



Universidad de Valladolid



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**

Máster en Ingeniería Industrial

MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

TRABAJO FIN DE MÁSTER

INTRODUCCIÓN AL CONTROL DE CALDERAS DE BIOMASA EN SISTEMAS DE CALEFACCIÓN

Autor: D. Ángel Pardos Blas
Tutor: Dr. Enrique Baeyens Lázaro
Valladolid, septiembre 2014

Resumen

Este trabajo es el punto de partida de un estudio más amplio cuyo objetivo final es el diseño de un sistema de control que permita optimizar el proceso de combustión e intercambio de calor en una caldera de biomasa. Este control tendrá que corregir los parámetros del sistema para adaptarse a las características del combustible que se introduzca a la cámara de combustión.

El desarrollo de una caldera de este tipo está motivado tanto por la utilización de recursos renovables como son los biocombustibles como por ser rentables por sí mismas en muchos casos. Por contra, los combustibles procedentes de la biomasa son exigentes y muy poco homogéneos, y precisan dispositivos sofisticados. La certificación de *pellets* y astillas, que son los combustibles para los que se ha pensado en un inicio el futuro diseño de caldera, presentan pese a ello una gran variabilidad en sus características de unas partidas a otras.

Existen ya numerosas marcas, muchas de ellas austriacas, que comercializan calderas de gran calidad. Estudiando varias de ellas se comprenden los elementos básicos que las componen y que servirán para comenzar con el diseño de un prototipo. Los dos elementos básicos que componen una caldera de este tipo son la cámara de combustión y el intercambiador de calor.

Para facilitar el análisis se puede realizar un estudio termodinámico de cada una de estas partes por separado pero el funcionamiento no se puede entender sin la construcción de un modelo completo que incluya a ambas.

Teniendo en cuenta los numerosos factores que afectan al funcionamiento de una caldera y su versatilidad de adaptación a numerosas instalaciones se propone el diseño del control de una caldera de 200 KW, policombustible, con parrilla móvil, intercambiador vertical y limpieza automática de tubuladores.

Entre las distintas posibilidades de control que se desarrollará en el futuro se optará por un control predictivo combinado con una sensorización avanzada que permita alcanzar los objetivos finales.

Se construyó un modelo simplificado con dos tubos del intercambiador con Ansys Fluent y se realizaron varios experimentos que permitieron identificar modelos de comportamiento. La relación de la temperatura de salida del agua respecto a la de entrada se identificó como un sistema de segundo orden. La de la temperatura de salida del agua respecto a la de humos con uno de tercer orden. Este análisis y la identificación de modelos en discreto se realizó con programas escritos en lenguaje Python.

Abstract

This report is the starting point of a bigger research project whose final goal is the design of a complete control system that improves the combustion process and the heat exchange inside a biomass boiler. The control will correct the parameters in order to adjust the system to the features of the fuel inside combustion chamber.

The aim of developing a biomass boiler is motivated by the fact that biofuels are a renewable source and also because these devices are profitable by their own. By contrast, biofuels are not an homogeneous fuel and demands sophisticated devices. The future design will burn pellets and woodchips. Despite of the control and certification of these biofuels, it is impossible to ensure that their features will be always the same.

There are a lot of brands, most of the from Austria, that comercialize really good quality boilers. After studying some of them it is easy to extract the main elements that compose them. The two main elements of a biomass boiler are the combustion chamber and the heat exchanger.

It is easier to analyze thermodynamically the two parts by separated but it is not possible to understand the whole operation sense of the device without working with a complete model that includes both parts.

The choice boiler to implement the future control system will have these characteristics: 200 KW of nominal power, multifuel system, moving grate, vertical heat exchanger and automatic cleaning. The nominal power was choice because of its capacity to adapt to a huge range of installations.

The different control strategies were studied. A predictive control system combined with advanced sensorization was choice to achieve the final goals of the research.

A very simplified model with Ansys Fluent was built. The model includes two pipes and simulates and small piece of heat exchanger. Some experiments were performed. They allow to identify the relation within outlet water and inlet water temperature as a second order model; and the relation within outlet water temperature and inlet smokes temperature as third orden model. The data analysis and the model indentification were calculated by programming Python code.

Agradecimientos

Son muchas las personas que me han contribuido en la realización de este trabajo y que sin ellas habría sido imposible. Desde Isa que me animó comenzar esta aventura hasta Elías y Lola que han estado conmigo siempre.

Agradezco las aportaciones del Doctor D. Lázaro Gorostiaga y de D. Lipsa Laurentiu, ingeniero de diseño de la Fundación Cartif, cuyo apoyo fue indispensable en algunas fases del proyecto.

Un especial agradecimiento a mi tutor, el Doctor D. Enrique Baeyens Lázaro, que ha mostrado todo el interés en orientarme, corregirme y guiarme durante todo el tiempo que he trabajado en este estudio.

Pero sobre todo doy las gracias a mi familia y a ti, Virginia.

Índice general

Índice general	IX
Índice de figuras	XIII
Índice de cuadros	XVII
1 Antecedentes y objetivos	1
1.1 Antecedentes	1
1.2 Objetivos	1
1.3 Organización de la memoria	2
2 La biomasa como combustible de calderas para sistemas de calefacción: pellets y astillas	5
2.1 Introducción	5
2.2 Proceso de combustión de la biomasa	7
2.3 Características físicas y químicas de los biocombustibles	8
2.4 Influencia de las características y elementos presentes en los biocombus- tibles	9
2.5 Pellets	15
2.6 Astillas	18
2.7 Conclusiones	19
3 Principales tecnologías presentes actualmente en caldera de media potencia	21
3.1 Introducción	21
3.2 Descripción de equipos comerciales	22
3.2.1 Ökofen	23
3.2.2 Catfire	24
3.2.3 KWB	27
3.2.4 Lasian	28
3.2.5 Herz	29
3.2.6 Hassgarner	30
3.2.7 Fröling	31
3.2.8 Viessmann	32
3.2.9 Binder	33

3.3	Otros elementos y dispositivos presentes en las calderas de biomasa . . .	34
3.4	Conclusiones	37
4	Análisis termodinámico de las calderas de biomasa	41
4.1	Introducción	41
4.2	Análisis en ecuaciones de la combustión	42
4.3	Análisis energético y exergetico de las calderas de biomasa	46
4.3.1	Primera ley de la termodinámica en la cámara de combustión . .	46
4.3.2	Segunda ley de la termodinámica en la cámara de combustión . .	47
4.3.3	Primera ley de la termodinámica en el intercambiador de calor .	47
4.3.4	Segunda ley de la termodinámica en el intercambiador de calor .	48
4.4	Conclusiones	49
5	Factores que afectan al funcionamiento de la caldera	51
5.1	Introducción	51
5.2	Factores destacables que determinan la operación de caldera	51
5.3	Medida práctica de la eficiencia de caldera	56
5.4	Conclusiones	58
6	Propuesta de diseño de una caldera de biomasa	59
6.1	Introducción	59
6.2	Dimensionado de la caldera	59
6.3	Elección de combustible y diseño de parrilla	61
6.4	Elementos y componentes de la caldera propuesta	61
6.5	Conclusiones	64
7	Puesta a punto de una caldera de biomasa	65
7.1	Introducción	65
7.2	Pasos de la puesta en marcha	65
7.3	Conclusiones	66
8	Análisis computacional del intercambio de calor en una caldera	67
8.1	Introducción	67
8.2	Modelo de intercambiador de calor con Ansys Fluent	67
8.3	Conclusiones	72
9	Visión global del control de una caldera de biomasa	73
9.1	Introducción	73
9.2	Procesos de control avanzados	74
9.2.1	Modelo base de un proceso de control	75
9.2.2	Modelo de control predictivo	75
9.2.3	Control neuro-borroso	76
9.2.4	Sensorización avanzada	77

9.3	Objetivos principales en el diseño de un sistema de control de una caldera de biomasa	78
9.4	Conclusiones	79
10	Identificación del modelo de funcionamiento del intercambiador caldera	81
10.1	Introducción	81
10.2	Experimentos y recogida de datos	81
10.3	Identificación de modelos mediante programación en Python	82
10.4	Conclusiones	91
11	Conclusiones finales	93
	Bibliografía	95
A	Programas en Python	97

Índice de figuras

2.1	Ciclo del CO_2 en la biomasa [3]	6
2.2	Fases de la combustión de la biomasa a lo largo de una parrilla [31] .	7
2.3	Saco-silo para almacenamiento y distribución neumática de <i>pellets</i> [28]	9
2.4	Limpieza automática del intercambiador [27]	13
3.1	Binder 8 MW Canadá [3]	21
3.2	Caldera Ökofen Pellematic Maxi 56 kW [32].	23
3.3	Catfire USZI 220 kW [5]	24
3.4	Catfire USZI 220 kW [5]	25
3.5	Caldera KWB TDS 240 kW [18]	27
3.6	Parrilla giratoria [18].	27
3.7	Lasian Biocompact 200 kW [19]	28
3.8	Lasian Biocompact 200 kW interior [19]	28
3.9	Herz Biomatic 220 kW [27]	29
3.10	Caldera Hassgarner 200 kW [11].	30
3.11	Caldera turbomat Fröling 220 kW [9].	31
3.12	Caldera Pyrot [30]	33
3.13	Binder USRF [3].	33
3.14	Limpieza intercambiador Binder [3]	34
3.15	Trampilla de seguridad [27]	35
3.16	Distintos sistemas de alimentación Binder [3].	36
3.17	Alimentación agitador más sinfín Catfire [5].	36
3.18	Caldera Herz con salida a ciclón [27]	37
3.19	Binder PRF parrilla fija [3]	37
4.1	Esquema energético de una caldera de biomasa simplificado	41
5.1	Dependencia del CO y NO_x del exceso de aire [12].	53
6.1	Consumos y perfil de la potencia demandada a lo largo de un día de invierno [1].	60
6.2	Esquema simplificado de la elección de elementos estructurales de la caldera.	62

6.3	Resumen de los sensores y actuadores de una caldera	63
6.4	Esquema de una caldera de biomasa simplificado	64
8.1	Geometría del intercambiador de calor. <i>Part water</i>	68
8.2	Geometría del intercambiador de calor. <i>Part smokes1 and smokes2</i>	68
8.3	Mallado del modelo de intercambiador	69
8.4	Temperatura de los humos a lo largo de los tubuladores	71
8.5	Temperatura del agua	71
8.6	Velocidad del agua.	72
9.1	Diagrama con los bloques de control de combustión y carga [29]	74
9.2	Representación esquemática de un sistema de control de modelo predictivo [29]	76
9.3	Estructura de un controlador PID con autoajuste neuro-borroso [15]	77
10.1	Variación de un grado a la temperatura de entrada. Respuesta a entrada escalón	82
10.2	Variación de un grado a la temperatura de entrada. Identificación del modelo mediante sistema de primer orden	83
10.3	Variación de un grado a la temperatura de entrada. Identificación del modelo mediante sistema de segundo orden	83
10.4	Variación de 300 grados a la temperatura de entrada de humos. Respuesta a entrada escalón	84
10.5	Variación de 300 grados a la temperatura de entrada de humos. Identificación del modelo mediante sistema de primer orden	85
10.6	Variación de 300 grados a la temperatura de entrada de humos. Identificación del modelo mediante sistema de segundo orden.	85
10.7	Variación de 300 grados a la temperatura de entrada de humos. Identificación del modelo mediante sistema de tercer orden	86
10.8	Mapa de polos y ceros de $G(s)$	86
10.9	Representación de la respuesta de la temperatura de salida del agua respecto a la variación de la entrada según una secuencia binaria aleatoria	87
10.10	Representación de la respuesta de la temperatura de salida del agua respecto a la variación de la temperatura de humos según una secuencia binaria aleatoria	87
10.11	Variación de ± 1 K en la temperatura de entrada de agua. Identificación con un modelo discreto con toma de datos cada 10 s	88
10.12	Variación de ± 1 K en la temperatura de entrada de agua. Identificación con un modelo discreto con toma de datos cada 20 s	89
10.13	Variación de ± 1 K en la temperatura de entrada de agua. Identificación con un modelo discreto con toma de datos cada 40 s	89

10.14	Variación de ± 300 K en la temperatura de entrada de humos. Identificación con un modelo discreto con toma de datos cada 10 s	90
10.15	Variación de ± 300 K en la temperatura de entrada de humos. Identificación con un modelo discreto con toma de datos cada 20 s	90
10.16	Variación de ± 300 K en la temperatura de entrada de humos. Identificación con un modelo discreto con toma de datos cada 40 s	91

Índice de cuadros

2.1	Características físicas y químicas de los combustibles y sus efectos en las calderas de biomasa [29]	10
2.2	Valores de referencia respecto a la norma ISO 1171-1981	14
2.3	Especificaciones de los <i>pellets</i> de madera para usos no industriales según la norma EN 14961-2 [6]	17

Capítulo 1

Antecedentes y objetivos

1.1. Antecedentes

La necesidad de buscar alternativas a los combustibles fósiles tradicionales ha impulsado el desarrollo de dispositivos que permitan la utilización de fuentes de energía alternativas para la satisfacer, en este caso, las demandas de los sistemas de calefacción. Este trabajo se centrará en la producción de calor para instalaciones industriales o domésticas mediante la combustión de biomasa.

Junto con la motivación del uso de energías renovables, el uso de los biocombustibles está igualmente impulsado por su competitividad respecto a los combustibles fósiles tradicionales en determinadas situaciones. Aunque no se va a realizar un estudio de la evolución de los precios de *pellets* y astillas, se puede tener presente un precio orientativo de estos para comprender cómo la rentabilidad de estas instalaciones ha propiciado su expansión durante los últimos años. En España se pueden obtener *pellets* a un precio que suele variar entre 20 y 30 céntimos de euro dependiendo de si es a granel o en sacos [2]. Las astillas suelen tener precios más reducidos al ser un combustible menos tratado. Estos valores, junto con su estabilidad, permiten una relativamente rápida amortización de las instalaciones, dependiendo del caso, y un ahorro considerable respecto al gasoil, por ejemplo.

Actualmente existen numerosas marcas comerciales y diseños que permiten la utilización de un amplio rango de combustibles. Sin embargo, y como se verá posteriormente, la variables características de la biomasa y la poca repetibilidad en la composición de esta dificultan el control y la optimización de la combustión e intercambio de calor en cada instante.

1.2. Objetivos

El eje principal del proyecto de investigación es el diseño de un control que permita anticiparse y corregir los efectos que pueden producir los cambios en la composición y

morfología de los biocombustibles que son utilizados por una caldera de biomasa.

Este es el objetivo principal de un estudio amplio y que se desarrollará en profundidad con posterioridad. Para alcanzar dicho objetivo, el presente trabajo expone los primeros pasos necesarios para adentrarse en el diseño de un control tan sofisticado y que en un principio se presenta complejo.

Se desarrollará una serie de herramientas y modelos que irán creciendo y perfeccionándose con el tiempo y que permitirán verificar las hipótesis y el control que progresivamente se irá perfilando.

Esta memoria recoge el trabajo realizado para la consecución de los siguientes objetivos:

- Desarrollar una base teórica e ilustrativa de todo lo que conlleva plantear una solución para un dispositivo como el que trata el proyecto: sus combustibles y composición de estos, descripción de la operación de una caldera de biomasa tipo, análisis termodinámico, factores que afectan a su funcionamiento, estrategias de control utilizadas...
- Conocer el estado actual de las calderas que se están comercializando para tener presente las soluciones de control que a día de hoy se utilizan y cómo mejorarlas.
- Diseñar de forma paralela un modelo de caldera que permita verificar los resultados del sistema de control diseñado. Dado que en principio es una investigación puramente teórica, para la comprobación y ajuste del diseño del control se desarrollará un pequeño modelo de una parte de la caldera, listo para ser mejorado y perfeccionado en el futuro. Este primer diseño permitirá simular los los primeros experimentos y estudios de comportamiento.
- Conocer y aplicar técnicas de identificación de modelos mediante programación en software libre una vez alcanzados los objetivos previos. De esta manera se procurará una serie de herramientas propias que podrán ser utilizadas en el futuro como apoyo para el desarrollo de controlador de la caldera objetivo.

1.3. Organización de la memoria

La memoria se dividirá en varias partes. En los primeros capítulos, se dará una visión global de los combustibles más comunes que son utilizados actualmente por las calderas comerciales. Los numerosos y posibles orígenes de la biomasa hacen necesario acotar a unos pocos aquellos que serán objeto del trabajo. Posteriormente se hará un pequeño resumen del estado actual de las calderas que se comercializan y de las distintas tecnologías que se utilizan.

Una vez desarrollada esta presentación, se expondrán las ecuaciones de energía y exergía que en un futuro servirán para analizar los sistemas de cámara de combustión e intercambiador de calor que componen la caldera.

A partir de este punto, se continuará exponiendo unas primeras condiciones y supuestos a partir de los cuales comenzar con el diseño de un modelo de caldera y su control.

Mediante Ansys Fluent se desarrollará un modelo de caldera que se irá construyendo y ampliando progresivamente con la intención de ir comprobando y verificando el sistema de control que se irá diseñando paralelamente. Este trabajo iniciará este diseño comenzando con la simulación de una pequeña parte del intercambiador.

El sistema de control se calculará y escribirá apoyándose en herramientas de software libre. Se utilizará programación y librerías de control de Python para el propósito que nos ocupa. En los últimos capítulos, se identificará el modelo de funcionamiento del intercambiador de calor utilizando los datos recogidos de una serie de simulaciones de Ansys Fluent.

Todos estos planteamientos servirán como punto de partida para la posteriores ampliaciones de modelo y sistema de control que cumplirán con el objetivo final de todo el estudio.

Capítulo 2

La biomasa como combustible de calderas para sistemas de calefacción: pellets y astillas

2.1. Introducción

La biomasa es todo el conjunto de materia que procede directa o indirectamente, en un tiempo relativamente reciente, de las reacciones fotosintéticas. Toda la materia vegetal y derivados se incluyen en esta definición. Bioenergía es el término utilizado para referirse a la energía procedente de la biomasa y los biocombustibles son aquellos materiales que permiten el transporte de dicha energía, captada de la energía solar, y acumulada como energía química [29]. Aunque el trabajo se centrará en procesos de combustión directa de biocombustibles no hay que olvidar otras formas de obtención de la energía como es el tratamiento de la materia vegetal para la obtención de biogases.

La necesidad de reducir la cantidad de CO_2 en la atmósfera, plasmada mediante acuerdos en 1998 con el Protocolo de Kioto, ha impulsado el desarrollo e investigación de dispositivos que permitan la extracción y aprovechamiento de la energía acumulada químicamente en los biocombustibles.

A diferencia de lo que ocurre con los combustibles fósiles, el CO_2 que se emite con el uso de biocombustibles describe un ciclo cerrado tal y como se muestra en la figura 2.1. Los procesos fotosintéticos capturan el gas que es liberado posteriormente a través de la combustión. El CO_2 liberado durante la combustión de derivados del petróleo o gases naturales fue capturado millones de años atrás e incrementa la presencia del mismo en la atmósfera provocando los desequilibrios que afectan al medio ambiente.

No obstante, y de cara a la continuación en un futuro de la investigación, conviene tener presente que, pese a que los biocombustibles se presentan como una alternativa para afrontar el problema del efecto invernadero, un crecimiento excesivo de su uso desembocaría en la aparición de nuevos conflictos medioambientales. El principal problema es el aumento de emisiones de partículas y polvo a la atmósfera así como de

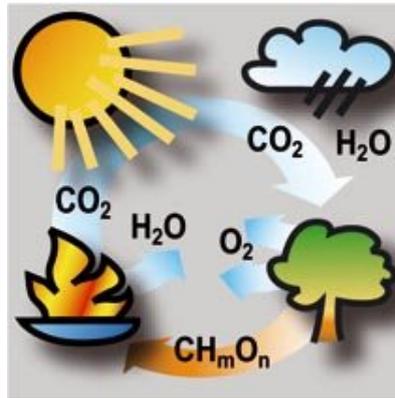


Figura 2.1: Ciclo del CO_2 en la biomasa [3]

otros productos contaminantes que se emiten si la combustión no es la adecuada o correcta. No es un problema actual pero si estos sistemas se extienden globalmente hay que proponer soluciones para corregirlos.

Si se habla de biomasa, se abre un amplia gama de recursos a partir de los cuales se pueden obtener combustibles para generar energía. Con el pertinente pretratamiento, o con la tecnología adecuada para su combustión, las posibilidades que ofrece la biomasa [8] incluyen la madera, especies herbáceas, desechos de la industria, desechos municipales de origen lignocelulósico, residuos de la industria papelera, serrines, hierbas, residuos de la industria alimentarias, algas... Los residuos de granjas y animales son otra potencial fuente de energía.

La biomasa ofrece importantes ventajas entre las que destaca la continua generación de combustible para su aprovechamiento y uso. Se puede tratar como una fuente de energía renovable aunque esta afirmación está supeditada al ritmo con el que se consume. Es por ello por lo que algunos autores la consideran simplemente parcialmente renovable ya que hay que tener en cuenta su ritmo de regeneración. Por otro lado, en contraposición con los combustibles de origen fósil, la biomasa posee una cantidad mucho menor de carbono en su composición por lo que su poder calorífico inferior se reduce.

Acotando notablemente el origen de los combustibles, las calderas que centran este estudio tienen como misión extraer la energía calorífica de combustibles principalmente procedentes de la madera como son astillas de pinos, encinas o chopos, todo tipo de residuos forestales de la zona donde se consume, virutas y serrines procedentes de la industria de la madera, y combustibles densificados a partir de los citados anteriormente como son los *pellets* y briquetas. Actualmente, y debido a que es un combustible con atractivo por su abundancia y generación continua, se intenta expandir el uso del hueso de aceituna tratado adecuadamente. Sin embargo, la necesidad de un fuerte pretratamiento hace que sus precios se acerquen a los de otros combustibles como el *pellet*, que son mucho menos problemáticos.

La biomasa puede ser utilizada tanto para la obtención de energía en forma de calor

como en forma de electricidad. El caso que nos ocupa se centrará en la generación de calor, especialmente en el campo de aplicación a los sistemas de calefacción.

2.2. Proceso de combustión de la biomasa

La combustión de la biomasa se compone de numerosos procesos físico-químicos de gran complejidad. El tipo de combustión depende tanto del combustible como de la aplicación final que queramos dar al proceso. Tradicionalmente se distinguen varias fases: secado, pirólisis, gasificación y la combustión propiamente dicha.

El secado, la pirólisis y la gasificación siempre serán las primeras etapas en el proceso de transformación en energía de combustibles sólidos. La importancia de estas etapas dependerá de la tecnología implementada. Por ejemplo, para calderas certificadas para trabajar con astillas de humedad de hasta un 50 %, es imprescindible un buen proceso de secado para la obtención del máximo rendimiento posible, o incluso para poder mantener la llama.

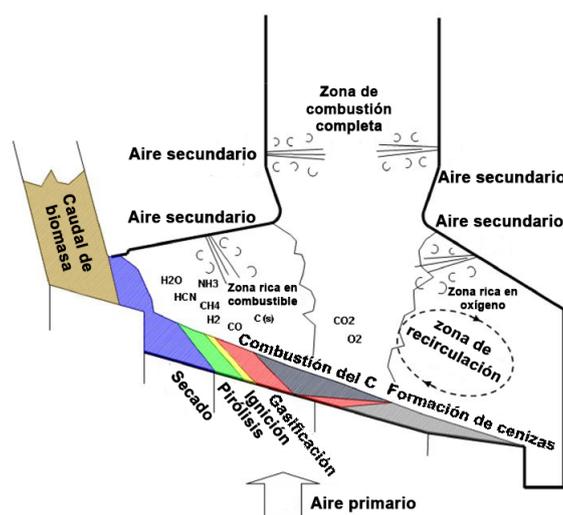


Figura 2.2: Fases de la combustión de la biomasa a lo largo de una parrilla [31]

Secado: el agua presente en una astilla húmeda se evapora a bajas temperaturas ($<373\text{ K}$). Dado que este proceso de vaporización utiliza energía liberada durante la combustión, la temperatura de la cámara disminuye, lo que resta eficiencia al sistema. Se ha comprobado que en calderas con combustibles de origen lignocelulósico una humedad mayor de un 60 % no permite un mantenimiento de llama. La madera húmeda necesita tanta energía para evaporar el contenido de agua y para calentar el vapor que la temperatura de la cámara de combustión cae sin que esta pueda ser mantenida. La humedad es por tanto una de las características más importantes del combustible y el proceso de secado es de gran relevancia.

Pirólisis: se puede definir como una degradación térmica en ausencia de un agente oxidante. Los productos resultantes de la pirólisis son principalmente alquitranes, car-

bonizados, carbonilla y gases de bajo peso molecular. En esta etapa se forman grandes cantidades de CO y CO_2 , especialmente con combustibles ricos en oxígeno. El tipo de material utilizado, la temperatura, la presión, tiempo de calentamiento y tiempo de reacción son las variables que afectan a la cantidad y características de los productos resultantes.

Gasificación: al contrario que en la etapa de pirólisis, la gasificación tiene lugar con aporte de oxígeno. Las reacciones de oxidación dan lugar a gases compuestos por CO_2 , H_2O , H_2 , y CH_4 entre otros con temperaturas alcanzadas de hasta 1073 K-1373 K.

Combustión: la etapa principal del proceso. Se define como la oxidación completa del combustible. Los gases calientes obtenidos pueden ser utilizados con el propósito de calentar agua como etapa final.

2.3. Características físicas y químicas de los biocombustibles

Las características y calidad de la biomasa como combustible varían considerablemente dependiendo de su origen y de la tecnología con la que ha sido tratada previamente a la combustión. La humedad puede variar desde un 10% - 20% típico de los *pellets* hasta el 60% que pueden presentar algunas astillas. De igual forma, el punto de fusión de las cenizas puede ir desde los 1073 K hasta 1973 K [29]. La calidad del combustible puede incrementarse con un tratamiento previo adecuado con el consecuente encarecimiento del producto.

Por otro lado, las calderas con tecnología para utilizar biomasa de baja calidad tienden a ser menos económicas. Es por ello que los dispositivos domésticos o de menor escala suelen estar enfocados al uso de combustibles muy tratados y por tanto más caros pero demandando una inversión inicial menor. Calderas capaces de generar energía con astillas húmedas y poco tratadas son interesantes para instalaciones grandes que precisan más potencia.

Las características físicas más importantes de los combustibles son sus dimensiones, densidad, poder calorífico superior (PCS) e inferior (PCI) y contenido en humedad. El combustible se puede distribuir tanto a granel (*pellets* y astillas), como en unidades individuales (fardos de paja o leña). Es en el primer grupo en el que se va a centrar el estudio. El tamaño de la astilla puede variar de 2 ó 3 cm hasta más de 15 cm en muchos casos.

De cara a un estudio y continuación posterior del proyecto sería interesantes incluir en el análisis la combustión de hueso de aceituna. Su producción en España lo hace atractivo pero la necesidad de un importante pretratamiento y su alto contenido en cloro exige que su problemática sea abordada mucho más ampliamente para un adecuado diseño final de caldera.

La densidad energética, resultante de la densidad másica y el PCI, influye en la

logística así como en el proceso de control en el interior de la cámara de combustión. La influencia de la humedad se aprecia en el comportamiento del proceso de degradación, la temperatura alcanzada y el volumen de gas producido. El uso de biomasa muy húmeda hace que sea necesaria una mayor estancia en la parrilla para que el proceso de secado elimine al máximo el agua presente antes de pasar a la pirólisis. Esto, consecuentemente, exige mayores dimensiones y una tecnología más desarrollada de caldera. Por todo ello, el conocimiento de estos parámetros se hace necesario a la hora de parametrizar el funcionamiento de la caldera. El uso de combustibles de humedad muy variable entre unas partidas y otras hace que la parametrización de la caldera no sea la adecuada en ciertos momentos de su uso y que su eficiencia caiga o incluso aparezcan problemas de funcionamiento. Algunas calderas ofrecen un medidor de humedad del combustible en silo y entrada a caldera pero su uso no es habitual ni está extendido. El problema de la alta humedad del combustible y la pérdida de eficiencia que acarrea puede ser amortiguado por sistemas de recuperación de energía, pero estos dispositivos, propios de calderas de condensación, no son objeto de este trabajo. Por simplificar y tener una idea aproximada el uso de *pellet* significa tener un combustible con una densidad energética de unos 9800 MJ/m^3 y el uso de astillas de unos 3500 MJ/m^3 .



Figura 2.3: Saco-silo para almacenamiento y distribución neumática de *pellets* [28]

2.4. Influencia de las características y elementos presentes en los biocombustibles

En el cuadro 2.1 que se expone a continuación se recogen las principales características físicas y químicas de los combustibles de las calderas de biomasa.

Es muy difícil que dichas características se mantengan homogéneas en todo el combustible presente en el interior del silo. Se aprecia en el cuadro cómo la variación de cada una de ellas afecta considerablemente al funcionamiento de la combustión y por tanto al funcionamiento global de la caldera.

Características	Efectos
Propiedades físicas	
Contenido en humedad	Con su aumento disminuye el PCI, la capacidad de ignición, y se modifica el diseño de la planta
PCS y PCI	Elección de un combustible u otro y diseño de la planta
Volátiles	Comportamiento de la descomposición térmica
Contenido en cenizas	Afecta a las emisiones de polvo, producción de cenizas y proceso de combustión
Fusión de las cenizas	Seguridad del funcionamiento de la planta, proceso de control, formaciones indeseables en la cámara de combustión
Mohos	Riesgos para la salud
Densidad del combustible	Logística del almacenamiento del combustible
Densidad de las partículas	Conductancia y descomposición térmica
Distribución de tamaños	Transporte, tecnología de la combustión, secado, formación de polvo
Finos presentes	Volumen de almacenamiento del combustible, pérdidas en el transporte, formación de polvo
Resistencia a la abrasión	Variaciones en la calidad de la combustión, formación de finos
Propiedades químicas	
- Carbono <i>C</i>	PCS
- Hidrógeno <i>H</i>	PCI, PCS
- Oxígeno <i>O</i>	PCS
- Cloro <i>Cl</i>	Formación de <i>HCl</i> , corrosiones, disminución de la temperatura de fusión de las cenizas
- Nitrógeno <i>N</i>	<i>NO_x</i> , <i>N₂O</i> emisiones
- Azufre <i>S</i>	Emisiones de <i>SO_x</i> , corrosión
- Flúor <i>F</i>	emisiones de <i>HF</i> , corrosión
- Potasio <i>K</i>	Corrosión en el intercambiador de calor, disminución de la temperatura de fusión de las cenizas
- Sodio <i>Na</i>	Corrosión en el intercambiador de calor, disminución de la temperatura de fusión de las cenizas
- Magnesio <i>Mg</i>	Incremento en la temperatura de fusión de las cenizas
- Oxígeno <i>O</i>	Incremento en la temperatura de fusión de las cenizas
- Metales pesados	Emisiones

Cuadro 2.1: Características físicas y químicas de los combustibles y sus efectos en las calderas de biomasa [29]

Influencia del carbono, hidrógeno, oxígeno y volátiles:

Carbono, hidrógeno y oxígeno son los componentes básicos de los combustibles de origen lignocelulósico. El carbono y el hidrógeno son oxidados durante la combustión. Las reacciones exotérmicas que dan lugar a CO_2 y H_2O liberan la energía aprovechada para calentar los humos. El oxígeno necesario a aportar a la reacción es, por una parte, cedido por oxígeno orgánico que se libera en la combustión y por otro por el aire que introduce el ventilador primario a la cámara de combustión. El carbono presente en la biomasa aparece en formas parcialmente oxidadas. Esa es la razón por la que el PCI de la madera es menor en comparación con el carbón. Aún así, la concentración de carbono en combustibles con origen en la madera tiene mayor PCI que los que tienen origen en materiales herbáceos, por su mayor contenido en carbono. El hueso de la oliva posee una concentración superior a todos estos. El problema del uso de éste es el citado anteriormente.

Respecto a la materia volátil, la cantidad con la que se presenta en la biomasa es superior a la existente en el carbón y normalmente varía entre un 70 y un 86 % en base húmeda. Como resultado de esto, la mayor parte del combustibles vaporiza antes de que las reacciones tengan lugar. Por tanto, la cantidad de volátiles afecta considerablemente a la descomposición térmica y al comportamiento de los combustibles sólidos.

Influencia del nitrógeno, azufre y cloro:

Los límites marcados para estos elementos, especialmente para la certificación del *pellet*, están detallados más adelante.

La formación de NO_x durante la combustión de biomasa tiene lugar a temperaturas entre 1073 y 1373 K [29], principalmente como resultado del uso de combustibles con alta concentración de N . Estudios en calderas austriacas y suizas [16][7] han concluido que la concentración de nitrógeno contenido en el combustible y los NO_x resultantes mantienen una relación logarítmica. Los resultados de varias investigaciones [17] muestran también que el aire aportado y la geometría del horno y parrilla tienen gran influencia en la formación de estos productos.

La disminución de estos es clave para el buen funcionamiento. Se ha observado que el aire primario y secundario debe ser inyectado de forma que, geoméricamente, queden separados dentro de la cámara de combustión. Esto es algo que como se verá no cumplen todas las calderas. El ratio de exceso de aire orientativo se sitúa en torno a $\lambda = 0,6 - 0,8$. Aproximadamente, la cantidad de aire en exceso queda regulada por el ventilador de aire secundario y debería ser lo más reducida posible toda que vez el C haya sido consumido completamente. La recirculación de humos, cuya primera función es la de regular la temperatura de la cámara de combustión, ayuda también a la reducción de emisiones de NO_x .

El Cl vaporiza casi completamente durante la combustión, formando HCl , Cl_2 y

cloruros alcalinos. Con el decrecimiento de la temperatura de los humos, los cloruros de alcalinos y alcalinotérreos comienzan a condensar y a depositarse sobre los tubos del intercambiador de calor provocando su deterioro y pérdida de eficiencia. Es por ello por lo que en las instalaciones con calderas de biomasa se coloca un sistema de elevación de la temperatura de retorno para evitar que el agua a la entrada sea menor de unos 328 K. Por tanto, el *Cl* presente en el material a quemar acaba, por un lado depositado sobre el intercambiador de calor si el funcionamiento no es el adecuado; por otro, en las cenizas finales, dependiendo de la cantidad de alcalinos y alcalinotérreos presente; y finalmente otra parte sale por los humos en forma de *HCl* con toda la problemática medioambiental que genera.

En cuanto al *S*, su presencia acaba en la formación de SO_2 , SO_3 y sulfatos alcalinos. Una gran parte del del *S* pasa a la fase gaseosa. En la caldera, donde los gases son rápidamente enfriados, los sulfatos condensan sobre la superficie de los tubos. La presencia de alcalinotérreos como el *Ca* ayudan a que el *S* acabe precipitado y forme parte de las cenizas finales, evitando posibles efectos de corrosión en las calderas.

55 Influencia del contenido en cenizas de los combustibles:

El contenido en cenizas varía en un amplio rango desde 0.5 % hasta un 12 % en los combustibles de menor calidad [29].

La cantidad de ceniza en un combustible determinará el tipo y la frecuencia de extracción de la misma que será necesaria. Las calderas de media potencia pueden venir provistas de sistemas de extracción automática o tener unos simples registros para limpiar periódicamente. No todas las calderas está preparadas para quemar combustible de baja calidad con un alto contenido en cenizas.

Combustibles con pocas impurezas proporcionan una mayor densidad energética y en general aportan mejores propiedades para su combustión. *pellets* y astillas con altos índices de cenizas generan mayores emisiones de polvo y partículas en suspensión por lo que hacen que los sistemas de limpieza de los tubos del intercambiador y los ciclones para reducir estas emisiones sean aún más importantes.

Los elementos que suelen conformar estas cenizas son el *Si*, *Ca*, *Mg*, *K* y *P*. *K*, *P* y *Mg* son los nutrientes más relevantes de las plantas por lo que se pueden reciclar y utilizar como abono para estas. El *Ca* y el *Mg* normalmente incrementan la temperatura de fusión de de las cenizas mientras que *K* y el *Na* las disminuyen. Este punto de fusión es de gran importancia como se explicará a continuación. El *Si* en combinación con el *K* y el *Na* forma silicatos de bajo punto de fusión. Conocer bien estos procesos es clave para evitar la formación y depósito de residuos en la parrilla y paredes de la cámara de combustión con el posterior deterioro de partes metálicas y ladrillos refractarios. Aparece de nuevo la necesidad de controlar constantemente la temperatura de cámara de combustión para evitar los procesos de sinterización y fusión de las cenizas cuando se utiliza combustible de baja calidad.

Además, en combinación con el *Cl* y el *S*, el *K* el *Na* pueden acrecentar el poder corrosivo de los productos originados por los primeros. Los cloruros aceleran la oxidación de la superficie del intercambiador de calor incluso a temperaturas bajas (373 K-423 K). La volatilización y consecuente condensación de metales llevan a la formación de aerosoles difíciles de eliminar en el ciclón que son expulsados a la atmósfera con su consecuente daño medioambiental.

Existen en las cenizas algunos otros elementos del tipo metales pesados: *Fe*, *Al* y *Mn*. En principio suelen acabar siempre en el cajón de cenizas sin provocar mayor problema. No obstante hay que tener en cuenta su presencia de cara a la utilización de las cenizas como abonos. Concentraciones altas de estos metales y un mal uso de las cenizas pueden ocasionar un daño ecológico importante en suelos destinados a la agricultura.



Figura 2.4: Limpieza automática del intercambiador [27]

Como se ha comentado la biomasa puede proceder de distintas fuentes y orígenes, y puede presentarse con grandes variaciones en cuanto a su calidad. Aun centrándose el estudio en la optimización y control de la combustión de *pellets* y astillas de distinto tamaño, la variabilidad dentro de estos es tal que se exigen unos límites a la hora de poder garantizar el buen funcionamiento de los dispositivos. Las calderas, sobre todo las destinadas a grandes instalaciones y con parrilla móvil, pueden ser alimentadas por combustibles de composición muy variable. La norma ISO 1171-1981 fija unos estándares y unos límites con los que los distintos elementos que pueden presentarse.

La tabla 2.2 muestra esos valores límite para los elementos presentes en los combustibles.

Elemento	% límite en b.h.	Factor limitante	Combustibles afectado	Soluciones tecnológicas
- N	< 0,6	NO_x	Paja, cereales, residuos madera, Forraje, hueso de aceituna	Control aire primario
	< 2,5	NO_x	Residuos de madera	Control aire secundario
- Cl	< 0,1	Corrosión	Paja, residuos madera, forraje, hueso de aceituna	Selección material, lixiviado combustible, limpieza automática intercambiador
	< 0,1	Emisiones HCl	Paja, residuos madera, forraje, hueso de aceituna	Secado previo, desbrozado
	< 0,3	Compuestos aromáticos	Paja, cereales, residuos de madera	Absorción con C activo
- S	< 0,1	Corrosión	Paja, cereales, forraje, huesos de aceituna	Igual Cl
	< 0,2	Emisiones SO_x	Forraje, residuos de madera, heno	Igual HCl
- Ca	Fusión cenizas	NO_x	Paja, cereales, residuos madera, forraje, hueso de aceituna	Control T ^a cámara de combustión
- K	< 0,7	Fusión cenizas/corrosión	Paja, cereales, residuos madera, forraje, hueso de aceituna	Igual Cl
	—	Aerosoles	Paja, cereales, residuos madera, forraje, hueso de aceituna	Precipitación en ciclón
- Zn	< 0,08	Reciclaje cenizas	Astillas, serrín, residuos de madera	Tratmto. cenizas
	<	Emisiones	Astillas, serrín, residuos de madera	Tratmto. condensados
- Cd	0,0005	Reciclaje cenizas	Astillas, serrín, residuos de madera	Igual Zn
	—	Emisiones	Astillas, serrín, residuos de madera	Igual Zn

Cuadro 2.2: Valores de referencia respecto a la norma ISO 1171-1981

2.5. Pellets

Los *pellets* son uno de los productos de compactación por biomasa más importantes por encima de las briquetas [4]. En su fabricación se utilizan materiales sobrantes y residuales procedentes de industrias de transformación y manufactura de la madera tales como virutas, serrines, polvo de lijado... Otra vía distinta para su obtención es el uso de residuos de poda agrícola y de limpieza forestal. En este caso se requiere una serie de tratamiento previo de los residuos (secado, astillado, molienda...), debido a que las operaciones de fabricación de este biocombustible necesitan unas condiciones de humedad y granulometría concretas. Los *pellets* tienen una característica forma cilíndrica, con diámetros normalmente comprendidos entre 6 y 12 mm y longitudes de 10 a 30 mm [4]. Como consecuencia, los *pellets* pueden ser alimentados y dosificados a través de sistemas automatizados, siendo una ventaja en instalaciones de edificios.

En comparación con otros combustibles, especialmente con las astillas, el *pellet* es un producto más fluible y por tanto más manejable.

Según la procedencia de su materia prima, distinguiremos dos tipos de *pellets*:

- *Pellet* de madera: Se fabrican principalmente a partir de residuos de madera. Generalmente, las instalaciones que se encargan de manufacturar este tipo de *pellets* emplean residuos lignocelulósicos generados en los procesos industriales, con el objetivo de solucionar el problema de la acumulación de estos. La materia prima de la que se obtienen estos biocombustibles proviene, aproximadamente: un 45 % de la industria de transformación de la madera; otro 45 % de industrias de segunda transformación de la madera (muebles, parquet, puertas...); y un 10 % restante que se obtiene de otras materias primas como residuos forestales, residuos de industrias textiles, etc. Dicha materia prima está principalmente en forma de serrín o astilla.

Estos *pellets* tienen la ventaja de que son combustibles estandarizados, requieren poco espacio de almacenamiento, y el esfuerzo en el mantenimiento y operación de la instalación es menor que con otros materiales [22].

- *Agropellets*: son *pellets* cuya manufacturados con materias primas de origen agrícola, generalmente residuos como paja, residuos de podas, etc. En la actualidad suponen una línea de investigación debido a la importancia que puedan tener en un futuro. Estos *pellets* presentan las desventajas de requerir un mayor espacio para su almacenamiento, por su menor densidad; y de dar problemas de emisiones o corrosión de la caldera, y por tanto, mayor mantenimiento de la instalación.

El *pelletizado* es un proceso basado en la misma tecnología con la que se produce el pienso para los animales. La biomasa, materia prima en este proceso, debe presentarse de la forma más homogénea posible, y con unas características de granulometría y de humedad determinadas y constantes en el tiempo. Para la obtención de un *pellet* de calidad, es indispensable que la humedad relativa esté entre el 8 y el 10 %, consiguiendo así una adecuada aglomeración sin provocar que el producto final se disgregue por exceso de agua. La granulometría óptima de la materia prima para este proceso,

está entre 6 y 8 mm. De esta manera se alcanza una adecuada compactación. Las plantas de obtención de *pellets* precisan una serie de equipos de reducción granulométrica y de separación. Para materiales madereros son necesarias astilladoras que realicen la primera reducción de tamaño. Esto no es necesario para el caso del serrín y la viruta.

El proceso de producción de *pellets* puede resumirse en:

- a) **Secado:** el proceso de secado es una operación imprescindible debido a la elevada humedad que presenta el serrín procedente de los aserraderos. Se puede realizar en un secadero rotatorio directo, cuyo flujo secante procede de los gases de combustión desprendidos por una caldera de biomasa alimentada con la viruta y los rechazos del serrín.
- b) **Refinado del material:** el material, una vez secado, se hace pasar por un molino refinador que iguala los tamaños de partícula a un máximo de 5 mm. La materia prima seca y refinada se transporta de forma neumática a un sitio previo al *pelletizado*.
- c) **Compactación:** en función de la forma de la matriz empleada, se pueden diferenciar dos tipos de *pelletizadoras*. Por un lado, la de matriz plana, en la que uno o varios rodillos pasan sobre el producto y lo extruyen entre los orificios que posee la matriz. Por otra parte, la *pelletizadora* de matriz anular, que tiene forma de corona circular agujereada, con una luz y espesor determinados, sobre la cual giran excéntricamente uno o varios rodillos. La matriz es una pieza estática, que sufre grandes abrasiones ya que los rodillos interiores presionan el material, produciéndola densificación en la canaletas. La forma de los *pellets* dependerá directamente del tipo de orificio existente en la matriz. Los equipos de matriz plana presentan la ventaja de duplicar la vida media de las matrices por ser estas reversibles, además de ser más baratas que las del tipo anular. La matriz anular parece producir *pellets* más largos sin mermar su consistencia. Es decir, ambas tienen ventajas e inconvenientes, y los fabricantes no se decantan claramente por ninguno de los dos tipos. El material entra por la parte superior de la *pelletizadora*, y es depositado en la matriz, donde se ejerce una gran presión sobre éste produciendo su compresión. A continuación, va entrando en cada canal de compactación formando un hilo continuo que sale por el lado inferior de la matriz, donde es cortado al largo deseado mediante un cabezal con cuchillas. Debido a las grandes presiones a las que se somete el material (1500-1600 *kg/cm*) y las elevadas temperaturas que se alcanzan en la matriz próximas a los 423 K, junto con un pequeño porcentaje de humedad (10%) que es añadido en el proceso, se logra la plastificación de la lignina actuando esta como aglomerante natural de las partículas.
- d) **Enfriado:** una vez elaborados los *pellets* se deben enfriar suave y lentamente para evitar que produzcan fisuras. Se pueden utilizar dos tipos de enfriadores: verticales y horizontales, siendo estos últimos más adecuados para reducir el volumen

de las piezas defectuosas y la producción de finos debidos al golpeo. Sin embargo, los enfriadores horizontales necesitan mayor espacio para su instalación. El enfriado de *pellets* se realiza mediante un flujo de aire a contra corriente. El aire es el que asciende verticalmente adquiriendo el calor de los *pellets*, mientras estos bajan cediendo calor.

El *pellet* se distribuye tanto a granel con camiones que lo inyectan en los silos de forma neumático como en sacos. Pese a ser un producto manufacturado existe una gran variabilidad en la calidad de unos *pellets* a otros pudiendo provocar graves problemas en la caldera un *pellet* no óptimo. *Avebiom* es la asociación española encargada de certificar y expedir los certificados EN-Plus que siguen las normas de calidad de la clasificación anterior.

Propiedad / Método de análisis	Unidad	A1	A2	B
Origen y fuente EN 14961-1		Madera del fuste / Residuos madereros no tratados químicamente	Árboles sin raíces/ Madera del fuste/ Residuos de tala/ Corteza/ Residuos/madereros no tratados químicamente	Forestal, plantaciones y otras maderas no usadas ni tratadas/ Subproductos y residuos de la industria de la madera/ Madera reciclada
Diámetro, <i>D</i> y Longitud <i>L</i> , prEN16127	mm	D06, 6 ± 1; 3,15 ≤ L ≤ 40 D08, 8 ± 1; 3,15 ≤ L ≤ 40	D06, 6 ± 1; 3,15 ≤ L ≤ 40 D08, 8 ± 1; 3,15 ≤ L ≤ 40	D06 6 ± 1; 3,15 ≤ L ≤ 40 D08 8 ± 1; 3,15 ≤ L ≤ 40
Humedad, M, EN 14774-1, EN 14774-2	% base húmeda	M10 < 10	M10 ≤ 10	M10 ≤ 10
Cenizas, A, EN14775	% base seca	A0.7 < 0,7	A1.5 ≤ 1,5	A3.0 ≤ 3,0
Durabilidad mecánica, DU, EN 15210-1	%	DU97.5 > 97,5	DU97.5 ≥ 97,5	DU96.5 ≥ 96,5
Finos en la puerta de fábrica en el transporte a granel (al momento de la carga) y en las bolsas pequeñas (hasta 20 kg) y grandes (al momento del envasado o la entrega al usuario final), F, prEN 15210-1	%	F1.0 < 1,0	F1.0 < 1,0	F1.0 < 1,0
<i>Aditivos</i>	% base seca	<2% Especificar tipo y cantidad	<2% Especificar tipo y cantidad	<2% Especificar tipo y cantidad
Poder calorífico neto, Q, EN 14918	MJ/kg o kWh/kg	Q16.5, 16,5 ≤ Q ≤ 19 o Q4.6, 4,6 ≤ Q ≤ 5,3	Q16.3, 16,3 ≤ Q ≤ 19 o Q4.5, 4,5 ≤ Q ≤ 5,3	Q16.0, 16,0 ≤ Q ≤ 19 o Q4.4, 4,4 ≤ Q ≤ 5,3
Densidad aparente, BD, EN 15103	% base seca	BD600 > 600	BD600 > 600	BD600 > 600
Nitrógeno, N, prEN 15104	% base seca	N0.3 ≤ 0,3	N0.5 ≤ 0,5	N1.0 ≤ 1,0
Sulfuro, S, prEN 15289	% base seca	S0.03 ≤ 0,03	S0.03 ≤ 0,03	S0.04 ≤ 0,04
Cloro, Cl, prEN 15289	% base secaa	Cl0.02 ≤ 0,02	Cl0.02 ≤ 0,02	Cl0.03 ≤ 0,03
Arsénico, As, prEN 15297	mg/kg seca	≤ 1	≤ 1	≤ 1
Cadmio, Cd, prEN 1529	mg/kg seca	≤ 0,5	≤ 0,5	≤ 0,5
Cromo, Cr, prEN 15297	mg/kg seca	≤ 10	≤ 10	≤ 10
Cobre, Cu, prEN 1529	mg/kg seca2	≤ 10	≤ 10	≤ 10
Plomo, Pb, prEN 15297	mg/kg seca	≤ 10	≤ 10	≤ 10
Mercurio, Hg, prEN 15297	mg/kg seca	≤ 0,1	≤ 0,1	≤ 0,1
Níquel, Ni, prEN 15297	mg/kg seca	≤ 10	≤ 10	≤ 10
Zinc, Zn, prEN 15297	mg/kg seca	≤ 100	≤ 100	≤ 100
Fusibilidad de las cenizas, prEN15370	°C	Especificar	Especificar	Especificar

Cuadro 2.3: Especificaciones de los *pellets* de madera para usos no industriales según la norma EN 14961-2 [6]

2.6. Astillas

Al contrario de lo que sucede con los *pellets*, no existe una estandarización tan desarrollada para las astillas. Actualmente esta regulación se espera que se incluya en la norma EN14961. Al ser un combustible no tan tratado ni tan manufacturado, no es posible delimitar tanto su composición química salvo por los parámetros típicos para la especie de la que procedan las virutas de madera.

No obstante, valores como su tamaño y humedad están bien definidos pues son los que principalmente determinan la calidad de esta. La norma austriaca ÖNORM M 7133 está ampliamente aceptada y se utiliza con frecuencia.

Se expone a continuación la nomenclatura y el significado de la clasificación propuesta ya que de aquí en adelante será la utilizada para referirse al tipo de astillas

Categoría según tamaño	Contenido másico permitido				Valores permitidos(máx 5%)	
	máx. 4%	máx. 20%	máx. 60-100%	máx. 20%	Sección en cm^2	Long. cm
	Tamaño de partícula en mm					
G30	> 1,0	1.0 - 2.8	2.8-16.9	> 16,0	3.9	8.5
G50	> 1,0	1.0 - 5.6	5.6-31.5	> 31,5	5	12.0
G100	> 1,0	1.0 -11.2	11.2-63.0	> 63,0,0	10	25
G120	> 1,0	1.0 - 63	63-100	> 100	12	30
G150	> 1,0	1.0 - 100	100 - 130	> 130	15	40

Categoría según contenido en agua	Límite % agua	Aclaración
W20	< 20	secado natural
W30	> 20 – 30	Estable para almacenamiento
W50	> 30 – 35	Almacenamiento restringido
W50	> 35 – 40	Húmedo
W50	> 40 – 50	Recién cosechado

Categoría según densidad aparente	Límite kg/m^2	Aclaración
S 160	< 160	baja densidad
S200	160 – 250	media densidad
S250	< 250	alta densidad

Categoría según contenido en cenizas	Límite %	Aclaración
A1	< 1	contenido bajo en cenizas
A2	> 1 – 5	contenido elevado en cenizas

Aclarar que el contenido en humedad se expresa en base húmeda.

Una vez vista esta clasificación, será más fácil comparar la tecnología de un tipo de calderas con otras. Como se verá en capítulos posteriores, la mayoría de las calderas más simples que consumen astillas se limitan al tamaño G30 y a una humedad W30.

2.7. Conclusiones

Entre las principales ventajas de los biocombustibles destacan principalmente su carácter de energía renovable y cuidadosa con el medio ambiente y su precio. Las instalaciones con calderas de biomasa son competitivas por sí mismas respecto a las de los combustibles convencionales dependiendo del caso. La estabilidad de sus precios y la disponibilidad a día de hoy en países como España y el resto y resto de Europa presentan estos sistemas como una solución aceptable.

En contraposición son combustibles mucho más exigentes y que precisan dispositivos más sofisticados para asegurar la correcta operatividad y fiabilidad que demandan este tipo de instalaciones. Se han descrito los factores físico-químicos que caracterizan principalmente a *pellets* y astillas y cómo estas características, que difícilmente pueden ser homogéneas en todo el material que se introduce a la cámara de combustión, afectan muy notablemente a la eficiencia y el buen funcionamiento de la caldera.

Es por todo ello por lo que existen protocolos de certificación que aseguran unos límites en las proporciones de los elementos químicos que componen el combustible. La humedad contenida, la forma y tamaño y su procedencia están estandarizados perfectamente en *pellets* y se empieza a hacerlo con las astillas, siendo éstos los dos principales biocombustibles utilizados actualmente en las calderas comerciales.

Capítulo 3

Principales tecnologías presentes actualmente en caldera de media potencia

3.1. Introducción

Existe gran variedad de calderas que utilizan la biomasa como fuente de energía. Tipos de calderas que varían tanto en su diseño, tecnología como finalidad.

En general, se analizarán calderas cuya finalidad sea la de aportar calor al agua de sistemas de calefacción. Dentro de este tipo de calderas tenemos las de pequeña escala, de hasta 100 kW, de media escala, hasta 500 kW y de gran escala, pudiendo llegar a potencias de hasta 10 MW. Sin embargo, la combustión de biomasa también se utiliza para la generación de energía eléctrica y la co-generación.

Haciendo un breve resumen previo de las calderas de generación de energía eléctrica, se concluye la existencia principalmente de dos grupos definidos por el tipo de proceso: calderas de ciclo térmico cerrado y calderas de ciclo abierto. Estas últimas se utilizan con combustibles comúnmente líquidos, gaseosos como se considera la biomasa pulverizada.

Las calderas que siguen un proceso térmico cíclico cerrado tienen una mayor expansión y se pueden dividir mediante la siguiente clasificación [29]:

- Turbinas de vapor con motores de vapor utilizados como punto de expansión en el ciclo de Rankine. El agua se evapora y se eleva la presión hasta que ésta cae durante la expansión en el motor.



Figura 3.1: Binder 8 MW Canadá [3]

- Turbinas de vapor utilizadas en ciclos orgánicos de Rankine. El calor de la combustión se transfiere a un medio orgánico como el aceite que alimenta un evaporador externo.
- Motores Stirling. Los gases de escape intercambian su calor periódicamente con un medio intermedio como puede ser el aire, helio e hidrógeno.
- Turbinas de gas cerradas. Se utiliza un ciclo cerrado con aire, helio u oxígeno el cual se comprime, calienta y se expande en la turbina.
- Turbinas de gas cerradas. En este otro caso el calor se transfiere a aire comprimido, el cual se expande en una turbina y retorna de nuevo como aporte de aire al interior de la caldera

Otro tipo de calderas, o más bien de parrillas que no se tratarán en este trabajo pero que conviene tener presente de cara a la continuación del proyecto son aquellas que, mediante un proceso de co-combustión, utilizan mezclas de combustibles con biomasa y carbón. El interés principal de este tipo de tecnología es el de reducir considerablemente las emisiones de CO_2 sin incurrir en unos costes tan elevados como pueden demandar una instalación con calefacción procedente de energía 100 % renovable.

En cualquier caso, las calderas que serán objeto de este análisis son simplemente aquellas destinadas a sistemas de calefacción. Una vez aclarada esta visión global de distintas aplicaciones que existen para la combustión de biomasa, de ahora en adelante el estudio se centrará únicamente en calderas de combustión de biomasa, para la producción de energía para sistemas de calefacción, y fijándose principalmente en el rango de medias potencias por las razones que se explicaran en posteriores capítulos.

3.2. Descripción de equipos comerciales

Actualmente existen numerosas marcas y diversos fabricantes de calderas de biomasa. Son muchas las empresas que, incluso procediendo de la fabricación de calderas clásicas de gas o carbón están esforzándose por desarrollar dispositivos que permitan la utilización de combustibles renovables, o parcialmente renovables como algunos autores catalogan a la biomasa.

A continuación, mediante una breve descripción de algunos modelos de unos pocos fabricantes, entre los que se encuentran algunos de los más destacados, se presentarán los elementos típicos de este tipo de calderas hasta conseguir una visión global de las tecnologías que actualmente se están comercializando.

La colección de calderas, salvo alguna excepción, se centra básicamente en la escala de media potencia, dejando de lado todas las posibilidades que ofrecen las calderas de pequeña escala en cuanto a soluciones domésticas (estufas, calderas de leña...).

Como se apreciará, la mayoría de estas calderas son de origen austriaco. Es allí donde hoy en día se diseña un alto porcentaje de las marcas de más calidad y mayor distribución europea. Suiza, Alemania, República Checa, Polonia e incluso España desarrollan nuevos equipos con los que competir.

Puntualizar que, pese a que se da por hecho que el fluido portador de calor es el agua, y dado que además todas las calderas que se muestran a continuación lo cumplen, existen otros tipos cuyo fluido puede variar pudiendo ser, por ejemplo, aceite térmico.

Todas las calderas que se muestran siguen un inicial esquema básico: alimentación, parrilla con sus ventiladores primario y secundario (en las calderas más sofisticadas) cámara de combustión, intercambiador de calor y salida de gases de escape con ventilador de tiro inducido.

3.2.1. Ökofen

Ökofen [32] es una empresa austriaca centrada en el desarrollo y comercialización de sistemas de calefacción basados en la combustión de *pellets*. Por tanto, sus calderas no son de tipo policombustible, algo a tener en cuenta a la hora de decidir en un futuro qué características se desea que tenga una caldera a diseñar. Su nacimiento, según su fundador, tiene relación con las crisis del petróleo de los años 70 y 80 que alertaron de la necesidad de búsqueda y experimentación con nuevas formas de obtención de calor. Según las referencias que ellos mismos aportan, su focalización en la combustión únicamente de *pellets* se basa en que en sus orígenes no consideraron rentable la utilización de astillas salvo en los lugares y zonas donde se obtuviera directamente.



Figura 3.2: Caldera Ökofen Pellematic Maxi 56 kW [32]

La caldera, como se puede apreciar, consta de sus ventiladores primario y secundario más uno de tiro. Son destacables la limpieza automática de cenizas mediante tornillo sinfín, la puerta de acceso a la parte delantera para facilitar los trabajos de mantenimiento, los sistemas de seguridad anti-retorno de llama entre el silo intermedio y el sinfín que transporta el combustible a cámara de combustión, los accesos por la parte superior y el sistema de encendido automático. Este tipo de sistema de encendido suelen ser del tipo resistencias eléctricas cerámicas refrigeradas por un pequeño ventilador.

Sin embargo, en los aspectos en los que nos centraremos al observar esta caldera serán: limitación de 56 kW pero posibilidad de ampliación hasta 224 kw mediante la colocación de calderas en cascada. Es una posibilidad que existe siempre, combinar varias calderas. Ofrecer un control ya optimizado para el adecuado funcionamiento de estos sistemas es lo realmente interesante. Además, podemos apreciar un intercambiador vertical que facilita la limpieza de los tubuladores, una parrilla fija de tipo circular, habitual en calderas que utilizan únicamente *pellets* como combustible, unas coronas por las que entra el aire secundario y un sistema de elevación de la temperatura de retorno que el fabricante no entra a detallar.

En general, se puede apreciar una caldera típica para la combustión de *pellets*, más pequeña que la que se pretende diseñar en este estudio, pero que ofrece pequeños detalles y posibilidades a tener en cuenta en el posterior desarrollo.

3.2.2. Catfire

Esta calera checa [5], en la línea de el resto de calderas policombustibles y de parrilla fija, utiliza combustibles de origen lignocelulósico de todo tipo, siempre y cuando cumplan con los límites de tamaño y humedad: G30 como máximo y menos de un 30% de humedad relativa. Dentro de toda la gama de calderas de esta marca, el estudio se fijará en el modelo de 220 kW. Con indiferencia respecto a la configuración del sistema de alimentación se ignorará la denominación USZI o USV, que atiende a sistema de

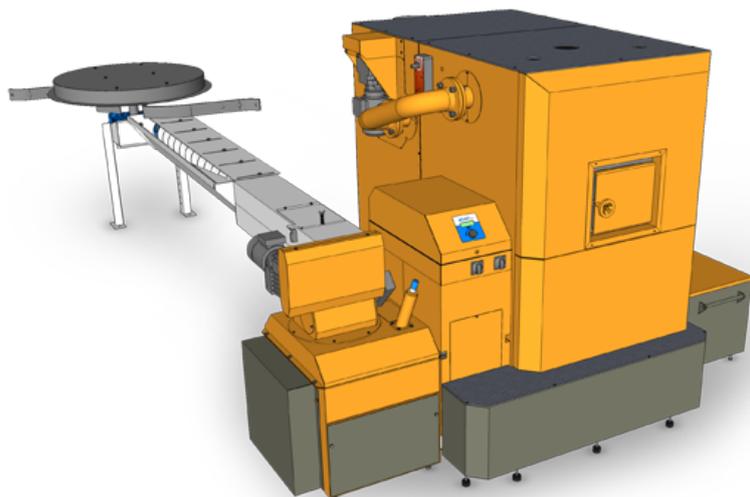


Figura 3.3: Catfire USZI 220 kW [5]

alimentación automático o de carga manual respectivamente. Estas calderas constan principalmente de varios módulos que facilitan su transporte y montaje: depósito intermedio de combustible; bloque con controlador y mayor parte de la electrónica; y dos bloques separados con quemador, cámara de combustión e intercambiador de calor. Destaca principalmente que la caldera es de parrilla fija, policombustible y con intercambiador de calor vertical. Se analizará a continuación todas las partes de las que consta la caldera.

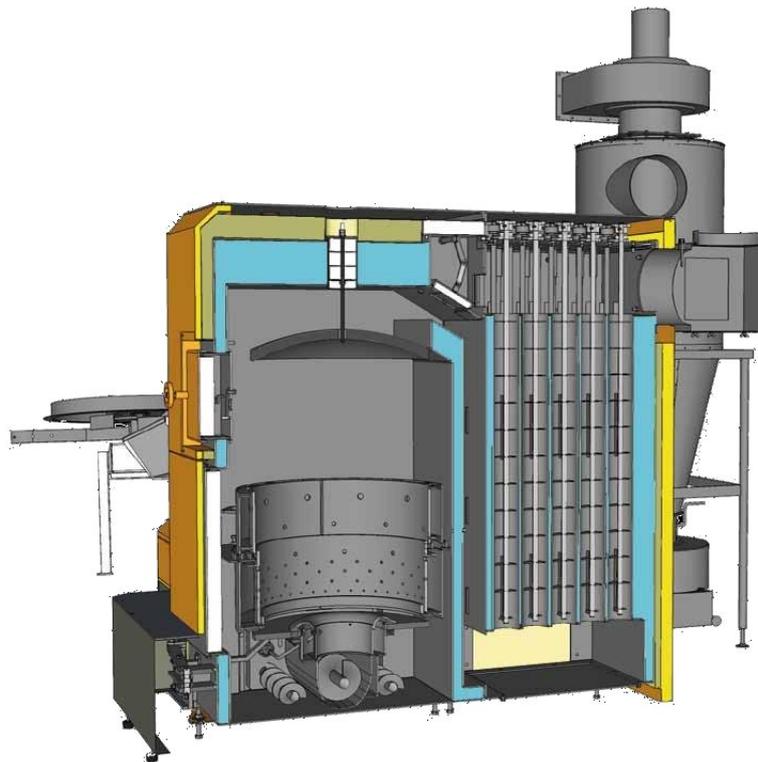


Figura 3.4: Catfire USZI 220 kW [5]

El combustible, ya sea *pellet*, astilla de hasta G30 y 30 % de humedad o incluso de otros tipos, se introduce por la parte inferior de la parrilla y sube hasta el hogar por afloración. El tipo de parrilla es por tanto de alimentación inferior. Junto al tornillo sinfín central que cumple el propósito descrito anteriormente se distinguen 2 tornillos sinfines más pequeños. Estos son los encargados de transportar la ceniza que cae del reborde de la parrilla hasta el cajón exterior que el operario se encarga de vaciar periódicamente.

Esto nos lleva a explicar cómo la parrilla va expulsando la ceniza que va produciendo siendo que en principio esta es fija. Para favorecer la caída de los residuos de la combustión, un motor provoca un movimiento oscilatorio del plato circular que ayuda al desplazamiento radial del combustible y sus posteriores residuos desde el centro hasta el borde.

Es a través de una serie de agujeros en este plato circular a través de los cuales el aire primario se introduce en la cámara de combustión y entra en contacto con las brasas. Inmediatamente por encima, se hallan dos coronas metálicas por donde el aire

secundario se mezcla con los gases producidos y regula la cantidad de oxígeno en los humos finales.

Los gases continúan ya su camino y, tras toparse con un deflector circular cerámico favoreciéndose así la precipitación de cenizas, llegan hasta el intercambiador de calor. Es interesante fijarse antes de proseguir cómo una manta de agua rodea la cámara de combustión aprovechando al máximo el calor producido en ésta. Esto es posible, o interesante mejor dicho, en calderas cuya cámara de combustión no está recubierta por material refractario. En este caso, toda la estructura es metálica.

Prosiguiendo, los gases llegan a un punto entre el intercambiador de calor y la cámara de combustión en la que una válvula separa estos dos cuerpos. La función de esta trampilla motorizada es de gran importancia pues asegura una temperatura constante en los humos de salida o, al menos, que ésta no se desplome por debajo de los 100 °C. Esto es así para evitar posibles condensaciones en la chimenea. La trampilla distribuye una parte de los gases a través del intercambiador de calor, atravesando los tubuladores, y otra la deja fluir directamente a salida para conseguir la temperatura final deseada. Igualmente, este sistema permite en caso de necesidad dejar escapar totalmente los gases de combustión al exterior para evitar un sobrecalentamiento del agua.

Los tubos del intercambiador citados anteriormente se limpian de forma automática mediante un mecanismo activado mediante uno o varios motores que hacen girar una serie de rascadores en su interior. La ceniza cae a la parte inferior que a la que se puede acceder mediante un registro para limpiarla.

Toda vez el intercambio de calor se haya realizado, los humos continúan hasta su salida donde la sonda Λ ¹ y el sensor de temperatura toman datos para la regulación de la combustión. Esta regulación con sonda Λ no estaba presente en las calderas descritas en páginas anteriores. El flujo llega hasta un ciclón que disminuye la cantidad de partículas y polvo hasta cumplir la normativa pertinente.

En cuanto al ventilador de tiro inducido se controla según la señal del presostato que asegura una depresión constante en la cámara de combustión. La depresión es la optimizada para conseguir el mejor intercambio de calor entre el agua y los humos.

Existen otros elementos de seguridad que no se han citado como el depósito de agua que descarga en caso de incendio en el tornillo de alimentación a cámara de combustión o la trampilla que separan los sistemas de transporte entre silo y caldera para evitar retornos de llama. Sin embargo, el objeto de la descripción no es analizar las calderas al completo sino hacer una pequeña revisión de los distintos sistemas de combustión, diseño y optimización del intercambio de calor que existen en la actualidad.

Notas

¹Permite medir el O_2 sobrante en los humos como medida de optimización de la combustión y de la no existencia de CO en los gases lanzados a la atmósfera.

3.2.3. KWB

KWB [18] es una de las empresas austriacas más importantes en cuanto a innovación, desarrollo y comercialización de calderas de biomasa. Entre las posibilidades que ofrece la TDS de 240 kW será objeto de análisis y descripción.

Se trata de una caldera policombustible con posibilidad certificada de utilizar astillas de hasta G50 con humedad de hasta un 45 %. La caldera no utiliza ni las típicas parrillas fijas ni las móviles habituales como se verá a continuación.



Figura 3.5: Caldera KWB TDS 240 kW [18]

Observando el esquema de la caldera se puede ver como la cámara de combustión tiene forma ciclónica. El objetivo es el de favorecer la mezcla de gases mediante un diseño que proporcione un momento angular al flujo de gases. De esta forma disminuyen las cenizas y polvo en los humos. Se aprecia que la caldera, como todas que buscan una alta optimización del proceso, está controlada mediante sonda Lambda. La recogida de cenizas es automática; los sistemas de seguridad los habituales (válvulas rotativas entre alimentación y caldera, compuertas anti-retorno de llama...); y la recirculación de humos está presente.

Llama la atención, sobre todo, el tipo de parrilla que utiliza esta caldera. La gasificación se produce sobre lecho circular y giratorio. Un dispositivo de carga lateral vierte el combustible sobre dicha parrilla que favorece su autolimpieza expulsando las cenizas por el borde de la misma.

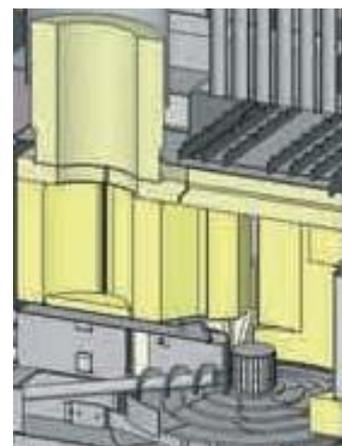


Figura 3.6: Parrilla giratoria [18]

3.2.4. Lasian

Lasian [19] es una empresa española que fabrica y distribuye calderas de biomasa de hasta 2.300 KW. La caldera es de parrilla fija y por afloración. Esto ya limita el material a consumir a *pellets*, o material de pequeño tamaño y baja humedad. Este tipo de parrilla, sin ningún tipo de movilidad, deja que las cenizas se acumulen en la cámara hasta que periódicamente un operario las retire manualmente.

El intercambiador es horizontal y está situado en la parte superior, haciendo junto con la cámara de combustión un solo bloque. La presión de funcionamiento del intercambiador es otra de las características importantes del global de la caldera. En este tipo de dispositivos de media hasta alta potencia lo habitual es que el diseño de este será como mínimo para trabajar a 3 bares. Muchas marcas ofrecen la posibilidad de escoger intercambiadores con mayores presiones de trabajo de 5 ó 6 bares y evitar así la utilización de un intercambiador intermedio con el resto de la instalación.

En general, se puede destacar de esta caldera que su cámara de combustión no está recubierta por ladrillo refractario sino que su estructura es completamente metálica. Como se puede apreciar en el esquema, un manto de agua rodea a la cámara de combustión y se fuerza que el flujo discorra rodeando ésta. Se aprecia como, a diferencia por ejemplo de la Binder se verá con posterioridad, el agua entra por la parte alta y delantera de la caldera y sale por la parte baja y trasera, haciendo que todo el flujo rodee el hogar.



Figura 3.7: Lasian Biocompact 200 kW [19]

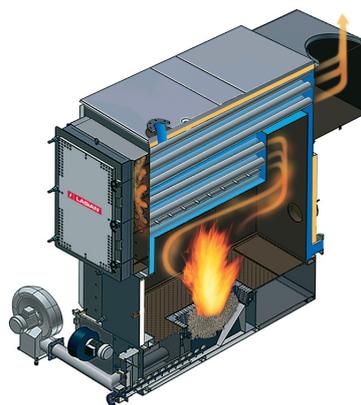


Figura 3.8: Lasian Biocompact 200 kW interior [19]

3.2.5. Herz

La caldera [27] Biomatic de 220 kW de Herz, austriaca como muchas de las marcas que tienen relevancia actualmente en el mercado europeo, presenta una estructura muy parecida a la USZI de Catfire que se ha descrito anteriormente. Hay que decir, que muchas de las empresas al estar concentradas en Austria y el centro de Europa, tienen relaciones fuertes entre ellas en muchos casos y su historia y origen convergen en muchas ocasiones años atrás. No es por tanto extraño encontrar similitudes entre los diseños.

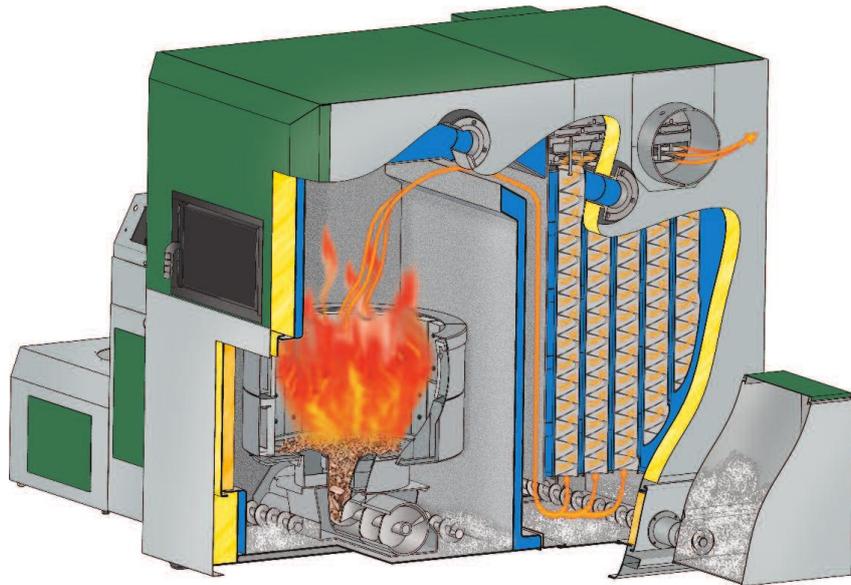


Figura 3.9: Herz Biomatic 220 kW [27]

Más allá de las diferencias en cuanto a control, que hasta ahora no se ha comentado nada al respecto, se pueden apreciar variaciones en cuanto al diseño de la USZI.

En primer lugar, el plato de la parrilla, a través del cual emerge el combustible y entra en contacto con el aire primario no tiene un movimiento oscilante que facilite la evacuación de cenizas sino un movimiento vibrante.

Prosiguiendo con el discurrir de los gases, todo continúa más o menos igual salvo por que no en este diseño no encontramos el plato cerámico defletante de la USZI. Es por ello por lo que la acumulación de cenizas es mayor en la parte inferior del intercambiador de calor y, a diferencia de la otra caldera en la que simplemente había un registro para limpiar manualmente cada cierto tiempo, parece que se hace necesario un sistema de extracción automática hacia un depósito exterior como se aprecia en el dibujo.

Hay otro aspecto de la caldera en el que fijarse y que no se ha detallado de momento: la limpieza de los tubuladores. Como se ha explicado hasta ahora, los tubuladores del intercambiador de calor necesitan una limpieza periódica de su superficie. La acumulación de residuos depositados sobre las paredes hace que el rendimiento del intercambio

de calor caiga notablemente. Es por ello que las calderas llevan incorporados estos tubuladores, o rascadores en caso de la Catfire, que limpian la superficie de los tubos cada ciertos ciclos de combustión.

La forma de estos tubuladores no es aleatoria y cumplen otra misión. Su perfil ayuda a aumentar la turbulencia de los gases y, consecuentemente, a mejorar el intercambio de calor con el metal y el agua.

3.2.6. Hassgarner

Hassgarner [11], es otra compañía austriaca. La caldera de 200 kW que se presenta a continuación, a diferencia de Catfire, se basa en tecnología de parrilla móvil, y difiere en varios aspectos con los anteriores modelos.

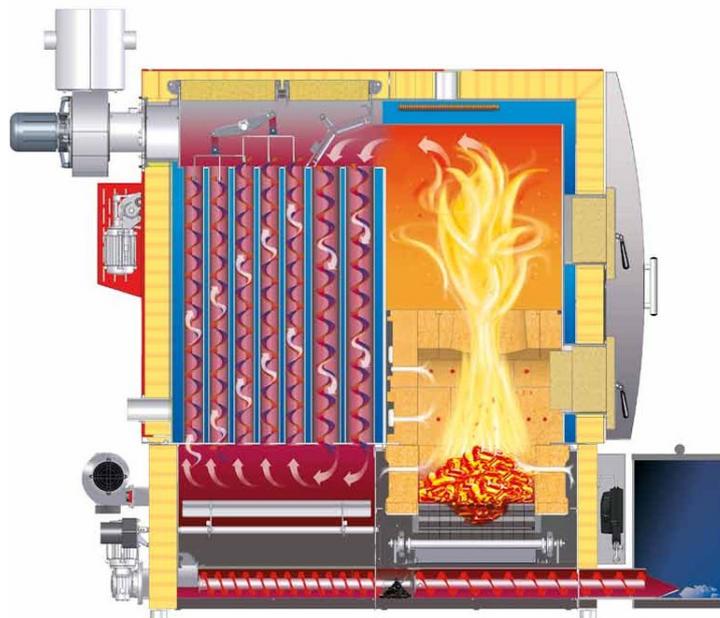


Figura 3.10: Caldera Hassgarner 200 kW [11]

En primer lugar, llama la atención el recubrimiento de la cámara de combustión. La caldera Catfire descrita en páginas anteriores mostaba una estructura metálica (hierro fundido) dentro de la cual tenía lugar la combustión. Debido a las características físico-químicas del material, un manto de agua envolvía el hogar aprovechando al máximo el calor de éste. Sin embargo Hassgarner presenta otro tipo de solución también muy utilizada. El interior de la cámara está completamente recubierto por ladrillos refractarios y cubierta por una bóveda doble del mismo material. Los ladrillos garantizan unas altas temperaturas de combustión (incluso con carga parcial) y reduce la necesidad de ignición. En general, la principal ventaja de las cámaras de combustión recubiertas por material refractario es su inercia y preservación del calor dentro del hogar. Por contra, los ladrillos pueden verse deteriorados si las temperatura de la cámara se dispara y se mantiene durante largos periodos en rangos para los que no están preparados.

Continuando con la descripción cabe pararse en el tipo de parrilla que se presenta. Al contrario que las parrillas fijas y por afloración que se han descrito hasta ahora, esta caldera funciona con una parrilla de gradas escalonadas y motorizadas. La parrilla recibe en su parte más alta el combustible procedente del sinfín de alimentación y discurre a lo largo de la misma describiendo todos los pasos típicos de la combustión. Gracias a esta tecnología la fase de secado tiene mayor presencia e importancia y permite la combustión certificada de astillas con humedad inicial de hasta un 35 % y la posibilidad de quemar combustible de hasta G50.

3.2.7. Fröling

Fundada en 1961 en Austria, Fröling lleva más de cuatro décadas trabajado en el desarrollo de calderas de biomasa.

Fröling comercializa calderas para la combustión tanto de leña, *pellets* y astillas en una amplia gama de potencias. De nuevo, el estudio se centrará en el análisis de la caldera policombustible de 220 KW de parrilla móvil en este caso, que es la que más se acerca al objetivo del presente trabajo.

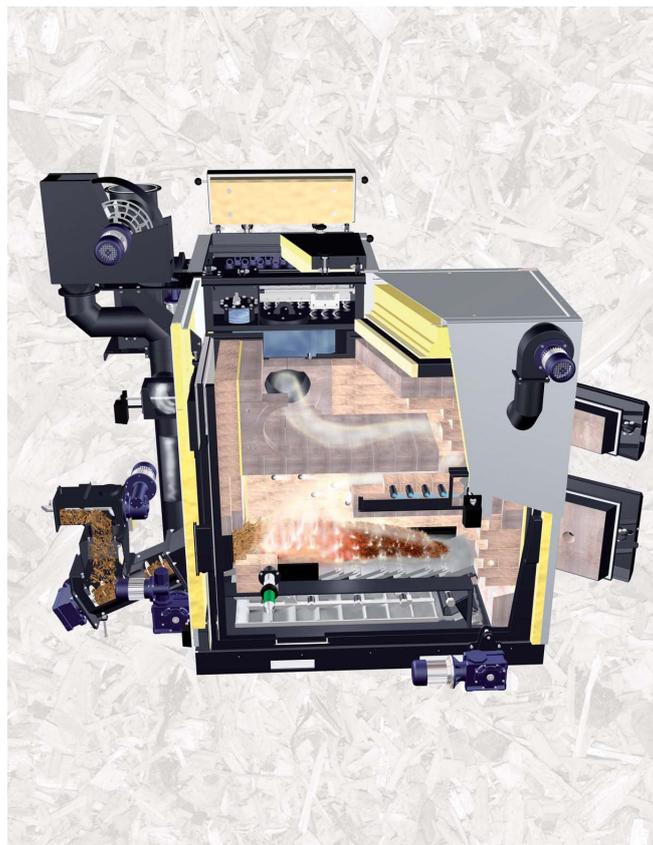


Figura 3.11: Caldera turbomat Fröling 220 kW [9]

La descripción que ofrece el fabricante es la siguiente [9]:

Cámara de combustión con material refractario. Consta de 4 capas (material refractario / aislante 1 / cámara de aire / aislante 2). La parrilla es de tipo móvil, horizontal,

sin caída pero con las piezas que la componen inclinadas, permitiéndose así la homogenización del proceso de combustión y transporte automático de los residuos hacia el sistema de extracción de cenizas. Intercambiador vertical de tres pasos y sistema de optimización del rendimiento con tubuladores y separador ciclónico de partículas integrado. Emisiones de partículas ($< 50 \text{ mg/Nm}^3$). Recirculación de humos opcional para la optimización de la combustión y del rendimiento, sobre todo cuando se utilizan combustibles exigentes como por ejemplo pélet. Ventilador de tiro con régimen regulado en combinación con el control de la depresión dentro de la cámara de combustión para facilitar el ajuste automático del proceso según condiciones variables de combustibles o de chimenea. Puertas de acceso a la cámara de combustión para su fácil mantenimiento.

3.2.8. Viessmann

El modelo [30] Pyrot de Viessmann se distribuye en un rango de potencias de 100 a 540 KW. Esta caldera ofrece un sistema de combustión ligeramente distinto a los anteriores como se describirá a continuación.

El tornillo sinfín de alimentación aporta continuamente combustible al interior de la cámara donde la gasificación tiene lugar. La sonda Lambda regula el ventilador primario. La parrilla es de tipo móvil. Sin embargo, el fabricante sólo certifica el buen funcionamiento de la misma hasta humedades de hasta un 35 %.

Los gases producidos continúan hacia una cámara superior donde el ventilador de aire secundario optimiza el proceso y, aquí es donde viene la novedad, aporta un momento angular al flujo de gases favoreciendo la mezcla de la forma más adecuada.

En la figura se puede apreciar el ventilador secundario (en rojo) que realiza la mezcla en esa cámara de combustión adaptada para el propósito. Son destacables igualmente la extracción automática de cenizas, la parrilla móvil, la ignición automática y la sonda Lambda y el sensor de temperatura de gases a la salida del ventilador de tiro inducido.

Existen tres elementos a puntualizar todavía. La recirculación de gases, que transporta de nuevo los humos de la chimenea hasta mezclarlos con el aire que impulsa el ventilador primario; el espacio superior utilizado como intercambiador de seguridad (en caso de que la temperatura de caldera se volviera incontrolable se realizaría una descarga de agua fresca); y la limpieza de los tubuladores de forma neumática en vez de con tubuladores, un método utilizado en intercambiadores de calor verticales y no horizontales.

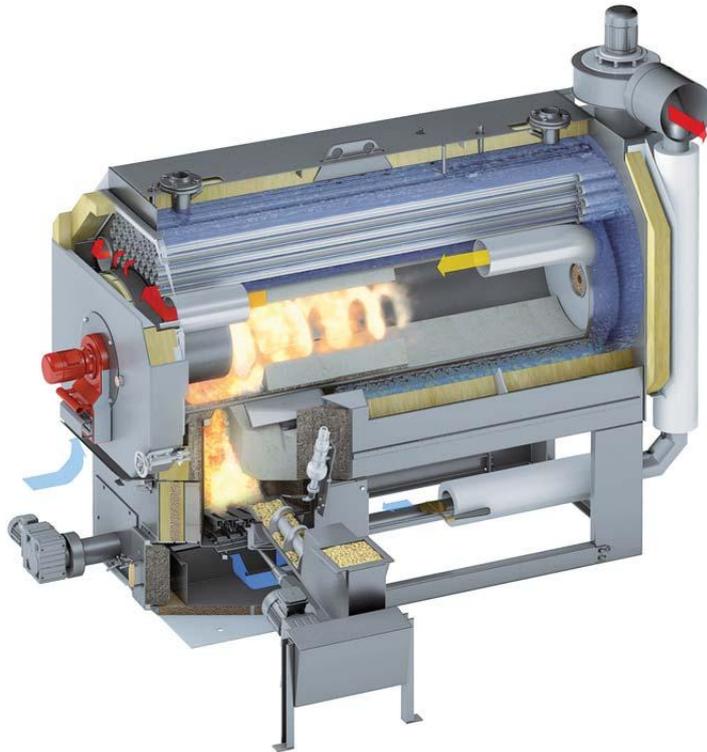


Figura 3.12: Caldera Pyrot [30]

3.2.9. Binder

Para finalizar esta pequeña introducción sobre las calderas comerciales que actualmente se están instalando (principalmente por Europa), se analizarán las características más destacables de la marca austriaca Binder.

Esta caldera, de aspecto robusto e industrial se diseña para todo tipo de potencias y tamaños, siendo su gama de altas potencias la más interesante. El modelo que interesa es el USRF. La parrilla, de tipo móvil e inclinada, recoge el material procedente del tortillo de alimentación (o transportador hidráulico para las potencias más altas). Una vez allí, el proceso de secado y posterior pirólisis a lo largo de la longitud de la primera



Figura 3.13: Binder USRF [3]

parte de ésta permite la combustión de gran cantidad y variedad de astillas, de tamaños de hasta G100 y humedad del 50 %. Es esta pues una caldera para ser alimentada con un combustible poco tratado y barato. Al final de la parrilla se recogerán las escorias y cenizas y se extraerán mediante tornillos sinfines a cajones exteriores.

Por lo demás se aprecia una cámara de combustión forrada con ladrillo refractario y rematada por una bóveda del mismo material.

Sin embargo, hay que explicar la limpieza del intercambiador de calor por ser algo distinta a lo visto hasta ahora. Al ser una caldera con intercambiador de calor horizontal, se gana en espacio en planta pero se aumenta considerablemente la altura. Algo similar ocurría con la caldera del grupo Viessmann. En aquel caso, los tubos del intercambiador se limpiaban de forma neumática, por unos dispositivos que inyectaban aire a presión cada ciertos períodos. Binder utiliza otra solución.

A la salida del intercambiador un conducto lleva los gases resultantes al ciclón para eliminar el polvo y las partículas en suspensión. Al salir de éste, pasa por el ventilador de tiro inducido y va a chimenea. Sin embargo, cuando la limpieza tiene lugar, una trampilla cambia su posición haciendo que los humos salientes del ventilador entren de nuevo al intercambiador de calor. El ventilador aumenta su velocidad al máximo y los mismos gases, al estar los conductos de salida cortocircuitados, arrastran la suciedad depositada en la superficie de los tubos encargados de transmitir el calor.



Figura 3.14: Limpieza intercambiador Binder [3]

3.3. Otros elementos y dispositivos presentes en las calderas de biomasa

Más allá de los conceptos globales de tipo de caldera, parrilla, tipos de intercambiador..., existen muchos más elementos presentes en la mayoría de calderas y que merece la pena tener presente de cara a tenerlos en cuenta en el momento de comenzar a diseñar un nuevo modelo.

Se ha nombrado alguno pero conviene repasar y destacar los numerosos **sistemas de seguridad** que deben incorporar las calderas de biomasa, tanto domésticas como industriales. El problema del retorno de llama es frecuente. A través del tornillo de alimentación, y sobre todo con calderas de aporte de material por afloramiento, puede

darse el caso de que la llama baje y haga arder el combustible de los presilos o silos intermedio y, en el peor de los casos, continuar hasta el silo. Para evitar existen distintas soluciones. Las calderas pequeñas suelen verter el combustible sobre la parrilla por lo que no hay continuidad en el combustible. Aun así, y también en el resto de calderas, se utilizan válvulas rotativas que aíslan el silo con el tornillo de alimentación a caldera. Otra solución es la de colocar trampillas, como se ve en la figura de la derecha que se cierran y cortan la posible subida de llamas y humos. En la figura 3.15 se ve la entrada al silo intermedio de una Herz, en ese punto se situaría el sistema de alimentación que descargaría el combustible. Siempre y cuando la caldera no demande material, la trampilla permanecerá cerrada. Otro sistema para evitar este problema es la utilización de un pequeño contenedor de agua que, activándose cuando un sensor de temperatura de bulbo en el tornillo de alimentación detecte una incontrolable subida de temperatura, descargar el agua extinguiendo la llama en ese punto. Existen también soluciones de control como la aceleración del tornillo sinfín en caso de detectarse subida de temperatura en su interior.

Las calderas de biomasa tienen bastantes más tipos de sistemas de seguridad pero uno de los más importantes, sobre todo en calderas de mayor tamaño es el intercambiador de seguridad en su parte superior. En caso de que la temperatura de caldera de dispara y ésta no sea capaz de disminuir aún deteniendo la combustión, una válvula térmica abriría y permitiría el paso de agua fresca para evitar mayores problemas. Es uno de los mayores problemas de seguridad. La válvula no debe ser electrónica y debe ser útil en caso de corte eléctrico pues es la principal causa de que se produzca esta situación al detenerse la bomba de funcionamiento de agua.



Figura 3.15: Trampilla de seguridad [27]

Las calderas de biomasa están completamente **sensorizadas**. Desde las sondas típicas PT100 y PT1000 útiles para controlar temperaturas de tanques de agua y de entrada y salida de la misma a caldera, hasta sondas del tipo NiCrNi con una resistencia a la temperatura superior a las anteriores para controlar la temperatura del ladrillo de cámara de combustión.

Finalmente, y ya que se han nombrado durante gran parte del trabajo, se explicará brevemente qué tipos de **sistemas de alimentación** se utilizan para transportar el combustible hasta los silos intermedios o directamente a las parrillas de las calderas.

Dependiendo del tipo de combustible que se utilice existen más o menos posibilidades. En el caso de utilizar únicamente *pellet*, es posible utilizar casi la mayoría de sistemas. Únicamente limita su densidad con respecto al resto de combustibles. Por ejemplo, la altura de *pellet* acumulada sobre un agitador o un suelo móvil es mucho menor que para el caso de las astillas. El *pellet* pues, al ser el combustible con compor-

tamiento más fluido, puede distribuirse tanto de forma neumática por aspiración, para calderas domésticas, como mediante sinfines situados en silos con suelos inclinados que convergen en él. Esto abarata mucho las instalaciones en cuando a almacenamiento (aunque por contra es el combustible más caro). El sinfín puede ir directo a a la entrada a caldera, provocando la consiguiente geometría de suelo doblemente inclinado en el silo, o realizar una subida final gracias a una solución mecánica mediante cardan.

De todas formas, dado que el caso que más interesa es el de calderas policom bustibles que permitan el uso tanto de *pellets* como de astillas, serrín, briquetas, etc, el sistema de alimentación debe ser más versátil. El más común e el conjunto agitador sinifín que se puede ver en la figura 3.17. Un sistema de ballestas gira y arrastra el combustible al interior de un tornillo sinifín que los transporta a caldera con una inclinación dada.

Para calderas de gran potencia que exigen un gran almacenamiento se utilizan suelos móviles movidos por sistemas hidráulicos o combinaciones de varios tipos de los sistemas citados. En la figura 3.16 se ve también este sistema arriba a la izquierda junto con otros sistemas. Todos estos dispositivos están completamente sensorizados y suelen ser controlados por la caldera detectando problemas de atascos mediante sensores de contacto o falta de combustible gracias a emisores y receptores de infrarrojos o ultraso nidos.

La combinación de varios sistemas de alimentación junto con sinfines encadenados permiten obtener soluciones sea cual sea la disposición de silo y sala de calderas.



Figura 3.16: Distintos sistemas de alimentación Binder [3]



Figura 3.17: Alimentación agitador más sinifín Catfire [5]

Como se vio en el tema de combustibles, uno de los mayores problemas de la biomasa en comparación con los combustibles fósiles es que, aunque emiten menos CO_2 y menos contaminantes, arrojan mayores cantidades de polvo a la atmósfera. En calderas pequeñas no suele ser alarmante pero para calderas de media y gran potencia se hace indispensable el uso de **ciclones** que reduzca su valor por lo menos hasta $50\text{ mg}/\text{m}^3$. Según el cliente o la normativa del lugar donde se realice la instalación se pueden buscar soluciones más eficientes con multiciclones, filtros de manga o filtros electrostáticos.

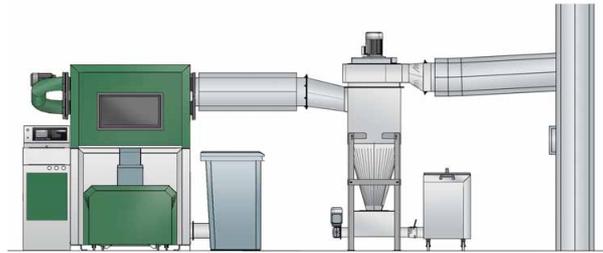


Figura 3.18: Caldera Herz con salida a ciclón [27]

3.4. Conclusiones

Existen distintas tecnologías de **parrilla** según lo visto hasta ahora. En general, aparte de las que hemos visto en los ejemplos propuestos se puede optar a la hora de diseñar una caldera entre parrillas fijas, con o sin alimentación por afloración, parrillas móviles, y otras menos convencionales como las rotativas o vibratorias.

Las parrillas completamente fijas son más apropiadas para calderas de menor escala como las de Ökofen o Lazar que se muestra en la figura. Sobre ellas el tornillo de alimentación sinfín vierte periódicamente el combustible (*pellet* únicamente para este tipo de tecnología) y, normalmente una pieza móvil o el desplazamiento de la misma parrilla permite la evacuación de las cenizas.

De ahora en adelante cuando se hable de parrilla fija, se referirá a las parrillas por afloración, en las que no hay elementos móviles. Estas últimas representan una opción óptima y económica como solución a calderas que pueden ir desde pequeña a gran escala. Binder, citado anteriormente, posee en su gama el modelo PRF y RRF con parrillas de este tipo que tienen la limitación de ceñirse únicamente a *pellets* y astillas de bajo tamaño y humedad. Otra desventaja de este sistema es la dificultad de añadir sistemas



Figura 3.19: Binder PRF parrilla fija [3]

de extracción automática de cenizas y su retirada tiene que ser completamente manual. Ejemplos como Catfire, Herz o KWB, ofrecen una variante a este tipo de parrillas ya que, al no ser completamente fijas sino que tienen un pequeño movimiento giratorio u oscilatorio, permiten la retirada y el vertido automático de los productos generados durante la combustión.

El sistema por afloramiento se alimenta de combustible, por tanto, mediante un tornillo sinfín que discurre por debajo del hogar. El aire primario es aportado a través de las rejillas de la parrilla mientras que el aire secundario se mezcla con los gases resultantes en una cámara adicional, como en el caso de la caldera Pyrot.

Para la combustión de astillas de mayor tamaño y humedad, se precisa de parrillas móviles. Dentro de este grupo se distinguirá entre parrillas inclinadas y horizontales.

Las parrillas móviles inclinadas son aquellas que hemos visto en la mayoría de ejemplos reales anteriores. Consisten en un conjunto de elementos fijos y móviles. Una serie de filas con distintas barras metálicas alternan un movimiento hacia delante y hacia atrás permitiendo el avance del combustible. El material, en diferentes fases de combustión, avanza y se renueva constantemente, lo cual es interesante para una distribución adecuada del aire primario a lo largo de la misma. Normalmente la parrilla se divide en diferentes secciones que pueden moverse a distintas velocidades. La fuerza motriz es aportada por cilindros hidráulicos. Todo el sistema está manufacturado con una aleación de acero para resistir las altas temperaturas.

El correcto ajuste del movimiento de avance del combustible es sensiblemente complejo. Si es excesivo, no dará tiempo suficiente a la combustión completa de astillas o *pellets* y aparecerán quemados en los cajones de cenizas. El nivel de combustible a lo largo de la parrilla está controlado por sensores infrarrojos situados a lo largo de la misma.

En cuanto a las parrillas horizontales, mucho menos habituales se diferencian por disponer el material sobre una superficie paralela al suelo. El avance es posible gracias a la inclinación de las barras y piezas metálicas móviles. Su principal ventaja es que los movimientos provocados por culpa de la gravedad en las parrillas inclinadas no tienen lugar aquí.

La mayoría de **sistemas de alimentación** [24] aportan el material horizontalmente. Sin embargo, y como se ha visto ya, los sistemas de alimentación a caldera mediante tornillo sinfín (*feeding auger*), pueden aparecer de distintas formas.

- Sistemas de alimentación inferior: es el sistema por afloramiento. Es útil para *pellets* y astillas de no más de un 40 % de humedad. El aire primario se introduce por las rejillas de la propia parrilla.
- Sistema de alimentación horizontal: es el más habitual en calderas de parrilla móvil. El sinfín o el sistema de transporte hidráulico introduce el material en la entrada a parrilla

- Sistema de alimentación superior: este tipo de sistema es apropiado sólo para *pellet* y no suele ser utilizado más que en calderas domésticas o de baja potencia. La principal ventaja es la separación entre la llama y el sinfín de alimentación.

En cuanto a las **cámaras de combustión** hay muchas clasificaciones. Según lo visto hasta ahora, se han analizado básicamente dos grupos de cámaras de combustión: púramente metálicas o con revestimiento de ladrillo refractario.

- Las cámaras de combustión metálicas suelen estar rodeadas por un manto de agua que aprovecha al máximo el calor generado dentro de las mismas mientras que las otras no. Es por ello que el diseño de las calderas con carcasa metálica fuercen el flujo de agua por sus paredes antes de entrar al intercambiador de calor.
- El ladrillo refractario dota a la caldera de un mayor aislamiento. Retiene mejor el calor producido y es más efectiva en ese aspecto. Es por eso por lo que estas calderas tienen mucha más inercia y que su control es más complicado. Importante es el problema de la regulación de la temperatura interior. Es frecuente que ésta se dispare si el funcionamiento no es el adecuado. Trabajar a temperaturas muy altas de cámara durante un tiempo prolongado afecta al ladrillo. La solución habitual para corregir esta situación es la recirculación de humos.

Respecto a los **intercambiadores de calor** básicamente se puede resumir en horizontales y verticales atribuyendo las siguientes características a cada uno de ellos.

- Los intercambiadores verticales suelen situarse en un módulo aparte aumentando el tamaño de caldera en planta. Por otro lado, su limpieza automática es mucho más sencilla gracias al uso de tubuladores que además aumentan la turbulencia dentro de los mismos.
- El intercambiador horizontal se suele colocar por encima de la cámara de combustión siendo la caldera más compacta aunque más alta. La limpieza automática de tubuladores se realiza normalmente mediante la inyección de aire a presión o la recirculación al interior de los propios humos de nuevo.

Capítulo 4

Análisis termodinámico de las calderas de biomasa

4.1. Introducción

En las siguientes páginas se expondrá un breve resumen de los procesos que tienen lugar dentro de la cámara de combustión así como de los factores que afectan tanto a dicha combustión como al funcionamiento completo de la caldera.

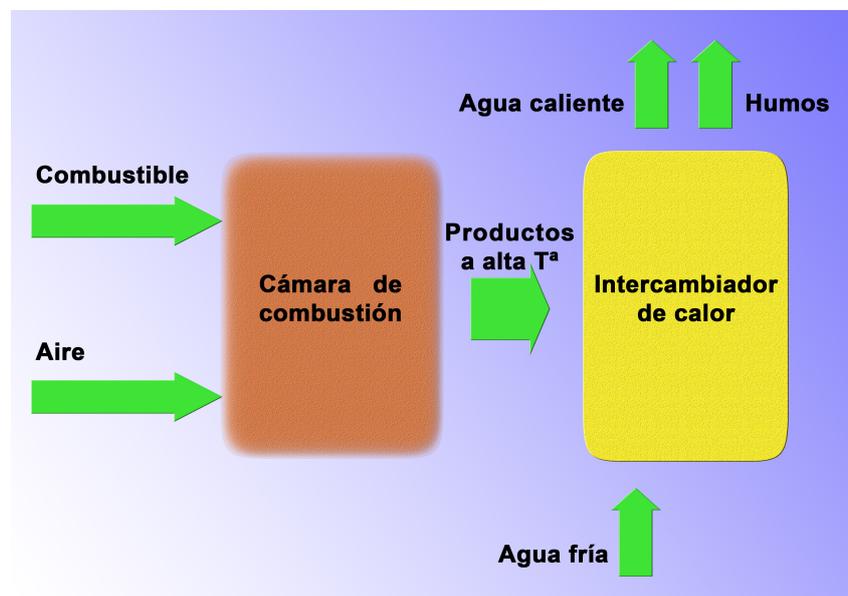


Figura 4.1: Esquema energético de una caldera de biomasa simplificado

Pese a que este trabajo se centrará, como se verá posteriormente, en una introducción al control únicamente de la temperatura de impulsión del agua a la salida del intercambiador, es necesario conocer qué elementos intervienen en las propiedades de los gases que se introducen al interior de éste para poder comprender cómo controlar el comportamiento de estos al ceder calor al agua.

Es un error, en principio, intentar describir como partes independientes el funcionamiento de una caldera de este tipo puesto que, para su adecuado diseño y control, debe ser comprendida en su conjunto completo. Todos sus elementos y la reacción de estos están interrelacionados entre sí y es imposible variar uno sin afectar al resto. Sin embargo, dado la complejidad del problema se estudiarán por separado cámara de combustión e intercambiador de calor para analizar su comportamiento ante los cambios en sus variables pero sin esperar de momento obtener resultados completamente reales hasta que se unan en el futuro los dos modelos.

En la figura 4.1 se muestra un esquema simplificado, obviando las pérdidas, de los flujos de energía dentro del sistema de caldera: cámara de combustión e intercambiador.

Al final de este capítulo se desarrollarán los balances de energía y exergía de forma simplificada de los dos bloques.

4.2. Análisis en ecuaciones de la combustión

El poder calorífico superior del combustible es el calor liberado durante la combustión por unidad de masa sin descontar la energía que empleará para evaporar el agua formada durante el proceso. Por otro lado, el poder calorífico inferior PCI sí que tiene en cuenta esa pérdida de energía [29].

El PCS superior de los combustibles procedentes de la biomasa suele variar entre 18 y un 22 MJ/kg y puede calcularse de forma aproximada mediante la siguiente fórmula[10]:

$$PCS = 0,3491 \cdot X_C + 1,1783 \cdot X_H + 0,1005 \cdot X_S - 0,0151 \cdot X_N - 0,1034 \cdot X_O - 0,0211 \cdot X_{cenizas}$$

[MJ/kgb.s.]

donde X_i es el contenido de C , H , S , N , O y ceniza en % en base húmeda.

EL PCI puede calcularse tomando el PCS y restando la cantidad de humedad e hidrógeno presentes en el combustible:

$$PCI = PCS \cdot \left(1 - \frac{w}{100}\right) - 2,444 \cdot \frac{w}{100} - 2,444 \cdot \frac{h}{100} \cdot 8,936 \cdot \left(1 - \frac{w}{100}\right)$$

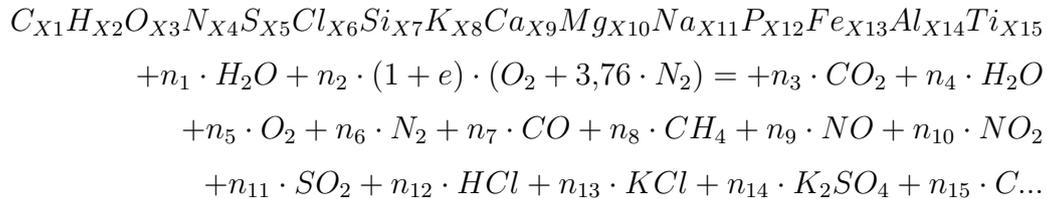
[MJ/kgb.h.]

donde 2,444 es la diferencia de entalpía entre el agua líquida y gaseosa a 25 °C; 8,936 es M_{H_2O}/M_{H_2} , ratio entre la masa moléculas de H_2O y H_2 ; w es el contenido de humedad en % en b.h. (base húmeda) y h la concentración de hidrógeno en b.s. (base seca).

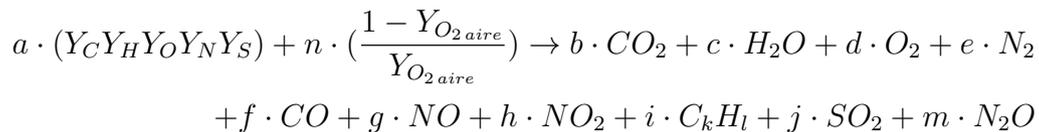
La predicción de la combustión, su proceso y comportamiento para su uso posterior en el diseño del control, requieren el conocimiento de las propiedades de combustible

y la manera en que estas propiedades influyen en cómo se va a desarrollar la secuencia de reacciones y qué productos van a dar resultantes.

La combustión puede formularse de varias maneras de forma más aproximada como se mostrará después o más real, intentando abarcar todos los elementos que tienen lugar en la composición de la biomasa [14]:



Sin embargo, por simplificar el proceso, la ecuación de la combustión se simplificará y solo se tendrá en cuenta la influencia de unos pocos elementos. Por tanto [29]:



donde Y_i es la fracción de volumen de carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno y azufre en el combustible. $Y_{O_2,aire}$ es la fracción de volumen de oxígeno en el aire y los coeficientes $a, n, b, c, d, e, f, g, h, i, j$ y m son los resultados del ajuste estequiométrico dependiente de la composición del combustible y suponiendo una combustión completa.

Se hace necesaria la toma de datos de numerosos experimentos para poder describir en detalle el proceso de la combustión de los hidrocarburos. El ocurrir de la reacción depende de la mezcla del combustible con los agentes oxidantes en la zona de la llama, de la temperatura y del tiempo de residencia como muestra la siguiente ecuación:



↓

$$\frac{d[\text{Productos}]}{dt} = k[\text{Combustible}]^a \cdot [\text{Oxidante}]^b \left[\frac{\text{moles}}{m^3 s} \right]$$

$$\text{donde } k = A \cdot T^\beta \cdot \exp \frac{-E}{R_u T}$$

A, b y E son constantes que para reacciones elementales están determinadas experimentalmente.

Las emisiones provocadas por una combustión incompleta y por tanto la pérdida de eficiencia son consecuencia de:

1. Una inadecuada mezcla del aire y el combustible durante la combustión en la cámara generando zonas muy ricas en aire u otras con deficiencia.

2. Escasez de oxígeno de forma global
3. Temperaturas de cámara muy bajas
4. Tiempo de residencia en parrilla insuficiente
5. Combustibles de baja calidad

Por tanto, controlar estos factores (ajustando la mezcla de combustible y oxígeno, temperatura, tiempo de residencia), permite reducir los inquemados y evitar la combustión incompleta. Sin embargo, hay que guardar un compromiso con el resto de posibles productos. Un exceso de tiempo de permanencia del combustible en la parrilla puede dar lugar al aumento de las emisiones de NO_x .

Para unos cálculos aproximados [29], se pueden obtener una serie de ecuaciones que describan el comportamiento termodinámico de la combustión y la cinéticas de los gases resultantes.

El flujo de gases se calcula a partir del conocimiento aproximado de la composición del combustible y la cantidad de aire introducida. Se supondrá que los cálculos aspiran alcanzar la combustión completa para entender las consecuencias que las variaciones en torno a este equilibrio se producen.

$$\bar{m}_{O_2,aire} \left[\frac{kg O_2}{kg comb.} \right] = (X_C \frac{M_{O_2}}{M_C} + \frac{X_H}{4} \frac{M_{O_2}}{M_H} + X_S \frac{M_{O_2}}{M_S} - X_O) \cdot (1 - X_{H_2O}) \cdot \lambda$$

Donde M_i es la masa molecular de elemento i en $[\frac{kg}{kmol}]$; X_i es la fracción másica del elemento i en un combustible seco libre de cenizas; X_{H_2O} la fracción de agua en base húmeda y λ el ratio de exceso de aire.

El balance del nitrógeno queda de la siguiente manera:

$$\bar{m}_{N_2,aire} \left[\frac{kg N_2}{kg comb.} \right] = \bar{m}_{O_2,aire} \frac{Y_{N_2,aire}}{Y_{O_2,aire}} \frac{M_{N_2}}{M_{O_2}}$$

donde $Y_{O_2,aire}$ es la fracción en volumen de O_2 en el aire; $Y_{N_2,aire} = 1 - Y_{O_2,aire}$

El del aire finalmente queda:

$$\bar{m}_{aire} \left[\frac{kg aire}{kg comb.} \right] = \bar{m}_{O_2,aire} + \bar{m}_{N_2,aire}$$

y el de los humos resultantes:

$$\bar{m}_{humos} \left[\frac{kg humos}{kg comb.} \right] = \bar{m}_{aire} + 1$$

Los productos resultantes que conforman estos humos son los siguientes:

$$\bar{m}_{CO_2} = X_C \frac{M_{CO_2}}{M_C} \cdot (1 - X_{H_2O})$$

$$\bar{m}_{SO_2} = X_S \frac{M_{SO_2}}{M_S} \cdot (1 - X_{H_2O})$$

$$\bar{m}_{H_2O} = X_H \frac{M_{H_2O}}{H_2} \cdot (1 - X_{H_2O}) + X_{H_2O}$$

$$\bar{m}_{O_2} = \frac{\bar{m}_{O_2,aire}}{\lambda} \cdot (\lambda - 1)$$

$$\bar{m}_{N_2} = X_H \frac{\bar{m}_{N_2,aire}}{H_2} + (1 - X_{H_2O})$$

Después de todos estos cálculos se pueden obtener todas las relaciones de caudales y caudales máscicos de aire y gases producidos.

En relación con los cálculos en torno a los balances de energía, hay que decir que nos permiten estimar las temperaturas producidas durante la combustión y ayudan a calcular la eficiencia final del proceso.

Por norma general el balance de energía queda:

$$E_{combustible} + E_{precalentamiento\ del\ aire} = E_{humos} + E_{perdida}$$

La energía química del combustible se libera durante la combustión. El precalentamiento del aire (dependiendo de la tecnología) es la diferencia de temperatura de este con respecto al aire ambiente. E_{humos} depende de su temperatura final tras fluir desde la parrilla a otras partes de la caldera y las pérdidas representan al calor perdido con los alrededores y por la combustión incompleta.

La E presente en el aire de entrada y en los gases se obtendrán mediante estimaciones y tablas que recogen mediante numerosos experimentos la entalpía de las distintas especies presentes en los gases de entrada y salida [10].

Las pérdidas de energía debido a una combustión incompleta se estimarán mediante:

$$\bar{E}_{CO} = C_{pCO} \cdot \bar{m}_{CO}$$

donde \bar{E}_{CO} se mide en $\frac{kJ}{kg\ combustible\ b.h.}$, y C_{pCO} es el poder calorífico de CO en kJ/kg a una $T_{ref} = 25^\circ C$

Análogamente las pérdidas por el carbono inquemado serán:

$$\bar{E}_C = C_{pC} \cdot \bar{m}_C$$

Concluyendo, el balance final de energía quedaría en (J/h) :

$$\begin{aligned} & PCI \cdot \dot{m}_{combustible} + [h_{comb} \cdot T_{comb} - h_{comb} \cdot T_{ambiente}] \cdot \dot{m}_{combustible} \\ & + [h_{aire} \cdot T_{aire} - h_{aire} \cdot T_{ambiente}] \cdot \dot{m}_{aire} = \\ & + [h_{humos} \cdot T_{humos} - h_{humos} \cdot T_{ambiente}] \cdot \dot{m}_{humos} + \sum_i Q_i + \sum_j \bar{E}_j \cdot \dot{m}_{comb} \end{aligned}$$

Para calcular la temperatura de humos se ajusta la parte izquierda de la ecuación a la parte derecha. Suponiendo que no hay pérdidas ni precalentamiento del aire la ecuación queda de la siguiente manera:

$$PCI \cdot \dot{m}_{combustible} = [h_{humos} \cdot T_{humos} - h_{humos} \cdot T_{ambiente}] \cdot \dot{m}_{humos}$$

4.3. Análisis energético y exergético de las calderas de biomasa

Una vez se han analizado las ecuaciones que permiten predecir la temperatura de los humos producidos en la combustión, se puede desarrollar un pequeño análisis que describa de forma energética y exergética el proceso global de generación de energía e intercambio de calor dentro de la caldera [25]:

Las herramientas matemáticas que se utilizarán para el análisis de la caldera serán los siguientes:

- Exergía química

$$\varepsilon_{comb} = \gamma_{com} PCI_{comb}$$

donde γ_{comb} es el ratio de exergía, o energía útil del poder calorífico del combustible

- Condiciones ambiente de referencia:

La exergía se evalúa siempre respecto a :

$$T_0 = 25^{\circ}C$$

$$P_0 = 100kPa$$

- Rendimientos exergéticos y energéticos:

$$\eta = \frac{E_{productos}}{E_{total}}$$

$$\psi = \frac{Ex_{productos}}{Ex_{total}}$$

4.3.1. Primera ley de la termodinámica en la cámara de combustión

La combustión dentro de la caldera descrita anteriormente es un proceso que en un principio se considerará sin pérdidas y sin trabajo sobre su volumen. La energía cinética y potencial de los fluidos resultantes en su interior se considerarán despreciables respecto al global. El balance final de la energía quedará de esta forma:

$$\dot{E}_{entrada} - \dot{E}_{salida} = \frac{d\dot{E}_{sistema}}{dt} = 0 \Rightarrow \text{proceso estacionario}$$

$$\dot{E}_{entrada} = \dot{E}_{salida}$$

$$\dot{m}_{combustible} \cdot h_{combustible} + \dot{m}_{aire} \cdot h_{aire} - \dot{m}_{productos} \cdot h_{productos} = 0$$

$$\dot{m}_{combustible} \cdot h_{combustible} + \dot{m}_{aire} \cdot h_{aire} = \dot{m}_{productos} \cdot h_{productos}$$

Con estas relaciones, la primera ley de la termodinámica para la cámara de combustión puede quedar expresada de la siguiente manera:

$$\eta_{cc} = \frac{\dot{m}_{productos} \cdot h_{productos}}{\dot{m}_{combustible} \cdot h_{combustible}}$$

Considerando a la cámara de combustión adiabática, el rendimiento η_{cc} es del 100 %

4.3.2. Segunda ley de la termodinámica en la cámara de combustión

EL balance exergético que determina el máximo trabajo reversible que puede realizar el sistema queda definido por:

$$\dot{X}_{entrada} - \dot{X}_{salida} - \dot{X}_{destruida} = \frac{d\dot{X}_{sistema}}{dt} = 0 \Rightarrow \text{sistema estacionario}$$

$$(\dot{m}_{combustible} \cdot \varepsilon_{combustible} + \dot{m}_{aire} \cdot \varepsilon_{aire}) - \dot{m}_{productos} \cdot \varepsilon_{productos} - I_{combsutibles} = 0$$

$$I_{combsutibles} = (\dot{m}_{combustible} \cdot \varepsilon_{combustible} + \dot{m}_{aire} \cdot \varepsilon_{aire}) - \dot{m}_{productos} \cdot \varepsilon_{productos}$$

donde $I_{combustible}$ es la destrucción de exergía y ε_i la exergía de aire, combustible y productos.

La segunda ley de la termodinámica para la cámara de combustión puede reformularse de la forma:

$$\gamma_{cc} = \frac{\dot{m}_{productos} \cdot \varepsilon_{productos}}{\dot{m}_{combustible} \cdot \varepsilon_{combustible}}$$

4.3.3. Primera ley de la termodinámica en el intercambiador de calor

El intercambiador de calor transfiere la energía térmica de los humos al agua de la instalación sin producirse la mezcla entre ellos a través de las paredes de los tubos que

lo componen normalmente de acero o hierro fundido. El intercambio de calor normalmente no implica ningún tipo de trabajo sobre el volumen de control y, al igual que en la cámara de combustión los términos de la energía cinética y potencial se desprecian.

El balance de energía quedaría por tanto:

$$\dot{E}_{entrada} - \dot{E}_{salida} = \frac{d\dot{E}_{sistema}}{dt} = 0$$

luego

$$\Rightarrow (\dot{m}_{humos e} \dot{h}_{humos e} + \dot{m}_{agua e} \dot{h}_{agua e}) - (\dot{m}_{humos s} \dot{h}_{humos s} + \dot{m}_{agua s} \dot{h}_{agua s}) = \dot{Q}$$

siendo

$$\dot{m}_{humos e} = \dot{h}_{humos s} \text{ y } \dot{m}_{agua e} = \dot{h}_{agua s}$$

La primera ley de la termodinámica se puede expresar por tanto de la siguiente manera para el intercambiador:

$$(\dot{m}_{humos e} \cdot \varepsilon_{humos e} + \dot{m}_{agua e} \cdot \varepsilon_{agua e}) - (\dot{m}_{humos s} \cdot \varepsilon_{humos s} + \dot{m}_{agua s} \cdot \varepsilon_{agua s}) - \dot{I}_{intercambiador} = 0$$

$$\dot{m}_{humos}(\varepsilon_{humos e} - \varepsilon_{humos s}) + \dot{m}_{agua}(\varepsilon_{agua e} - \varepsilon_{agua s}) = \dot{I}_{intercambiador}$$

La eficiencia del intercambiador vendrá dada por:

$$\eta_{int} = \frac{\dot{m}_{agua}(h_s - h_e)}{\dot{m}_{humos}(h_e - h_s)}$$

y el de la caldera en su totalidad:

$$\eta_{caldera} = \frac{\dot{m}_{agua}(h_s - h_e)}{\dot{m}_{combustible}(h_{combustible})}$$

4.3.4. Segunda ley de la termodinámica en el intercambiador de calor

Asumiendo que la variación de la exergía dentro del sistema caldera es igual a 0, el balance de exergía queda:

$$\dot{X}_{entrada} - \dot{X}_{salida} - \dot{X}_{destruida} = \frac{dX_{sistema}}{dt} = 0$$

$$\dot{I}_{humos} = \dot{m}_{humos} \cdot (\varepsilon_{humos entrada} - \varepsilon_{humos salida}) + \dot{m}_{agua} \cdot (\varepsilon_{agua entrada} - \varepsilon_{agua salida})$$

Por tanto, el balance global de exergía teniendo en cuenta el balance de cámara de combustión e intercambiador de calor queda:

$$\dot{I}_{caldera} = \dot{I}_{combustor} + \dot{I}_{intercambiador calor}$$

La eficiencia exergética de toda la caldera vendrá dada por:

$$\Psi_{caldera} = \frac{\dot{m}_{agua} \cdot (\varepsilon_{salida} - \varepsilon_{entrada})}{\dot{m}_{combustible} \cdot \varepsilon_{combustible}}$$

4.4. Conclusiones

Al comienzo del capítulo se planteó la separación del estudio de la caldera en dos partes, cámara de combustión e intercambiador, para la simplificación del análisis. Sin embargo, y especialmente en la etapa del diseño del control, hay que tener presente que el funcionamiento y la operación no tienen sentido si no se estudia todo el sistema en conjunto una vez se haya realizado la descripción y funcionamiento de ambas.

Existen numerosos estudios y experimentos que describen el proceso de combustión de la biomasa. No obstante la composición y características de los gases producidos, que es el producto que interesa al transferir el calor desde la cámara de combustión al agua, es difícil de predecir en cada instante debido a la imposibilidad de uso de un combustible con unas características homogéneas y unas condiciones constantes.

Los balances energéticos y exergéticos de cámara de combustión e intercambiador de calor ponen de manifiesto las pérdidas que inevitablemente tendrá un sistema termodinámico de este tipo y que se tendrán en cuenta en los posteriores capítulos durante la evaluación de la eficiencia de una caldera.

Capítulo 5

Factores que afectan al funcionamiento de la caldera

5.1. Introducción

En anteriores capítulos se han descrito como las diferentes características y propiedades de los combustibles afectan al funcionamiento de una caldera de biomasa. La eficiencia final de un dispositivo de este tipo, concepto que ya ha aparecido tras el análisis termodinámico, depende de numerosos factores que comienzan en la etapa del diseño del dispositivo y terminan con las condiciones en las que opera.

En este capítulo se describirán estos factores y se expondrán los métodos prácticos que existen evaluar el rendimiento final de una caldera.

5.2. Factores destacables que determinan la operación de caldera

El proceso de control y optimización de una caldera de biomasa es complejo si se quiere alcanzar un comportamiento adecuado y sobre todo si se desea conseguir una máquina fiable y robusta ante la posibilidad de que combustibles de baja calidad hagan presencia dentro de ella. Por norma general, pretender conseguir el mayor rendimiento y eficiencia de la combustión de biomasa exige un importante incremento de la sensorización de la misma, de la utilización de actuadores como motores eléctricos y ventiladores y, por lo tanto, de las posibilidades de fallo. Es por ello por lo que es importante conseguir un compromiso entre eficiencia y fiabilidad, sobre todo en los momentos en los que las condiciones de funcionamiento no son constantes, ya sea por la variación de la calidad del combustible o por agentes externos. Un ejemplo de esto último sería por ejemplo la inestabilidad meteorológica. En días de tormenta se dan casos en los que la variación brusca de la presión exterior modifica considerablemente el tiro de la chimenea haciendo circular los humos a mayor velocidad. Si el cambio es tal que no entra

dentro de la capacidad de regulación del ventilador de tiro es posible que aparezcan humos negros y excesivamente calientes, con la consiguiente pérdida de eficiencia.

Por tanto, [29] el objetivo es mejorar la eficiencia, operatividad y fiabilidad en una caldera. Con estas metas, hay que valorar las siguientes variables a la hora de plantear un diseño:

Lo mecanismos de transferencia de calor que tienen lugar dentro de la caldera son todos los posibles: conducción, convección y radiación. Para alcanzar bajos niveles de emisiones es necesario minimizar las pérdidas de calor en la cámara de combustión, lo cual se consigue modificando aquellas variables que afectan directamente a estos procesos. De cualquier forma, para conseguir una buena eficiencia térmica, hay que optimizar al máximo el intercambio de calor que tiene lugar entre la cámara de combustión y la chimenea. Las calderas vienen completamente aisladas en su superficie con mantas de fibra de vidrio entre la carcasa y las chapas exteriores. Las pérdidas de radiación se estiman para cada caldera pero a la hora de calcular la eficiencia de forma indirecta a través de medición de humos se suele valorar que la caldera pierde a mayores entre un 2 y un 5 % de rendimiento por este proceso y por el calor que se pierde a través de paredes y tuberías.

El **aislamiento** es por tanto un factor clave para conseguir rendimientos deseados. Aunque no se ha hablado de ello todavía, las calderas comerciales tienen certificaciones de rendimientos en torno al 90 % en muchos casos. Estos buenos resultados son consecuencia de la suma de numerosos detalles como el tratado en este párrafo. El calor se transfiere por conducción a través de las paredes de la cámara de combustión. El aislante debe tener un espesor óptimo y debe estar bien diseñado para no provocar el efecto contrario.

El calor acumulado en las paredes metálicas de la cámara de combustión o en el ladrillo refractario provocan que, junto con la cantidad de material que queda ardiendo dentro del horno aún habiéndose retirado la demanda de calor, las calderas tengan una gran **inercia y acumulen energía calorífica** en su interior durante un largo tiempo. Es un cambio de concepto respecto a las calderas de gasoil por ejemplo. Conseguir que ese calor acumulado no se pierda es parte de la necesidad de colocar acumuladores de agua caliente en este tipo de instalaciones para mejorar la eficiencia y funcionamiento de las mismas.

Este calor acumulado en la cámara de combustión lleva de nuevo a la necesidad de controlar la temperatura de la esta tanto por cuestiones de seguridad como de eficiencia. El **precalentamiento del aire** mediante sistemas de recirculación permite que la temperatura interior sea un factor más controlable por la caldera y además recupera calor que de otra manera hubiera sido arrojado a la atmósfera. Antes de la salida a chimenea, parte de los humos son recirculados mediante la activación de una válvula que lo mezcla con aire fresco y rico en oxígeno y lo inyecta a través del ventilador primario. El objetivo es el de introducir la misma cantidad de O_2 con mayor volumen de gases. Esto es aplicable tanto para la recuperación de calor como para el control de la

temperatura interior si es preciso.

La cantidad de aire es en consecuencia uno de los factores, si no el que más afecta en concreto a la combustión. El **exceso de aire** debe ser tal que asegure una adecuada mezcla con el combustible. Esto significa que para que haya una completa combustión, y la cantidad de CO se reduzca al máximo debe haber un exceso de oxígeno en la salida de gases. Por otro lado, una cantidad de aire superior a la óptima provoca un enfriamiento de los gases y por tanto una pérdida del rendimiento. El nitrógeno inerte presente en el aire absorbe el calor producido. Alcanzar este punto óptimo es el principal objetivo del diseño de las entradas de aire primario y secundario. La llama alimentada por el aire primario lanza productos en los gases todavía sin haber completado el proceso de oxidación. Es el aporte de aire secundario el que regula el exceso de aire y termina de quemar estos gases. En la figura 5.1 puede apreciar la estrecha zona de rendimiento óptimo de una caldera [12]. Sobre todo en calderas de media y alta potencia en el que el consumo de combustible es alto, la inversión en dispositivos de control como sensores y actuadores se vuelve más interesante. Es por ello por lo que en calderas domésticas los sistemas no son tan sofisticados. Los costes se reducen mediante la eliminación de ventiladores dejando únicamente el de tiro o quitando directamente la sonda Λ .

La cantidad de aire primario se adapta al volumen de combustible presente en la parrilla. Durante las puestas en marcha se adaptan estos valores junto con los tiempos de alimentación principalmente dependiendo del **tipo de combustible**. La influencia de la composición del material que entre en combustión es importante respecto al calor obtenido de él, a las emisiones que de él se derivan, y a la cantidad y propiedades de las cenizas que generan. La biomasa por lo general contiene altos contenidos de volátiles y una baja cantidad de carbono comparada con el carbón. La aspiración es encontrar sistemas de control que se adapten y sean flexibles ante cada vez un mayor espectro de posibles combustibles de biomasa. Actualmente, las variaciones de calidad o de propiedades simplemente entre unos unas partidas de *pellets* y otras hacen que la parametrización quede obsoleta fácilmente y que la eficiencia de las calderas varíe notablemente sin poder corregirse esta situación sin la actuación de un operario.

No sólo la cantidad de aire es clave sino que su **distribución** tiene igual importancia. Una distribución eficiente de aire permite reducir de forma efectiva tanto la emisión de inquemados como el CO o los NO_x . La distribución del aire primario y secundario entre el combustible, la llama y la cámara determinan que la mezcla sea la adecuada, que

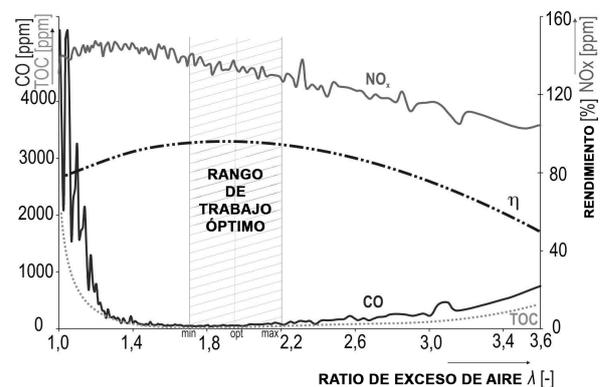


Figura 5.1: Dependencia del CO y NO_x del exceso de aire [12]

el tiempo de permanencia del material en el interior sea el óptimo y que por tanto los gases alcancen las temperaturas deseadas.

La velocidad y circulación de los gases queda determinada por la depresión en caldera. Esta a su vez depende del **tiro** que tenga a la salida salida de humos. Existen dos posibilidades. La primera, útil únicamente para pequeñas calderas y estufas es el tiro natural de la chimenea. En las calderas para medias y grandes instalaciones que nos ocupan es necesaria una regulación mediante un ventilador de tiro inducido. La velocidad de los humos es un factor determinante a la hora de que la transferencia de calor que éstos realizan dentro del intercambiador al agua sea la más eficiente. El intercambiador está diseñado para que los humos cedan la mayor cantidad de calor posible a una velocidad determinada. Esta velocidad se regula normalmente mediante un sensor de depresión en cámara de las calderas más grandes y sofisticadas. En calderas más pequeñas el controlador varía la velocidad del ventilador de tiro en función del caudal que entregan instantáneamente el ventilador primario y secundario. En las más grandes, el sensor de depresión indica al ventilador de tiro que modifique su velocidad para que el tiro sea siempre constante independientemente de que los ventiladores primario y secundario varíen su velocidad para adaptarse a la cantidad de combustible presente en la parrilla.

La cantidad adecuada de material en la parrilla se ajusta mediante los **sistemas de carga** e introducción de combustible al interior de la misma. Un decrecimiento del ritmo de entrada de material por debajo de la carga nominal de combustión para la que ha sido diseñada la caldera puede provocar problemas de emisiones por combustión incompleta, pérdida de eficiencia térmica, y problemas de operación. Normalmente, en las puestas en marcha se fija la cantidad de combustible y el ritmo de entrada a máxima potencia. Si la demanda de la instalación es menor y la carga modula los ventiladores se adaptan a la nueva cantidad de material presente. Sin embargo, si la parametrización no es la correcta, normalmente no podrán alcanzar por sí solos el punto óptimo de exceso de aire.

Otra de las características de los combustibles que afectan más directamente al funcionamiento es, como se ha comentado anteriormente, **la humedad** . Además de la pérdida de eficiencia por el calor transmitido al agua que contienen, provocan un mal proceso de combustión incrementando las emisiones por inquemados. Al retardar todo el proceso suele ser necesario disminuir la carga y aumentar el tiempo de permanencia del combustible en parrilla para que tenga tiempo de consumirse y no caigan *pellets* o astillas a medio arder al cajón de cenizas. Consecuentemente se produce una disminución de la potencia efectiva de la caldera.

La **distribución del combustible** sobre la parrilla reducirá o aumentará la superficie activa del mismo. La forma y diseño de la parrilla junto con la morfología del material serán por tanto claves.

Esta reparto del combustible lleva a la idea de la **distribución del calor** dentro de la cámara. Una buena homegeneización de la temperatura en la parrilla y en determinadas

zonas, permitirá que los gases extraigan todo ese calor y lo lleven al intercambiador.

El **diseño** es, como se está viendo, un elemento que determinará el buen funcionamiento del dispositivo. La construcción de la caldera influye significativamente en la operación dentro de la cámara de combustión. Los materiales deberán ser elegidos para la construcción de la misma en base a su capacidad de transferencia de calor, su densidad, grosor, aislamiento térmico, influencia en la temperatura de la cámara de combustión, resistencia al calor, resiliencia....

Una de las partes más importantes de la caldera, cuyo buen funcionamiento determinará la eficiencia de la caldera es el **intercambiador de calor** cuyas propiedades dependerán de las características del flujo de gases procedentes de la cámara de combustión que lo atraviesen. Intercambiadores de calor hay de muchos tipos como se ha visto en la colección anterior de calderas. Centrándose el estudio en los distintos métodos para alcanzar la transferencia de calor adecuada, vemos que hay diseños que van desde un solo paso de humos hasta dos y tres. La unidad más simple del intercambiador de calor es un tubo, normalmente de acero o hierro fundido, rodeado de agua y atravesado por un caudal másico de humos calientes. El conjunto de estos tubos, la calidad de las soldaduras entre ellos, su grosor, el material del que estén hechos, la situación de la entrada y salida de agua; todos ellos son factores de diseño que deben ser tomados en cuenta a la hora de plantear posibilidades de intercambiadores. Para que la caldera sea capaz de que el intercambiador mantenga su mayor eficiencia en todo momento, el control debe asegurar un caudal de humos siempre a la velocidad óptima para su diseño. En principio, la velocidad y por tanto el caudal de agua a través de él es siempre constante. Normalmente los fabricantes determinan que el salto de temperatura del agua entre su entrada y salida debe estar entre 10 y 20 K dependiendo del caudal que proporcione la bomba. La variación de este caudal una vez alcanzado el punto de máxima eficiencia de la caldera y habiéndose ya parametrizado, afecta fuertemente al funcionamiento final de la instalación. Un repentino aumento de la velocidad en el flujo del agua podría llevar a situaciones indeseables del dispositivo al no poder adaptarse al nuevo ritmo de extracción de calor.

Todo el buen funcionamiento queda subordinado al **control y la regulación**. Años de experiencia y de fabricación de calderas de biomasa ha hecho que ya muchos diseños de caldera se parezcan entre ellos o que, como ocurre en algunos casos, la bifurcación de empresas que en un origen eran la misma provoca que se distribuyan calderas exactamente con el mismo diseño y aspecto. Sin embargo, la diferencia entre ellas (que muchas veces se traduce en el precio final), radica en los distintos programas y sistemas de regulación y control que utilizan. Aplicando los adecuados sistemas de control se consigue la eficiencia óptima de la caldera, disminuyen las emisiones contaminantes y mejora, si se ha alcanzado un compromiso entre control y aumento de dispositivos, sensores y actuadores, la fiabilidad. Existen distintas estrategias de control como se verá en los próximos capítulos. El control típico se basa en las medidas de los gases de escape pero el objetivo del proyecto es el de introducir nuevos métodos y líneas de

investigación sobre el control para, con una mayor información del funcionamiento del sistema, adaptarse mejor a los cambios y prevenir problemas antes de que sucedan. El funcionamiento inadecuado de la caldera durante un tiempo prolongado provoca graves desperfectos que son difíciles de detectar en origen. Sobre todo en calderas de media y alta potencia, un control que permita amortiguar los cambios ante la variabilidad de los combustibles y de las condiciones de operación, o que por lo menos detecte comportamientos anómalos provocados por éstos, sería el paso siguiente en la regulación de estas máquinas.

5.3. Medida práctica de la eficiencia de caldera

En anteriores capítulos se definió la eficiencia de la caldera. Se explicarán cuáles son los métodos [13] experimentales que se utilizan para la certificación de las calderas. Existen dos formas de realizar este cálculo:

- El método directo obtiene la medición, por un lado, del calor contenido en el agua antes y después de su paso por el intercambiador de calor, y por otro lado calcula exactamente el combustible consumido y, con los datos adecuados, la energía que contenía. Este es el procedimiento que se utiliza para la certificación de la eficiencia de las calderas. La dificultad de su aplicación en calderas que están ya operativas y que no permiten la toma de todos los datos necesarios hacen que este método no se utilice para las puestas en marcha, ajustes y mantenimientos.
- El método indirecto es aquel que se basa en el razonamiento de que el calor que se ha introducido y no sale por la chimenea es el que se ha aprovechado para calentar el agua. Este es el método utilizado principalmente en puestas en marcha. Un medidor de humos toma los datos de salida de los gases y realiza una estimación, dependiendo del combustible que se esté utilizando, de la energía aportada para calcular el rendimiento instantáneo.

Para los dos casos, los rendimientos obtenidos están referidos al PCI del combustible.

Método directo para el cálculo del rendimiento: se debe medir el caudal que circula por la caldera. Es necesario el uso de caudalímetros de gran precisión ya que las perturbaciones y variaciones instantáneas hacen que la potencia calculada en cada momento oscile constantemente sin dar resultados claros. El rendimiento vendrá definido por la siguiente ecuación:

$$\eta = \frac{\dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T}{F \cdot PCI}$$

donde η es el rendimiento en %; \dot{m} es el caudal másico de agua en (kg/s); c_p es el calor específico del agua en (kJ/kg°C) y ΔT es el salto térmico entre la salida y entrada de agua. F responde al consumo de combustible en (kg/h) y PCI es el poder calorífico inferior del combustible (kJ/kg).

La dificultad de este método radica pues en la obtención adecuada de los datos que precisa.

El **método indirecto de cálculo del rendimiento** es más práctico y su aplicación es la que operarios y personal utilizan para comprobar el buen funcionamiento de la caldera. En contraposición, es un método no tan simple como el anterior y exige una mayor explicación. Hay que determinar primero todas las posibles pérdidas que tienen lugar en una caldera:

- Las pérdidas de calor a través del cuerpo de la caldera aparecen en forma de conducción, convección y radiación. Las pérdidas por conducción se producen principalmente en los apoyos de la caldera. No se suelen tener en consideración. Las pérdidas por convección y radiación tienen lugar a través del bloque de la caldera y depende de la temperatura del agua, de la temperatura del aire de la sala de máquinas, de la temperatura de los cerramientos de la sala de calderas y de las características de ésta en lo referente al aislante que lo rodea. El valor instantáneo de estas pérdidas es difícil de conseguir. Hay estimaciones que indican que estas pérdidas pueden rondar el 2 % del total. Cuando se calcula la eficiencia de la caldera *in situ* se suele restar ese valor a las mediciones efectuadas con el medidor de humos para tener una aproximación más real.
- Las pérdidas de calor sensible en los humos marcarán el calor perdido y tirado a la atmósfera y supondrán casi la totalidad de pérdidas de la caldera. Estas pérdidas dependen de los siguientes factores: la diferencia de temperatura de humos con la del aire del ambiente, el calor específico de los humos, y el exceso de aire utilizado para la combustión. Estas pérdidas suponen entre un 6 y un 10 % de disminución de la potencia nominal en el caso de un funcionamiento adecuado de la caldera.

Las pérdidas se calculan mediante cualquier de las siguientes ecuaciones:

$$P_h = \frac{\dot{m} \cdot c_{pm} \cdot \Delta T}{F \cdot PCI}$$

$$P_h = \frac{\dot{v} \cdot c_{pv} \cdot \Delta T}{F \cdot PCI}$$

donde P_h son las pérdidas porcentuales, \dot{v} es el caudal de los humos (m^3/s) y c_{pv} es el calor específico de los humos en (kJ/kg). Al observar esta fórmulas se entiende mejor por qué las calderas que emiten a la atmósfera humos de 100 °C en vez de 170 °C por ejemplo, ganan un 6-7 % de eficiencia unas con respecto a otras.

La composición de los gases influirá también notablemente en estas pérdidas debido a la diferencia de calores específicos entre unas y otras especies.

- Las pérdidas por inquemados son debidas a la mala combustión y emisión de CO a la atmósfera. Su cálculo puede llevarse a cabo mediante:

$$p_i = \frac{PC_{CO}}{PCI} \cdot CO$$

donde el CO es el contenido en % de monóxido de carbono y PC_{CO} es su poder calorífico.

Los medidores de humos también calculan la presencia de otras especies en los gases como los NO_x y los SO_x que también producen pérdidas y disminución de eficiencia al igual que los inquemados.

El cómputo de todas estas pérdidas arrojan una estimación sobre el rendimiento instantáneo de la caldera:

$$\eta = 100 - (P_h + p_i) \cdot 100$$

5.4. Conclusiones

Existe un gran número de factores que afectan a la eficiencia final de una caldera: el diseño del intercambiador y de la parrilla, el aislamiento, la inercia del sistema, el tipo de combustible, humedad, la cantidad y distribución de aire en cada instante, su precalentamiento, el tipo de control realizado.... Todos estos factores determinan un rendimiento final durante la operación que será clave a la hora de determinar la calidad de la caldera.

Los métodos de obtención práctica de la eficiencia de los dispositivos pueden ser directos o indirectos. Los métodos directos, más costosos y que se utilizan en las certificaciones, miden el combustible perfectamente caracterizado que se introduce en caldera y registran la energía obtenida en ese tiempo. Por contra los indirectos realizan el cálculo midiendo la energía no aprovechada del calor latente de los gases de escape y estimando el resto de pérdidas.

Capítulo 6

Propuesta de diseño de una caldera de biomasa

6.1. Introducción

Se procederá a plantear una propuesta inicial de diseño de una caldera alimentada con combustibles procedentes de la biomasa para sistemas de calefacción con agua caliente.

El trabajo futuro permitirá plantear un diseño más ajustado pero las características principales del dispositivo quedarán fijadas en este capítulo. Esta idea inicial de diseño se realiza con la intención de cubrir las necesidades de control que plantea el estudio.

6.2. Dimensionado de la caldera

A la hora de plantear un posible diseño lo primero es determinar el tamaño de la caldera y su potencia nominal. Se han descrito anteriormente numerosos dispositivos de calderas con un amplio rango de potencias. El objetivo es el de trabajar y proponer una caldera que permita calefactar varias viviendas o amplias superficies. Es decir, inicialmente se descartan calderas de baja potencia para viviendas unifamiliares.

Una de las principales diferencias de las calderas de biomasa con respecto a otras más convencionales como las de gas o gasoil es la necesidad de adaptar y ajustar la potencia a la demanda de la instalación. Calderas sobredimensionadas suelen llevar a malos comportamientos en las instalaciones con numerosos arranques y paros y desaprovechando la inercia de las brasas aún calientes dentro del hogar.

A continuación se expone un caso concreto en el que se aprecia cómo calderas de media potencia, con una adecuada instalación, pueden ser utilizadas en grandes instalaciones alcanzándose así los mejores rendimientos posibles y el retorno más rápido de la inversión al funcionar a régimen nominal durante largos períodos.

En el instituto Plockton High Scholl, en el noroeste de Escocia, se plantearon el cambio de sus antiguas calderas de 900 KW a un sistema de calefacción por biomasa [1].

El estudio de los perfiles de la potencia demandada a lo largo de los días de invierno es clave para determinar el dimensionado de las calderas. Dejando al margen la pérdida de eficiencia de unas calderas viejas, se determinó que la demanda media de éstas era de un 15 % de la total instalada. Esto muestra el absoluto sobredimensionado de la potencia necesaria. Sin embargo, un análisis de los picos de potencia demandados a durante los días más fríos permitió ajustar el tamaño de las calderas adecuado.

En la figura 6.1 se puede apreciar cómo en pleno invierno la potencia demandada está siempre por encima de 110 KW alcanzándose en picos de 590 KW sobre las 8 de la mañana. En un principio podría suponerse que la elección más adecuada sería la de instalar una caldera de como mínimo 600 W con lo que aún se estaría ahorrando respecto al sistema de 900 KW que había anteriormente. Sin embargo, hay que recordar que el ahorro es mayor cuanto más prolongado es el tiempo de funcionamiento a plena carga de la caldera. La solución a esta instalación fue la de dimensionar el volumen de acumulación de agua de tal forma que durante el tiempo durante el cual la demanda de la instalación fuese menor que la potencia de la caldera, ésta cargase los depósitos acumulando la suficiente energía para cubrir los picos de demanda cuando ésta fuese superior.

De esta forma, con una caldera de 400 KW y 30.000 litros de acumulación de agua la demanda de la instalación queda cubierta siempre haciendo que la caldera trabaje al 100 % durante largos períodos y con un dispositivo más ajustado y económico que el que en principio se podría haber elegido.

Una idea orientativa poco precisa del dimensionado de una caldera podría ser considerar 1 KW por cada 10 m^2 de superficie. Este cálculo es más erróneo y distorsionador cuando mayor es la instalación. Sin embargo permite hacerse una idea de lo que puede proporcionar cada caldera. Este estudio se centrará en el diseño del control de una caldera de 200 KW. Este tamaño medio permite, mediante adecuados ajustes y del volumen de agua de inercia, cubrir la demanda de un amplio espectro de instalaciones por lo que se presenta como muy interesante y versátil.

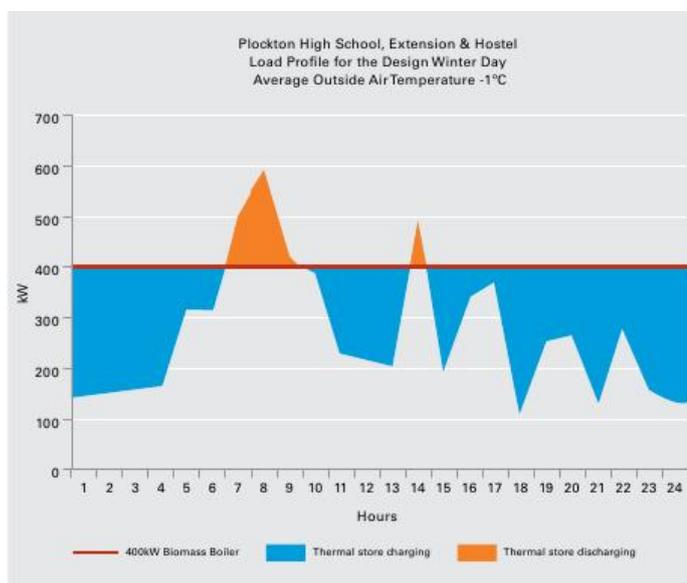


Figura 6.1: Consumos y perfil de la potencia demandada a lo largo de un día de invierno [1]

6.3. Elección de combustible y diseño de parrilla

Una vez elegida la potencia, el siguiente paso es determinar el combustible para el cual se diseñará la parrilla. Teniendo en cuenta las descripciones anteriores se elegirá una caldera de parrilla móvil por los siguientes motivos:

- Versatilidad de combustibles tanto en tamaño como en humedad
- Limpieza automática de cenizas en parrilla
- Mayor control de la combustión

Se incluirá ladrillo refractario en el interior de la cámara mejorándose así la eficiencia de la caldera al aumentar su inercia.

En cuanto al resto de especificaciones se elegirá un diseño modular, separándose cámara de combustión e intercambiador de calor permitiéndose así la introducción de forma semi-ensamblada la caldera en las salas y facilitando su montaje.

El intercambiador de calor será vertical para facilitar la limpieza de los tubuladores y la generación de turbulencias en su interior. El número de pasos a ser determinado en un futuro.

Quedan por tanto ya fijadas unas ideas iniciales a partir de las cuales se iniciará el diseño del control.

Existen muchas más variables y funciones sobre las que actúa el control de una caldera, especialmente aquellas referidas a seguridad sobre la instalación. Sin embargo, para comenzar este proyecto el control actuará sobre los siguientes elementos:

- Control de la potencia y eficiencia de la combustión mediante el sistema de alimentación (tornillo sinfín) y velocidad de parrilla, y ventiladores primarios y secundarios.
- Control de la temperatura de humos y paso a través del intercambiador mediante la regulación de válvula mezcladora de humos y ventilador de tiro inducido.

Para ello, el controlador obtendrá información de la depresión dentro del hogar, de la temperatura de humos a la salida, y de la temperatura del agua a la entrada y la salida del intercambiador.

Con el objetivo de mejorar la eficiencia de la caldera y su seguridad, se incluirá en posteriores trabajos un sistema de recirculación de humos que controle la temperatura de la cámara de combustión y recupere energía procedente de los gases de escape.

6.4. Elementos y componentes de la caldera propuesta

El diseño completo de la caldera se irá perfilando conforme vaya avanzando el estudio pero, a estas alturas, se han definido ya las principales características a partir de las cuales se irá construyendo el control del dispositivo completa.

En el resumen de la figura 6.2 se resumen todos estos elementos sobre los que ya se ha comentado.

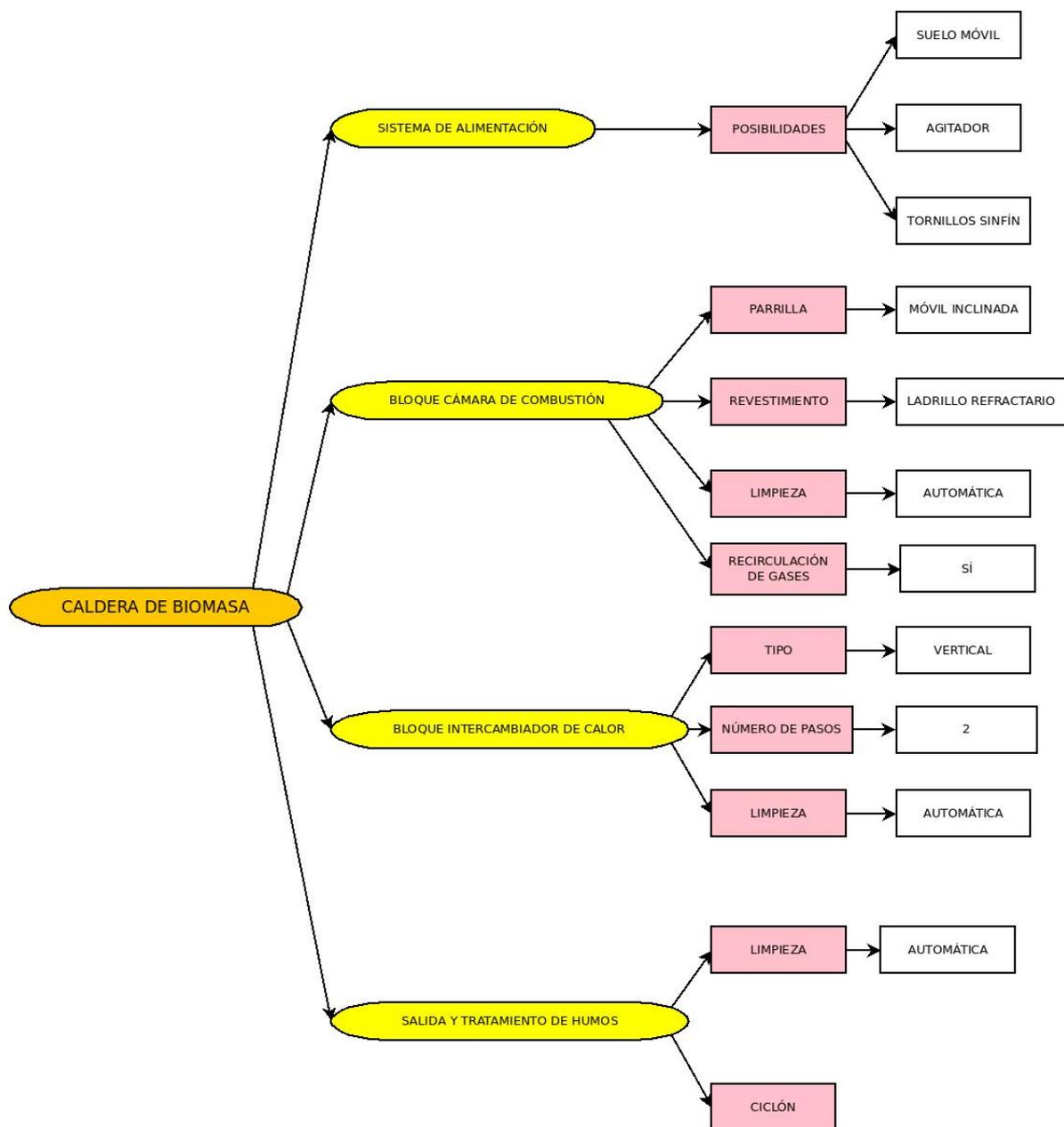


Figura 6.2: Esquema simplificado de la elección de elementos estructurales de la caldera

El conjunto de sensores y actuadores que permiten ejercer el control sobre la caldera queda resumido en el esquema de la figura 6.3. Dado que el objeto final de este trabajo es el de diseñar un control que permita la actuación antes posibles cambios bruscos en la composición del combustible, se incluirán todos los sensores y actuadores que en principio sean necesarios para conseguir ese objetivo. Una vez conseguido ese propósito se podría estudiar la posibilidad de reducir costes u optimizar el diseño al máximo.

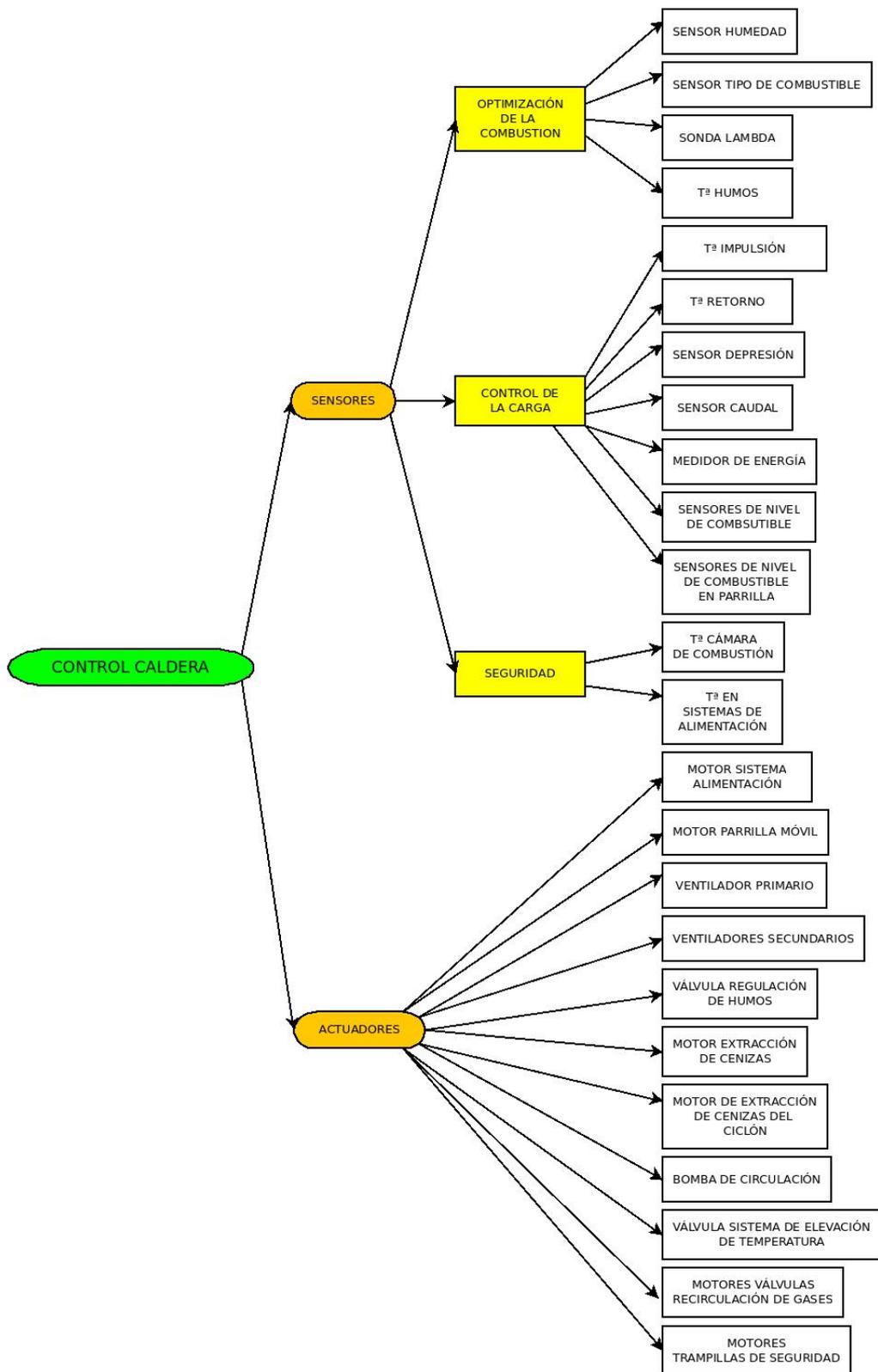


Figura 6.3: Resumen de los sensores y actuadores de una caldera

6.5. Conclusiones

Por su versatilidad y capacidad de adaptación a un gran número y tipo de instalaciones se ha encontrado interesante el desarrollo de una caldera de biomasa con una potencia nominal de 200 KW. Tras lo analizado hasta ahora se ha elegido como objeto el diseño del diseño de control una caldera con las siguientes características:

- Parrilla móvil
- Policombustible
- Intercambiador de calor vertical
- Limpieza automática
- Recirculación de humos

En la figura 6.4 pueden apreciarse, de forma resumida y limitada, los elementos que conforman el sistema y los sensores y actuadores que interactúan con el controlador. El número final de estos sensores y actuadores es mayor del mostrado en la figura puesto que, en principio, se estudiarán todas posibilidades para que la sensorización y el resto de elementos que intervengan permitan al controlador actuar amortiguando las variaciones en la composición del combustible que entre a la parrilla.

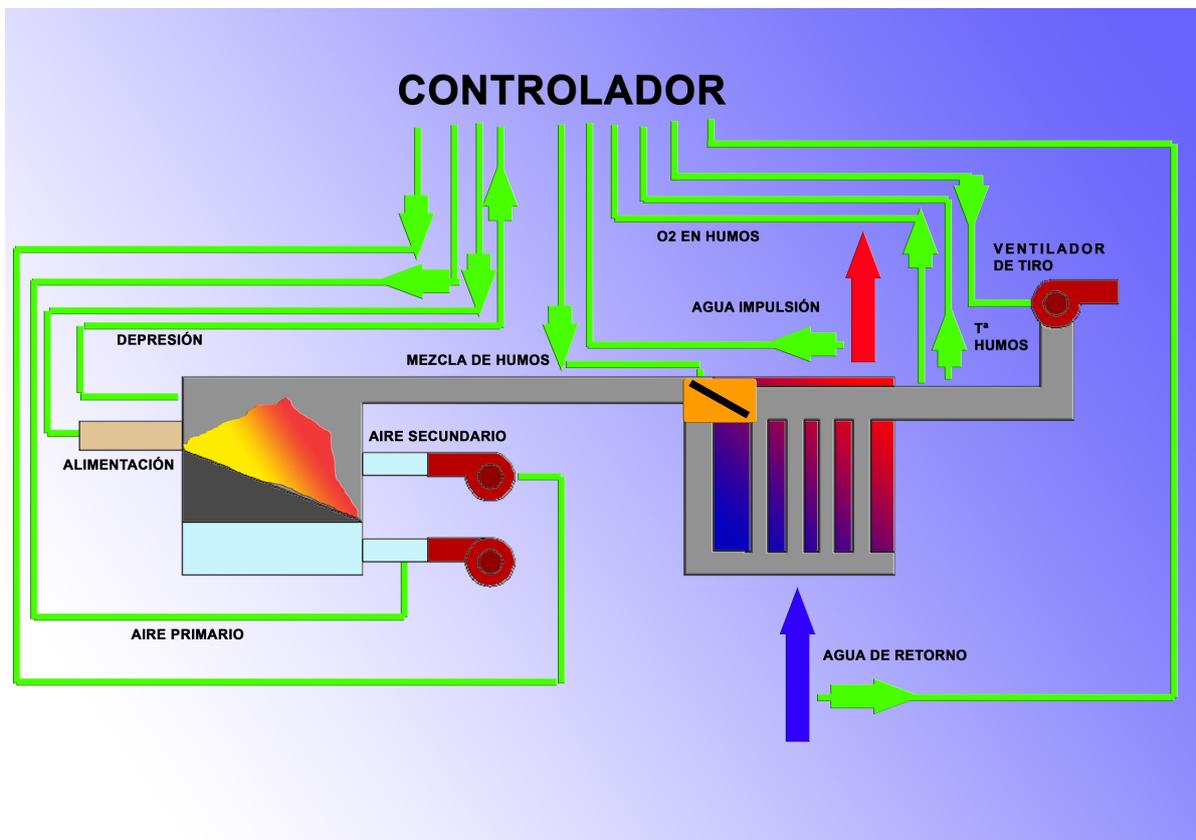


Figura 6.4: Esquema de una caldera de biomasa simplificado

Capítulo 7

Puesta a punto de una caldera de biomasa

7.1. Introducción

Llegado este punto, conviene hacer un pequeño resumen del proceso de puesta en marcha de una caldera de biomasa. Sobre todo de aquellas que van desde la media hasta la alta potencia y en el que el trabajo del personal técnico se vuelve más importante. Esta información será útil durante la construcción del modelo computacional de la caldera y la elección de las condiciones de funcionamiento.

7.2. Pasos de la puesta en marcha

En principio una caldera está diseñada para una determinada potencia nominal. Es trabajo del técnico conseguir el aporte de material necesario que permita la obtención de esa cantidad de energía dependiendo del poder calorífico del combustible. Esto es algo determinante principalmente en calderas policombustibles en las que el tipo de material varía completamente de una instalación a otra.

Una vez determinado el aporte de material hay que ajustar la cantidad de aire primario necesario para consumirlo al ritmo adecuado. Un aporte de aire primario en exceso puede hacer que el material se consuma completamente pero la turbulencia y velocidad de los gases hacen que una gran cantidad de combustible inquemado se pierda y salga al exterior sin consumirse. Por el contrario, una cantidad deficiente respecto al ritmo de entrada del producto provocaría que este se acumulara y cayese al cajón de cenizas sin haber terminado de quemarse.

Dependiendo del tipo de control, una vez fijados los parámetros anteriores para un 100 % de potencia, el controlador debe actuar para conseguir optimizar la combustión buscando el 9 % de O_2 a la salida de los gases actuando sobre la velocidad del ventilador secundario. Con un analizador de gases se mide a la salida la cantidad de O_2 y la de CO . La máxima eficiencia se conseguirá reduciendo este último hasta el mínimo.

Con la caldera parametrizada al 100 % de potencia, el controlador actúa para modular y reducir la carga si fuera preciso a través de la reducción proporcional de la alimentación y la adaptación de los valores de los ventiladores según sea necesario.

Existen numerosas estrategias de control pero de entre todas ellas el lazo más importante es el actúa sobre el ventilador secundario según la sonda *Lambda* y regula la cantidad de exceso de aire.

Un persistente problema en las calderas de biomasa es su incapacidad de adaptarse a cambios en la composición y morfología del combustible debido a que la cantidad de éste y su correspondiente demanda de aire dependen del PCI. Por tanto, cada cambio de combustible requiere una nueva puesta en marcha.

El intercambio de calor con el agua depende en gran medida de la velocidad de los productos calientes a través de los tubos. Esta velocidad viene determinada por la depresión en la cámara de combustión. Cada intercambiador está optimizado para unos determinados valores de velocidad de paso de los humos a través de él. Un sensor de depresión en la cámara permite al controlador actuar sobre el ventilador de tiro (normalmente a través de un variador de frecuencia), para mantener constante la velocidad de los humos ajustándose a los cambios provocados por los ventiladores primario y secundario y maximizando constantemente el intercambio de calor con el agua que fluye, normalmente, a velocidad constante. La medida de la temperatura de humos a la salida orientará sobre si el intercambio de calor es el adecuado o se está desperdiciando gran parte de la energía calorífica de los humos.

La reducción de potencia, llegado el momento, se realiza mediante la disminución de aporte de material a la parrilla y la posterior regulación y adaptación de los diferentes flujos de aire que se han mencionado anteriormente. Ante una disminución de la potencia requerida el flujo de gases será el mismo en el intercambiador de calor, pero los gases calientes producidos durante la combustión estarán presentes en menor proporción y por tanto la temperatura final de estos productos será menor.

7.3. Conclusiones

El proceso de puesta en marcha variará dependiendo del tipo de control que tenga cada caldera. Sin embargo, hay una serie de ideas básicas que resumen los objetivos que deben cumplirse en cada operación de puesta a punto de estos dispositivos:

- Ajuste de la alimentación según las características del combustible.
- Ajuste del aire primario a la cantidad de combustible.
- Ajuste del aire secundario, si fuera necesario.
- Ajuste de la depresión en la cámara de combustión.

La caldera se parametriza a su potencia nominal y es el control de la carga es el que calcula los valores de los parámetros en cada instante conforme la demanda disminuye.

Capítulo 8

Análisis computacional del intercambio de calor en una caldera

8.1. Introducción

Sin una caldera real sobre la cual comprobar los resultados, se construirá un modelo computacional para analizar y verificar el funcionamiento del sistema de control que se diseñará.

El diseño de un modelo completo de la caldera se presenta como un problema realmente complejo dados los numerosos procesos que se producen dentro de ella: combustión, transporte de especies, generación de gases, turbulencia en estos, intercambio de calor con agua... El modelo, por tanto, se irá perfilando y verificando poco a poco. En este primer estudio se propondrá simplemente la simulación de una pequeña parte del intercambiador de calor. Esta servirá posteriormente para permitir la introducción al control del intercambio de calor en una caldera de este tipo.

El modelo constará de un pequeño intercambiador de calor formados únicamente por dos tubos y un volumen de agua a su alrededor. El objetivo final es la construcción de un intercambiador de calor completo para una caldera de 200 KW. La dificultad del problema y, sobre todo, la necesidad de simplificar los cálculos debido a las limitaciones de los equipos informáticos, llevan a que el modelo se tenga que ir modificando, ampliando y verificando muy progresivamente

8.2. Modelo de intercambiador de calor con Ansys Fluent

El diseño del intercambiador se realizó con Catia V5 y se importó posteriormente a Ansys Fluent en formato stp.

Se pueden apreciar dos tubos a través de los cuales circulan los humos y un volumen de agua alrededor que fluye desde abajo hasta arriba. El motivo del alargamiento de la

salida es simplemente para evitar recirculaciones del fluido. De esta forma se mejora el guiado y no se producen problemas de falseamiento de resultados de la temperatura a la salida debido a las características del cálculo que realiza Fluent.

Destacar que, basándose en otros modelos de calderas, el modelo tiene una altura de 1043 mm y unos tubos de 80 mm de diámetro. La posterior figura muestra el modelo tumbado para una mejor visualización, destacándose las diferentes partes del mismo: agua, tubulador de humos 1 y tubulador de humos 2.

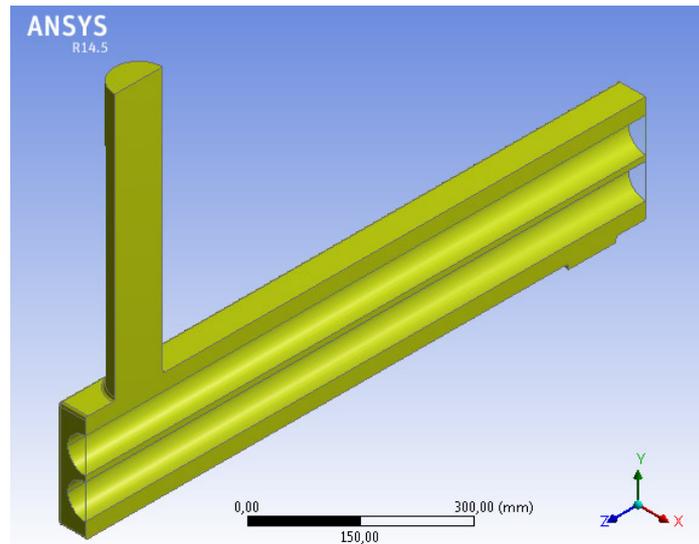


Figura 8.1: Geometría del intercambiador de calor. *Part water*

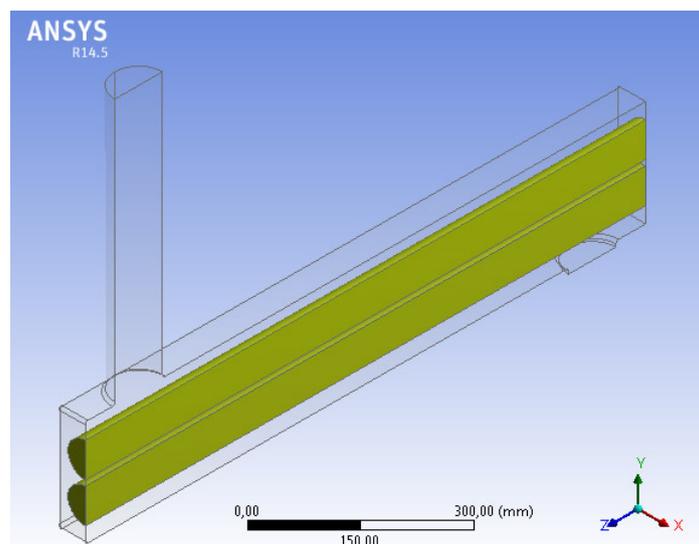


Figura 8.2: Geometría del intercambiador de calor. *Part smokes1 and smokes2*

Durante la fase de mallado se implementaron distintos métodos destacando el *inflation* aplicado sobre las superficies curvadas como la entrada y salida de agua y los

tubuladores para facilitar la convergencia de resultados en posteriores fases. Las características de la malla quedan descritas en la siguiente cuadro:

Estadísticas	
Nodos	43103
Elementos	184898
Calidad ortogonal	
Mín.	4,260091926e-02
Máx.	0,9976
Media	0,89491
Desviación estándar	9,5285e-02

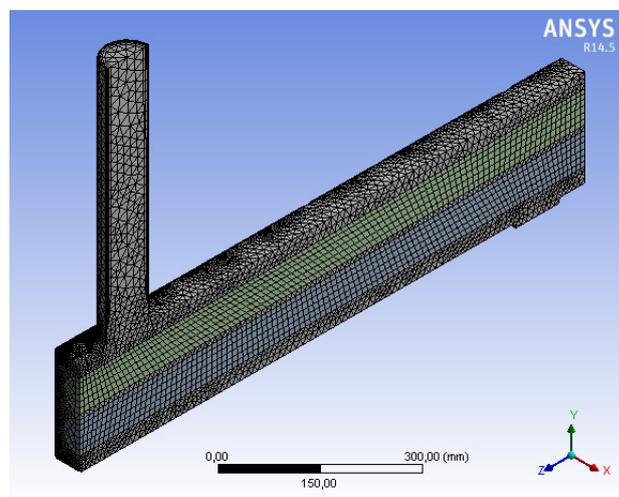


Figura 8.3: Mallado del modelo de intercambiador

En cuanto a la simulación en Fluent, se planteó el problema con las siguientes simplificaciones:

- Fluido portador de calor: agua
- Material de contacto entre lo humos y agua: existía la posibilidad de elegir entre hierro fundido y diferentes tipos de aceros ya que son los materiales que habitualmente se utilizan en el diseño de los intercambiadores de calor de las calderas de biomasa. Finalmente se optó por un acero con las siguientes características

$$\begin{aligned} \text{Densidad} &= 7780 \text{ Kg/m}^3 \\ C_p &= 489 \text{ J/kgK} \\ \text{Conductividad térmica} &= 55 \text{ W/mK} \end{aligned}$$

Dado que se van a simular los cambios en la temperatura de salida del agua en función de la temperatura de entrada y de la potencia que desarrolla la caldera, no se puede en este punto del proyecto disminuirla mediante reducción de aporte de material

puesto que la parrilla no se ha modelado de momento. Para poder regular la potencia entregada por la cámara de combustión al intercambiador de calor se ha supuesto una variable intermedia como es la temperatura de humos a la entrada de los tubuladores. Este dato, que en ningún momento se podría conocer en las calderas actuales, permitirá actuar sobre la potencia desarrollada por el intercambiador de calor en las simulaciones que se realizarán.

En el modelo utilizado se aplicaron las siguientes simplificaciones que deberán ser corregidas en futuros trabajos:

- Modelo de flujo laminar
- Composición de los humos: aire caliente a incompresible

Previamente a la realización de experimentos se realizó una pequeña puesta en marcha del modelo hasta alcanzar las siguientes condiciones de funcionamiento estacionarias:

- Velocidad agua: $0,019 \text{ m/s}$
- Temperatura agua a la entrada: 338 K
- Velocidad entrada humos: $0,7 \text{ m/s}$
- Temperatura entrada humo: 1273 K

Con estas condiciones se obtuvieron los siguientes resultados:

$$T_{\text{salida agua}} = 341,074 \text{ K}, T_{\text{salida humos1}} = 926,821 \text{ K} \text{ y } T_{\text{salida humos2}} = 910,335 \text{ K}$$

Con estos datos se puede calcular la potencia que da el intercambiador r teniendo en cuenta que el caudal de agua presente es:

$$\text{Diámetro de entrada} = \text{DN } 80 = 88,9 \text{ mm}$$

$$Q_{\text{agua}} = 68,4 \text{ m/hora} \cdot 0,00621 \text{ m}^2 = 0,425 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$P_{\text{intercambiador}} = 1000 \text{ cal/kgK} \cdot 0,425 \text{ m}^3/\text{h} \cdot 1000 \text{ kg/m}^3 \cdot (341,074 \text{ K} - 338 \text{ K}) = 1306450 \text{ cal/h}$$

Si se transforma a KW queda:

$$P_{\text{intercambiador}} = 0,00001163 \text{ KW/cal/h} \cdot 1306450 \text{ cal/h} = 1,519 \text{ KW}$$

Observando los resultados en las figuras posteriores se aprecia el deficiente intercambio de calor de los humos con el agua al lanzarsen gases a 900 K. Hay que tener en cuenta que para mejorar el intercambio de calor es importante el modelo turbulento y, de hecho, aumentar la turbulencia en todo lo posible en el interior de los tubos. Posteriores pasos de humos de nuevo por el intercambiador harán que la temperatura de los gases lanzados a la atmósfera sea menor.

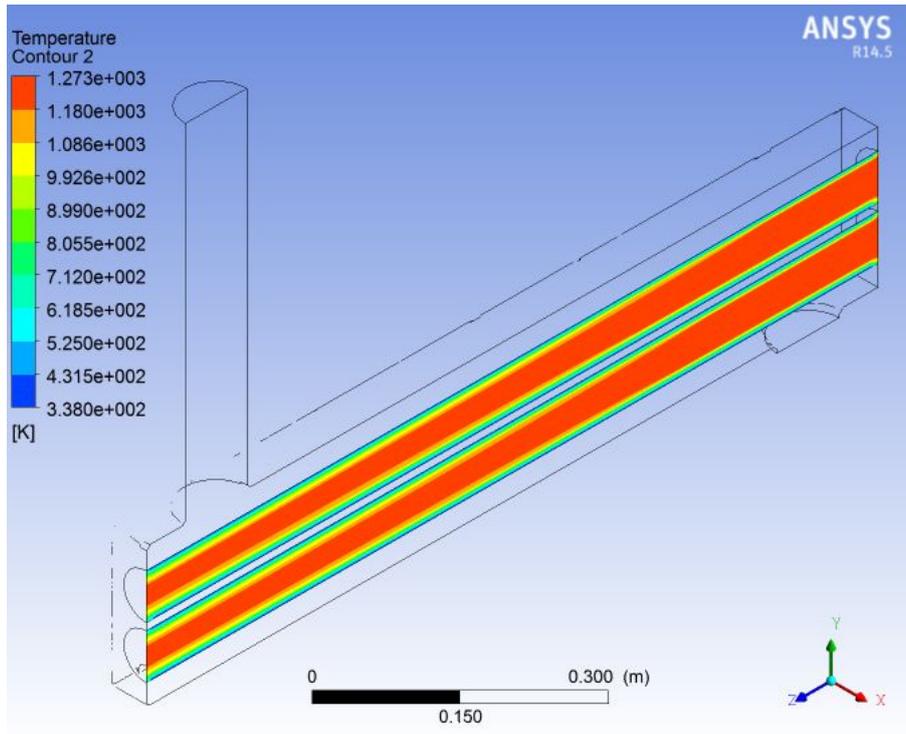


Figura 8.4: Temperatura de los humos a lo largo de los tubuladores

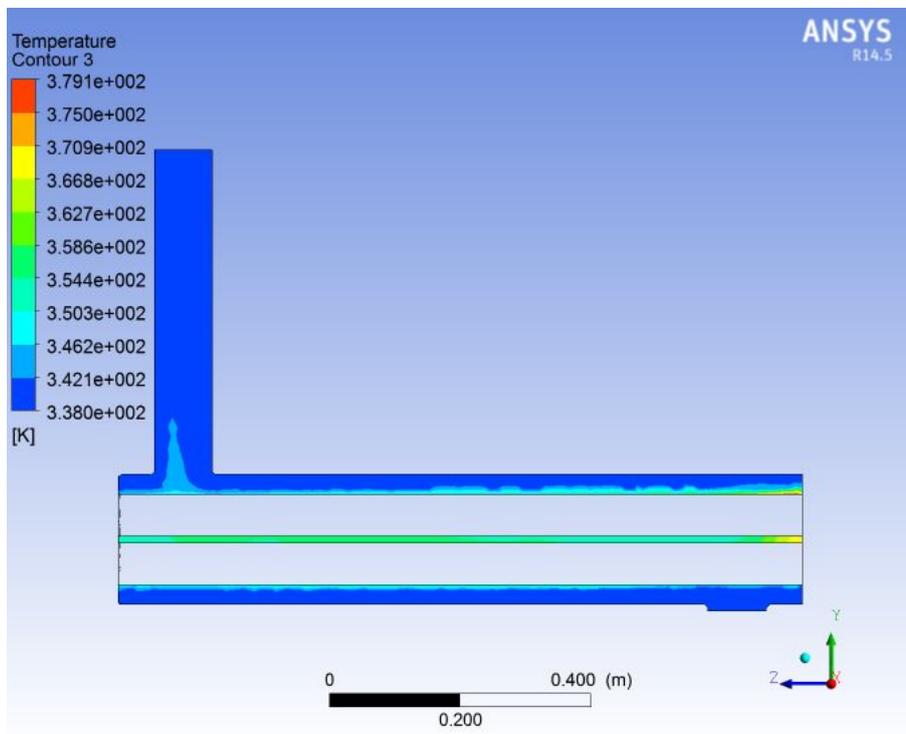


Figura 8.5: Temperatura del agua

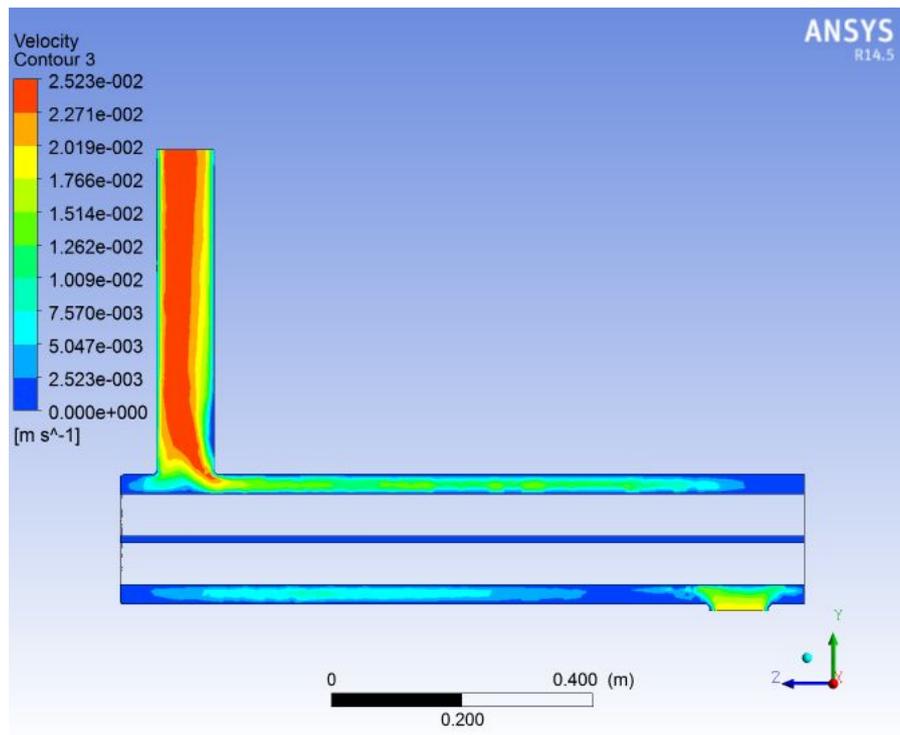


Figura 8.6: Velocidad del agua

A partir de este modelo en régimen estacionario se aplicaron diferentes cambios y se estudió la respuesta transitoria ante las variaciones de temperatura a la entrada y la disminución de potencia variando la temperatura de gases de humos.

Los resultados se exponen en el capítulo de identificación del modelo.

8.3. Conclusiones

El modelo obtenido podrá ser utilizado para la toma de datos y elaboración de un inicial diseño de control. Los resultados arrojados con las simplificaciones propuestas demuestran un comportamiento todavía alejado de la realidad al no haber incluido el modelo turbulento ni las características reales de los gases. No obstante sí que será útil para estudiar el comportamiento y la reacción de la temperatura de impulsión del agua ante las variaciones de las condiciones de contorno en las entradas de agua de retorno y humos.

La necesidad de utilizar una variable ficticia y no medible en las calderas reales, como es la temperatura de los humos a la entrada del intercambiador, pone de manifiesto cómo los resultados y el estudio no se acercará al funcionamiento real hasta estudiar la caldera en todo su conjunto.

Capítulo 9

Visión global del control de una caldera de biomasa

9.1. Introducción

Un sistema de control de proceso de una caldera de biomasa moderna consiste básicamente en los siguientes lazos de control: control de la carga; control de la combustión, control de temperatura de la cámara de combustión y control de la depresión en la cámara de combustión.

El control de la carga de combustible en las calderas de biomasa está normalmente en relación con la temperatura de impulsión objetivo y determina la cantidad de combustible demandada y el caudal necesario de aire primario.

Para cada modelo de cámara de combustión y para cada tipo de combustible existe un ratio de exceso de aire λ que minimiza las emisiones de CO . Si se modifica ese ratio, tanto aumentándolo como disminuyéndolo las emisiones de CO se incrementan o se provoca un innecesario enfriamiento de los gases. La relación característica CO/λ depende de la cantidad de humedad en el combustible y de las condiciones instantáneas de la cámara. Un aumento en la humedad relativa del combustible y una reducción en la alimentación del mismo provocan que el λ aumente y viceversa.

Tanto el contenido en humedad del combustible admitido como la cantidad de energía térmica demandada pueden variar dependiendo del diseño de la cámara de combustión. Por ello, un punto fijo para el ratio de exceso de aire puede provocar indeseables aumentos de las emisiones de CO .

Para conseguir un adecuado funcionamiento es preciso un control sobre el CO y el ratio de exceso de aire. Nunca uno sin el otro. El ratio de exceso de aire puede variar hasta que se encuentre el mínimo de emisiones de CO . Si estas emisiones aumentaran (debido a una variación en la humedad o en la carga demandada), se repetiría el proceso. Por tanto, la cámara de combustión se puede y se debe adaptar a cualquier tipo de combustible en las condiciones demandadas en cada instante.

La temperatura de la cámara de combustión debe controlarse con la recirculación

de gases, en caso de que las paredes estén cubiertas por ladrillo refractario, o por la circulación del agua alrededor de ella.

La depresión suele medirse mediante presostatos que aseguran el valor demandado mediante la actuación sobre el ventilador de tiro.

9.2. Procesos de control avanzados

Hasta ahora, la forma más habitual de mejorar el control del proceso de combustión ha sido implementando mejoras basadas en la experiencia y en experimentos de ensayo y error. Dado que el proceso de combustión lo componen diversos procesos (varias entradas, varias salidas), que suelen estar sujetos a las numerosas perturbaciones que aparecen con la composición del combustible, es difícil entender las relaciones que existen entre ellos. Debido a esta complejidad, es muy complicado diseñar un sistema de control basado en experiencias prácticas. El método de ensayo-error tiene limitada eficiencia.

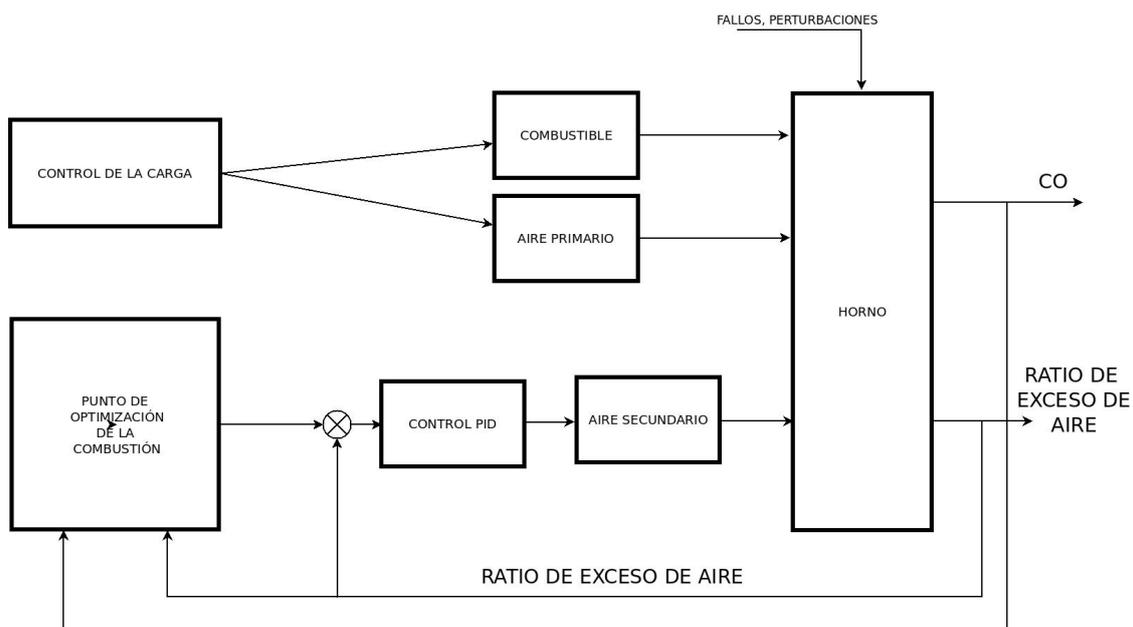


Figura 9.1: Diagrama con los bloques de control de combustión y carga [29]

En la figura 9.1 se muestra el diagrama de bloques típico del control de la carga de una caldera de biomasa. La instalación tiene una demanda concreta en cada momento que es la que determina mayor o menor alimentación de combustible. El controlador hará lo necesario para conseguir el punto óptimo en los parámetros de la combustión para conseguir la máxima eficiencia en la nueva situación

A partir de aquí existen varias estrategias, más allá de la utilización de PID (controlador proporcional, integral y derivativo), con las que enfrentarse al diseño de un control que consiga estos objetivos de la forma más eficiente

Un modelo de proceso de control predictivo, por ejemplo, puede contribuir a mejorar y satisfacer las necesidades de control. El modelo de control predictivo permite la revisión de la estrategia de control utilizando los últimos datos del estado de la planta y su entorno. El conocimiento del comportamiento del proceso se representa en forma de un modelo matemático de un sistema dinámico. Este modelo se usa explícitamente en el controlador para predecir futuras respuestas para perturbaciones y medidas tomadas en el pasado. Respuestas que cumplan con los objetivos de control demandados. El modelo refleja las propiedades dinámicas más significativas del comportamiento de la planta y permite simular futuras salidas en base al conocimiento de procesos pasados.

A continuación se describen varias de las posibles estrategias de control.

9.2.1. Modelo base de un proceso de control

La optimización del control utiliza un modelo de proceso (preferentemente validado) y un modelo computacional del controlador que será probado y optimizado. El proceso de aprendizaje se usa en la etapa de diseño del controlador. En esta etapa, distintas estrategias y parámetros se incluyen en el controlador para ser probados y optimizados para adaptarse al proceso real.

9.2.2. Modelo de control predictivo

Un modelo de control predictivo es la herramienta más adecuada para un proceso multivariable. Estos procesos son aquellos cuyas entradas influyen más que una salida simultánea. Una característica de estos modelos es que la estrategia puede ser ajustada para cada cálculo que se realice en la siguiente acción de control. Como resultado, el control predictivo es muy flexible ante condiciones variables tales como los cambios en la demanda de carga, encendidos y apagados y fallos de sensores y actuadores.

Su surgimiento fue resultado de la necesidad de la industria de controlar los procesos de forma más ajustada y precisa dentro de unas restricciones tanto físicas como operacionales.

El éxito del control predictivo en la industria es en gran parte debido al hecho de que este modelo se adapta perfectamente a sus requerimientos. Estos se pueden separar en tres categorías:

- **Requerimientos operacionales:** los procesos deben operar dentro de unos límites de control en regiones predefinidas (seguridad, emisiones, etc.).
- **Requerimientos de calidad del producto final.**
- **Requerimientos económicos:** los productos finales deben producirse maximizando la productividad económica sin entrar en conflicto con el resto de requerimientos.

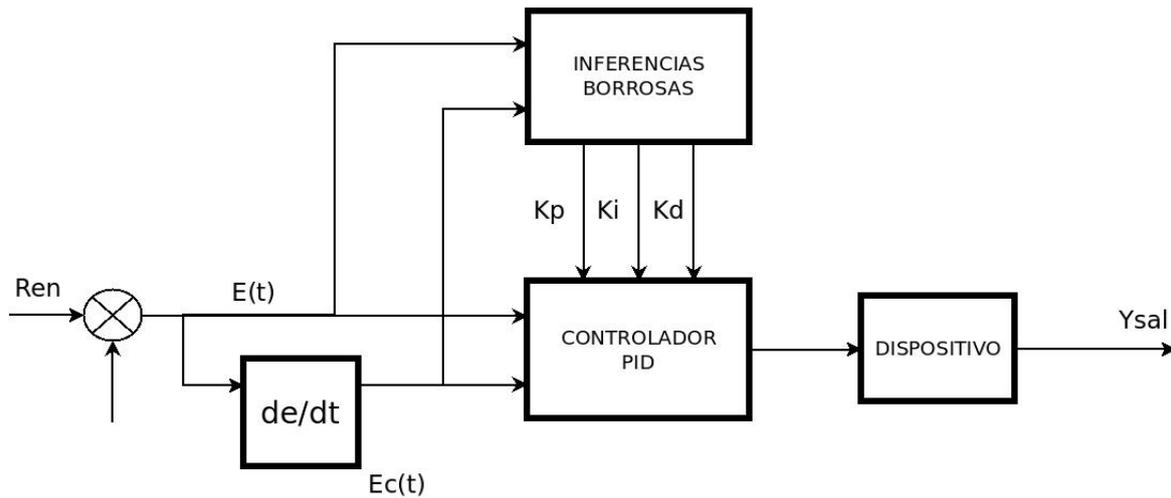


Figura 9.3: Estructura de un controlador PID con autoajuste neuro-borroso [15]

El núcleo del sistema es el controlador neuro-borroso. Contiene un repositorio de parámetros que utiliza en cada instante. La lógica que utiliza describe un mapa de entradas que da lugar a otro de salidas. Las características de esta lógica son:

1. Flexibilidad
2. Lenguaje cercano a máquina
3. Capacidad para la acumulación de información avanzada y experta
4. Facilidad para la combinación con estrategias de control clásico

Por tanto, la información procesada por el controlador neuro-borroso permite la adaptación y ajuste constante de los parámetros proporcional (K_p), integral (K_i) y derivativo (K_d) del PID que recibe la señal de error (E) y actúa en consecuencia.

9.2.4. Sensorización avanzada

Existen técnicas de sensorización basadas en diferentes tipos de software que estiman valores a menudo muy difíciles de medir. Los modelos computacionales se utilizan para estimar la salida de un sensor. Estas técnicas aportan información adicional sobre el proceso que normalmente no se podría obtener. Los motivos de esto podrían ser:

- No existe un método de medida directa de una variable del sistema.
- La técnica de medida es muy costosa.
- La medida no se puede obtener durante el funcionamiento en la instalación *in situ*.

Un ejemplo de este tipo de sensores es aquel diseñado para para el cálculo del poder calorífico del combustible que hay en el interior de la cámara de combustión en cada momento. Este sensor estima las propiedades de la biomasa que se está consumiendo en tiempo real basándose en las medidas de la composición de los gases de la combustión y algunas otras medidas. Un controlador automático puede con esos datos calcular el poder calorífico de la biomasa, su densidad y contenido en humedad y adaptar la combustión a esos valores para asegurar la mayor eficiencia posible.

Conviene tener en cuenta este tipo de técnicas y sensores en el futuro puesto que en combinación con un modelo de control predictivo como el que se ha descrito anteriormente podría ser la estrategia a seguir para alcanzar los objetivos finales.

9.3. Objetivos principales en el diseño de un sistema de control de una caldera de biomasa

Para el caso que nos ocupa, se tratará de diseñar el control de una caldera de biomasa que en principio cumpla con los siguientes objetivos [23]:

- Control de la temperatura de impulsión de la caldera
- Control sobre el aire secundario en relación con la temperatura de humos y la concentración de O_2 a la salida
- Control de la temperatura de la cámara de combustión mediante recirculación de humos

La decisión sobre la estrategia de control más adecuada se discernirá en posteriores estudios. El primer paso, será identificar los modelos que se ajustan al comportamiento del intercambiador de calor y para ello se mostrarán las herramientas matemáticas y de programación que se utilizarán en posteriores capítulos.

Dejando para más adelante la modelización de la cámara de combustión y su control, se pueden apuntar las siguientes líneas que se tendrán en cuenta en la investigación que se realizará a continuación de este estudio.

El sistema de control de la combustión en el hogar debe ser diseñado con el objetivo de hacer cumplir las condiciones de seguridad, operacionalidad en el arranque, funcionamiento y parada requeridos, anticipándose siempre a los posibles errores y problemas que pudiesen surgir [26]. Debe protegerse contra los posibles accidentes o mal funcionamiento debido a la composición del combustible aunque el papel del operario sea siempre indispensable tarde o temprano. Su misión principal, además de la de garantizar la seguridad es la de adaptar la alimentación a la demanda de energía de la instalación y aportar el aire necesario en todo instante para asegurar la mayor eficiencia posible.

9.4. Conclusiones

Se han descrito los principales lazos que componen el control típico de una caldera de biomasa. El control de la carga, la optimización de la combustión y la estabilidad de la depresión y temperatura de la cámara son los objetivos principales de cualquier diseño. Sin embargo, para optimizar aún más el funcionamiento de la caldera y mejorar su adaptación a cambios externos se optará por nuevas estrategias, además de los PIDs más convencionales, que permitan mejorar estos lazos.

Una vez estudiados las diferentes posibilidades, se optará en un futuro por estrategias de control predictivo en combinación con sistemas de sensorización avanzada para alcanzar los objetivos finales del proyecto global.

Capítulo 10

Identificación del modelo de funcionamiento del intercambiador caldera

10.1. Introducción

El primer paso para la construcción de un control completo de la caldera será el diseño de la regulación de la temperatura de impulsión en función de la temperatura de humos a la entrada del intercambiador. Este trabajo se centrará en conocer y desarrollar técnicas de identificación de modelos de comportamiento del intercambiador de calor desarrollado con Ansys Fluent que posteriormente serán utilizadas, tras la evolución del modelo CFD, para el desarrollo de modelos de control como los que se han descrito anteriormente.

Para esta identificación se han implementado, una serie de programas en lenguaje Python que han permitido mediante herramientas de software libre realizar los cálculos necesarios y procesar los datos recogidos en las simulaciones con el modelo de Ansys Fluent. Los programas que han generado todos los resultados que se muestran en este capítulo se recogen en el Apéndice A

10.2. Experimentos y recogida de datos

Los experimentos realizados en Ansys Fluent fueron los siguientes:

- Aumento y disminución en 1 grado de la temperatura de retorno de agua que llega a la entrada del intercambiador
- Aumento y disminución de 300 grados a la entrada de los humos
- Aumento y disminución de 1 grado a la entrada de la temperatura de retorno de agua según una serie binaria aleatoria generada con Python.

- Aumento y disminución de 300 grados a la entrada de la temperatura de retorno de agua según una serie binaria aleatoria generada con Python.

Se eligió una variación de la temperatura de entrada de humos lo suficientemente grande como para apreciar cambios significativos en la temperatura de salida del agua. Con los resultados obtenidos se procedió al tratamiento de los datos para la identificación de los modelos.

10.3. Identificación de modelos mediante programación en Python

El programa A.1 se escribió para leer el archivo txt generado con Ansys Fluent que recogía los valores de temperatura media a la salida del intercambiador en función del aumento y disminución de la temperatura de entrada del agua en 1 K, y representar los resultados gráficamente. Además, calcula e imprime por pantalla los valores de ganancia, constante de tiempo y retraso necesarios para la posterior identificación del modelo. Figura 10.1

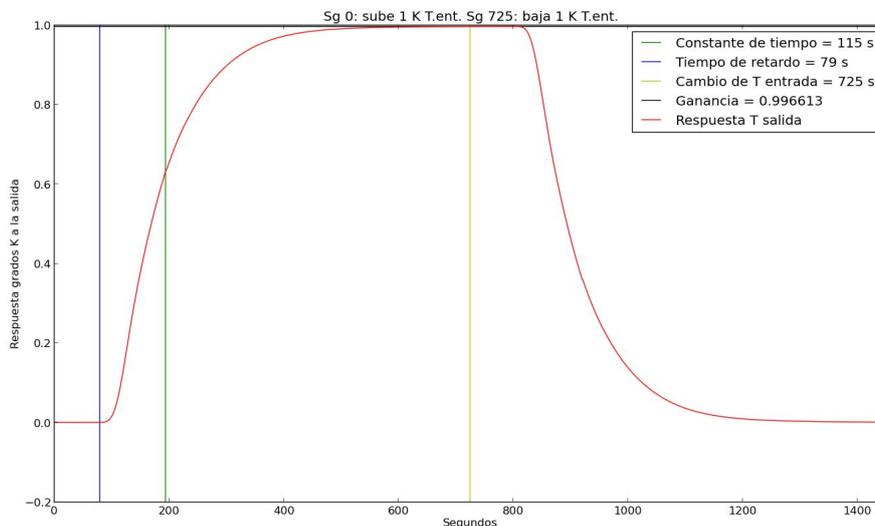


Figura 10.1: Variación de un grado a la temperatura de entrada. Respuesta a entrada escalón

Utilizando la librería de control de Python en el programa A.2, escrito en forma de función, se generó una respuesta a una entrada escalón que actúa sobre la función de transferencia $G(s)$ que, utilizando las constantes que se ha calculado utilizando las constantes previamente calculadas [21].

Los resultados se pueden ver en la figura 10.2.

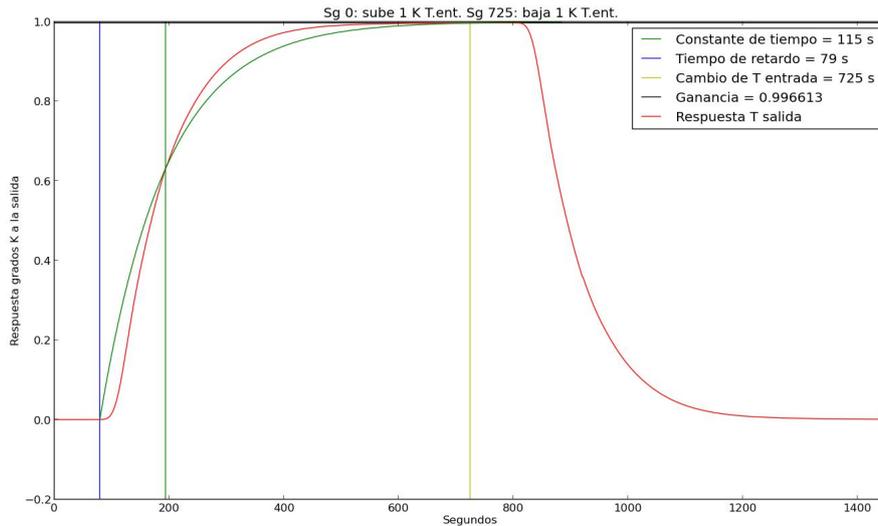


Figura 10.2: Variación de un grado a la temperatura de entrada. Identificación del modelo mediante sistema de primer orden

La función de transferencia que relaciona la temperatura de salida respecto de la de entrada con las constantes calculadas y suponiendo un sistema de primer orden queda de la siguiente forma:

$$G(s) = \frac{0,996613}{1 + 115s} \cdot e^{-79\tau}$$

Como se ve gráficamente en la figura 10.3, si se prueba con un sistema de segundo orden la aproximación al modelo real es mayor.

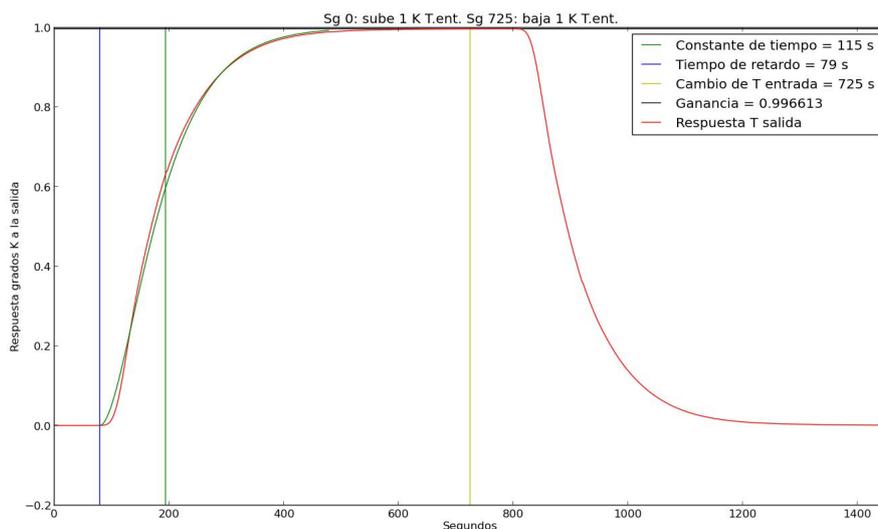


Figura 10.3: Variación de un grado a la temperatura de entrada. Identificación del modelo mediante sistema de segundo orden

De igual forma, el programa A.3 realiza la misma secuencia para el archivo de texto con los datos de temperatura a la salida del intercambiador, disminuyendo y aumentando la temperatura de humos en 300 K. Figura 10.4

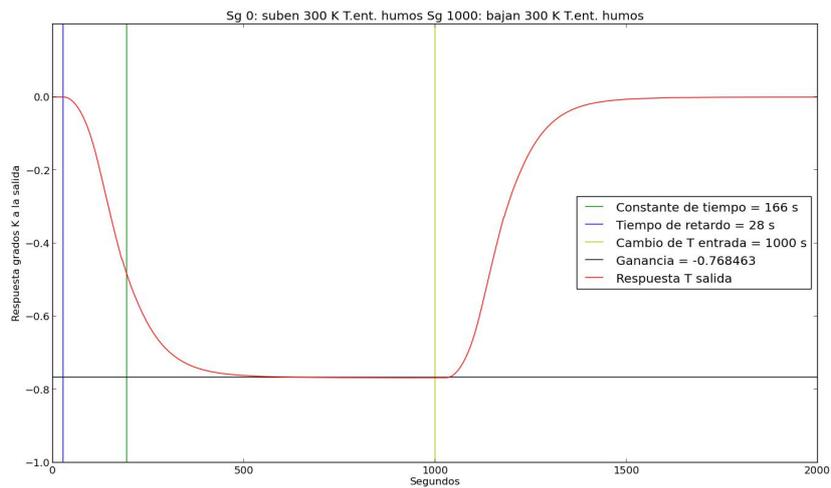


Figura 10.4: Variación de 300 grados a la temperatura de entrada de humos. Respuesta a entrada escalón

La identificación con un sistema de primer orden queda de la siguiente manera:

$$G(s) = \frac{-0,768463}{1 + 166s} \cdot e^{-28s}$$

En las representaciones se aprecia como un sistema de primer orden (figura: 10.5) no se ajusta a la realidad por lo que hay que recurrir a sistemas de segundo o incluso de tercer orden. Figuras 10.6 y 10.7

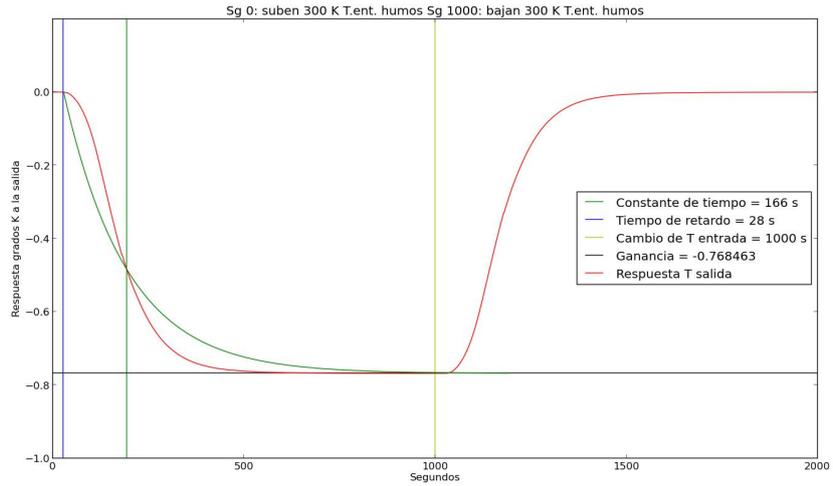


Figura 10.5: Variación de 300 grados a la temperatura de entrada de humos. Identificación del modelo mediante sistema de primer orden

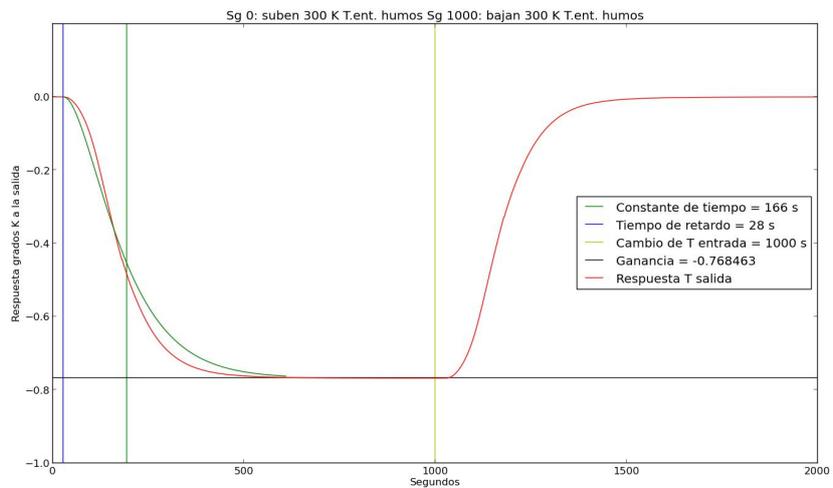


Figura 10.6: Variación de 300 grados a la temperatura de entrada de humos. Identificación del modelo mediante sistema de segundo orden

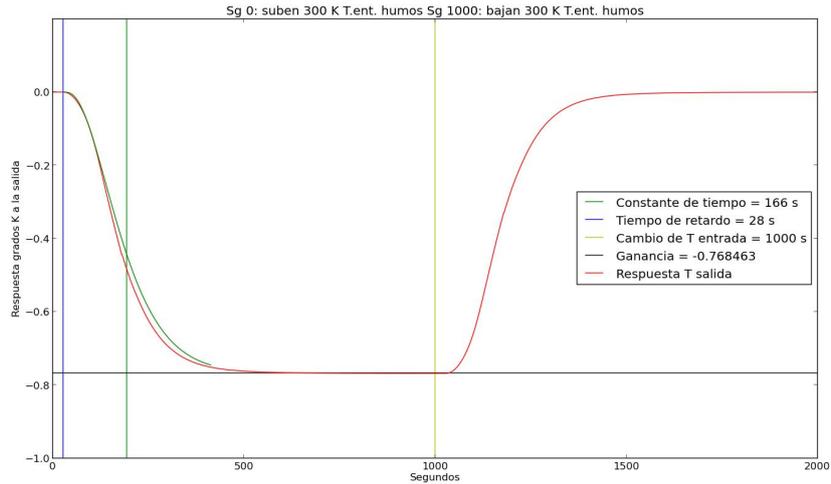


Figura 10.7: Variación de 300 grados a la temperatura de entrada de humos. Identificación del modelo mediante sistema de tercer orden

Continuando con el análisis se escribió el programa A.4 para determinar la posición de polos y ceros de las funciones de transferencia. La figura 10.8 representa el mapa de la función de transferencia de segundo orden de temperatura de salida del agua respecto a la de entrada.

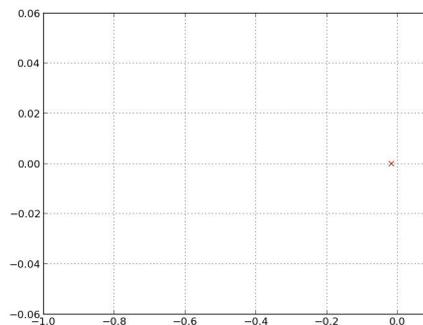


Figura 10.8: Mapa de polos y ceros de $G(s)$

Llegado este punto se pasará de la identificación de unos modelos continuos a otros discretos. Para poder aplicar las técnicas de identificación de modelos de función de transferencia discretizadas se tomaron datos de la reacción del sistema ante variaciones tanto de la temperatura de agua a la entrada como de la de los humos siguiendo una secuencia aleatoria binaria que se representó con los programas A.5 para y A.7 respectivamente.

Para el caso de la temperatura de salida del agua respecto a la de entrada se generaron cambios de 1 K que se producían o mantenían cada 400 segundos. Con esta frecuencia, por tanto, se introdujo un aumento o disminución en 1 K de la temperatura

de entrada de agua al sistema si el bit correspondiente era 1, o se mantuvo la entrada si era 0. Mediante el programa A.6 se representaron los datos registrados de temperatura de salida que resultaron del experimento (figura 10.9). La lectura de la temperatura de salida se calculó cada 10 s.

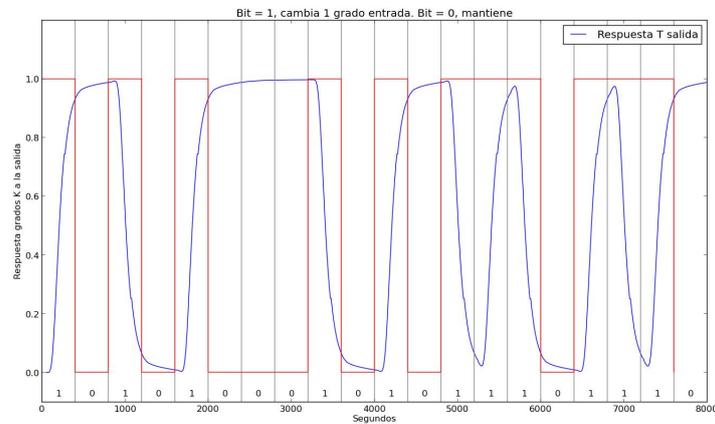


Figura 10.9: Representación de la respuesta de la temperatura de salida del agua respecto a la variación de la entrada según una secuencia binaria aleatoria

De igual forma para la función de transferencia de la temperatura de salida del agua respecto a la temperatura de entrada de humos se usó el programa A.8 para representar los resultados arrojados por Ansys Fluent. La secuencia binaria aleatoria cambiaba de bit en este caso cada 500 segundos. Figura 10.10.

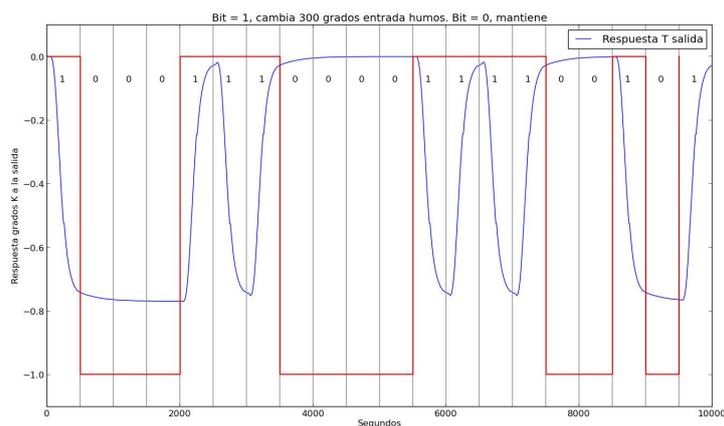


Figura 10.10: Representación de la respuesta de la temperatura de salida del agua respecto a la variación de la temperatura de humos según una secuencia binaria aleatoria

Con toda esta información se procedió a la identificación de un modelo discreto mediante la utilización de técnicas de regresión lineal [20] de la forma que se expone a continuación:

$$y(t) = \sum_{j=1}^N \theta_j \varphi_j(t) + e(t)$$

donde $y(t)$ es, en este caso, el vector de los resultados de temperatura a la salida en un instante k ; θ_j el vector de coeficientes que se calculan; $\varphi_j(t)$ la matriz de regresores y $e(t)$ es el ruido en la medición que en este caso es 0 por ser un experimento simulado por ordenador.

La ecuación que se utilizará para identificar el modelo será la siguiente:

$$y(k) = a_1 \cdot y(k-1) + a_2 \cdot y(k-2) + b_1 \cdot u(k-8) + b_2 \cdot u(k-9)$$

Teniendo en cuenta el retraso del sistema es de unos 80 s, se estimó que la influencia de ésta comienza a tener efecto a partir del instantes $k-8$ para este caso en el que se toman los datos cada 10 s.

Los valores de los coeficientes calculados quedaron según el programa A.9 fueron:

$$a_1 = 1,96814437 \quad a_2 = -0,96814371 \quad b_1 = 0,0099063 \quad b_2 = -0,01026351$$

La ecuación resultante queda dibujada sobre la representación de los datos experimentales en la figura 10.11

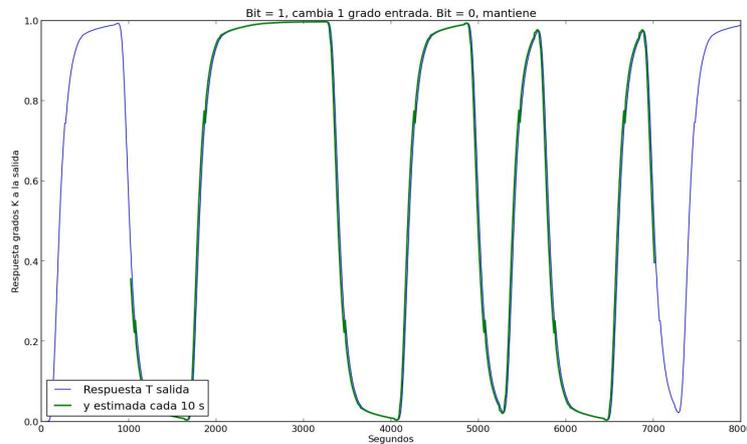


Figura 10.11: Variación de ± 1 K en la temperatura de entrada de agua. Identificación con un modelo discreto con toma de datos cada 10 s

La misma estrategia fue utilizada de nuevo pero con una toma de datos cada 20 s. Programa A.10 y figura 10.12).

$$y(k) = a_1 \cdot y(k-1) + a_2 \cdot y(k-2) + b_1 \cdot u(k-4) + b_2 \cdot u(k-5)$$

$$a_1 = 1,95264624 \quad a_2 = -0,95264557 \quad b_1 = 0,02400247 \quad b_2 = -0,02411218$$

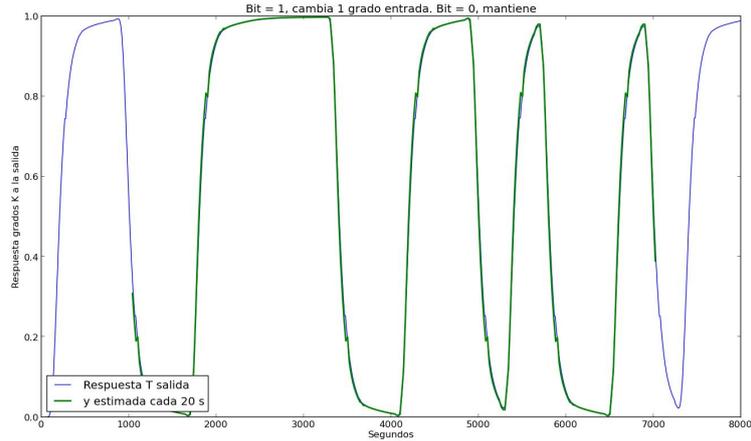


Figura 10.12: Variación de ± 1 K en la temperatura de entrada de agua. Identificación con un modelo discreto con toma de datos cada 20 s

Y cada 40 segundos. Programa A.11 y figura 10.13

$$y(k) = a_1 \cdot y(k - 1) + a_2 \cdot y(k - 2) + b_1 \cdot u(k - 2) + b_2 \cdot u(k - 1)$$

$$a_1 = 1,86174707 \quad a_2 = -0,86173635 \quad b_1 = 0,13536421 \quad b_2 = -0,14096483$$

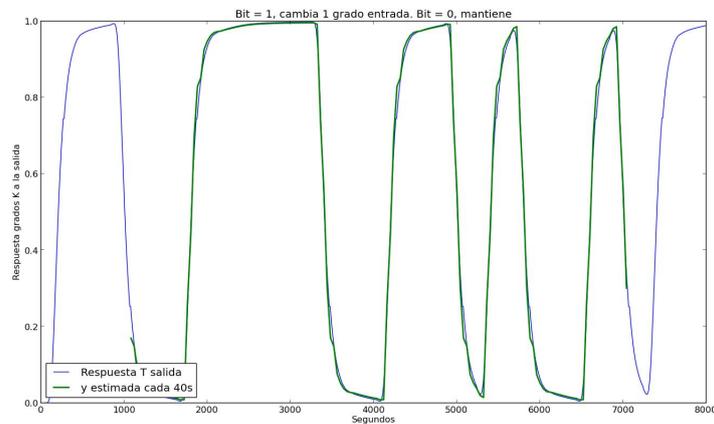


Figura 10.13: Variación de ± 1 K en la temperatura de entrada de agua. Identificación con un modelo discreto con toma de datos cada 40 s

En cuanto a la función de transferencia de temperatura de salida del agua respecto a la de entrada de humos se actuó de igual forma solo que teniendo en cuenta que el retraso calculado anteriormente era de 28 segundos. Programa A.12 y figura 10.14.

$$y(k) = a_1 \cdot y(k - 1) + a_2 \cdot y(k - 2) + b_1 \cdot u(k - 3) + b_2 \cdot u(k - 4)$$

$$a_1 = 1,9325767 \quad a_2 = -0,93257581 \quad b_1 = 0,00358503 \quad b_2 = -0,00222968$$

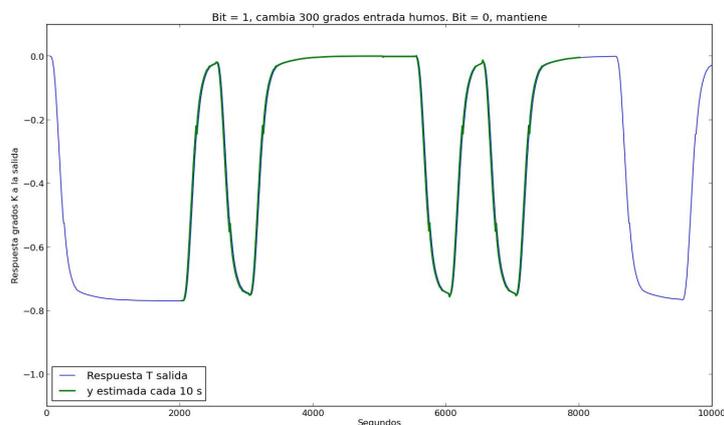


Figura 10.14: Variación de ± 300 K en la temperatura de entrada de humos. Identificación con un modelo discreto con toma de datos cada 10 s

Para una discretización de 20 segundos. Programa A.13 y figura 10.15.

$$y(k) = a_1 \cdot y(k - 1) + a_2 \cdot y(k - 2) + b_1 \cdot u(k - 2) + b_2 \cdot u(k - 3)$$

$$a_1 = 1,95028186 \quad a_2 = -0,95028313 \quad b_1 = 0,01905064 \quad b_2 = -0,02048316$$

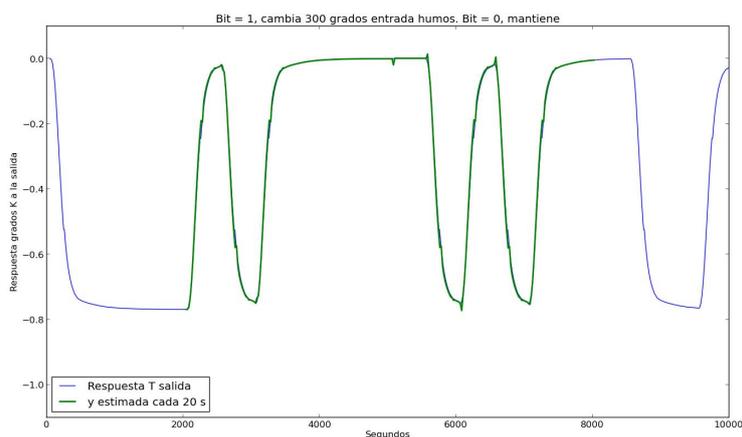


Figura 10.15: Variación de ± 300 K en la temperatura de entrada de humos. Identificación con un modelo discreto con toma de datos cada 20 s

Y para un registro de datos cada 40 segundos. Programa A.11 y figura 10.16.

$$y(k) = a_1 \cdot y(k - 1) + a_2 \cdot y(k - 2) + b_1 \cdot u(k - 2) + b_2 \cdot u(k - 1)$$

$$a_1 = 1,95893008 \quad a_2 = -0,95892829 \quad b_1 = 0,00727689 \quad b_2 = -0,0043644$$

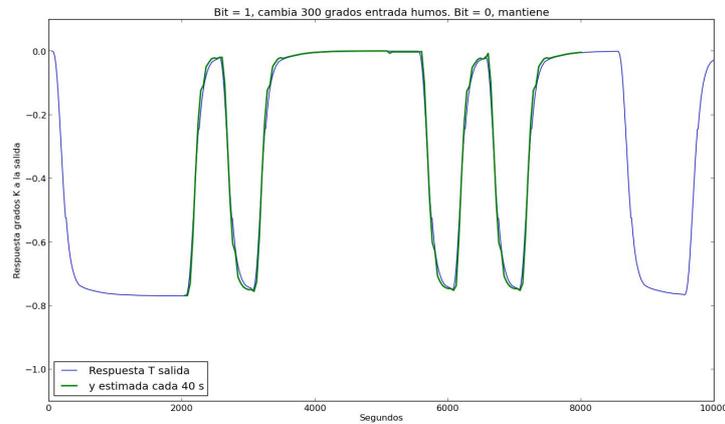


Figura 10.16: Variación de ± 300 K en la temperatura de entrada de humos. Identificación con un modelo discreto con toma de datos cada 40 s

10.4. Conclusiones

Los resultados obtenidos mediante experimentos simulados con Ansys Fluent fueron tratados con programas escritos en Python para la identificación de modelos de comportamiento que serán utilizados en posteriores trabajos para la elaboración del control de la carga de la caldera.

El trabajo sobre el modelo continuo permitió identificar la función de transferencia de la temperatura de salida del agua con respecto a la de entrada como un sistema de segundo orden; y la de salida del agua con respecto a la de entrada de humos como un sistema de tercer orden.

Mediante el uso de secuencias binarias aleatorias se variaron las entradas de las funciones de transferencia durante la realización de una serie de experimentos que permitieron estimar un modelo discreto de los dos sistemas. Quedó de manifiesto, verificando los resultados obtenidos en continuo, la lentitud de ambos, y cómo habrá que tener en cuenta estos tiempos de retraso en el futuro.

En cuando a la experiencia del uso del lenguaje Python para resolver problemas de control fue útil en la mayoría de las ocasiones y, aunque en algunos momentos se vuelve una opción más laboriosa que la utilización de programas comerciales como Matlab, puede ser hoy una herramienta alternativa para el estudio de problemas de control simples y, en un futuro y con un desarrollo más profundo, para problemas más complejos.

Capítulo 11

Conclusiones finales

La principal motivación de este trabajo ha sido la de iniciar un estudio más amplio cuyo propósito final es el desarrollo del control de una caldera de biomasa que pueda responder ante los cambios en la composición y las características de los biocombustibles utilizados.

Para ello se hizo un pequeño resumen de los biocombustibles usados en calderas de biomasa comerciales. A pesar de la existencia de muchos más tipos de materiales a utilizar, una caldera que pudiera adaptarse y alcanzar su máximo rendimiento en función de las variables composiciones de *pellets* y astillas sería un gran avance en la robustez y eficiencia de este tipo de sistemas de calefacción. Seguidamente se describieron varias de las principales calderas comerciales y las soluciones que se aplican actualmente.

Toda esta información, junto con la relación de las distintas estrategias de control que se explicaron en capítulos siguientes, permitieron cumplir con el objetivo inicial de exponer una descripción de las características, combustibles, operatividad, análisis termodinámico y estado actual de las calderas de biomasa que se marcó al inicio del trabajo.

A partir de este punto se comenzó a trabajar sobre el modelo computacional para los futuros experimentos y verificaciones del sistema de control. Utilizando como herramienta para el diseño Catia V5 y para la generación del modelo CFD Ansys Fluent, las principales dificultades surgieron a la hora de ajustarse a las capacidades de los equipos informáticos utilizados. Se simplificó el modelo hasta simular simplemente el paso de dos tubos con aire caliente a través de un volumen de agua que fluía. Todo ello en régimen laminar.

Pese todo, la meta era diseñar un modelo inicial que permitiera ejecutar unas primeras simulaciones y experimentos y que sirviera de punto de partida de un modelo para ser perfeccionado en el futuro. Quedó de manifiesto la complejidad de crear modelos de este tipo por lo que su evolución será en un futuro progresiva y verificada en todo momento.

Gracias a las herramientas de software libre que ofrecen las librerías de funciones de Python, se analizaron los resultados y se identificaron los modelos de las funciones de transferencia de la temperatura de salida del agua respecto a la de entrada y a la

temperatura de humos, variable por cierto ficticia y que sólo será utilizada hasta que se diseñe el modelo de parrilla y de la combustión del material en el hogar.

Se programaron los programas necesarios para identificar el modelo tanto en continuo como en discreto y se compararon los resultados de los modelos obtenidos con la toma de datos experimental simulada con Fluent.

La utilización de las librerías de Python permitió la identificación de estos modelos y se presenta como una herramienta eficaz y útil frente al uso de otros programas comerciales como Matlab. No obstante exige un mayor esfuerzo en programación y algunas de sus funciones están todavía por mejorarse y desarrollarse más en profundidad. El modelo utilizado sirvió para apreciar la lentitud de un sistema de estas características ante los cambios y el estudio de los transitorios permitió la iniciación en la identificación de los modelos de funciones de transferencia del sistema. El conjunto de programas que se pueden leer en el anexo A quedan como un grupo de herramientas a utilizar en el futuro para la identificación de los modelos que vayan surgiendo en la investigación. Pese a la dificultad, las librerías de Python han permitido cumplir con el objetivo de proporcionar funciones de software libre que ayuden al diseño de sistemas de control.

Líneas futuras de la investigación

Los resultados obtenidos en este trabajo se utilizarán como punto de partida para futura investigación y desarrollo de un modelo completo de caldera y diseño de su control. Se plantean las siguientes líneas de trabajo para continuar con lo hecho hasta ahora:

- Mejora del modelo de intercambiador con dos tubos utilizando modelos con turbulencia para alcanzar resultados más realistas y optimizados del intercambio de calor.
- Ajustar las propiedades y características del fluido utilizado para simular los productos calientes procedentes de la combustión.
- Ampliación del modelo hasta lograr un intercambiador de calor que permita un aporte de energía del fluido caloportador de 200 kW.
- Identificación del modelo mediante herramientas de software libre (programación en Python).
- Diseño y simulación de una parrilla móvil para la simulación de la combustión de distintos materiales.
- Identificación del modelo y funciones de transferencia de parrilla y sistema completo de parrilla e intercambiador de calor.
- Diseño completo del control de una caldera de biomasa.

Bibliografía

- [1] Biomass boiler installation at Plockton High School, Plockton. Tech. rep., Carbon Trust, <http://www.carbontrust.com>.
- [2] AVEBIOM. <http://www.avebiom.org>.
- [3] BINDER. <http://www.binderboiler.com>.
- [4] CAMPS MICHELENA, M., MARCOS MARTÍN, F., ET AL. Los biocombustibles. *Ediciones Mundi-Prensa* (2002).
- [5] CATFIRE. <http://www.catfire-service.com>.
- [6] CONSEJO EUROPEO DEL PELLET. *Manual para la certificación de pellets de madera para usos térmicos. Basado en la norma EN 14961-2*, 5 2011.
- [7] DE SOETE, G. Heterogene stickstoffreduzierung an festen partikeln. *VDI Ber*, 498 (1983), 171–176.
- [8] DEMIRBAS, A. Combustion characteristics of different biomass fuels. *Progress in Energy and Combustion Science* 30, 2 (2004), 219 – 230.
- [9] FRÖLING. <http://www.froeling.com>.
- [10] GAUR, S., AND REED, T. B. An atlas of thermal data for biomass and other fuels. Tech. rep., National Renewable Energy Lab., Golden, CO (United States), 1995.
- [11] HASSGARNER. <http://www.hassgarner.es>.
- [12] HRDLIČKA, J., AND ŠULC, B. Advanced features of a small-scale biomass boiler control for emission reduction.
- [13] IDAE. *Guía técnica: procedimiento de inspección de eficiencia energética para calderas*.
- [14] JENKINS, B., BAXTER, L., JR., T. M., AND MILES, T. Combustion properties of biomass. *Fuel Processing Technology* 54, 1–3 (1998), 17 – 46.
- [15] JUNRAN JIN, HENGSHUO HUANG, J. S., AND PANG, Y. Study on fuzzy self-adaptive pid control system of biomass boiler drum water. *Journal of Sustainable Bioenergy Systems* 3 (2013), 93–98.

- [16] KELLER, R. *Primärmassnahmen zur NO_x-Minderung bei der Holzverbrennung mit dem Schwerpunkt der Luftstufung*. PhD thesis, Diss. Techn. Wiss. ETH Zürich, Nr. 10514, 1994. Ref.: P. Suter; Korref.: L. Reh, 1994.
- [17] KILPINEN, P. *Kinetic modeling of gas-phase nitrogen reactions in advanced combustion processes*. na, 1992.
- [18] KWB. <http://www.kwb.es>.
- [19] LASIAN. <http://www.lasian.es>.
- [20] LJUNG, L. *System identification*. Springer, 1998.
- [21] LJUNG, L. Identification for control: Simple process models. In *Decision and Control, 2002, Proceedings of the 41st IEEE Conference on* (2002), vol. 4, IEEE, pp. 4652–4657.
- [22] MARTÍN, F. M. *Biocombustibles sólidos de origen forestal*. 2001.
- [23] MASA, V., PAVÍAS, M., AND SVARC, I. Mathematical model of biomass boiler for control purposes. *CHEMICAL ENGINEERING* 25 (2011), 743–748.
- [24] MÍGUEZ, J., MORÁN, J., GRANADA, E., AND PORTEIRO, J. Review of technology in small-scale biomass combustion systems in the european market. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16, 6 (2012), 3867–3875.
- [25] SAIDUR, R., AHAMED, J., AND MASJUKI, H. Energy, exergy and economic analysis of industrial boilers. *Energy Policy* 38, 5 (2010), 2188 – 2197. Greater China Energy: Special Section with regular papers.
- [26] SATHYAN, M. A., AND LETHAKUMARY, B. Rlnng conversion, boiler dynamics and control.
- [27] TERMOSUN. <http://www.termosun.com>.
- [28] VAGALUME. <http://www.tiendavagalume.es>.
- [29] VAN LOO, S., AND KOPPEJAN, J. *The handbook of biomass combustion and co-firing*. Earthscan, 2007.
- [30] VIESSMANN. <http://www.viessmann.co.uk>.
- [31] YIN, C., ROSENDAHL, L. A., AND KÆR, S. K. Grate-firing of biomass for heat and power production. *Progress in Energy and Combustion Science* 34, 6 (2008), 725 – 754.
- [32] ÖKOFEN. <http://www.okofen.es>.