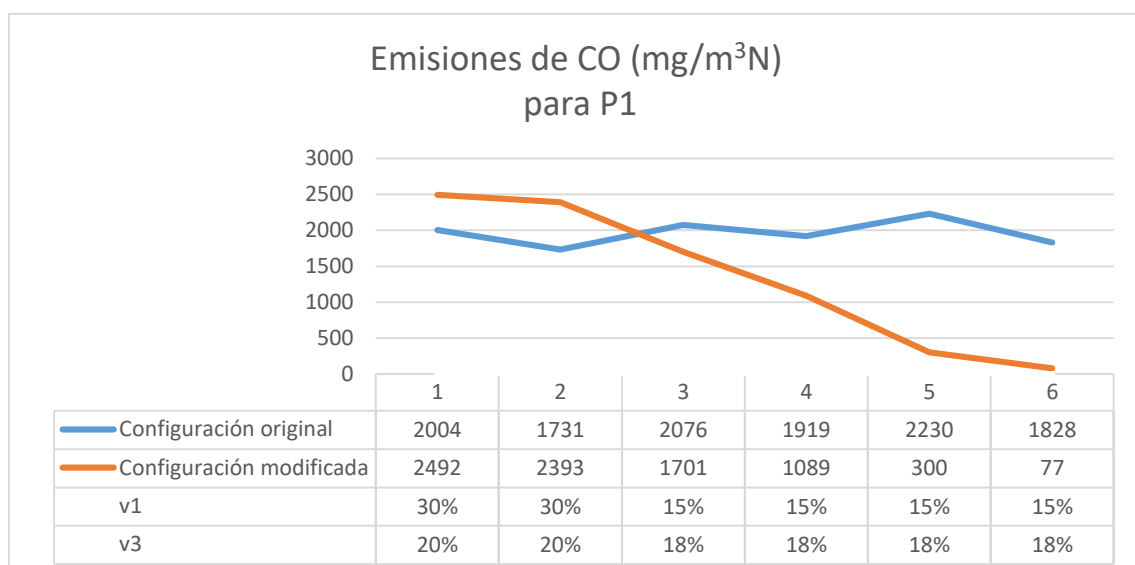
6.2.2 Regulación del sistema de alimentación de biomasa a caldera

En esta prueba se ha decidido dejar por defecto los parámetros relacionados con los ventiladores y modificar el tiempo de accionamiento del tornillo sinfín. Como con la configuración de fábrica para las pruebas con los PA la concentración de oxígeno era mayor de la necesaria, se ha decidido aumentar la cantidad de combustible con la que se alimenta la caldera. De esta forma se busca conseguir las concentraciones óptimas y limitar las emisiones de CO por debajo de la norma. Si no se consigue ajustando solo el tiempo de accionamiento del tornillo sinfín, se puede modificar después de que se establezcan los datos, la frecuencia de uso de los ventiladores.

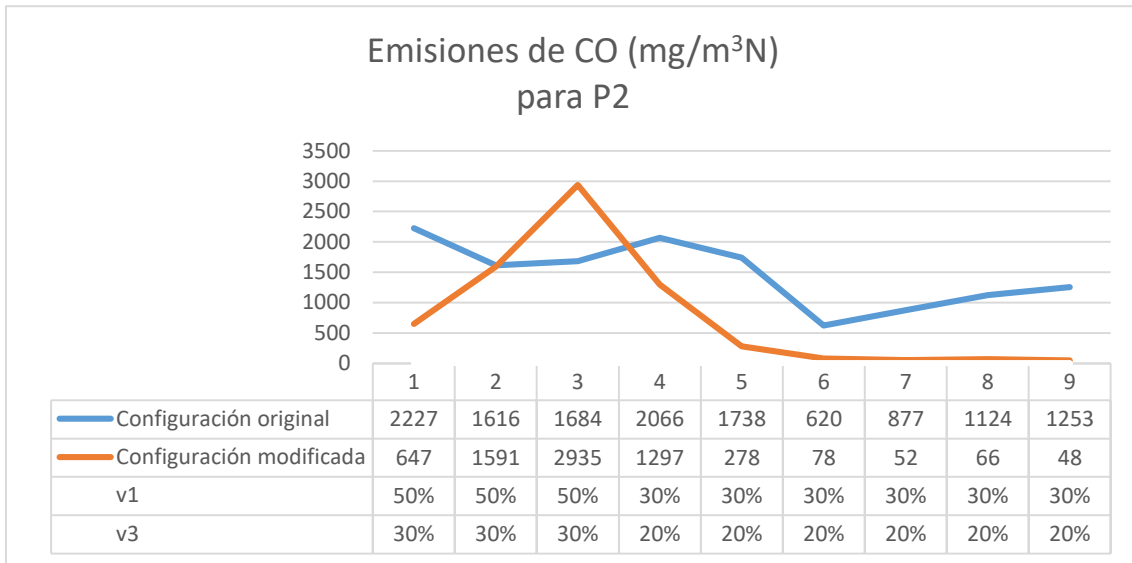
De esta forma se puede comparar el efecto de cada parámetro por separado y posteriormente comprobar cómo se complementan ambos. En un principio se ha aumentado en un 50% el tiempo de accionamiento del sistema de alimentación, pero al observar el escaso resultado obtenido, se ha decidido duplicar los valores iniciales.

En las siguientes gráficas 11, 12 y 13 se puede ver una reducción de emisiones significativas, pero se sigue todavía lejos de los objetivos que se persiguen, por lo que se ha decidido combinar una reducción del uso de los ventiladores con un aumento del suministro de pélets a la parrilla de combustión. Se ha tenido que abortar las pruebas debido a una acumulación de combustible en la parrilla que ha impedido finalizar la prueba para todos los niveles de potencia. Una posible solución para evitar este problema en pruebas futuras sería regular el sistema de limpieza de cenizas de la parrilla para que funcione con mayor frecuencia.

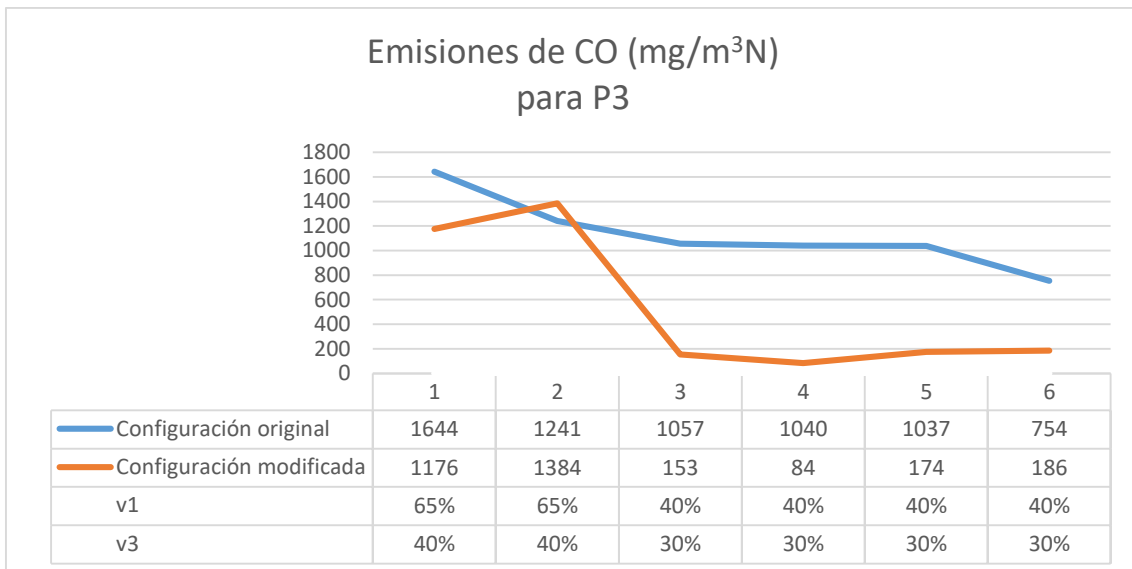
Pese a los contratiempos, se puede concluir que la regulación de los ventiladores posee mayor influencia en el control de las emisiones de CO que la regulación del sistema de alimentación de la caldera. Si se desea cumplir con la normativa que regula las emisiones de CO, es necesario reducir la potencia de los ventiladores, puesto que regulando únicamente el sistema de alimentación no es suficiente. Las emisiones de NO_x sufren el mismo comportamiento que durante la prueba con los parámetros de combustión de serie y siguen sin cumplir la norma vigente. El número de emisiones aumenta conforme se sube de nivel de potencia (gráfica 6) por lo que no existe una clara relación entre la regulación del sistema de alimentación y las emisiones de NO_x.



Gráfica 11. Comparativa de emisiones de CO para la configuración original y modificada de la caldera (ventilador y sistema de alimentación) alimentada con PA en el nivel de potencia P1



Gráfica 12. Comparativa de emisiones de CO para la configuración original y modificada de la caldera (ventilador y sistema de alimentación) alimentada con PA en el nivel de potencia P2



Gráfica 13. Comparativa de emisiones de CO para la configuración original y modificada de la caldera (ventilador y sistema de alimentación) alimentada con PA en el nivel de potencia P3

7. CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS

Este TFG está enfocado en la primera etapa de un proyecto de investigación (TEGBIOSOL) en el que se pretende comprobar la rentabilidad económica y energética de los TEG en calderas de biomasa. La biomasa es una fuente energética compleja que varía su comportamiento en función de su composición y origen. El potencial de cada combustible depende de muchos factores que se han comentado a lo largo de este proyecto.

No se pueden obtener unas conclusiones certeras a raíz de las primeras pruebas experimentales, pero sí unas impresiones sobre los combustibles que mejor se adaptan al sistema de generación. Es posible integrar la tecnología TEG en calderas de biomasa con combustibles complejos pero es necesario analizar el lugar donde se van a instalar y las condiciones de funcionamiento de la caldera. Con la realización de este Trabajo de Final de Grado se han obtenido los rangos de temperatura a los que estarán sometidos los TEG, facilitando información necesaria para la correcta selección de los módulos.

Después del estudio acerca de la instrumentación disponible para el registro del caudal de fluidos (aire, gas y agua) y de temperaturas, se ha podido determinar los sensores de medición que mejor se adaptan a las condiciones de trabajo de la caldera de condensación. Además se ha podido comprobar durante la realización de este trabajo que el analizador de gases todavía ofrece mediciones del %O₂ correctas, pese a estar en el límite de su vida útil.

Con la realización de protocolos adaptados a la caldera del proyecto TEGBIOSOL y este Trabajo de Final de Grado, se consigue asegurar el correcto procedimiento de las diferentes pruebas descritas, garantizando la integridad de los instrumentos utilizados y del personal que los manipula, además de la repetibilidad y fiabilidad de los resultados que se obtienen.

Cuando la caldera se alimenta con biomasa de PP, se obtienen unos rendimientos sobre el PCI y PCS más que satisfactorios y las emisiones de gases a la atmósfera están controladas. El problema aparece para el combustible experimental, puesto que supera los límites de emisiones recogidos en la norma UNE-EN 303-5:2013. A través del ajuste de parámetros que influyen en la combustión de la caldera (potencia de ventiladores y tiempo de accionamiento del tornillo sinfín del sistema de alimentación) se ha conseguido reducir las emisiones de CO y asemejarlas a las que se producen durante la combustión de PP, además de aumentar considerablemente el rendimiento de la caldera de condensación. Sin embargo, no se ha conseguido que las emisiones de NO_x para el combustible experimental cumplan la normativa vigente.

Para ser las primeras pruebas experimentales, los resultados son esperanzadores puesto que el combustible de procedencia de residuos agrícolas es más barato que el de madera de pino y además se aprovechan residuos que en algunos casos no tienen una utilidad práctica.

Las experiencias estrechamente relacionadas con el proyecto TEGBIOSOL y este trabajo no son abundantes, de ahí la importancia de continuar con la investigación en la misma línea con el fin de conseguir un mejor conocimiento acerca del tema y continuar con la mejora y el desarrollo tanto de la tecnología TEG, como de su implantación en calderas, además de la búsqueda de nuevos combustibles de biomasa con costes de producción y tratamiento reducidos para competir directamente con los combustibles fósiles.

El objetivo principal no debe ser otro que maximizar la contribución de la biomasa a la demanda total de consumo energético ya que un bien abundante en todo el planeta y permite la

producción energética o la elaboración de combustibles sólidos, líquidos o gaseosos. Dada su escasa explotación y aprovechamiento, es junto a otras fuentes de energía renovables como la solar, eólica o hidroeléctrica, un importante recurso energético a tener en cuenta en el futuro más próximo.

8. BIBLIOGRAFÍA

- Abderezak, B., & Randi, S. (2020). Experimental investigation of waste heat recovery potential from car radiator with thermoelectric generator. *Thermal Science and Engineering Progress*, 20(April), 100686. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2020.100686>
- Alanne, K., Laukkanen, T., Saari, K., & Jokisalo, J. (2014). Analysis of a wooden pellet-fueled domestic thermoelectric cogeneration system. *Applied Thermal Engineering*, 63(1), 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2013.10.054>
- Asociación Técnica Española de Climatización y Refrigeración - ATECYR. (2011). *Guía básica de instrumentación de medida de instalaciones en los edificios*. 1–76. <https://www.fenercom.com/pdf/publicaciones/Guia-basica-de-instrumentacion-de-medida-de-instalaciones-en-los-edificios-fenercom-2011.pdf>
- Bajpai, P. (2020). Biomass energy projects worldwide. *Biomass to Energy Conversion Technologies*, 175–188. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-818400-4.00008-6>
- Bellucci, A., Girolami, M., & Trucchi, D. M. (2021). Thermionic and thermoelectric energy conversion. In *Ultra-High Temperature Thermal Energy Storage, Transfer and Conversion*. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-819955-8.00010-7>
- Bhukesh, S. K., Kumar, A., & Gaware, S. K. (2019). Bismuth telluride (Bi₂Te₃) thermoelectric material as a transducer for solar energy application. *Materials Today: Proceedings*, 26, 3131–3137. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.646>
- Bianchini, A., Pellegrini, M., & Sacconi, C. (2014). Thermoelectric cells cogeneration from biomass power plant. *Energy Procedia*, 45, 268–277. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.01.029>
- Champier, D. (2017). Thermoelectric generators: A review of applications. *Energy Conversion and Management*, 140, 167–181. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.02.070>
- Chen, M., Lund, H., Rosendahl, L. A., & Condra, T. J. (2010). Energy efficiency analysis and impact evaluation of the application of thermoelectric power cycle to today's CHP systems. *Applied Energy*, 87(4), 1231–1238. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.06.009>
- Gao, H. B., Huang, G. H., Li, H. J., Qu, Z. G., & Zhang, Y. J. (2016). Development of stove-powered thermoelectric generators: A review. *Applied Thermal Engineering*, 96, 297–310. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.11.032>
- Ingalaturre, G. D., Javier, F., Solsona, A., & Septiembre, N. (2010). *Sensores de caudal*.
- Jaziri, N., Boughamoura, A., Müller, J., Mezghani, B., Tounsi, F., & Ismail, M. (2019). A comprehensive review of Thermoelectric Generators: Technologies and common applications. *Energy Reports*, xxxx. <https://doi.org/10.1016/j.egypr.2019.12.011>
- Kütt, L., Millar, J., Karttunen, A., Lehtonen, M., & Karppinen, M. (2018). Thermoelectric applications for energy harvesting in domestic applications and micro-production units. Part I: Thermoelectric concepts, domestic boilers and biomass stoves. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 98(December 2015), 519–544. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.051>

- Marin, D. (2016). *Información técnica: El uso de termopares*. 40(cable MI), 1–13.
- Moser, W., & Friedl, G. (2008). A biomass-fuel based micro-scale CHP system with thermoelectric generators. *Central European Biomass Conference 2008*. http://www.bioenergy2020.eu/files/publications/pdf/236_CP_I-1-21_Paper_Austrian_Bioenergy_Friedl_Moser.pdf
- Najjar, Y. S. H., & Kseibi, M. M. (2017). Thermoelectric stoves for poor deprived regions – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 80(January 2016), 597–602. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.211>
- Pourkiaei, S. M., Ahmadi, M. H., Sadeghzadeh, M., Moosavi, S., Pourfayaz, F., Chen, L., Pour Yazdi, M. A., & Kumar, R. (2019). Thermoelectric cooler and thermoelectric generator devices: A review of present and potential applications, modeling and materials. *Energy*, 186, 115849. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.07.179>
- Rehfuss, E. A., Bruce, N. G., & Smith, K. R. (2011). Solid Fuel Use: Health Effect. *Encyclopedia of Environmental Health*, 150–161. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-52272-6.00716-9>
- Royo, J., Canalís, P., & Quintana, D. (2020). Chemical study of fly ash deposition in combustion of pelletized residual agricultural biomass. *Fuel*, 268(July 2019), 117228. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117228>
- Royo, J., Canalís, P., Quintana, D., Díaz-Ramírez, M., Sin, A., & Rezeau, A. (2019). Experimental study on the ash behaviour in combustion of pelletized residual agricultural biomass. *Fuel*, 239(November 2018), 991–1000. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.11.054>
- Saidur, R., Abdelaziz, E. A., Demirbas, A., Hossain, M. S., & Mekhilef, S. (2011). A review on biomass as a fuel for boilers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(5), 2262–2289. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.02.015>
- Sornek, K., Filipowicz, M., & Rzepka, K. (2016). The development of a thermoelectric power generator dedicated to stove-fireplaces with heat accumulation systems. *Energy Conversion and Management*, 125, 185–193. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.05.091>
- Zhao, Y., Wang, S., Ge, M., Li, Y., & Liang, Z. (2017). Analysis of thermoelectric generation characteristics of flue gas waste heat from natural gas boiler. *Energy Conversion and Management*, 148, 820–829. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.06.029>

9. ÍNDICE DE IMÁGENES Y GRÁFICAS

9.1 ÍNDICE DE IMÁGENES

Imágenes 1 . Localización de los TEG parte superior de la caldera.....	22
Imágenes 2 . Localización de los TEG en el sistema de alimentación	22

9.2 ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Temperatura media de los TEG en función de la potencia de la caldera alimentada PP Y PA en la zona superior de la caldera	33
Gráfica 2. Temperatura media de los TEG en función de la potencia de la caldera alimentada con PA en la parte inferior de la caldera.....	33
Gráfica 3. Concentración de oxígeno en caldera alimentada con PP según los tres métodos de medida.....	34
Gráfica 4. Concentración de oxígeno en caldera alimentada con PA según los tres métodos de medida.....	35
Gráfica 5. Emisiones de CO para ambos combustibles en función de la potencia	36
Gráfica 6. Emisiones de NOx para ambos combustibles en función de la potencia	37
Gráfica 7. Evolución del rendimiento de la caldera sobre el PCI en función de la potencia para ambos combustibles	38
Gráfica 8. Evolución del rendimiento de la caldera sobre el PCI en función de la potencia para ambos combustibles	39
Gráfica 9. Evolución del rendimiento de la caldera alimentada con PA en función de la potencia de los ventiladores para P4 con la configuración original y la configuración modificada	40
Gráfica 10. Evolución de las emisiones de gases en función de la potencia del ventilador de la caldera alimentada por PA para P4.....	40
Gráfica 11. Comparativa de emisiones de CO para la configuración original y modificada de la caldera (ventilador y sistema de alimentación) alimentada con PA en el nivel de potencia P1	42
Gráfica 12. Comparativa de emisiones de CO para la configuración original y modificada de la caldera (ventilador y sistema de alimentación) alimentada con PA en el nivel de potencia P2	42
Gráfica 13. Comparativa de emisiones de CO para la configuración original y modificada de la caldera (ventilador y sistema de alimentación) alimentada con PA en el nivel de potencia P3	42

ANEXO I: SELECCIÓN DE LA INSTRUMENTACIÓN

En este Anexo se recoge todo el estudio que ha sido realizado para la selección de la instrumentación que mejor se adapta a las condiciones de trabajo de la caldera de condensación. Se divide en dos grandes bloques: Termómetros y Caudalímetros:

I. TERMÓMETROS

Termopares

Un termopar es prácticamente el único instrumento diseñado para medir temperaturas extremadamente altas. El dispositivo es ampliamente utilizado en equipos de calderas. Es un sensor que realiza mediciones de temperatura. Se compone de dos metales diferentes, unidos en un extremo. Cada aleación se diferencia por su resistencia y potencial eléctrico. Esta unión constituye el punto de medición, que recibe el nombre de junta caliente. El otro extremo recibe el nombre de junta fría. Cuando la junta caliente sufre un cambio de temperatura, se produce una tensión proporcional a esta. Las aleaciones de termopar se presentan comúnmente en forma de alambre.

En la actualidad existe una gran variedad de posibles uniones de conductos de termopares (más de 300) para realizar mediciones de temperatura. El rango de tensión de estos instrumentos va desde los 5 a los 100 mV/ °C y están descritos en la norma DIN EN 60584-1 y se comparan con el platino como metal de referencia.

El tipo de termopar se define por su composición. Los más comunes son los tipos J, K, T, E, R, S y B, aunque es cierto que existen otros que utilizan metales más complejos y raros que suponen un costo mayor. Sin embargo, permiten la lectura de temperaturas más altas. Marin (2016) clasifica los termopares existentes en el mercado en:

- Tipo J: Están compuestos por la combinación de hierro y constantán (aleación de cobre y níquel). El rango de medición es de -40°C a 750°C. Su uso en entornos oxidantes y a altas temperaturas (superiores a 550°C) los degrada rápidamente. Tampoco se recomienda para bajas temperaturas, debido a problemas de condensación que provocan la oxidación del hierro. Es de los pocos termopares que permiten su uso de forma segura en atmósferas reductoras o en vacío.
- Tipo K: Formados por dos aleaciones, chromel (níquel y cromo) y alomel (níquel y aluminio), con un rango de medidas de -200 a 1200° C. Poseen una buena resistencia a la oxidación lo que les hace ideales para trabajar en atmósferas oxidantes o de gas inerte. Es necesario protegerlos de ambientes en los que hay presencia de azufre. Su uso no es recomendable en aplicaciones al vacío o atmósferas reductoras.
- Tipo T: Aparecen mediante la combinación de cobre y constantán. El rango de temperaturas de estos sensores (-200° C a 350° C). Son ligeramente sensibles a la oxidación y son muy efectivos en presencia de humedad en el entorno. Suele ser útil en procesos a temperaturas bajas y criogénicas.

- Tipo E: Compuesto por la aleación de chromega y constatán. Disponen de un amplio rango (-200° C a 900° C) de medición. Su uso también se ve limitado en aplicaciones al vacío o atmósferas reductoras. Cuenta con la variación de fuerza electromotriz más alta por grado de temperatura.
- Tipo N: Se basan de omega-P (aleación de níquel, cromo y silicio) y omega-N (aleación de níquel, silicio y magnesio). Su rango de temperatura es muy amplio (-200°C a 1200°C) y se utiliza como alternativa a los termopares de tipo K en aplicaciones que requieren mayor vida útil y mayor estabilidad. Se debe proteger de la presencia de azufre en el entorno.
- Tipo R, tipo S y tipo B: Se caracterizan por la combinación de platino (13% para los de tipo R, 10% para los de tipo S y 30%) y la aleación de rodio y platino. El rango va desde 0° C a 1600° C para tipo R y tipo S y de 600 ° C a 1700° C en el caso de los de tipo B. Son de los termopares más caros. Están diseñados para su utilización a elevadas temperaturas. Se montan normalmente en vainas cerámicas cerradas en un extremo. Si la funda es metálica, es necesario un tubo interior de cerámica. Estos sensores están compuestos de metales nobles y son muy susceptibles a la contaminación. Por ello es recomendable revestirlos con material cerámico. No presentan envejecimiento hasta temperaturas próximas a 1400°C. En cambio la presencia de fósforo y silicio se destruyen este tipo de sensores puesto que provocan la contaminación del polo.
- Tipo U: Aparecen de la combinación de cobre y una aleación de cobre y níquel. Tiene un rango bajo de temperatura de 0°C a 50°C.
- Tipo G, tipo C y tipo D: Fabricados con una combinación de tungsteno y una aleación de tungsteno y renio para el caso del tipo G mientras que los termopares tipo C y D aparecen de la unión de dos aleaciones de tungsteno y renio de composiciones distintas. Permiten medir temperaturas extremas, con un rango de 0 °C a 2300 °C. Se deben manipular con cuidado, ya que sus materiales son frágiles, además pierden su eficacia para temperaturas inferiores a 400 °C y les afectan las atmósferas oxidantes.

Se han comentado los tipos de termopares en función de su composición, así como sus características principales y para que rangos de temperatura de medición son útiles. Además, se han tratado las limitaciones más representativas de cada uno de ellos. Otro apartado a tener en cuenta a la hora de realizar la clasificación de los termopares y seguir con la búsqueda del que mejor se adapte a las condiciones de trabajo, es según la forma que adquieren. Existen 3 grandes grupos:

- Termopar de alambre en cordón: Es la forma más sencilla en la que se puede presentar un termopar. Son básicamente dos trozos de alambre unidos con un cordón soldado. Proporcionan un tiempo de respuesta muy rápido. Debido a la escasa protección del sistema y su exposición al entorno, tienen varias limitaciones:

No se puede usar con líquidos que puedan corroer u oxidar el instrumento, al estar al descubierto son más sensibles a todo lo que les rodea y las mediciones se pueden ver afectadas por el entorno.

- Sonda de termopar: Es una evolución del sistema anterior, que es alojado dentro de un tubo metálico. La pared del tubo recibe el nombre de funda de la sonda, generalmente fabricada en acero inoxidable (interesante por su amplia compatibilidad química) e Inconel (compatible con rangos de temperatura más altos que el acero inoxidable). La punta de la sonda del termopar está disponible en tres estilos diferentes: A tierra (termopar en contacto con la pared de la funda, lo que proporciona un tiempo de respuesta rápido pero susceptible a bucles de tierra eléctricos), sin conexión a tierra (donde el termopar está separado por una capa de aislamiento y por lo tanto tiene un tiempo de respuesta mayor) y expuesta (donde la punta sobresale de la funda, especialmente utilizados para la medición de aire).
- Sonda de superficie: Se utilizan para medir la temperatura de una superficie sólida asegurando una medición continua. Para que esto ocurra, toda la superficie del sensor está en contacto con la superficie a medir. Estos instrumentos se pueden acoplar incluso a mecanismos en movimiento. Un gran inconveniente es la complejidad de estas sondas respecto a las otras dos y por lo tanto el precio.

Termorresistencias

Las termorresistencias son dispositivos de medición de temperatura resistivos. Esto significa que el sensor determina la temperatura del entorno basándose en la variación de su valor óhmico. El valor resistivo de los metales que se utilizan como referencia es mayor a medida que aumenta su temperatura.

Al igual que los termopares, existen diferentes tipos de termorresistencias. Para uso industrial se emplean habitualmente sensores de temperatura de resistencia Pt100 o Pt1000. Las características exactas de los sensores se especifican en la norma EN 60751: 2008. Las versiones comerciales de mayor presencia en la industria a día de hoy son las siguientes:

- Sensores de hilo bobinado: Es el tipo de termorresistencia más extendido en la práctica industrial y ha sido utilizado durante décadas. Su diseño es muy básico. Basta con un hilo metálico muy fino (generalmente cobre, níquel o platino), envuelto por un cuerpo de protección. Este cuerpo suele ser un vidrio o cerámica y los límites de aplicación de este dispositivo varían en función de la calidad del material de aislamiento. El hilo bifilar de un sensor de vidrio se funde con el cuerpo de protección para limitar el movimiento y reducir la influencia de las vibraciones. Uno de los inconvenientes de este sistema de protección es que el vidrio aumenta su conductividad térmica con la subida de la temperatura y el sensor pierde su precisión. Por lo tanto, el rango de uso de temperatura de estos dispositivos va aproximadamente entre -200 °C y 400 °C. Mientras, en el caso del sensor cerámico el hilo se aloja en su interior sin ser sujeto y toma forma de espiral. La falta de sujeción le hace vulnerable a vibraciones y en consecuencia sus mediciones se ven alteradas por lo que no es recomendable su uso cuando están presentes en el

entorno a medir. Sin embargo, estos sensores ofrecen un rango de medición de temperaturas más amplio (-200 °C a 600 °C).

- Resistencias de película delgada: Una fina capa de platino es aplicada sobre una placa soporte de cerámica. Después se colocan los conductores y se sellan con una capa adicional de vidrio para aislarlos del entorno exterior. Estos dispositivos destacan por su tamaño especialmente reducido y su alta resistencia a las vibraciones. El rango de operación va de -50 °C a 500 °C. Su uso está ampliamente expandido en los hornos domésticos y su coste de fabricación es relativamente bajo en comparación a los sensores de hilo bobinado.

Tabla resumen y motivos de selección

La precisión de los termopares varía en función del fabricante, pero todas se deben acoger a la norma DIN EN 60584-1. Dentro de esa norma existen diferentes clases de termopares para realizar la medición. En este caso se escogen las clases 1 y 2 puesto que son los tipos de sensores que interesan (a partir de -40 °C en adelante). La clase 3 es para temperaturas inferiores a -40 °C y no son rangos de temperaturas interesantes para la toma de medidas en una caldera de biomasa. En el caso de las termorresistencias, sus rangos y precisiones se encuentran en la norma EN 60751: 2008.

Modelo	Rango de medidas (°C)	Desviación límite (°C)	Utilidad proyecto
Tipo J	-40 a 750	Clase 1: $\pm 1,5$ Clase 2: $\pm 2,5$	Gases: No Agua: Sí Aire: Sí
Tipo K	-200 a 1200	Clase 1: $\pm 1,5$ Clase 2: $\pm 2,5$	Gases: si Agua: Sí Aire: Sí
Tipo T	-200 a 350	Clase 1: $\pm 0,5$ Clase 2: ± 1	Gases: No Agua: No Aire: No
Tipo E	-200 a 900	Clase 1: $\pm 1,5$ Clase 2: $\pm 2,5$	Gases: No Agua: Sí Aire: Sí
Tipo N	-200°C a 1200	Clase 1: $\pm 1,5$ Clase 2: $\pm 2,5$	Gases: Sí Agua: Sí Aire: Sí
Tipo R y S	0 a 1600	Clase 1: ± 1 Clase 2: $\pm 1,5$	Gases: Sí Agua: No Aire: No
Tipo B	600 a 1700	Clase 1: ± 1 Clase 2: $\pm 1,5$	Gases: Sí Agua: No Aire: No
Tipo U	0 a 50	Sin datos norma DIN EN 60584-1	Gases: No Agua: No Aire: No
Tipo G, C y D	0 a 2315	Clase 1: ± 1 Clase 2: $\pm 1,5$	Gases: Sí Agua: No Aire: No

Hilo Bobinado	-200 a 600	< $\pm 0,3$	Gases: No Agua: Sí Aire: Sí
Película delgada	-50 a 500	< $\pm 0,3$	Gases: No Agua: Sí Aire: Sí

La instrumentación a instalar en los equipos, debe tener las características necesarias para funcionar de forma continua durante un largo periodo de tiempo. En este caso, la precisión no es el factor más determinante y pasan a un primer plano la robustez y durabilidad de los instrumentos seleccionados. La manejabilidad o la versatilidad de los mismos también es necesario tenerlos en cuenta.

Se han visto los principios de funcionamiento de los dos tipos de termómetros que a priori son útiles para la toma de datos de temperatura en diferentes zonas de la caldera. Antes de seleccionar un modelo, es necesario decantarse por termopar o termorresistencia. Después de haber realizado un amplio estudio sobre las posibilidades existentes, el uso de termopares es el más adecuado para monitorizar las temperaturas de distintas zonas de la caldera por varios motivos:

Las ventajas de estos dispositivos son varias, destacan por su bajo costo (diseño simple) y su larga vida útil (ausencia de conjuntos complejos y elementos de fricción). Además del amplio rango de medidas en comparación a las que ofrecen las termorresistencias, con las que sería muy complicado medir la temperatura de los gases superiores a 600 °C aunque proporcionan una mayor exactitud cometiendo errores de precisión de 0,2°C o inferiores. Otro motivo es su fácil montaje y desmontaje en la instalación. Su principal limitación está en la exactitud, pues es fácil obtener errores del sistema cuando se trabaja con precisiones inferiores a 1°C.

También existen razones económicas. El coste de las termorresistencias suele ser de 2 a 3 veces mayor que los termopares. Esto se debe a que las termorresistencias son dispositivos con diseños más complejos y, por tanto, más caros. Si es cierto que la instalación de las termorresistencias es más sencilla y barata que la de los termopares, aun así, sigue siendo más económico el uso de termopares.

La versatilidad de los termopares, es otro factor a tener en cuenta. Se pueden encargar sensores con diámetros muy pequeños (1 mm o incluso inferiores) lo que permite facilitar su instalación en zonas que existen restricciones de espacio. Un factor a tener en cuenta a la hora de trabajar con los termopares, es la lenta pero prolongada desviación que sufren de su señal con el paso del tiempo, que necesita corregirse periódicamente. Por su parte las termorresistencias son más sencillas de calibrar, reciben señales más robustas y proporcionan lecturas más estables. Además de su buena tolerancia a las interferencias eléctricas, aunque en el caso de este proyecto no es un factor problemático.

Todos dispositivos tienen sus ventajas e inconvenientes. Es necesario realizar un balance en términos generales y escoger el sensor que mejor se adapte a la caldera para cada uno de los fluidos a medir.

Una vez que se ha realizado la selección del tipo de termómetro, es necesario decidir cuál es la forma que tendrá el termopar que se ha seleccionado. Después de mostrar los aspectos en los que pueden presentarse los termopares, el sistema de medición más adecuado para la caldera

del proyecto es la sonda termopar. Es más sencilla y más económica que la sonda de superficie por motivos relacionados con la simplicidad del diseño y además es más resistente a entornos desfavorables o tiene mayor vida útil que el termopar de alambre en cordón ya que vienen protegidos por una funda.

II. CAUDALÍMETROS

Medición del caudal de agua en la instalación

A la hora de seleccionar el instrumento correcto, es necesario diferenciar entre la tecnología de medición intrusiva o no intrusiva, en función de si se realiza de forma directa o indirecta. La mayoría de estos dispositivos sirven tanto para líquidos como para gases a excepción del caudalímetro electromagnético que solo sirve para líquidos conductores. Después de consultar la información en diferentes fuentes y proveedores como (Asociación Técnica Española de Climatización y Refrigeración - ATECYR, 2011) o (Ingalaturre et al., 2010) los sistemas de medición de flujo más empleados son:

Caudalímetros intrusivos:

- Tubo Venturi: Se utiliza para la medida de caudales tanto de líquidos en tuberías como de aire en conductos de sección circular. Normalmente se compone de una pieza del mismo tamaño en los extremos que la tubería donde se realiza la medición con un estrechamiento (garganta) en el tramo intermedio. Se conecta un manómetro entre la entrada al caudalímetro y la garganta y a partir de la ecuación de Bernoulli y otras consideraciones, se puede calcular la velocidad teórica que junto a un coeficiente de velocidad que se calcula de forma experimental, permite obtener la velocidad real del fluido. El mantenimiento requerido es mínimo, producen una mínima caída de presión y se puede usar para medir grandes flujos. Su principal inconveniente es el coste elevado con respecto a otros sistemas. Algunas de las recomendaciones para la instalación de estos dispositivos son que la tubería debe ser de sección circular, circule a tubo lleno y estar en posición horizontal. Para garantizar la condición de flujo uniforme y que la medición sea correcta se necesitan 5 diámetros aguas arriba y 4 aguas abajo respecto a la colocación del instrumento.
- Métodos de área variable (rotámetros): Se trata de un caudalímetro de coste reducido, que permite conocer el caudal con una precisión suficiente para ajustar el caudal a su valor nominal. Su funcionamiento se basa en la generación de una fuerza de arrastre constante mediante la variación de la sección de la tubería o conducto en función del caudal que fluye por el interior. Está formado por un tubo cónico y un flotador que se mueve libremente en el interior que es la pieza encargada de regular el caudal. Además dispone de una ventana de visualización del fluido que permite prevenir y determinar problemas relacionados con el purgado o la corrosión de las tuberías. Sin embargo, tiene ciertas limitaciones puesto que la precisión no es la correcta para la realización de balances energéticos. Sirve para líquidos y gases, su caída de presión es baja y tienen una instalación y mantenimiento simple. Para

su correcta instalación se sugiere que esté lo más vertical posible y libre de vibraciones. Además se recomienda colocar el rotámetro 5 diámetros aguas arriba y debajo de elementos que provoquen restricción de flujo.

- Método de turbina: Lo forman una hélice o rotor de diseño especial montada en el interior del conducto o tubería. Lo normal es que sean axiales y giran proporcionalmente al caudal de paso. Ese giro se puede medir de diferentes maneras (procedimientos magnéticos, ópticos, etc.) y es útil para un amplio rango de medición. Suele presentar problemas de pérdida de carga por rozamiento. Sin embargo, se caracterizan por su buena repetibilidad y precisión en las medidas tanto para líquidos como para gases aunque es necesario recalibrar periódicamente. Requieren tramos rectos de tubería de 10 diámetros antes de la entrada al medidor y 5 diámetros a la salida
- Métodos electromagnéticos: Funcionan según la Ley de Faraday. Se usan caudalímetros electromagnéticos que permiten medir la velocidad del fluido en función de la fuerza electromotriz inducida que experimenta un medio conductor que se mueve dentro de un campo magnético. Son muy precisos a la hora de medir el caudal del agua. Tienen un coste relativamente bajo siendo una opción muy interesante relación precisión-precio. Además no obstaculiza el flujo, por lo tanto no producen pérdidas de carga. El principal inconveniente es que sirven para fluidos conductores y además la deposición de alguna sustancia en el interior del tubo puede dar lugar a errores de medición. Por lo general se recomienda un mínimo de 10 diámetros aguas arriba y 5 diámetros aguas abajo de donde esté instalado el medidor electromagnético.

Caudalímetros no intrusivos:

- Método por ultrasonidos: Es la única medida de caudal no intrusiva. Permite la medida del caudal de líquidos en tuberías. Es la manera más fiable de realizar medidas de caudal y balances en instalaciones donde no existe instrumentación fija. Estos instrumentos gozan de mucha versatilidad puesto que se puede utilizar en cualquier tubería donde el líquido que fluye en su interior permita la propagación del sonido. Se pueden emplear con diámetros nominales muy pequeños y una vida útil elevada ya que miden fluidos sin entrar en contacto directo. Aunque es cierto que la medida es muy sensible a la presencia de burbujas y no es recomendable instalar estos sensores en tramos de tubería verticales. Se recomienda ser instalado manteniendo una conducción recta de 10 diámetros aguas arriba y 5 diámetros aguas abajo.

Existen otras formas de medida de caudal de forma no intrusiva, que son medir el caudal a partir del incremento de presión producido por la bomba o realizar la medición a través de la pérdida de presión que se da en una válvula de equilibrado. Debido a su baja precisión, no se contemplarán como opción para realizar la toma de medidas de este proyecto.

Medición del caudal de aire en la instalación

La medición del caudal de aire se suele realizar de forma puntual, calculando la velocidad del flujo en uno o varios puntos de sección conocida. Los sistemas de medición exclusivos para gases más utilizados son los siguientes:

- **Caudalímetros mecánicos:** Disponen de una turbina o molinete. Su velocidad de rotación proporciona la medida de la velocidad en el punto donde se ha instalado. Se emplea en medidas al aire libre o conductos de ventilación de gran tamaño. Su uso es muy sencillo y el coste es bajo comparado con otros sistemas de medición. En secciones de menor tamaño se tiene que considerar la posibilidad de que produzca un bloqueo aumentando la velocidad de medida del flujo.
- **Caudalímetros de hilo caliente:** Se emplea en equipos comerciales para medir la velocidad de los gases de forma instantánea. Es una sonda, formada por un puente Wheatstone y un sistema electrónico. La sonda tiene un sensor metálico que tiene forma de hilo y actúa como una resistencia y a la que se le somete una corriente eléctrica para mantenerlo por encima de la temperatura del fluido. El calor que pierde dicho hilo depende de la velocidad del fluido (pérdidas por convección). Una de las grandes ventajas de estos aparatos es que se pueden introducir en orificios de 10 mm lo que le permite una amplia versatilidad de uso. El sensor es sensible y el entorno puede dañarlo inutilizando el equipo.
- **Tubo de Pitot:** Su uso está ampliamente extendido y mide la presión dinámica mediante la diferencia entre la presión total y la estática, que se miden a través de dos sondas de presión. Mediante las ecuaciones de Bernoulli se obtiene la velocidad. Su coste es relativamente bajo, las pérdidas de carga no son muy significativas y la instalación de los dispositivos es sencilla y móvil. Algunos de los inconvenientes son la menor precisión que otros aparatos, su tendencia al ensuciamiento y su escasa efectividad para la medición de caudal de líquidos puesto que puede dañar la sonda.

Tabla resumen

Caudalímetro	Ventajas	Inconvenientes
Tubo Venturi	Elevada precisión Causa poca pérdida de carga Mantenimiento mínimo Se pueden medir grandes flujos	Coste elevado Dificultad de instalación
Rotámetros	Coste reducido Permite prevenir y determinar problemas de corrosión Instalación y mantenimiento simple Pérdidas de presión reducidas	Uso limitado para balances energéticos (problemas de precisión) Instalación en tubos verticales
Método de turbina	Buena repetibilidad y precisión Amplio rango de medición	Pérdidas por rozamiento Recalibración periódica
Método electromagnético	Buena precisión Relación precio-precisión muy interesante	Funciona con líquidos conductores Deposición en el tubo de medición puede provocar errores de medida

	No generan pérdida de carga	
Método por ultrasonidos	Versatilidad Vida útil elevada Posibilidad de medir diámetros muy pequeños	Medida sensible a la presencia de burbujas y deposiciones en la tubería su uso en tuberías horizontales desaconsejado
Caudalímetros mecánicos	Buena utilidad para conductos grandes o al aire libre Simplicidad de uso y mantenimiento Coste bajo	Posibilidad de bloqueo de tuberías pequeñas alterando velocidad del interior
Caudalímetros de hilo caliente	Tamaño compacto (Versatilidad de uso) No provoca obstrucciones en tuberías	Sensibilidad del sensor
Tubo de Pitot	Uso ampliamente extendido Coste relativamente bajo Instalación sencilla y de fácil movilidad	Menor precisión que otros aparatos Tendencia al ensuciamiento No es recomendable su uso con líquidos

ANEXO II: PROGRAMA DE CÁLCULO DE LA EFICIENCIA DE COMBUSTIÓN DE LA CALDERA

{ANALISIS DE COMBUSTIBLE (b.s., con cenizas)}

//Nota: No se ponen acentuacion a las palabras porque a veces en este tipo de programas da error.

//Primero se determinar la composicion del combustible que va a ser analizado

//Es necesario comentar que fm significa fraccion masica

//Los datos iniciales son en base seca

"//Pellet de pino

fmcs=50,9

fmhs=6,1

fmos=100-fmcs-fmhs-cens-fmns-fmss

fmns=0,09

fmss=0,02

cens=0,4

fmh2o=7,2 {Humedad en b.h.}

PCI = 17550 {kJ/kg}"

//Pellet agricola

fmcs=46,36

fmhs=5,77

fmos=100-fmcs-fmhs-cens-fmns-fmss

fmns=0,56

fmss=0,055

cens=5,947

fmh2o=9,1 {Humedad en b.h.}

PCI=15500 {kJ/kg}

//Se toman como muestra 100 kilos de combustible y dividiendo para la masa molecular se obtiene la composicion en kmoles

//Antes de realizar el cociente es necesario pasarlos a base humeda.

fmc = fmcs * (1 - fmh2o/100)

fmh = fmhs * (1 - fmh2o/100)

fmo = fmos * (1 - fmh2o/100)

fmn = fmns * (1 - fmh2o/100)

fms = fmss * (1 - fmh2o/100)

cen = cens * (1 - fmh2o/100)

//Una vez en base humeda se puede continuar con el planteamiento de la combustión

c = (fmc/12)

h = (fmh/1)

o = (fmo/16)

n = (fmn/14)

s = (fms/32)

x = (fmh2o/18)

j = (Rsol * C%res) / 12

//Se plantea la ecuacion. Ademas se necesitan 4 datos extra del analizador de gases de la parte experimental
 //Con la ecuacion y los datos de porcentaje de CO₂, CO, Rsol (residuos sólidos) y calculo de moles de agua en el aire se obtienen 9 ecuaciones y 9 incognitas
 //Los porcentajes de CO y CO₂ en base seca sin tener en cuenta el agua se obtienen de forma experimental



//Balances de materia del Carbono (c), Hidrogeno (h), Oxigeno (o), Nitrogeno (n) y Azufre (s)

$$\begin{aligned} c &= b + d + j \\ h + 2*x + 2*a*x_{aire} &= 2*e \\ o + x + 2*a + a*x_{aire} &= 2*b + d + e + 2*g + 2*i \\ n + 7,52*a &= 2*f \\ s &= i \end{aligned}$$

//Los datos de % de CO₂, ppm de CO y C%res=10% se obtienen de laboratorio.
 //Para el caso de la humedad del aire, es necesario buscar la humedad relativa y la temperatura ambiente en el dia de pruebas en este caso r=0,8 y Tref=25

$$\begin{aligned} \{O_2\text{gases} &= 0,0725\} \\ CO_2\% &= 6,3 / 100 \\ CO\% &= 2004 / 1000000 \\ T_g &= 32 \end{aligned}$$

$$C\%_{res} = 0,1$$

//Para obtener los kmol de agua del aire, se multiplica la humedad específica del aire por el cociente 4,76 (moles totales de aire) y por el cociente entre el peso molecular del agua y el aire
 //De esta forma junto a los datos obtenidos experimentalmente y las aproximaciones de los residuos de cenizas, obtenemos el mismo numero de incognitas y de ecuaciones

$$r = 0,8$$

$$\begin{aligned} x_{aire} &= 4,76 * w_{aire} * (28,97/18) \\ w_{aire} &= Humrat(AIRH_2O; P=1; T=T_{ref}; R=r) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} O_2\% &= g / (b + d + f + g + i + j) \\ CO_2\% &= b / (b + d + f + g + i + j) \\ CO\% &= d / (b + d + f + g + i + j) \\ R_{sol} &= cen / (1 - C\%_{res}) \end{aligned}$$

//Se procede al calculo de perdidas separadas. Se va a plantear el rendimiento sobre el PCI las perdidas calculadas son: calor sensible de los gases (P_csg), generacion de carbono (P_c) y monoxido de carbono (P_co) en la combustion, perdidas de residuos solidos (P_Rsol) y las perdidas por radiacion y conveccion (P_ryc) a las que se les suma P_cond se que es la energía recuperada del calor latente de los gases

//El PCI se da en kJ/kg y la cantidad de combustible tomado para el analisis es de 100 kg, por lo que los resultados calculados anteriormente hay que dividirlos por un factor de 100
 //Rendimiento sobre el PCI, despues de las simplificaciones convenientes queda:

$$\begin{aligned} Rend_{PCI} &= (1 - Perdidas + P_{cond}) * 100 \\ Perdidas &= P_{ryc} + P_{csg} + P_{Rsol} + P_c + P_{co} \end{aligned}$$

//Cálculo PCS, a partir del PCS del combustible y el PCI obtenido

$$\text{PCS} = \text{PCS}_0 \cdot (1 - \text{fmh}_{2\text{o}} / 100)$$

$$\text{PCI} = \text{PCS} - 2443 \cdot (\text{fmh}_{2\text{o}} / 100) + 8,938 \cdot \text{fmh}_{\text{s}} / 100 \cdot (1 - \text{fmh}_{2\text{o}} / 100)$$

$$\text{Rend}_{\text{PCS}} = \text{Rend}_{\text{PCI}} \cdot \text{PCI} / \text{PCS}$$

//Las pérdidas por conveccion y radiacion se suponen constantes y se obtienen de resultados experimentales

$$P_{\text{ryc}} = 0,01$$

//Pérdidas por formacion de CO en combustion

$$P_{\text{co}} = (d \cdot 283000) / \text{PCI} / 100$$

//Pérdidas por formacion de C en combustion

$$P_{\text{c}} = (j \cdot 393500) / \text{PCI} / 100$$

//Pérdidas por residuos solidos

$$c_{\text{Rsol}} = 1 \text{ \{kJ/kgK\}}$$

$$T_{\text{Rs}} = 100 \text{ \{°C\}}$$

$$P_{\text{Rsol}} = (j \cdot c_{\text{Rsol}} \cdot (T_{\text{Rs}} - 25)) / \text{PCI} / 100$$

//Pérdidas por calor sensible de los gases, es necesario calcularlas por separado las de CO₂, CO, N₂, O₂, SO₂ y H₂O. Se necesitaran las entalpias de los gases a 25°C y la temperatura de los gases de combustion:

$$T_{\text{ref}} = 25$$

$$P_{\text{csg}} = P_{\text{csgCO}} + P_{\text{csgCO}_2} + P_{\text{csgN}_2} + P_{\text{csgO}_2} + P_{\text{csgSO}_2} + P_{\text{csgH}_2\text{O}}$$

//Para CO

$$h_{\text{co}} = \text{Enthalpy}(\text{CO}; T = T_{\text{ref}})$$

$$h_{\text{co_real}} = \text{Enthalpy}(\text{CO}; T = T_{\text{g}})$$

$$P_{\text{csgCO}} = d \cdot (h_{\text{co_real}} - h_{\text{co}}) / \text{PCI} / 100$$

//Para CO₂

$$h_{\text{co}_2} = \text{Enthalpy}(\text{CO}_2; T = T_{\text{ref}})$$

$$h_{\text{co}_2_real} = \text{Enthalpy}(\text{CO}_2; T = T_{\text{g}})$$

$$P_{\text{csgCO}_2} = b \cdot (h_{\text{co}_2_real} - h_{\text{co}_2}) / \text{PCI} / 100$$

//Para N₂

$$h_{\text{n}_2} = \text{Enthalpy}(\text{N}_2; T = T_{\text{ref}})$$

$$h_{\text{n}_2_real} = \text{Enthalpy}(\text{N}_2; T = T_{\text{g}})$$

$$P_{\text{csgN}_2} = f \cdot (h_{\text{n}_2_real} - h_{\text{n}_2}) / \text{PCI} / 100$$

//Para O2

h_o2 = Enthalpy(O2;T=Tref)
h_o2_real = Enthalpy(O2;T=Tg)

P_csgO2 = g * (h_o2_real - h_o2) / PCI /100

//Para SO2

h_so2 = Enthalpy(SO2;T=Tref)
h_so2_real = Enthalpy(SO2;T=Tg)

P_csgSO2 = i * (h_so2_real - h_so2) / PCI /100

//Para H2O

h_h2o = Enthalpy(H2O;T=Tref)
h_h2o_real = Enthalpy(H2O;T=Tg)

P_csgH2O = e * (h_h2o_real - h_h2o) / PCI /100

//Calor recuperado en calderas de condensación

//Las calderas de condensacion recuperan el calor latente de los gases

//Se calcula el vapor de agua presente en los gases de combustión que condensa (diferencia entre el agua producida en la combustión y el máximo de agua que puede contener los gases para la temperatura a la que se encuentran) a partir de la presión parcial del agua y la presión parcial del agua máxima.

//Una vez que se tiene el agua que condensa, si se multiplica por su entalpía de vaporización y se divide para el PCI del combustible, se obtiene la energía recuperada.

Pp_H2O = e/(b + d + e + f + g + i + j)
Pp_H2Omax = P_sat(Steam;T=Tg)
Pp_H2Omax = e_max/(b + d + e_max + f + g + i + j)
W_cond = e - e_max

//Una vez que tenemos el agua condensada se obtiene el calor recuperado

H_vap = Enthalpy_vaporization(Steam;T=Tg)

P_cond1 = W_cond * H_vap / PCI / 100

//Se coloca un If para valores en los que no se puede calcular (cuando las ganancias por condensacion son inferiores a 0 o superiores a 0,1)

P_cond2 = If(P_cond1;0;0;P_cond1)

P_cond = If(P_cond2;0,1;P_cond2;0;0)

ANEXO III: PROTOCOLO DE USO DEL ANALIZADOR DE GASES

Objetivos:

- Medir compuestos químicos contenidos en la masa de productos, gaseosos o no, emitidos durante la combustión de caldera.
- Determinación de la calidad del combustible utilizado.
- Adaptación de la caldera a dicho combustible para lograr una adecuada combustión.
- Reducción de emisión de gases contaminantes analizando el combustible.
- Adaptación a la legislación vigente de emisión de gases que cada vez es más exigente.

Aplicabilidad:

El sistema de analizador de gases en nuestro caso será utilizado para la combustión en una caldera comercial, pero es aplicable a cualquier mecanismo en el que se produzca combustión y se quiera analizar dichos gases de escape.


Preparación, comprobaciones previas y manera de proceder:

1. Abrir la caja del analizador y quitar los laterales.
2. Conectar a red.
3. Conectar todas las partes de la sonda con delicadeza:
 - Tubo flexible de la sonda
 - Sonda tubo largo-quitarle el tapón y guardarlo en el estuche
 - Cables negros conectados entre si
4. Posteriormente, conectar la sonda con cuidado al analizador. Antes de la conexión, ver las marcas de plástico del analizador y de la sonda para que coincidan al realizar su conexión.
5. Conectar el cable RS232 entre el analizador y el PC.
6. Comprobar el estado de los dos filtros (en la propia manguera y abajo en el analizador. Para retirar el filtro hay que apretar hacia adentro y girar. Tener cuidado con el filtro de la manguera porque es lana de vidrio y se tiene que manejar con guantes.
7. Conectar la botella de condensados.
8. Verificar que la tarjeta SD esté insertada para guardar los nuevos datos en ella.
9. Encender con tecla marcha/paro (⊙) :
 - Se calientan los equipos (alrededor de 30 min), hasta que todo pase de “...” a “OK”.
10. Una vez termine el tiempo de calentamiento, verificar que aparezca “**Presionar ON para modo medida**” y entonces pulsar de nuevo la tecla marcha/paro (⊙) para realizar el cero del analizador.

- Mientras se realiza el “cero” del analizador (unos 5 min), un rectángulo que aparece en la parte inferior de la pantalla se va llenando y parpadea “0.0”.
 - En este momento se puede verificar las condiciones del menú de guardar datos.
11. Para crear una nueva carpeta de almacenamiento de datos:

F3 Data → **Seleccionar un sitio** → **Nuevo**


- Asegurar que los datos de la prueba anterior estén bien descargados. Entonces, formatear o vaciar la memoria (“borrar todas las medidas”) para tener más sitio libre.
 - Entrar el nombre del nuevo sitio donde se van a guardar los datos de la prueba.
12. Para modificar el formato de guardar datos, si se está en otro menú, apretar F2 settings.

Una vez dentro de F2 settings, para ir a la opción **ajustar medida** apretar el botón de la flecha () y realizar los siguientes ajustes:

F2 Settings →

- **Ajustar el Intervalo de Auto-Cero a 2 h.**
 - **Ajustar Auto-Medida indicando:**
 - Destinación memoria: MMC/SD.
 - Duración: máx (pulsar tecla F3).
 - Intervalo: 30 s (*cambiar según necesidades*).
 - Almacenamiento: ON
 - Imprimir: OFF
 - Valores medios: OFF
 - Al final, cuando todo esté entrado, se elige: “Auto-Medida: ON”
 - Empieza a registrar datos en el “sitio” elegido de la tarjeta SD.
13. Para mirar los valores en pantalla durante la medición **Apretar F1.**
14. Se inserta la sonda de gases en la chimenea. Se cuidará en medir en el punto medio de la chimenea. También se tendrá particular cuidado en evitar las infiltraciones de aires alrededor de las sondas. Finalmente, la sonda tendrá que estar lo más recto posible (perpendicular a la chimenea).

Para parar el programa:

15. Para finalizar la prueba: volver a **F2 Settings**, “Auto-Medida: OFF”.
16. Pulsar la tecla marcha/paro () y elegir “Cargar batería”.
- Se recomienda la purga del analizador.
 - Se recomienda dejarlo medir el aire limpio para limpiar bien el analizador. Puede ser durante 1 hora, antes o después de la prueba.
 - Cuando se quite la conexión a red, se para del todo el analizador.

Para mirar y grabar los datos desde el programa:

1. Abrir el programa "MRU_32bit_data_logger".
2. En el menú desplegable elegir "COM1".
3. Pulsar el botón "Iniciar" y se empieza a ver las medidas en tiempo real.
4. Se puede cambiar cada canal (9 en total), eligiendo en la barra de arriba (pestaña "ajustes" la variable interesada.
5. Cuando se desee, parar pulsando "Stop".
6. Luego pulsar "Guardar datos", se escriben los datos en el archivo deseado.

Para leer y exportar a Excel los datos guardados en la tarjeta SD:

1. Se inserta la tarjeta en el PC donde estará previamente instalado el programa "MRU_32bit_data_logger".
2. Se pulsa el botón "Leer datos guardados" y se elige el archivo a leer.
3. En la barra del menú: lista/exportar.
4. Allí aparece la tabla.
5. Pulsando "guardar lista".
6. Se introduce el nombre del archivo a guardar y se elige la extensión ".xls".

Encendido con programador:

Se puede dejar preparado el arranque con programador para que se encienda un tiempo antes de la prueba y se estabilicen las células del analizador de gases.

1. Entrar todos los datos necesarios para programar las medidas (F2 Settings → ...)
2. Apagar con tecla marcha/paro (⊙).
3. Elegir opción: cargar batería.
 - Se purga el analizador (~ 1 min).
 - Aparece la pantalla de carga de la batería.
4. F5 Timer → Entrar la fecha y hora deseada del programador.

Cambiar las variables que se ven en la pantalla:

Antes o durante la medición, es posible ajustar las variables y el orden en el que aparecen en la pantalla durante la medición.

1. F2 Settings → Programa Medida → F3 Display
 - Elegir parámetros con las flechas derecha e izquierda.

Cambiar las variables que se imprimen:

1. F2 Settings → Programa Medida → F2 Imprimir
 - Elegir parámetros con las flechas derecha e izquierda.

ANEXO IV: PROTOCOLO DE USO DE LA SONDA Y PESADA DE ANILLOS

Objetivos generales:

- Correcta manipulación del material para garantizar la seguridad del personal así como la adecuada conservación de las herramientas (Anillos de deposición, sonda, etc.)
- Conseguir un proceso fiable y reproducible.
- Analizar el combustible en función de sus características de deposición.
- Predicción del comportamiento de los diferentes combustibles procedentes de biomasa.
- Dar claridad al proceso para evitar malentendidos.

Objetivos específicos de la manipulación de la sonda:

- Comprobación y verificación tanto de la sonda de deposición como las partes desmontables para su utilización en las pruebas de combustión.
- Manipulación y manejo de forma segura de la sonda de deposición durante la inserción y extracción de la misma en los distintos puntos de muestreo de los equipos de intercambio térmico de proceso (cámara de combustión y cuerpos de caldera) durante las pruebas de combustión.

Objetivos específicos del proceso del pesaje de anillos:

- Preparar los anillos de cara a su utilización durante las pruebas de combustión.
- Obtener el ratio de deposición para una prueba y condiciones dadas.
- Recoger muestras de los depósitos obtenidos en la sonda de deposición para su análisis en SEM/XRD u otra técnica de análisis.

Personal requerido:

Para el proceso de pesaje de anillos bastará con 1 persona.

Respecto a la manipulación de la sonda, será necesario el trabajo en equipo de 3 personas.

Aplicabilidad:

Es un protocolo para realizarse en calderas comerciales de características generales que utilizan como medio de alimentación biomasa ya sea agrícola o forestal, pero se puede extrapolar a cualquier tipo de instalación donde se generen cenizas de biomasa.

Material necesario:

Se va a dividir el material necesario en tres grupos, habrá uno que lo formarán herramientas y accesorios que serán útiles a lo largo de todo el proceso y luego existirán dos grupos de materiales específicos para la realización del pesaje de anillos y la utilización de la sonda.

Material general:

1. Los guantes serán imprescindibles (nitrilo o vinilo, de protección para el manejo de herramientas, de protección para uso en aplicaciones de alta temperatura, etc.)
2. El uso de botas de seguridad siempre que se entra en un laboratorio o taller es recomendable.
3. Será necesario llevar gafas de protección contra proyecciones.

Material específico pesada de anillos:

1. Acetona.
2. Guantes de nitrilo o de vinilo.
3. Brocha .
4. Caja para transportar las muestras.
5. Frascos de cristal con su tapa para guardar el anillo.
6. Rotulador indeleble.
7. Celo para etiquetar los frascos de cristal.
8. Cuaderno.
9. Pinza para manipular el anillo.
10. Balanza analítica.
11. Papel para limpieza (secado).
12. Calibre.

Material específico utilización de la sonda:

1. Gafas de protección contra proyecciones.
2. Guantes de protección para el manejo de herramientas.
3. Guantes de protección para uso en aplicaciones a alta temperatura.
4. Guantes de nitrilo o de vinilo.
5. Botas de seguridad.
6. Caja para transportar las muestras.
7. Frascos de cristal con su tapa para guardar el anillo.
8. Rotulador indeleble.
9. Celo para etiquetar los frascos de cristal.
10. Pinza para manipular los casquillos o anillos (también se puede utilizar unos alicates).
11. Llaves inglesas y/o llaves de tubo.
12. Extractor mecánico compuesto por garras de sujeción para los anillos.
13. Casquillos de recogida de depósitos.
14. Casquillos distanciadores de ajuste y posicionamiento.
15. Sonda de deposición (incluye el conjunto formado por todos los sistemas de instrumentación y sujeción de casquillos).

16. Bridas roscadas de fijación de la sonda en los equipos de combustión.
17. Juntas de cierre de cartón prensado antifugas.
18. Sistema de alimentación de aire comprimido (tubos de plástico, arandelas)

Preparación, comprobaciones previas y manera de proceder:

Al igual que para el material necesario, las operaciones previas que hay que realizar durante el proceso del pesaje de anillos son diferentes a las comprobaciones necesarias que hay que realizar a la sonda de deposición, así como su uso posterior. Será dividirlo en dos capítulos distintos para diferenciar los procedimientos correspondientes a cada herramienta.

I. PROCESO RELACIONADO CON EL PESAJE DE ANILLOS:

Pasos previos:

1. Reservar el laboratorio analítico.
2. Guardar en la caja de transporte el material requerido.
3. Limpiar la mesa donde se va a colocar el material.
4. Verificar que todo el material esté completo.
5. Limpiarse las manos.
6. Limpiar la balanza con una brocha (comprobar que la brocha esté LIMPIA antes de usarla). Limpiar bien el platillo y asegurar que el anillo no toque ese platillo.
7. Nivelar la balanza (verificando que la burbuja de nivel esté centrada) y enchufarla. Se calibrará automáticamente (aparecerá una numeración). Dar al botón on para encenderla.
8. Cerrar bien las puertas de la balanza, tarar y verificar que esté en cero.

Procedimiento para pesar los anillos limpios (antes de la prueba):

1. Realizar los “pasos previos” anteriormente descritos.
2. Enumerar un frasco de cristal+tapa con boli indeleble y el celo de etiquetar. Limpiar el bote por dentro asegurando que no quede suciedad que pueda caer sobre la tapa.
3. Limpiar la tapa del bote con la brocha y pesar. Cerrar bien las puertas durante la medición y esperar unos segundos hasta que se estabilice la medida. **Apuntar en el cuaderno** con las 4 cifras significativas.
4. Cubrir las manos con los guantes de nitrilo. **Importante: Siempre que se manejen los anillos deberán utilizarse los guantes.**
5. Coger con las manos con los guantes (ó con la pinza) un anillo de la caja y medir tanto su longitud como su diámetro con el calibre. Anotar en el cuaderno las medidas con 1 cifra significativa
6. Limpiar el anillo con papel humedecido con acetona. Se limpiará tanto por su cara interna como su cara externa, teniendo cuidado de eliminar material distintos al acero (ej. manchas negras, naranjas).
7. Cerrar bien las puertas de la balanza, tarar y verificar que esté en cero.

8. Colocar el anillo en el platillo de la balanza, cerrar puertas, esperar unos segundos y verificar que la medida esté estable. **Apuntar en el cuaderno la medida con las 4 cifras significativas.**
9. Sacar el anillo de la balanza, limpiar el platillo de la balanza y tarar la balanza.
10. Colocar el anillo sobre la tapa del bote y pesar el conjunto en la balanza. Apuntar en el cuaderno con las 4 cifras significativas. Cerrar el conjunto tapa+anillo con el frasco de cristal.
11. Guardar los anillos pesados con sus envases en la caja de transporte.
12. Limpiar el platillo de la balanza y tarar.
13. Pesar cada conjunto anillo + tapa por separado siguiendo procedimientos similares a los pasos 5-10.
14. Guardar los anillos con sus envases en el desecador. Se dejarán al menos 24 horas en el desecador antes de utilizarse en la prueba de combustión.
15. Guardar el resto del material.

Procedimiento para pesar los anillos sucios (después de la prueba):

1. Realizar pasos previo (número 1).
2. Sacar los botes del desecador y colocarlos en la caja de transporte. Cuidar que los anillos no se muevan dentro de su respectivo bote durante el transporte para evitar la pérdida del material depositado en el anillo.
3. Recoger el material necesario.
4. Realizar pasos previos (números 3-11).
5. Cubrir las manos con los guantes de nitrilo. **Importante: Siempre que se manejen los anillos deberán utilizarse los guantes.**
6. Colocar el envase de cristal sobre el papel y abrirlo con mucho cuidado.
7. Pesar cada conjunto anillo+tapa, siguiendo un procedimiento similar a la pesada del conjunto anillo+tapa antes de la prueba. **Apuntar en el cuaderno con las 4 cifras significativas.**
8. Quitar el conjunto de la balanza.
9. Cerrar bien las puertas de la balanza, tarar y verificar que esté en cero.
10. Pesar el anillo por separado cogiéndolo por su parte interior con las pinzas. **Apuntar el peso en el cuaderno con las 4 cifras significativas.**
11. Quitar el anillo de la balanza, con las pinzas, y ponerlo sobre la tapa. Cerrar el conjunto tapa+anillo con el frasco de cristal respectivo. Limpiar el platillo de la balanza.
12. Realizar los puntos 4-9 para el resto de los anillos.
13. Guardar los anillos con su frasco en la caja de transporte.
14. Guardar la balanza.
15. Recoger el resto del material.
16. Entregar los frascos al analista.

Procesamiento de datos:

Una vez obtenidos los datos de anillos limpios y anillos sucios, se deberá transferir la información al archivo Excel correspondiente al día de la prueba en la hoja "sonda". Las columnas que se deberán rellenar con la información de las pesadas.

II. PROCESO DE INSERCIÓN-EXTRACCIÓN DE LA SONDA:

Preparación y comprobaciones previas (Normalmente realizadas):

1. Comprobar estado de los cuatro termopares de la sonda y de sus señales en la pantalla del sistema SCADA, conectando los conectores rápidos y probando a calentar con un mechero.
2. Comprobar el estado superficial (limpieza, marcas, deformaciones, etc.) de los dos conductos de la sonda.
3. Comprobar desde el extremo final de la sonda la colocación del termopar que se encuentra dentro del tubo interior y que mide temperatura de aire. El termopar debe estar sujeto en los orificios de fijación habilitados en su interior, y la punta debe sobresalir aprox. 8 mm. del extremo libre del tubo interior.
4. Verificar el montaje de los elementos que componen la sonda y el apriete de los tornillos de la unión embridada.
5. Verificar estado de los racores de cierre rápido y unión roscada de los tubos de refrigeración con aire comprimido (entradas y salida de aire).
6. Verificar estado de los instrumentos de regulación de aire comprimido (válvula de corte, filtro-regulador de presión, manómetro de presión, regulador de caudal, uniones de cierre rápido, bifurcador de caudal y tramos de tubería).
7. Instalar conjunto brida + tubo roscado + junta cartón + tapa ciega en cada punto de muestreo, mediante los elementos roscados, tornillos y tuercas correspondientes.

Procedimiento para la inserción de la sonda de deposición en los distintos puntos de toma de contacto:

1. Colocar y sujetar la sonda de deposición en una estructura móvil.
2. Utilizando guantes de vinilo/nitrilo, introducir casquillo distanciador en la sonda hasta los topes existentes.
3. Utilizando guantes de vinilo/nitrilo, cubrir la punta de los termopares con una ligera capa de grasa conductora térmica mediante el aplicador (evita el gripaje).
4. Alojamiento de termopares en su posición: Los termopares se deben colocar, en lo posible, de forma que se encuentre en el mismo plano (plano paralelo al plano longitudinal de la sonda de deposición) y enfrentados a la corriente de los gases de combustión según la orientación de cada punto de muestreo de la instalación.
5. Utilizando guantes de vinilo/nitrilo y con pinzas de manipulación, introducir el casquillo de sacrificio de 40 mm. de longitud (**VER PROTOCOLO DE PREPARACIÓN PREVIO**) hasta que haga tope con el casquillo anterior.
6. Utilizando guantes de vinilo/nitrilo, introducir el casquillo distanciador en el extremo libre que queda después de haber introducido los dos casquillos anteriores. Colocar los casquillos de forma que los orificios para los termopares queden en el mismo plano, que será el que esté enfrentado a los gases.

7. Utilizando guantes de vinilo/nitrilo, cubrir el bulón de apriete que se utiliza para fijar los casquillos a la sonda con una ligera capa de grasa conductora térmica mediante el aplicador.
8. Colocar los elementos de ajuste y fijación de los casquillos (arandelas de ajuste y bulón de apriete), en los utillajes y orificios habilitados en el extremo de la sonda.
9. Conectar y ajustar los tubos de aire comprimido a la sonda mediante los racores de conexión rápida y el bifurcador. El modo de refrigeración depende de la temperatura de funcionamiento deseada:
 - a) Normal: entrada de aire por la camisa exterior
 - b) Variada: entrada de aire por el tubo interior (con temperaturas de gases muy altas y temperaturas de casquillo bajas)
10. Conectar los termopares al autómatas mediante los conectores rápidos.
11. Introducir la junta de estanqueidad en la sonda hasta que esta quede ajustada a la brida.

USO DE GAFAS Y GUANTES TÉRMICOS OBLIGATORIO PARA LA INSERCIÓN DE LA SONDA

12. Abrir la entrada del punto de muestreo, desenroscando los tornillos de unión y quitando la tapa ciega de cierre.
13. Introducir cuidadosamente la sonda en el punto de muestreo, **EVITANDO ROZAR O GOLPEAR LA SONDA CON LAS PAREDES DE LOS ELEMENTOS DE FIJACIÓN Y LAS PAREDES INTERIORES DE LOS EQUIPOS.**
14. Unir y atornillar las bridas de unión y fijación de la sonda al punto de muestreo.
15. Regular el sistema de refrigeración de la sonda mediante los elementos manuales de apertura e instrumentos de control (válvula, regulador de presión y regulador de caudal) hasta alcanzar las condiciones de trabajo requeridas en cada caso.

Girar muy despacio el regulador en sentido contrario a las agujas del reloj para abrir el paso de aire. **No forzar al cerrar, se puede romper.**

Procedimiento para la extracción de la sonda de deposición en los distintos puntos de la caldera:

USO DE GAFAS Y GUANTES TÉRMICOS OBLIGATORIO PARA LA EXTRACCIÓN DE LA SONDA

1. Desatornillar las bridas de unión.
2. **(PASO MÁS DELICADO)** Extraer **CUIDADOSAMENTE** la sonda evitando rozar o golpear la sonda con las paredes de los elementos de fijación y las paredes interiores de los equipos. (A partir de este momento evitar que cualquier agente exterior pueda afectar al casquillo (viento, polvo, etc.))
3. Colocar y sujetar la sonda en la estructura móvil.
4. Abrir del todo la válvula del sistema de refrigeración de la sonda para enfriar el casquillo lo antes posible.
5. Cerrar la entrada del punto de muestreo colocando la junta de estanqueidad y la tapa ciega de cierre y roscar los elementos de unión (tornillos).

6. Desconectar los conectores rápidos de los termopares.
7. Tras el enfriamiento de la sonda y sus elementos, cortar el paso de aire a la sonda de deposición mediante la válvula de corte general. **No forzar el cierre, se puede romper.**
8. Extraer **CON DELICADEZA** los elementos de ajuste y fijación de los casquillos (arandelas de ajuste y bulón de apriete) mediante pinzas o alicates de punta plana.
9. Cuidadosamente, extraer la punta del termopar del casquillo distanciador mediante pinzas de manipulación o alicates de punta plana. **TENER CUIDADO CON NO ROZAR O GOLPEAR EL CASQUILLO CENTRAL.**
10. Cuidadosamente, extraer el casquillo distanciador del extremo libre de la sonda mediante pinzas de manipulación o alicates de punta plana. **TENER CUIDADO CON NO ROZAR O GOLPEAR EL CASQUILLO CENTRAL.**
11. Cuidadosamente y con guantes de vinilo/nitrilo, extraer el casquillo central de recogida de depósitos mediante pinzas de manipulación o alicates de punta plana. Extraer con las **pinzas colocadas en el interior** del casquillo, no rozar ni tocar la parte de los depósitos. En caso de que el casquillo ofreciera resistencia utilizar el elemento extractor de 3 garras, apoyando la punta del eje roscado del mismo en el extremo saliente de la camisa de la sonda y colocando las garras del extractor en la superficie transversal libre del segundo casquillo distanciador, de forma que este segundo casquillo empuje al casquillo central y lo desplace hasta una zona segura donde pueda ser sujetado mediante las pinzas o los alicates de punta plana.
12. Depositar suavemente el casquillo sobre la tapa del bote de cristal correspondiente. Colocar el bote sobre la tapa, mantener el bote con la tapa hacia abajo, cerrarlo y dejarlo en el desecador.
13. Extraer el segundo casquillo distanciador mediante pinzas de manipulación o alicates de punta plana.
14. Proceder a la limpieza exhaustiva de las distintas partes de la sonda de deposición mediante acetona y papel.

ANEXO V: PROTOCOLO DE CLASIFICACIÓN DE CENIZAS

Objetivos generales:

- Análisis y clasificación de las cenizas obtenidas durante el proceso de combustión.
- Prevenir problemas que causan las cenizas en la caldera (corrosión, erosión, abrasión, etc.)
- Evitar la caída de rendimiento de la caldera con el uso.
- Adaptación de la combustión en función de la biomasa utilizada.
- Control de las emisiones perjudiciales al medio ambiente

Objetivos específicos de la determinación del grado de sinterización:

- Clasificar las cenizas de fondo en 4 fracciones de cenizas de acuerdo a su grado de sinterización.
- Determinar grado de sinterización de las cenizas de fondo.
- Obtener muestras para la determinación de la cantidad de inquemados presentes en las 4 fracciones de cenizas de acuerdo a su grado de sinterización.
- Obtener muestras de las 4 fracciones de cenizas de acuerdo a su grado de sinterización para su análisis en SEM y/o XRD.

Objetivos específicos de la determinación de inquemados y cenizas:

- Analizar contenido en inquemados o en cenizas en una muestra dada.

Objetivos específicos del análisis SEM y XRD:

- Obtener información de la distribución de elementos inorgánicos en las cenizas mediante el método de análisis XRD. El equipo de Difracción de Rayos X y/o Análisis por Fluorescencia, es empleado para el análisis de fases cristalinas de las cenizas resultantes de la conversión termoquímica del combustible.
- Obtener información de la distribución de elementos inorgánicos en las cenizas mediante el método de análisis SEM-EDS.

Personal requerido:

2 personas mínimo, 3 aconsejable para la clasificación según el grado de sinterización.

1 persona para determinar los inquemados.

Tanto para el análisis SEM como para el XRD, será necesario una persona cualificada al manejo de los instrumentos de observación.

Aplicabilidad:

Al igual que el resto de protocolos, están diseñados para una caldera de combustión de biomasa comercial, pero tiene aplicación a cualquier tipo de instalación donde se produzca combustión de biomasa.

Formatos disponibles para procesar los datos:

En el caso de la determinación del grado de sinterización, dispondremos de una hoja sintering de cenizas, mientras que para los inquemados, se necesitarán una hoja de recogida de datos (Análisis de inquemados-cenizas) y dos hojas de cálculo (Inquemados y Carga+Cenizas).

Material necesario:

Se va a dividir el material necesario en tres grupos, habrá un grupo de materiales específicos para determinar el grado de sinterización y la obtención del contenido de inquemados, así como el material necesario para el posterior análisis en laboratorio. No existe apartado de material específico para el análisis SEM y XRD, puesto que será personal calificado el que realice dicho procedimiento.

Material específico para análisis del grado de sinterización:

Para recogida de ceniza de la caldera, se puede usar:

- Rollo de plástico.
- Tamiz de 3,15 mm.
- 3 cubos grandes.
- Linterna o frontal.
- Cámara de fotos.
- Material de protección: guantes, gafas y mascarilla.
- Espátula pequeña.
- Pala de plástico.
- Martillo normal.
- Guantes de trabajo.
- Brocha.
- Balanzas (con rango de kg y otra con rango de g).
- Cuadernillo para recogida de datos del grado de sinterización.
- Aspiradora.

Para almacenaje de muestras para el laboratorio que las analizará, se puede usar:

- Bolsas de zip de distintos tamaños, pequeñas y grandes.
- Guantes de vinilo.
- Cámara de fotos.
- Equipos de protección personal: mascarilla y gafas.
- Mortero de ágata.
- Sobre o caja.

Material específico para análisis de ceniza:

Se puede usar:

- Caja para transportar las muestras.
- Acetona.
- Guantes de nitrilo o de vinilo.
- Brocha.

- Bolsas plásticas de tamaño pequeño para guardar las muestras resultantes del análisis.
- Rotulador indeleble.
- Crisoles con su tapa.
- Trípode.
- Rejilla metálica.
- Espátula cuchara.
- Mortero de ágata con su mazo.
- Muestras.
- Papel de limpiar (para secar/limpiar los crisoles).
- Pinza.
- Balanza analítica.
- Guantes térmicos.
- Normas vigentes de determinación de humedad y de cenizas.

Preparación, comprobaciones previas y manera de proceder:

Al igual que para el material necesario, las operaciones previas que hay que realizar y la forma de llevar a cabo el proceso es diferente. Existirán tres capítulos. En cada uno de ellos se mostrarán las acciones a realizar.

I.DETERMINACIÓN DEL GRADO DE SINTERIZACIÓN

Preparación previa:

- Las balanzas han de estar niveladas (la burbuja dentro del círculo) y cada vez que se haga una nueva pesada se ha de tarar (aunque la balanza ya ponga cero).
- Evitar la recogida cerca de corrientes de aire que favorezcan pérdida de cenizas.
- Pesar el tamiz y los cubos limpios (apuntar datos en el cuaderno correspondiente).

Procedimiento:

1. Colocar el rollo de plástico en el suelo lo más cerca que se pueda de la puerta de la caldera pero de manera que no interrumpa la operación de muestreo. Emplazar el tamiz encima.
2. Abrir la puerta de la caldera y con la linterna o frontal inspeccionar visualmente el estado de la parrilla de fondo y el cenicero. Hacer fotos de cada una de esas partes y del conjunto.
3. Identificar la presencia de inquemados. Si existe una zona con gran cantidad de inquemados, separarlo del resto de cenizas y guardar para análisis de inquemados. Esto indicará que la combustión ha sido muy deficiente y por eso se analizará aparte.
4. Colocarse los guantes, gafas y mascarilla.
5. Retirar los termopares de la zona de parrilla donde están las cenizas.
6. Hacer una retirada de las cenizas en dos o más zonas, para tener referencia de la ubicación de los depósitos encontrados. Se propone:
 - ZONA 1: parrilla de fondo.
 - ZONA 2: cenicero.

Las siguientes actividades (5-8) se realizarán de manera separada para cada zona identificada:

7. Identificar si existen zonas donde se detecte gran cantidad material inquemado. En ese caso, recogerlo aparte para su pesada y posterior análisis. Guardar una muestra para análisis de inquemados. Para ello, utilizar los datos de las pesadas de la bolsa con y sin inquemados en el cuadernillo de datos.
8. Con la espátula y la pala de plástico pequeña, retirar las cenizas acumuladas en cada zona y verterlas al tamiz (este proceso ha de ser realizado con cuidado para que no se deshagan durante la propia manipulación). Continuar trasladando las cenizas del quemador al tamiz hasta colmatar el área disponible del tamiz. Si es necesario, usar la linterna o frontal para visualizar mejor las cenizas acumuladas en el quemador.
9. Una vez el tamiz se ha colmatado, comprobar la presencia de pélets sin quemar y retirar manualmente (si los hay), con los guantes puestos en todo momento, los pélets que aparecen con las cenizas y que no se han quemado. Colocarlos en una bolsa previamente pesada y pesar la bolsa con los pélets.
Anotar los datos de las pesadas en el cuadernillo de datos.
10. Cribar el material retenido en el tamiz (necesario 2 personas) de manera que se recojan las diferentes fracciones de cenizas.
 - Categoría S1: fracción que pasa por un tamiz de 3,15 mm después de mover manualmente el tamiz.
 - Categoría S2a: fracción que no pasa por un tamiz de 3,15 mm después de mover manualmente el tamiz, se puede disgregar fácilmente con las manos y no presenta material fundido.
 - Categoría S2b: fracción que no pasa por un tamiz 3,15mm después de mover manualmente el tamiz, se puede disgregar fácilmente con las manos y presenta material fundido.
 - Categoría S3: fracción que no pasa por un tamiz 3,15mm después de mover manualmente el tamiz, no se puede disgregar fácilmente con las manos y presenta material fundido (aspecto de rocas grandes).

La fracciones 2 y 3 normalmente vienen acompañadas de finos que entraría en la fracción 1, por lo que es conveniente sacudirlas ligeramente antes de recogerlas para su posterior pesada. Es importante que tras la inspección visual y la separación de las fracciones, si hay muestras de distinto color, se tomen fotografías para poder distinguir la coloración de las distintas fracciones y tomar muestra por si se pueden analizar en el futuro. Apuntar las observaciones de color en el cuadernillo.

11. Introducir cada una de las fracciones en cubos o bolsas previamente pesados. Pesar cada una de las fracciones diferenciadas y apuntar en el cuadernillo el valor correspondiente.
12. Mediante la aplicación del procedimiento de cuarteos a cada fracción recogida e incluso de la de inquemados (si hubo) se separa una muestra de entre 50-100 g que se analizará posteriormente (SEM ó XRD y análisis de inquemados). La muestra se debe tomar de la porción resultante de aplicar 3 veces el método de cuarteos a cada fracción.

Método de cuarteos:

En todo momento, manipular las cenizas con los guantes de vinilo puestos.

Primero, se dispone en el suelo el rollo de plástico extendido. Posteriormente, se dispone encima el material obtenido para cada fracción.

Luego se agrupa la muestra en el centro, se mezcla bien y se hace el primer cuarteo: se eliminan 2 porciones opuestas y las otras 2 se mezclan bien y se hace otro cuarteo. Como en el caso anterior se eliminan 2 fracciones opuestas que no estén en la misma posición de la primera vez. A la muestra restante se hace el último cuarteo. Desechar el material sobrante luego de la recogida de la muestra.

Triturar la muestra definitiva todo lo posible con la ayuda de un martillo normal o de goma, hasta obtener una fracción fina que se entregará al laboratorio responsable para el análisis de inquemados, SEM, XRD, ICP u otro.

13. Guardar la porción obtenida de cada fracción para análisis en las bolsas plásticas de tamaño mediano y/o pequeño.

Para SEM/XRD/ICP usar las bolsas pequeñas y guardar alrededor de 1 gramo. Se deberán almacenar como un polvo fino, se podrá usar para ello el mortero de ágata.

Para inquemados usar o las bolsas medianas o las pequeñas y guardar alrededor de 8-10g. El sobrante se podrá usar para SEM/XRD/ICP, o repetibilidad de inquemados si fuese necesario. Pesar cada bolsa para verificar que se tenga un mínimo de 8 a 10g.

Cada bolsa deberá estar identificada. Para ello, se deberá indicar en cada bolsa:

Zona de recogida (1 o 2, ver punto 6): Zona 1

Tipo de fracción (S1, S2a, S2b o S3, ver punto 9): S1

Fecha de prueba: 30/10/2020

Fecha del muestreo: 1/11/2020

Nombre del combustible: DIN+

14. Guardar las muestras de cenizas recolectadas en una caja o sobre. Identificar el sobre o caja con:

Combustible: Pélets de pino

Prueba: 30/10/2020

Muestreo: 1/11/2020

Limpieza final y recogida:

15. Limpiar el interior de la cámara de combustión y la parte inferior de los cuerpos 1 y 2 con el aspirador y la brocha.
16. Limpiar y dejar secar todo el material utilizado con la manguera o en el fregadero. Limpiar el plástico si no se ha dañado y dejar secar para reutilizarlo.
17. Rellenar la Excel de la prueba con los pesos recogidos.

II. DETERMINACIÓN DE INQUEMADOS/CENIZAS.

Pasos previos:

1. Reservar el laboratorio.
2. Leer el procedimiento de la norma de análisis del contenido en humedad y en cenizas.
3. Guardar en la caja de transporte el material requerido a llevar al laboratorio analítico.
4. Limpiar la mesa del laboratorio analítico donde se va a colocar el material.
5. Disponer el material almacenado en la caja de transporte sobre la mesa.
6. Tomar el material necesario del armario en el laboratorio analítico. Ponerlo sobre la mesa con el resto del material. Verificar que todo el material esté completo.
7. Nivelar la balanza (verificando que la burbuja de nivel esté centrada) y enchufarla. Se calibrará automáticamente (aparecerá una numeración). Dar al botón on para encenderla.
8. Limpiarse las manos y ponerse los guantes de vinilo.
9. Limpiar bien el platillo de la balanza con la brocha (comprobar que la brocha esté LIMPIA antes de usarla). Asegurar que el anillo de la balanza no toque ese platillo.
10. Cerrar bien las puertas de la balanza, tarar y verificar que esté en cero.
11. Asegurarse que cada crisol esté seco y limpio. Si están húmedos, dejarlos en la estufa a 105 °C durante una hora (Seguir pasos de la norma de determinación de humedad). Si están secos a temperatura ambiente no es necesario secarlos a 105°C.
12. Enumerar cada crisol y su tapa con boli indeleble (tantos crisoles como muestras se van a analizar). Dejar sobre la mesa.

Procedimiento:

1. Cubrir las manos con los guantes de nitrilo. Importante: Siempre que se manejen los crisoles deberán utilizarse los guantes (térmicos o de nitrilo).
2. Realizar los “pasos previos” anteriormente descritos.
3. Asegurarse que cada crisol esté limpio y numerado.
4. Introducir el crisol con su tapa en la balanza. Cerrar bien las puertas durante la medición y esperar unos segundos hasta que se estabilice la medida. **Apuntar en la hoja de recogida de datos, la masa del crisol** con las 4 cifras significativas.
5. Sacar el crisol con su tapa y dejarlo sobre un papel limpio cerca de la balanza.
6. Tomar con la espátula cuchara, **un mínimo de 1 g de muestra** y verter al crisol. Si la muestra no es un polvo fino, triturlarla lo más posible empleando el mortero de ágata hasta convertirla en una muestra fina. En este caso limpiar el mortero con papel humedecido con acetona antes y después de utilizarlo.
7. Introducir el crisol con su tapa y la muestra en la balanza. Cerrar bien las puertas de la balanza, durante la medición y esperar unos segundos hasta que se estabilice la medida. **Apuntar en el cuaderno** con las 4 cifras significativas. **Si hay menos de 1 g de muestra verter más muestra en el crisol y pesar.**
8. Sacar el crisol con su tapa y la muestra de la balanza y dejar sobre la mesa sobre el papel limpio, limpiar el platillo de la balanza y tarar la balanza.
9. Repetir pasos 4-8 hasta acabar con las muestras y sus crisoles respectivos.

10. Una vez se tengan los crisoles preparados, quitarles la tapa y dejarla en el desecador. (verificar que la válvula de vacío del desecador esté en posición de cierre).
11. Colocar la rejilla sobre el trípode. Colocar los crisoles con la muestra y sin tapa sobre la rejilla. Tomar la pinza para manipular crisoles e introducir el trípode en la mufla.
12. Al cabo del tiempo de secado retirar el trípode con las muestras, colocar a cada crisol su tapa y almacenar en el desecador.
13. Una vez se hayan enfriado los crisoles (aprox. 10min) se pesará cada uno con su tapa siguiendo los pasos previos 4 al 8.
14. Introducir nuevamente los crisoles. Repetir pasos 12 y 13 **hasta que el cambio de masa sea inferior a lo indicado por la norma de humedad y/o cenizas.**
15. Al no haber variación por pesada se continuará a 250 °C hasta alcanzar los 550 °C. Al cabo de tres horas a 550 °C, se repetirán pasos 12-14 **hasta que la variación en la masa sea inferior a lo indicado por la norma de humedad y/o cenizas.**
16. Si no se consigue variación en las pesadas se dará por culminado el procedimiento.
17. Limpiar los crisoles, y si es necesario guardar el residuo obtenido en el crisol en una bolsa plástica rotulada con el tipo de muestra y de análisis, día de prueba y de muestreo, fecha de análisis, tipo de combustible y número de crisol como se indica a continuación:

Muestra: S1- análisis de inquemados

Prueba: 30/10/2020

Muestreo: 1/11/2020

Análisis: 06/11/2020

Combustible: DIN+

Crisol 1

Si se está analizando el contenido en cenizas sería:

Muestra: Pélets de pino - análisis de cenizas

Prueba: 30/10/2020

Muestreo: 1/11/2020

Análisis: 06/11/2020

Combustible: Eucalipto

Crisol 1

18. Al terminar las pesadas del material, guardar la balanza y el resto del material
19. Guardar el resto de las muestras de cenizas y las bolsitas con los residuos del análisis de inquemados en un sobre.

Procesamiento de datos:

Una vez obtenidos los datos de las masas, se deberá transferir la información al archivo Excel correspondiente al día de la prueba en la hoja "inquemados". Una vez se tenga el porcentaje de inquemados correspondiente a cada muestra, se deberán introducir los datos en la Excel correspondiente al día de la prueba en la hoja "carga+cenizas".

III. ANÁLISIS SEM y XRD.

Directrices generales SEM:

1-Se debe proporcionar a experto qué se va a analizar y cómo.

- Se debe contactar con el encargado de realizar los análisis con anticipación. Se tienen dos opciones: que realice el análisis por su cuenta o que esté una persona del equipo presente durante el proceso.
- Se le entregará la muestra recogida de caldera (aproximadamente 1g), molida al tamaño más fino posible en una bolsa bien identificada (ver Protocolo del grado de sinterización). Sería preferible entregarle la muestra sin quemados no la que se recoge directamente de caldera. Esto se puede obviar si se normalizan los resultados sin carbono.
Se le debe indicar que se quiere tener los resultados en el fichero pdf y Excel que se entrega.
- Se le deberán indicar los elementos a analizar. Se tienen 3 casos:
 - a) Que determine todo lo que detecte el equipo.
 - b) Que determine solo los elementos mayoritarios y minoritarios:
Elementos Mayoritarios (Si, Al, Ca, Mg, K, Na, P, S, Cl, Fe, Ti)
Elementos Minoritarios (Cd, Co, Cr, Cu, Mn, Mo, Pb, Zn, Ti, V)
 - c) Que determine los elementos que estarán en la Excel de procesamiento de datos:
Na, Mg, Al, Si, P, S, Cl, K, Ca
- Se le debe indicar que haga 3 análisis de áreas 1mm*1mm por muestra.

2-Una vez obtenidos los datos, procesarlos con la Excel respectiva:

- Se toman los datos del pdf y se pegan en la hoja de normalización.
- Con esto se obtendrá la composición del depósito en %Atómico para los elementos mayoritarios: Na, Mg, Al, Si, P, S, Cl, K, Ca
- Si hubiese interés en los minoritarios se puede hacer un procedimiento similar.

Directrices generales XRD:

1- Se debe proporcionar al encargado qué se va a analizar y cómo.

- Se debe contactar con anticipación y se coordinará si se hacen los análisis de forma independiente o si requiere alguien del equipo de investigación durante el análisis.
- Se le entregará la muestra recogida de caldera (aproximadamente 1g), molida al tamaño más fino posible en una bolsa bien identificada (ver Protocolo del grado de sinterización). Sería preferible entregarle la muestra analizada con el SEM, pero si se retiran los quemados se perderán los carbonatos.

- Se le debe indicar si se quiere solo identificación de fases o también semicuantificación con el método de Rietveld y resultados.
- Se le debe indicar que haga 3 análisis de áreas 1mm*1mm por muestra.

2-Una vez obtenidos los datos, se debe obtener información de:

- fases (compuestos) presentes
- presencia de material amorfo
- Concentración de los compuestos (si se hace Rietveld)