



UNIVERSIDAD DE VALLADOLID



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES

Grado en Ingeniería Mecánica

**Análisis y caracterización de la combustión
de pélets en una caldera Solarfocus TII30 de
llama invertida**

Autor:

Esteban González, Irene

Tutor:

Dr. Julio Francisco San José Alonso

**Departamento de Ingeniería
Energética y Fluidomecánica**

Cotutor:

D. Alfonso Calderón Vezanzones

Valladolid, Julio 2014.

RESUMEN

En el presente TFG, se han realizado ensayos de combustión con ocho muestras de pélets diferentes en una instalación térmica con una caldera Solarfocus de 30kW. La finalidad es establecer una relación entre el tipo de pélet y la combustión desde el punto de vista de la eficiencia energética y las emisiones contaminantes.

Experimentalmente, se examina la evolución de algunos parámetros de la caldera, como la temperatura de los humos o el coeficiente de aire. Esto permite establecer el periodo estacionario de la combustión y detectar los problemas asociados a inquemados y escorias.

El estudio teórico de la combustión posibilita conocer la eficiencia del proceso desarrollado. Respecto las emisiones, fueron determinadas por un analizador de humos.

Los resultados arrojaron una eficiencia superior al 74% en todos los ensayos, no obstante, dos muestras sobrepasaron los límites de emisión de NO_x y, en tres, las escorias impedían la correcta combustión.

Palabras clave: biomasa, caracterización, combustión, emisiones, eficiencia.

Abstract

In this degree final project, combustion tests with eight different samples of pellets have been carried out in a heating system with a Solarfocus boiler of 30KW. The aim is to establish a relationship between the type of pellet and the combustion from the point of view of energy efficiency and emissions.

Experimentally, the evolution of some parameters of the boiler is examined, as the fumes temperature or the air coefficient. This allows to set the stationary period of the combustion and to detect the problems associated with the unburned residues and slags.

The theoretical study of combustion facilitated to know the efficiency of the process developed. Regarding emissions, they were determined by a gas analyzer.

The results showed efficiencies greater than 74% in all tests. Nevertheless, two samples exceeded the emission limit of NO_x, and in three, the slags did not allow a correct combustion.

Keywords: biomass, characterization, combustion, emissions, efficiency.

ÍNDICE

RESUMEN	I
ÍNDICE DE FIGURAS	VI
ÍNDICE DE GRÁFICOS.....	VII
ÍNDICE DE TABLAS	VIII
CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	1
1.1 ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN	1
1.1.1. INTRODUCCIÓN	1
1.1.2. ESCENARIO ENERGÉTICO.....	2
1.1.3. LA BIOMASA.....	5
1.1.4. LOS PÉLETS	6
1.2 JUSTIFICACIÓN	7
1.3 OBJETIVOS.....	8
CAPÍTULO 2 POTENCIAL DE BIOMASA EN CASTILLA Y LEÓN	9
2.1 INTRODUCCIÓN	9
2.2 DEFINICIÓN DE BIOMASA.....	9
2.3 CLASIFICACIÓN DE LA BIOMASA	10
2.4 DISPONIBILIDAD DE BIOMASA EN CASTILLA Y LEÓN	12
2.4.1 BIOMASA FORESTAL	13
2.4.2 CULTIVOS ENERGÉTICOS.....	15
2.4.3 RESTOS AGRÍCOLAS.....	17
2.4.4 RESTOS DE LA INDUSTRIA DE LA MADERA	18
2.4.5 BIOMASA DE ORIGEN URBANO Y DE OTRAS INDUSTRIAS	20
2.4.6 SÍNTESIS	21
CAPÍTULO 3 BIOCOMBUSTIBLES SÓLIDOS	23
3.1 INTRODUCCIÓN	23
3.2 PÉLETS.....	23
3.2.1. PROCESO DE PELETIZADO.....	24
3.3 CARACTERIZACIÓN DE LOS COMBUSTIBLES	26
3.3.1. CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS.....	27
3.3.2. CARACTERÍSTICAS ENERGÉTICAS.....	34
3.3.3. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS.....	37
3.4 NORMALIZACIÓN DE LOS PÉLETS.....	40

3.5	CARACTERIZACIÓN DE LAS MUESTRAS ESTUDIADAS.....	41
3.5.1.	CARACTERIZACIÓN MUESTRA 1	42
3.5.2.	CARACTERIZACIÓN MUESTRA 2	43
3.5.3.	CARACTERIZACIÓN MUESTRA 3	44
3.5.4.	CARACTERIZACIÓN MUESTRA 4	45
3.5.5.	CARACTERIZACIÓN MUESTRA 5	46
3.5.6.	CARACTERIZACIÓN MUESTRA 6	47
3.5.7.	CARACTERIZACIÓN MUESTRA 7	48
3.5.8.	CARACTERIZACIÓN MUESTRA 8	49
CAPÍTULO 4	LA COMBUSTIÓN	51
4.1	INTRODUCCIÓN	51
4.2	FUNDAMENTOS DE LA COMBUSTIÓN.....	51
4.2.1	TIPOS DE COMBUSTIÓN.....	52
4.3	ETAPAS EN LA COMBUSTIÓN DE BIOMASA	54
4.4	ESTEQUIOMETRÍA DE LA COMBUSTIÓN.....	55
4.5	RENDIMIENTO DE LA COMBUSTIÓN	60
4.6	CARACTERIZACIÓN DEL PROCESO DE COMBUSTIÓN. EMISIONES.....	63
4.6.1	EMISIONES.....	63
4.7	EXCEL PARA EL ANÁLISIS DE LA COMBUSTIÓN EXPERIMENTAL	66
CAPÍTULO 5	INSTALACIÓN EXPERIMENTAL	69
5.1	INTRODUCCIÓN	69
5.2	INSTALACIÓN	69
5.2.1	SISTEMA DE ALIMENTACIÓN	69
5.2.2	CALDERA DE COMBUSTIÓN	70
5.2.3	INSTALACIÓN DE DISIPACIÓN.....	73
5.3	SISTEMA DE CONTROL Y MEDIDA.....	74
5.4	METODOLOGÍA DE ENSAYO	75
CAPÍTULO 6	DATOS EXPERIMENTALES.....	81
6.1	INTRODUCCIÓN	81
6.2	EXPOSICIÓN DE LOS RESULTADOS.....	81
6.3	RESULTADOS.....	83
6.3.1	ENSAYO MUESTRA 1	83
6.3.2	ENSAYO MUESTRA 2	86
6.3.3	ENSAYO MUESTRA 3	89
6.3.4	ENSAYO MUESTRA 4	92

6.3.5	ENSAYO MUESTRA 5.....	95
6.3.6	ENSAYO MUESTRA 6.....	98
6.3.7	ENSAYO MUESTRA 7.....	101
6.3.8	ENSAYO MUESTRA 8.....	104
CAPÍTULO 7 ANÁLISIS DE RESULTADOS		107
7.1	INTRODUCCIÓN	107
7.2	EVOLUCIÓN DE LOS PARÁMETROS DE COMBUSTIÓN.....	107
7.2.1	ENSAYO MUESTRA 1.....	108
7.2.2	ENSAYO MUESTRA 2.....	111
7.2.3	ENSAYO MUESTRA 3.....	113
7.2.4	ENSAYO MUESTRA 4.....	115
7.2.5	ENSAYO MUESTRA 5.....	118
7.2.6	ENSAYO MUESTRA 6.....	121
7.2.7	ENSAYO MUESTRA 7.....	124
7.2.8	ENSAYO MUESTRA 8.....	127
7.2.9	COMPARACIÓN DE LAS VARIABLES MEDIAS.....	130
7.3	ESTUDIO DE LAS EMISIONES	131
7.3.1.	EMISIONES DE CO ₂	131
7.3.2.	EMISIONES DE CO.....	132
7.3.3.	EMISIONES DE NO _x	134
7.4	ESTUDIO DEL RENDIMIENTO.....	135
7.5	COMPARACIÓN FINAL	136
CAPÍTULO 8 CONCLUSIONES		139
8.1	CONCLUSIONES	139
8.2	DESARROLLOS FUTUROS.....	140
BIBLIOGRAFÍA.....		143
ANEXO 1.....		147

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO 3

Figura 3.1 Matriz cilíndrica.	25
Figura 3.2 Matriz plana.	26
Figura 3.3 Curva termogravimétrica de un combustible.	28
Figura 3.4 Bomba calorimétrica.	35
Figura 3.5 Dimensiones de un pélet y método de calibración.	37
Figura 3.6 Instrumental de cálculo de la densidad de partícula.	39
Figura 3.7 Muestra 1.	42
Figura 3.8 Muestra 2.	43
Figura 3.9 Muestra 3.	44
Figura 3.10 Muestra 4.	45
Figura 3.11 Muestra 5.	46
Figura 3.12 Muestra 6.	47
Figura 3.13 Muestra 7.	48
Figura 3.14 Muestra 8.	49

CAPÍTULO 4

Figura 4.1 Esquema etapas combustión partícula de biomasa.	55
Figura 4.2 Esquema de pérdidas y energía aprovechada.	60
Figura 4.3 Pantalla de los datos del combustible, el aire necesario y los gases generados para la muestra de estudio.	666
Figura 4.4 Pantalla de los datos recogidos del analizador de humos.	67
Figura 4.5 Pantalla con los cálculos y resultados del calor específico de los humos, emisiones de CO ₂ , pérdidas de combustión y rendimiento.	677

CAPÍTULO 5

Figura 5.1 Sistema de alimentación.	69
Figura 5.2 Componentes de la caldera de la instalación Thermj ⁿ ator II.	70
Figura 5.4 Esquema de una combustión descendente.	72
Figura 5.4 Oxidación gases en la cámara de combustión.	72
Figura 5.5 Instalación de disipación.	73
Figura 5.6 Caldera, depósito de inercia y depósito de alimentación.	74
Figura 5.7 Limpieza cámara de combustión.	75
Figura 5.8 Limpieza parrilla.	75
Figura 5.9 Limpieza de cenizas de la chimenea.	76
Figura 5.10 Limpieza del cenicero.	76
Figura 5.11 Parrilla cubierta de pélets.	76
Figura 5.12 Esquema del funcionamiento interno de la caldera.	79
Figura 5.13 Diagrama de flujo del proceso seguido durante los ensayos.	80

CAPÍTULO 7

Figura 7.1 Acumulación de inquemados en la parrilla.....	110
Figura 7.2 Estado final de la parrilla en la combustión de la muestra 4.....	117
Figura 7.3 Inquemados y escoria al final la combustión de la muestra 5....	120
Figura 7.4 Detalle de la escoria generada por la muestra 5	120
Figura 7.5 Parrilla al finalizar el ensayo de la muestra 6.....	123
Figura 7.6 Cámara de combustión tras el ensayo de la muestra 6.	123
Figura 7.7 Parrilla al parar la caldera durante el ensayo de la muestra 7. ..	126
Figura 7.8 Cámara de combustión tras el ensayo de la muestra 7.	126
Figura 7.9 Situación final de la parrilla en el ensayo de la muestra 7.....	126
Figura 7.10 Cámara de combustión tras el ensayo de la muestra 8.....	129
Figura 7.11 Situación de la parrilla finalizado el ensayo de la muestra 8....	129

ÍNDICE DE GRÁFICOS

CAPÍTULO 1

Gráfico 1.1 Consumo de energía primaria en el año 2013	2
Gráfico 1.2 Evolución de la sustitución de importaciones de combustibles fósiles (tep)	3
Gráfico 1.3 Producción de energía primaria del año 2013	3
Gráfico 1.4 Toneladas de CO ₂ evitadas.....	4

CAPÍTULO 7

Gráfico 7.1: Evolución temporal de TH y TC durante el ensayo 1.	108
Gráfico 7.2: Evolución temporal del índice de exceso para la muestra 1. ...	109
Gráfico 7.3: Evolución temporal de TH y TC durante el ensayo 2.	111
Gráfico 7.4: Evolución temporal del índice de exceso para la muestra 2. ...	112
Gráfico 7.5: Evolución temporal de TH y TC durante el ensayo 3.	113
Gráfico 7.6: Evolución temporal del índice de exceso para la muestra 3. ...	114
Gráfico 7.7: Evolución temporal de TH y TC durante el ensayo 4.	115
Gráfico 7.8: Evolución temporal del índice de exceso para la muestra 4. ...	116
Gráfico 7.9: Evolución temporal de TH y TC durante el ensayo 5.	118
Gráfico 7.10: Evolución temporal del índice de exceso para la muestra 5..	119
Gráfico 7.11: Evolución temporal de TH y TC durante el ensayo 6.	121
Gráfico 7.12: Evolución temporal del índice de exceso para la muestra 6..	122
Gráfico 7.13: Evolución temporal de TH y TC durante el ensayo 7.	124
Gráfico 7.14: Evolución temporal del índice de exceso para la muestra 7..	125
Gráfico 7.15: Evolución temporal de TH y TC durante el ensayo 8.	127
Gráfico 7.16: Evolución temporal del índice de exceso para la muestra 8..	128
Gráfico 7.17 Valores promedio de la temperatura de caldera y de humos..	130
Gráfico 7.18 Valores promedio del coeficiente de aire.....	131

Gráfico 7.19 Concentraciones de CO ₂ máx y CO ₂ en las muestras.	132
Gráfico 7.20 Emisiones de CO medidas en los ensayos de las muestras. ...	133
Gráfico 7.21 Emisiones de NO _x medidas en los ensayos de las muestras...	134
Gráfico 7.22 Rendimiento de la combustión para las muestras de estudio.	135
Gráfico 7.23 Comparación final de las muestras de estudio.....	137

ÍNDICE DE TABLAS

CAPÍTULO 2

Tabla 2.1: Biomasa forestal.....	10
Tabla 2.2: Biomasa agrícola.	10
Tabla 2.3: Biomasa ganadera.	10
Tabla 2.4: Biomasa industrial.....	10
Tabla 2.5: Biomasa urbana.	11
Tabla 2.6: Biomasa acuática.	11
Tabla 2.7: Biocombustibles sólidos.	11
Tabla 2.8: Biocombustibles líquidos.	11
Tabla 2.9: Biocombustibles gaseosos.	12
Tabla 2.10: Tipos de biomasa UBET.	12
Tabla 2.11: Tipos de biocombustibles UBET.	12
Tabla 2.12: Previsiones de biomasa forestal potencial.....	14
Tabla 2.13: Previsiones de biomasa forestal fácilmente valorizable (1)	14
Tabla 2.14: Previsiones de biomasa forestal fácilmente valorizable (2)	15
Tabla 2.15: Previsiones de cultivos energéticos herbáceos fácilmente valorizables en Castilla y León.....	16
Tabla 2.16: Previsiones de restos agrícolas en Castilla y León (1)	17
Tabla 2.17: Previsiones de restos agrícolas en Castilla y León (2)	18
Tabla 2.18: Previsiones de restos producción fácilmente valorizable de los restos de la industria de la madera en Castilla y León.....	19
Tabla 2.19: Previsiones de producción fácilmente valorizable de madera de residuos de construcción y demolición y residuos de parques y jardines en Castilla y León.....	20
Tabla 2.20: Síntesis de la producción potencial y fácilmente valorizable para 2015 en Castilla y León	21
Tabla 2.21: Síntesis de la producción potencial y fácilmente valorizable para 2020 en Castilla y León	22

CAPÍTULO 3

Tabla 3.1 Especificaciones de pélets de madera para uso no industrial.....	41
Tabla 3.2 Caracterización química, energética y física de la muestra 1.....	42
Tabla 3.3 Caracterización química, energética y física de la muestra 2.....	43
Tabla 3.4 Caracterización química, energética y física de la muestra 3.....	44

Tabla 3.5 Caracterización química, energética y física de la muestra 4.	45
Tabla 3.6 Caracterización química, energética y física de la muestra 5.	46
Tabla 3.7 Caracterización química, energética y física de la muestra 6.	47
Tabla 3.8 Caracterización química, energética y física de la muestra 7.	48
Tabla 3.9 Caracterización química, energética y física de la muestra 8.	49

CAPÍTULO 4

Tabla 4.1 Composición estándar del aire.	52
Tabla 4.2 Emisiones límite de CO, HC y partículas.....	65

CAPÍTULO 5

Tabla 5.1 Características Thermi ⁿ ator II – 30kW.....	71
Tabla 5.2 Parámetros de control de la instalación.....	74
Tabla 5.3 Características equipo de medida TESTO modelo 350S.	75
Tabla 5.4 Estados de trabajo de la caldera.	77

CAPÍTULO 6

Tabla 6.1 Datos de los ensayos: duración y combustible empleado	81
Tabla 6.2 Datos del display de la caldera en el ensayo de la muestra 1	83
Tabla 6.3 Análisis de humos del ensayo de la muestra 1.	84
Tabla 6.4 Parámetros de combustión de la muestra 1.....	84
Tabla 6.5 Necesidades estequiométricas de la muestra 1.	84
Tabla 6.6 Masa y volumen del comburente empleado para la muestra 1.....	85
Tabla 6.7 Masa y volumen estequiométrico de los gases productos de la muestra 1.	85
Tabla 6.8 Gases totales estequiométricos generados por la muestra 1.....	85
Tabla 6.9 Gases totales generados con exceso de aire por la muestra 1.....	85
Tabla 6.10 Cp de los gases de escape de la muestra 1.....	85
Tabla 6.11 Porcentajes de CO ₂ , pérdidas y rendimiento de la muestra 1.	85
Tabla 6.12 Datos del display de la caldera en el ensayo de la muestra 2.....	86
Tabla 6.13 Análisis de humos del ensayo de la muestra 2.....	87
Tabla 6.14 Parámetros de combustión de la muestra 2.	87
Tabla 6.15 Necesidades estequiométricas de la muestra 2.....	87
Tabla 6.16 Masa y volumen del comburente empleado para la muestra 2....	87
Tabla 6.17 Masa y volumen estequiométrico de los gases productos de la muestra 2.	88
Tabla 6.18 Gases totales estequiométricos generados por la muestra 2.	88
Tabla 6.19 Gases totales generados con exceso de aire por la muestra 2. ...	88
Tabla 6.20 Cp de los gases de escape de la muestra 2.....	88
Tabla 6.21 Porcentajes de CO ₂ , pérdidas y rendimiento de la muestra 2.	88
Tabla 6.22 Datos del display de la caldera en el ensayo de la muestra 3.....	89
Tabla 6.23 Análisis de humos del ensayo de la muestra 3.....	90
Tabla 6.24 Parámetros de combustión de la muestra 3.	90

Tabla 6.25 Necesidades estequiométricas de la muestra 3.	90
Tabla 6.26 Masa y volumen del comburente empleado para la muestra 3... ..	90
Tabla 6.27 Masa y volumen estequiométrico de los gases productos de la muestra 3.....	90
Tabla 6.28 Gases totales estequiométricos generados por la muestra 3.....	91
Tabla 6.29 Gases totales generados con exceso de aire por la muestra 3....	91
Tabla 6.30 Cp de los gases de escape de la muestra 3.	91
Tabla 6.31 Porcentajes de CO ₂ , pérdidas y rendimiento de la muestra 3.....	91
Tabla 6.32 Datos del display de la caldera en el ensayo de la muestra 4.	92
Tabla 6.33 Análisis de humos del ensayo de la muestra 4.	93
Tabla 6.34 Parámetros de combustión de la muestra 4.....	93
Tabla 6.35 Necesidades estequiométricas de la muestra 4.	93
Tabla 6.36 Masa y volumen del comburente empleado para la muestra 4... ..	94
Tabla 6.37 Masa y volumen estequiométrico de los gases productos de la muestra 4.....	94
Tabla 6.38 Gases totales estequiométricos generados por la muestra 4.....	94
Tabla 6.39 Gases totales generados con exceso de aire por la muestra 4....	94
Tabla 6.40 Cp de los gases de escape de la muestra 4.	94
Tabla 6.41 Porcentajes de CO ₂ , pérdidas y rendimiento de la muestra 4.....	94
Tabla 6.42 Datos del display de la caldera en el ensayo de la muestra 5.	95
Tabla 6.43 Análisis de humos del ensayo de la muestra 5.	96
Tabla 6.44 Parámetros de combustión de la muestra 5.....	96
Tabla 6.45 Necesidades estequiométricas de la muestra 5.	96
Tabla 6.46 Masa y volumen del comburente empleado para la muestra 5... ..	96
Tabla 6.47 Masa y volumen estequiométrico de los gases productos de la muestra 5.....	97
Tabla 6.48 Gases totales estequiométricos generados por la muestra 5.....	97
Tabla 6.49 Gases totales generados con exceso de aire por la muestra 5....	97
Tabla 6.50 Cp de los gases de escape de la muestra 5.	97
Tabla 6.51 Porcentajes de CO ₂ , pérdidas y rendimiento de la muestra 5.....	97
Tabla 6.52 Datos del display de la caldera en el ensayo de la muestra 6.	98
Tabla 6.53 Análisis de humos del ensayo de la muestra 6.	99
Tabla 6.54 Parámetros de combustión de la muestra 6.....	99
Tabla 6.55 Necesidades estequiométricas de la muestra 6.	99
Tabla 6.56 Masa y volumen del comburente empleado para la muestra 6.	100
Tabla 6.57 Masa y volumen estequiométrico de los gases productos de la muestra 6.....	100
Tabla 6.58 Gases totales estequiométricos generados por la muestra 6... ..	100
Tabla 6.59 Gases totales generados con exceso de aire por la muestra 6.. ..	100
Tabla 6.60 Cp de los gases de escape de la muestra 6.	100
Tabla 6.61 Porcentajes de CO ₂ , pérdidas y rendimiento de la muestra 6....	100
Tabla 6.62 Datos del display de la caldera en el ensayo de la muestra 7. ...	101
Tabla 6.63 Análisis de humos del ensayo de la muestra 7.	102

Tabla 6.64	Parámetros de combustión de la muestra 7.	102
Tabla 6.65	Necesidades estequiométricas de la muestra 7.	102
Tabla 6.66	Masa y volumen del comburente empleado para la muestra 7.	102
Tabla 6.67	Masa y volumen estequiométrico de los gases productos de la muestra 7.	103
Tabla 6.68	Gases totales estequiométricos generados por la muestra 7. .	103
Tabla 6.69	Gases totales generados con exceso de aire por la muestra 7.	103
Tabla 6.70	Cp de los gases de escape de la muestra 7.	103
Tabla 6.71	Porcentajes de CO ₂ , pérdidas y rendimiento de la muestra 7. ..	103
Tabla 6.72	Datos del display de la caldera en el ensayo de la muestra 8.	104
Tabla 6.73	Análisis de humos del ensayo de la muestra 8.	105
Tabla 6.74	Parámetros de combustión de la muestra 8.	105
Tabla 6.75	Necesidades estequiométricas de la muestra 8.	105
Tabla 6.76	Masa y volumen del comburente empleado para la muestra 8.	106
Tabla 6.77	Masa y volumen estequiométrico de los gases productos de la muestra 8.	106
Tabla 6.78	Gases totales estequiométricos generados por la muestra 8. .	106
Tabla 6.79	Gases totales generados con exceso de aire por la muestra 8.	106
Tabla 6.80	Cp de los gases de escape de la muestra 8.	106
Tabla 6.81	Porcentajes de CO ₂ , pérdidas y rendimiento de la muestra 8. ..	106

CAPÍTULO 7

Tabla 7.1	Emisiones de CO expresadas en mg/Nm ³	133
Tabla 7.2	Emisiones de NO _x expresadas en mg/MJ.....	135

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN

1.1.1. INTRODUCCIÓN

La situación energética actual, ha propiciado el desarrollo de nuevas políticas energéticas para alcanzar escenarios sostenibles, caracterizados por la diversificación y la eficiencia.

Las estrategias emprendidas están orientadas a la reducción del consumo de energía y del impacto ambiental que implica, principalmente por el empleo de los combustibles fósiles.

Así, la Directiva 2009/28/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de abril de 2009, relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables, marca los propósitos de la política energética comunitaria y establece los objetivos que deberán cumplir los Estados miembros en los próximos años.

Para España, estos objetivos se concretan en que las energías renovables representen un 20% del consumo final bruto de energía, con un porcentaje en el transporte del 10%, en el año 2020. ^[1]

Con motivo de la anterior Directiva y en vista del cumplimiento de sus objetivos vinculantes, el Estado español remitió a la Comisión Europea, CE, el Plan de Acción Nacional de Energías Renovables ^[2], PANER, en el año 2010.

Posteriormente, el Consejo de Ministros celebrado el 11 de noviembre de 2011 aprobó el Plan de Energías Renovables ^[3] 2011-2020 (PER 2011-2020), elaborado por el Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE). Este Plan establece un conjunto de medidas a desarrollar por el Gobierno para lograr los objetivos fijados en la Directiva 2009/28/CE, a partir de unos escenarios técnicos, económicos y energéticos. ^[4]

1.1.2. ESCENARIO ENERGÉTICO

La política energética en España ha avanzado de manera armonizada con los países europeos. [2]

Uno de los retos fijados en España es dar respuesta a la elevada dependencia energética que históricamente ha caracterizado el sector.

Según datos del Ministerio de Industria, Energía y Turismo, MINETUR, en el pasado año 2013, el grado de autoabastecimiento de energía primaria fue del 27.9%, es decir, la dependencia energética se situó en el 72.1 %.

Como muestra el Gráfico 1.1, el petróleo representa el 43.55% del consumo de energía primarias, seguido del gas natural, con un 21.46%, y la energía nuclear con un 12.16%.

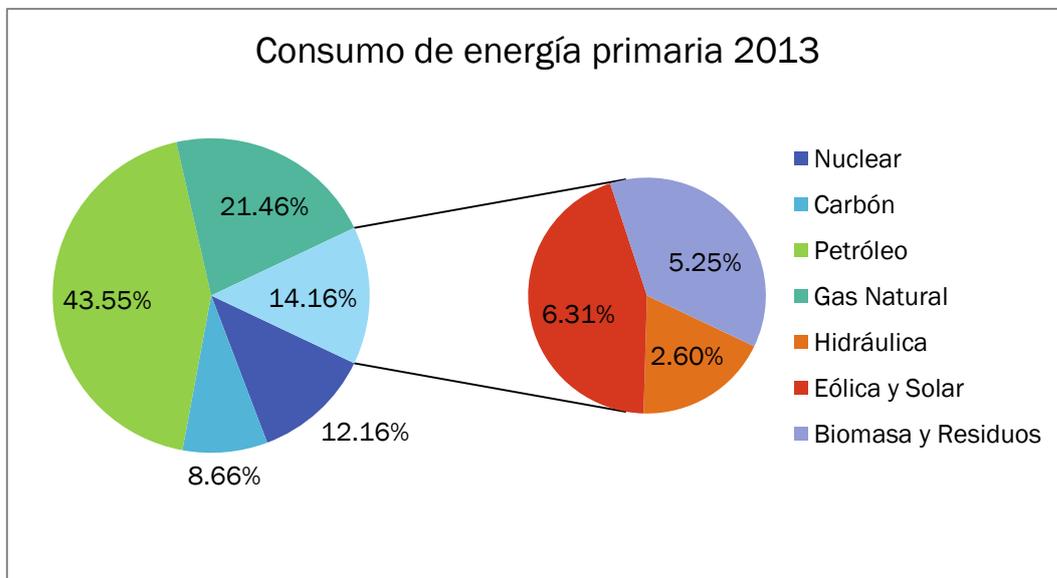


Gráfico 1.1 Consumo de energía primaria en el año 2013. [5]

Teniendo en cuenta la falta de recursos energéticos fósiles en España, las energías renovables son la única alternativa para un autoabastecimiento energético sostenible.

En los últimos años, el descenso del consumo energético ha implicado un aumento de la contribución de las energías renovables y la disminución de la dependencia.

Las energías renovables evitaron, en 2012, la importación de 13.480.857 toneladas equivalentes de petróleo, lo que supuso un ahorro económico equivalente a 2.429 millones de euros, Gráfico 1.2.

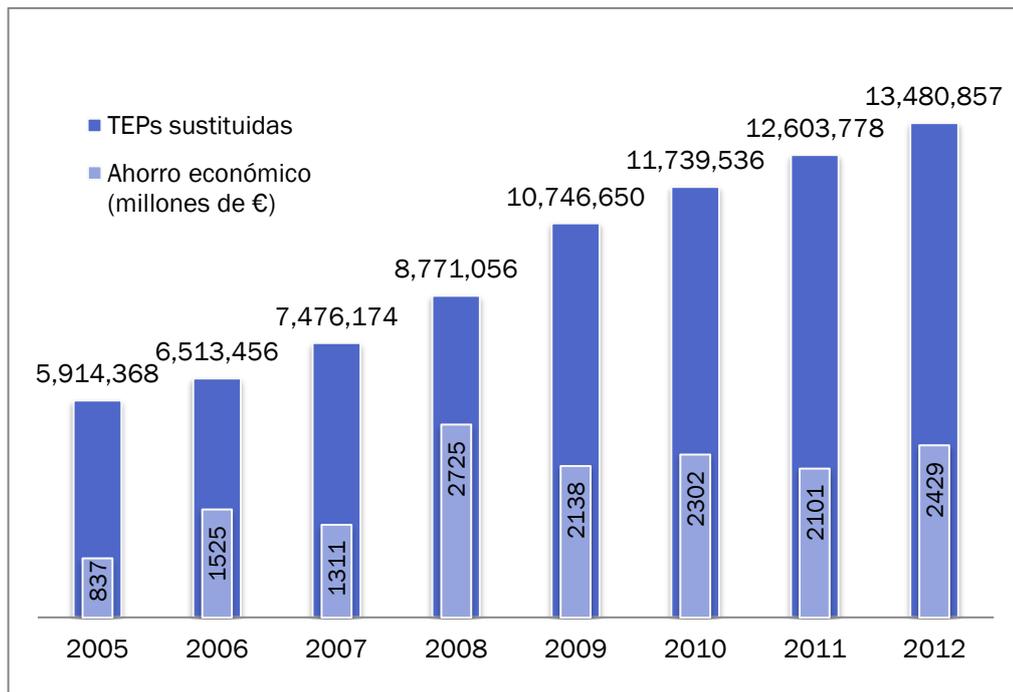


Gráfico 1.2 Evolución de la sustitución de importaciones de combustibles fósiles (toneladas equivalentes de petróleo). [4]

En cuanto a la producción de energía primaria, en el pasado ejercicio, 2013, las energías renovables representaron el 49.91% de la producción primaria total, Gráfico 1.3.

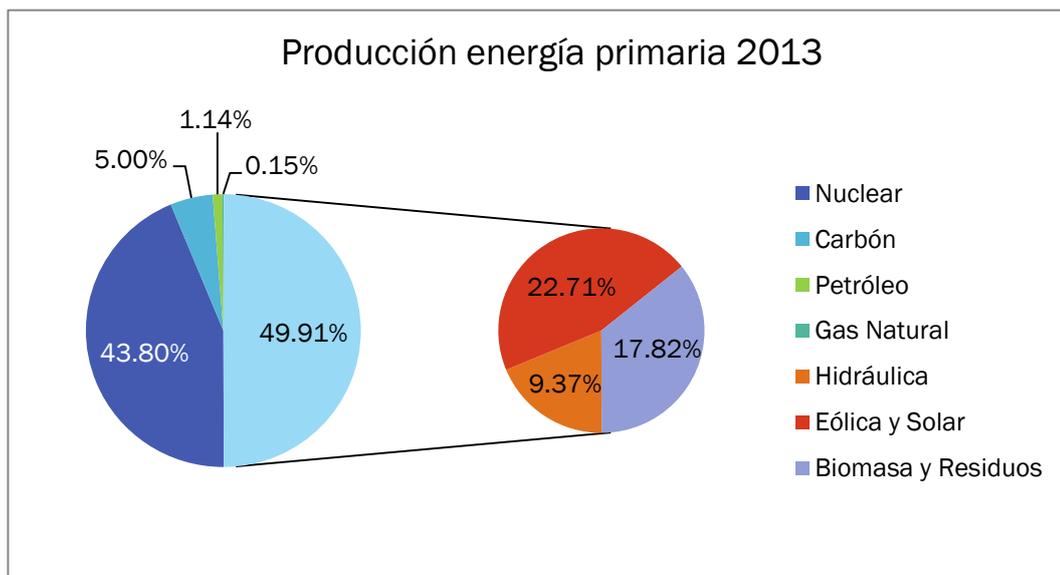


Gráfico 1.3 Producción de energía primaria del año 2013. [5]

En el año 2012, la aportación de las energías renovables llegó al 1% del Producto Interior Bruto, PIB, ingresando 10.563 millones de euros. Las energías renovables son contribuidoras fiscales y mejoran nuestra balanza comercial. [4]

En ámbito medioambiental, también juegan a favor de la reducción de los gases de efecto invernadero. Sus emisiones de CO₂ se consideran neutras, por lo que, el remplazo de las energías fósiles por las energías renovables supone un ahorro económico al dejar de pagar derechos de emisión.

El Gráfico 1.4 expone las toneladas de CO₂ evitadas en los últimos años, y el ahorro que conllevó. Como señala, en el año 2012 se dejaron de emitir 36.745.548 toneladas de CO₂, ahorrando 270,8 millones de euros.

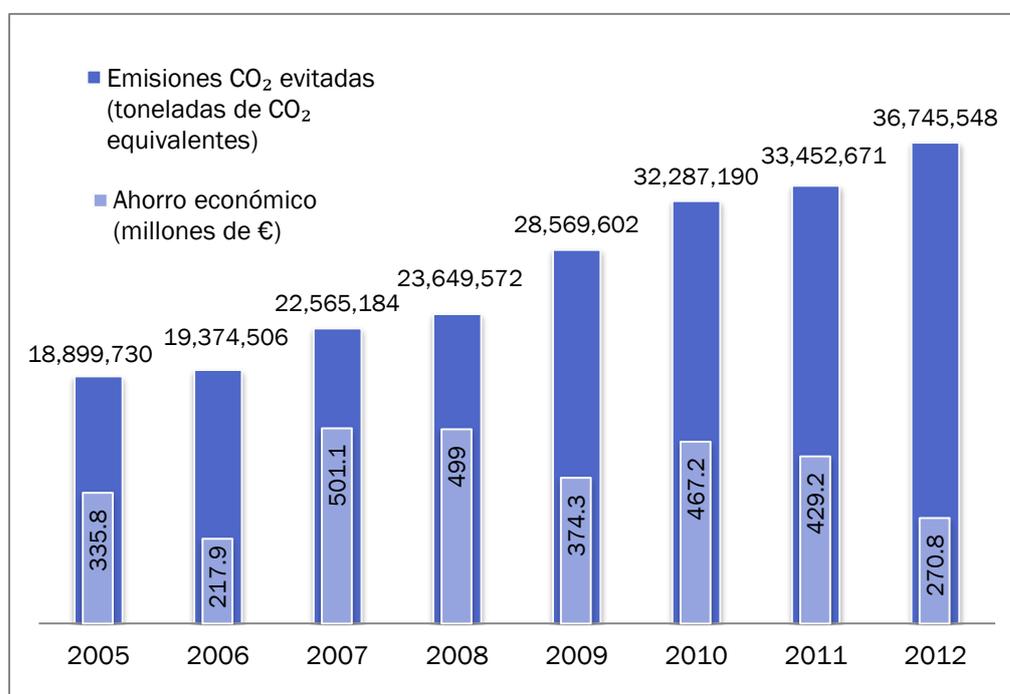


Gráfico 1.4 Toneladas de CO₂ evitadas. [4]

Igualmente, con su empleo se evitan la emisión de otros gases altamente contaminantes a la atmósfera como son el NO_x y el SO₂.

1.1.3. LA BIOMASA

La biomasa es una fuente de energía renovable clave en el cumplimiento de los objetivos energéticos que se han planteado tanto en Europa como en España.^[6]

La Junta de Castilla y León, acorde con las directrices marcadas, aprobó en el año 2010, el Plan Regional de Ámbito Sectorial de la Bioenergía de Castilla y León, PBCyL, para el fomento del uso de la biomasa, siempre bajo la premisa de un consumo controlado y sostenible de los recursos naturales.

La biomasa potencia la revitalización y el mantenimiento de actividades agrícolas y forestales, generando nuevos empleos y convirtiéndose en una herramienta para el desarrollo rural. Por otro lado, contribuye a la valorización de residuos, a la reducción del riesgo de incendios y al mantenimiento de las masas forestales.

Con los biocombustibles, la biomasa se presenta como la alternativa más realista a corto y medio plazo para alcanzar el 10% de energías renovables en el transporte fijado como objetivo para 2020.

Dentro de las energías renovables térmicas, el PER 2011/2020 atribuye a la biomasa 4653 ktep de los 5357 ktep fijados como objetivo final, y es que la capacidad que dispone para la generación de calor, hace de ella una opción rentable y eficaz, ya sea para su aplicación en usos residenciales (fundamentalmente calefacción y agua caliente sanitaria) o como parte de procesos industriales.

No obstante, el desarrollo en las aplicaciones térmicas es menor que el previsto. Las razones se encuentran en los altos costos de inversión de los equipos térmicos, en la incertidumbre en el suministro, en el mantenimiento que requieren estas instalaciones y en la falta de incentivos.

En el sector doméstico, cada vez adquiere una mayor presencia. Así lo demuestra el Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios^[7], RITE, que en la última modificación del 13 de abril del 2013 incluye y amplía aspectos para la regulación de las instalaciones de biomasa.

Mientras, en el sector industrial, la utilización térmica de está prácticamente reducida al autoconsumo de los residuos propios de algunas industrias.^[6]

Por otro lado, actividades complementarias a la actividad principal del sector térmico, como son la recogida, movilización de las biomasa y la densificación de los recursos, suponen más de un tercio de la contribución de la biomasa térmica al PIB.^[4]

1.1.4. LOS PÉLETS

El hecho de que las diferentes biomásas puedan ser utilizadas sin problemas en múltiples tecnologías de conversión energética, amplía sus campos de actuación y adquiere mayores garantías en cuanto a su consolidación en los mercados.

Para que esto sea posible, es necesario homogeneizar las características y este propósito se alcanza, por ejemplo, con la peletización del recurso.

Los pélets es un combustible eficiente, limpio, que no presenta riesgos de explosión ni es tóxico. Sus procesos de transporte, llenado del depósito y combustión están totalmente automatizados. Gracias a su alta densidad, precisan menores espacios de almacenamiento para una misma autonomía.

Disponen de utilidad tanto en el sector industrial como en el térmico. En el primer caso, es empleado en centrales de generación eléctrica, mientras que en el segundo, la aplicación es principalmente el abastecimiento residencial.

Hace dos años se preveía que el consumo del pélet industrial se dispararía; por el contrario, el pélet para uso térmico es el que adquiere protagonismo en Europa actualmente. ^[8]

España dispone de un gran potencial para su producción. Según datos del European Pellet Council, EPC, la producción de pélets en el año 2012 fue de 250.000 toneladas. Sin embargo, el volumen de producción no llegó al 30% de su capacidad, situada en 950.000 toneladas para ese mismo año. ^[9]

Dentro del panorama nacional, Castilla y León se ha consolidado como líder en la fabricación de pélets. Aporta el 20% de la producción nacional con siete plantas que pueden alcanzar las 160.000 toneladas al año. Más de la mitad del producto regional procede de Burgos, que se sitúa como la primera provincia de España, con 90.000 toneladas al año. ^[10]

De nuevo, datos aportados por el EPC indicaron que, con fines térmicos, en España se consumieron 175.000 toneladas en el año 2012, ascendiendo hasta las 200.000 en 2013. El número de calderas instaladas en el pasado año fue de 16064 presentando un incremento casi del 20% respecto del año anterior. ^[9] Por tanto, estos resultados muestran la tendencia positiva en la que se encuentra esta industria.

1.2 JUSTIFICACIÓN

En el contexto internacional, europeo, nacional y regional se apuesta por la biomasa como una energía con gran potencial, lo que justifica su inclusión en las investigaciones y estudios que se llevan a cabo sobre el desarrollo de nuevas alternativas energéticas.^[11]

En esa búsqueda de conseguir impulsar las energías renovables, aumentando la calidad y dando nuevas soluciones que mejoren las aplicaciones existentes, se encuentra Cenit Solar, empresa en la que desarrollé mi periodo de prácticas universitarias.

Su departamento I+D+i ha realizado diversos estudios de investigación relacionados con la biomasa.^[12,13] Como ejemplos se prestan los estudios sobre la viabilidad de la densificación y del aprovechamiento térmico de biomasas lignocelulósicas como el cardo o el sarmiento.

Por otra parte, de su experiencia en el sector de la instalación de sistemas de calefacción de biomasa densificada, se reincide en la necesidad de que los pélets que estén en el mercado cumplan con las normas de calidad para los que se ha ensayado y certificado la tecnología desarrollada. Esto tiene especial importancia en los equipos de pequeño y mediano tamaño como son los utilizados en el sector doméstico.

En ese aspecto se justifica el presente trabajo. Alcanzar las prestaciones de eficiencia y en emisiones será clave para convencer a un mercado, que en España, aún se encuentra en fase de desarrollo.

1.3 OBJETIVOS

El objetivo general de este Trabajo Fin de Grado con título “Análisis y caracterización de la combustión de pélets en una caldera Solarfocus TII30 de llama invertida” es el estudio de la combustión de ocho muestras de pélets diferentes en una instalación de biomasa.

A partir de ahí, se buscará determinar cuáles son las muestras que mejor comportamiento tienen y mejor optimizan las prestaciones de la instalación en base a la eficiencia y las emisiones contaminantes producidas.

Para ello, se procederá a:

- Realizar un estudio de los recursos disponibles en Castilla y León, con el fin de establecer el alcance que podría llegar a tener la producción de biomasa densificada en la Comunidad.
- Estudiar los biocombustibles sólidos. Conocer las propiedades físicas, químicas y energéticas que les caracterizan y determinan su idoneidad para su aplicación a los procesos energéticos.
- Caracterizar las muestras empleadas.
- Elaborar un estudio de la combustión para la determinación de la estequiometría y las emisiones del proceso térmico desarrollado.
- Diseñar un protocolo de ensayo para la preparación de la instalación, la realización de las combustiones, el control de las variables de la instalación y la adquisición de datos. Todo ello para alcanzar condiciones homogéneas y estacionarias en toda la experimentación.
- Realizar análisis de los productos de cada combustión con el fin de cuantificar las emisiones producidas.
- Recopilar los datos experimentales de las variables controladas.
- Analizar el desarrollo de las combustiones. En caso de haber incidentes durante las mismas, realizar una búsqueda de los motivos inmediatos.
- Analizar las emisiones producidas y la eficiencia alcanzada para cada uno de los ensayos.
- Concluir, en base a los análisis realizados, qué muestras se han mostrado como las más óptimas para el trabajo en la instalación.

CAPÍTULO 2

POTENCIAL DE BIOMASA EN CASTILLA Y LEÓN

2.1 INTRODUCCIÓN

En el presente capítulo se establece la definición de biomasa y se aplica una clasificación de la misma, debido a la gran diversidad existente en la procedencia de estos materiales.

A su vez, se realiza una valorización del potencial previsible para los futuros años de cada uno de los tipos señalados en el territorio de Castilla y León. Esta es una labor ardua para la cual es preciso el empleo de metodologías asociadas a estos fines como el programa WISDOM^[14].

Por último, se recogen los potenciales de biomasa energética que la Junta de Castilla y León expuso en el Plan de la Bioenergía de Castilla y León, PBCyL.^[15]

2.2 DEFINICIÓN DE BIOMASA

Existen diferentes y variadas definiciones y clasificaciones para los conceptos de biomasa, biocombustible y bioenergía, tanto en la literatura nacional como internacional.

En el presente, se ha optado por la definición establecida en la *Unified Bioenergy Terminology*, UBET, por la *Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura*, FAO, y el *Comité Europeo de Estandarización*, CEN, según los cuales:

La **biomasa** es el material de origen biológico, excepto el procedente de formaciones geológicas y que se ha fosilizado.

El **biocombustible** es el combustible elaborado directa o indirectamente a partir de biomasa.

La **bioenergía** es la energía de los biocombustibles.

Por tanto, se identifica la biomasa con el recurso natural revalorizado, mientras que el biocombustible es el material del que se extrae directamente la energía. La diferencia entre biomasa y biocombustible es a veces muy difusa al poder emplearse algunos recursos naturales directamente como combustible sin requerir un significativo grado de transformación previo. Es el caso de la leña, cáscaras de frutos secos, paja o lejías negras.

2.3 CLASIFICACIÓN DE LA BIOMASA

Son muchos los materiales de origen orgánico admisibles en la definición de biomasa, por consiguiente, es preciso realizar una clasificación adecuada. En ese sentido, el PBCyL agrupa todos los tipos de biomasa en seis grandes bloques: biomasa forestal, biomasa agrícola, biomasa ganadera, biomasa industrial, biomasa urbana y biomasa acuática.

Así acorde al origen, la biomasa se clasifica como sigue:

Tabla 2.1: Biomasa forestal.

BIOMASA FORESTAL	
Fracción leñosa	Restos de tratamientos silvícolas
	Restos de aprovechamiento por el sistema tradicional
	Copas aprovechadas de forma integrada
Fracción maderable	Coníferas
	Frondosas

Tabla 2.2: Biomasa agrícola.

BIOMASA AGRÍCOLA	
Cultivo energético	Herbáceo de regadío
	Herbáceo de secano
	Leñoso
Resto agrícola	Resto agrícola herbáceo de regadío
	Resto herbáceo de secano
	Resto agrícola leñoso

Tabla 2.3: Biomasa ganadera.

BIOMASA GANADERA	
Estiércol vacuno	
Purín	
Gallinaza	

Tabla 2.4: Biomasa industrial.

BIOMASA INDUSTRIAL	
Industria de la madera	Subproducto de la madera
	Corteza
	Legía negra
Industria agroalimentaria	Residuo y subproducto de origen vegetal
	Subproducto animal
	Lodo de EDAR industrial

Tabla 2.5: Biomasa urbana.

BIOMASA URBANA	
Fracción orgánica de residuos urbanos	
Aceite vegetal usado	
Lodo de EDAR urbanas	
Madera recuperada	Residuos de envases de madera
	Residuo de construcción y demolición
	Madera de podas en calles, parques y jardines
	Residuo voluminoso de madera

Tabla 2.6: Biomasa acuática.

BIOMASA ACUÁTICA	
Alga	
Fitoplancton	

A su vez, el PBCyL establece una clasificación para los biocombustibles según su estado:

Tabla 2.7: Biocombustibles sólidos.

BIOCOMBUSTIBLES SÓLIDOS	
Grado de transformación bajo	Leña
	Paja
	Fruto o similar
	Cáscara o similar
Grado de transformación medio	Astilla
	Hebra
	Paca
	Harina
Grado de transformación alto	Pélet
	Briqueta
	Carbón vegetal
Otros	

Tabla 2.8: Biocombustibles líquidos.

BIOCOMBUSTIBLES LÍQUIDOS	
Sin transformación industrial bioenergética <i>per se</i>	Aceite vegetal puro
	Legía negra
Producto principal de una transformación industrial bioenergética	Biodiesel
	Bioetanol
	Biometanol
Subproducto de una transformación industrial bioenergética	Bio-EFBE
	Bio-DME
	Otros carburantes sintéticos
	Líquido piroleñoso
Otros	

Tabla 2.9: Biocombustibles gaseosos.

BIOCOMBUSTIBLES GASEOSOS	
Digestión anaerobia	Gas de vertedero
	Gas de tratamiento biológico
Otros procesos	Gas de tratamiento termoquímico
	Biohidrógeno
	Otros gases sintéticos
Otros	

La FAO propuso en 2004 otra forma de clasificación tanto para la biomasa como para los biocombustibles en función de la naturaleza básica de cada material. Siguiendo dichos criterios, en las Tablas 2.10 y 2.11, la UBET establece:

Tabla 2.10: Tipos de biomasa UBET.

TIPOS DE BIOMASA	
Woody biomass	(biomasa leñosa)
Herbaceous biomass	(biomasa herbácea)
Biomass from fruits and seeds	(biomasa de frutos y semillas)
Others/mixtures	(otros/mezclas)

Tabla 2.11: Tipos de biocombustibles UBET.

TIPOS DE BIOCOMBUSTIBLE	
Woodfuels	(Biocombustibles leñosos)
Agrofuels	(Agrocombustibles)
Municipal by-products	(Subproductos municipales)
Others/mixtures	(otros/mezclas)

2.4 DISPONIBILIDAD DE BIOMASA EN CASTILLA Y LEÓN

El conocimiento de los recursos disponibles o previsiblemente disponibles es básico para el desarrollo de una actividad industrial. Conocer la potencialidad de la biomasa incentivará la inversión en tecnologías y proyectos empresariales que den un salto en el progreso de esta fuente renovable. No obstante, la dificultad de esta tarea, debida a la extensión de la biomasa y del territorio, conlleva la obtención de informaciones muy diversas y poco precisas. Por tanto, será necesario realizar análisis de escenarios geográficos localizados para aumentar la exactitud de los resultados.

En dicho afán, en 2007, la Junta de Castilla y León, JCyL, realizó una planificación de los recursos bioenergéticos de la región con el denominado Plan de la Bioenergía de Castilla y León, PBCyL.

Para alcanzar informaciones fiables y poder elaborar estrategias energéticas a largo plazo, la JCyL solicitó asistencia técnica a la FAO. Este organismo proporcionó el programa WISDOM (Metodología de Mapeo de Oferta y Demanda Integrada de Dendrocombustibles), el cual desarrolló junto con la Universidad Nacional de México.

La metodología aplicada con dicho programa permite identificar, cuantificar y localizar la producción y el consumo de biocombustibles y otros eventuales recursos de biomasa aún no utilizados, dentro de un área geográfica específica. Está basada en Sistemas de Información Geográfica (SIG), que ofrecen nuevas posibilidades de combinar o integrar información estadística y espacial sobre la producción (oferta) y el consumo (demanda) de combustibles leñosos (leña, carbón vegetal y otros dendrocombustibles).

La colaboración de la FAO, la JCyL y CESEFOR^[16] en el proyecto, destacó la importancia que tiene la dendroenergía (ya sea como leña, carbón vegetal o subproductos agroindustriales) para la producción de energía (térmica y eléctrica) en el sector residencial, comercial e industrial en Castilla y León. Además, los resultados mostraron que existe margen para un importante desarrollo de la bioenergía pero que este necesita compatibilizarse con el funcionamiento de la industria existente.

En el PBCyL se recopilaron los resultados alcanzados de las previsiones de biomasa para los próximos años.

A continuación, se presenta la situación y estimaciones de los tipos de biomasa establecidos en Castilla y León que podrían servir como materia prima para la obtención de biomasa densificada, la cual es objeto de estudio en este trabajo.

2.4.1 BIOMASA FORESTAL

Se entiende por biomasa forestal cualquier vegetal procedente de terrenos forestales que sea apto para producir energía. Se incluyen árboles completos, parte de ellos, tocones y matas.

El PBCyL realiza varias clasificaciones: en función del proceso de obtención y el destino final, establece la biomasa forestal en producto forestal o en subproducto; en función del tamaño del recurso, como fracción maderable o fracción leñosa. Además, establece diferentes tipologías.

Castilla y León es la Comunidad Autónoma con mayor capital forestal en España. Un 52% del territorio de Castilla y León es forestal y, más concretamente, un 32% corresponde a superficie arbolada. ^[15]

El PBCyL establece unas previsiones de biomasa forestal potencial de Castilla y León hasta el 2030, Tabla 2.12, entendiendo por tal el crecimiento anual total de los montes de Castilla y León.

Pero debido a las limitaciones tecnológicas, económicas y ambientales, el aprovechamiento máximo de biomasa forestal será muy inferior a los valores de la biomasa potencial estimada. Así, a su vez establece un escenario más realista con la estimación de la cantidad de biomasa que fácilmente puede ser valorizada en los sucesivos años, Tabla 2.13 (1) y 2.14 (2).

Tabla 2.12: Previsiones de biomasa forestal potencial. ^[15]

		2015	2020	2025	2030		
Existencias	Volumen maderable (10 ³ x m ³ /año cc)		186.556	199.790	211.103	222.202	
	Biomasa Total	Material anhidra (10 ³ x t/año)	244.809	261.809	276.634	291.179	
		Material Verde (10 ³ x t/año)	488.934	523.618	553.267	582.357	
Potencial existencias	Crecimiento medio de volumen maderable (10 ³ x m ³ /año cc)		8.740	9.360	9.890	10.410	
	Biomasa potencial Total	Material anhidra	10 ³ x t/año	11.454	12.266	12.961	13.642
			ktep/año	5.200	5.600	5.900	6.200
		Material Verde	10 ³ x t/año	22.907	24.532	25.921	27.284
			ktep/año	4.600	5.000	5.200	5.500

Tabla 2.13: Previsiones de biomasa forestal fácilmente valorizable (1). ^[15]

		2015	2020	2025	2030	
Biomasa forestal fácilmente valorizable (10 ³ x t/año en verde)	Fracción leñosa	Restos de tratamientos selvicolas	48	60	60	60
		Restos de aprovechamiento por el sistema tradicional	95	124	123	133
		Copas aprovechables de forma integrada	380	494	490	529
		total	523	678	673	722
		Coníferas	306	474	632	829
		Fronosas	837	1.025	1.135	1.223
		Total	1.143	1.499	1.767	2.052
	TOTAL		1.666	2.177	2.440	2.774

Tabla 2.14: Previsiones de biomasa forestal fácilmente valorizable (2). [15]

			2015	2020	2025	2030	
Energía Primaria anhidra de la biomasa forestal fácilmente valorizable (ktep/año)	Fracción leñosa	Restos de tratamientos selvícolas	11	14	14	14	
		Restos de aprovechamiento por el sistema tradicional	21	28	28	30	
		Copas aprovechables de forma integrada	85	111	110	119	
		Total	117	153	152	153	
	Fracción maderable	Coníferas	121	159	194	230	
		Fronosas	117	178	203	223	
		Total	257	337	397	452	
	TOTAL			374	490	549	625

2.4.2 CULTIVOS ENERGÉTICOS

A partir de la definición que establecida por la Directiva 2003/30 CE se entiende por cultivos energéticos aquellos cultivos no alimentarios destinados a la producción de energía que se utilizan fundamentalmente en la producción de biocarburantes o energía térmica y eléctrica producida a partir de la biomasa.

Los cultivos energéticos son clasificados por varios criterios; en función del aprovechamiento final del cultivo, se distinguen los cultivos herbáceos, los oleaginosos, los amiláceos, los oligosacáridos, los lignocelulósicos y los cultivos leñosos de corta rotación; según el carácter tradicional o nuevo del cultivo.

Con los cultivos energéticos, la producción de biomasa puede ser planificada y especializada con criterios exclusivamente energéticos. Igualmente, aportan mayor seguridad en el suministro del recurso en el tiempo.

Los principales cultivos energéticos en Castilla y León son de oleaginosas (colza y girasol) o cereales (cebada y trigo) orientados a la elaboración de biocarburantes. Por otro lado, los cultivos tradicionales como la remolacha o la patata son empleados únicamente para fines alimentarios. En cuanto a los cultivos leñosos de corta duración son, salvo alguna excepción de carácter experimental, inexistentes en Castilla y León. También existen a nivel experimental otros cultivos herbáceos, como cardo, pataca, etc.

Las continuas modificaciones en las normativas agrícolas comunitarias, reforma del PAC, modificación de los mecanismos de pago, la poca adaptación de algunos de los cultivos a las condiciones edafoclimáticas de la región, la falta de tradición y el desconocimiento de los nuevos cultivos por

parte de los agricultores, la competencia del mercado alimentario y sobre todo la baja rentabilidad de los cultivos hacen que estos no tenga el desarrollo previsto.

Han sido tan variables las superficies de cultivo en los últimos años que las estimaciones basadas en tendencias no pueden aplicarse de una forma fiable. Aun así, el PBCyL presenta una estimación fácilmente valorizable de las superficies y de la producción de energía hasta el año 2030, Tabla 2.15, en base a la producción potencial de anteriores años, entendiendo como tal, la que podría aportar la superficie agrícola de Castilla y León.

Tabla 2.15: Previsiones de cultivos energéticos herbáceos fácilmente valorizables en Castilla y León. ^[15]

Origen de la producción		2015	2020	2025	2030	
SECANO	Superficie secano potencial (barbecho incluido)	2.897.347				
	Fácilmente valorizable	% fácilmente valorizable	11%	15%	16%	17%
		Superficie de secano(ha)	318.708	434.802	483.576	492.549
		Producción en verde (t/año)	748.964	1.021.315	1.089.402	1.157.490
		Producción anhidra (t/año)	851.599	888.544	947.780	1.007.016
		E. primaria anhidra (ktep/año)	261	356	379	403
REGADÍO	Superficie regadío potencial (ha)	510.000				
	Fácilmente valorizable	% fácilmente valorizable	4,5%	8%	9%	11%
		Superficie de regadío(ha)	22.950	40.800	45.900	56.100
		Producción en verde(t/año)	114.750	204.000	229.500	280.500
		Producción anhidra (t/año)	99.833	177.480	199.665	244.035
		E. primaria anhidra (ktep/año)	40	71	80	98
TOTAL	Superficie (ha)	341.658	475.402	509.476	548.649	
	Producción (t/año)	751.431	1.066.024	1.147.445	1.251.051	
	E. primaria anhidra (ktep/año)	301	426	459	501	

2.4.3 RESTOS AGRÍCOLAS

Quedan englobados en esta categoría los residuos agrícolas procedentes de cultivos herbáceos como la paja del cereal, los cañotes de maíz, etc., como los precedentes de cultivos leñosos como la vid, los frutales, el olivo.

Los potenciales energéticos vienen definidos por los de los cultivos de los que proceden. La estimación potencial realizada por el PBCvL se muestra en las Tablas 2.16 (1) y 2.17 (2).

Tabla 2.16: Previsiones de restos agrícolas en Castilla y León (1). ^[15]

			2015	2020	2025	2030
HERBÁCEOS SECANO	Potencial potencial	Superficie (ha)	2.069.883			
		t/ha y año, en verde	2			
		t/año, en verde	4.139.766			
		t/año, anhidras	3.642.994			
		E. primaria anhidra (ktep/año)	1.455			
	Producción fácilmente valorizable	Restos fácilmente valorizables (%)	9	12	13	13
		t/año, en verde	372.579	496.772	538.170	538.170
		t/año, anhidra	327.869	437.159	473.589	473.589
		E. primaria anhidra (ktep/año)	131.1	174.9	189.4	189.4
	Barbecho (producción potencial cereales-ha/año)		300.000			
	Producción potencial en verde (t/año)		600.000			
	Energía primaria anhidra (ktep/año)		240			
HERBÁCEOS REGADÍO	Potencial potencial	Superficie (ha)	510.000			
		t/ha y año, en verde	6.75			
		t/año, en verde	3.442.500			
		t/año, anhidras	2.857.275			
		E. primaria anhidra (ktep/año)	1.058			
	Producción fácilmente valorizable	Restos fácilmente valorizables (%)	9	12	13	
		t/año, en verde	309.825	413.100	447.525	447.525
		t/año, anhidra	257.155	342.873	371.446	171.437
		E. primaria anhidra (ktep/año)	103	137	149	69

Tabla 2.17: Previsiones de restos agrícolas en Castilla y León (2). ^[15]

			2015	2020	2025	2030
LEÑOSOS	Potencial potencial	Superficie (ha)	85.943			
		t/ha y año, en verde	2.8			
		t/año, en verde	240.640			
		t/año, anhidas	214.856			
		E. primaria anhida (ktep/año)	86			
	Producción fácilmente valorizable	Restos fácilmente valorizables (%)	6	8	10	11
		t/año, en verde	14.438	19.251	24.064	26.470
		t/año, anhida	12.891	17.188	21.486	23.634
		E. primaria anhida (ktep/año)	5.2	6.9	8.6	9.5
	Total fácilmente valorizable (incluido barbecho)	t/año, en verde	1.296.842	1.529.123	1.609.759	1.612.165
E. primaria anhida (ktep/año)		519	612	644	645	
Total fácilmente valorizable (sin barbecho)	t/año, en verde	696.842	929.123	1.009.759	1.021.155	
	E. primaria anhida (ktep/año)	279	372	404	405	

2.4.4 RESTOS DE LA INDUSTRIA DE LA MADERA

Esta biomasa recoge los residuos y subproductos que se generan en el desarrollo de la actividad de la industria de la madera y que pueden ser valorizados energéticamente. El PBCyL incluye también los rollos de madera importada y reciclada, destinada a esta industria y de la cual, parte puede ser derivada a revalorización energética.

El origen de estos restos puede ser la industria de primera transformación (aserraderos, industria del desenrollo y fábricas de tableros,...), de la industria de la pasta de papel (legías negras) o también la industria de segunda transformación (industria de carpintería y ebanistería). Esta última no adquiere mayor relevancia respecto a la primera debido a la existencia de barnices, colas y otras sustancias comunes en sus restos.

En el PBCyL se hace una estimación hasta el año 2030 con unas hipótesis de crecimiento del sector maderero, aumento de las cortas en los montes de Castilla y León y una reducción de importaciones tanto de madera en rollo como de madera reciclada. Las estimaciones previstas podrán ser significativamente mayores con las previsiones de ayudas del PAC, la Política Agraria Común.

La Tabla 2.18 muestra las previsiones de producción fácilmente valorizable de los restos de la industria de la madera en Castilla y León.

Tabla 2.18: Previsiones de restos producción fácilmente valorizable de los restos de la industria de la madera en Castilla y León. ^[15]

			2015	2020	2025	2030
SUBPROD. DE TRANSFORMACIÓN INDUSTRIAL (RESTOS + CORTEZAS + LEJÍAS NEGRAS)	RESTOS MADERA (SIN CORTEZA)	t/año anhidro	195.000	303.000	345.000	390.000
		t/año humedad en origen	273.000	424.000	483.000	546.000
		Ktep/año anhidro	88	136	155	175
	CORTEZA	t/año anhidro	64.000	89.000	93.000	115.000
		t/año humedad en origen	122.000	169.000	177.00	218.000
		Ktep/año anhidro	31	42	45	55
	TOTAL SUBPRODUCTOS	t/año anhidro	259.000	392.000	438.000	505.000
		t/año humedad en origen	395.000	593.000	660.000	764.000
		Ktep/año anhidro	119	178	200	230
OTRAS FRACCIONES	IMPORTACIÓN MADERA EN ROLLO	t/año anhidro	21.000	25.000	30.000	34.000
		t/año humedad en origen	41.000	50.000	59.000	68.000
		Ktep/año anhidro	9	11	13	15
	MADERA RECICLADA	t/año anhidro	64.000	91.000	116.000	148.000
		t/año humedad en origen	71.000	102.000	130.000	166.000
		Ktep/año anhidro	28	41	52	67
TOTAL	t/año anhidro		344.000	508.000	584.000	687.000
	t/año humedad en origen		507.000	745.000	849.000	998.000
	Ktep/año anhidro		156	230	265	312

2.4.5 BIOMASA DE ORIGEN URBANO Y DE OTRAS INDUSTRIAS

Constituye la biomasa de origen urbano todos aquellos residuos catalogados como urbanos y que por su contenido orgánico pueden ser valorizables energéticamente. También abarca los residuos industriales no peligrosos, biodegradables no procedentes de la industria de la madera ni de la agroalimentaria (p.ej. lodos de plantas depuradoras, madera de construcción y demolición y residuos de envases de madera)

Entre la gran diversidad considerada, pueden verse agrupados los residuos de envases de madera, madera procedente de construcción y demolición, restos de poda y jardinería urbanos y residuos voluminosos de madera.

La Tabla 2.19 recoge las estimaciones de las previsiones fácilmente valorizables que realiza el PBCyL para el grupo anteriormente definido.

Tabla 2.19: Previsiones de producción fácilmente valorizable de madera de residuos de construcción y demolición y residuos de parques y jardines en Castilla y León. ^[15]

				2015	2020	2025	2030
Materia de residuos de construcción y demolición	Producción total	Obras	t/año	80.000	90.000	100.000	
		Total anhidro	t/año	76.000	85.500	95.000	
			Ktep/año	31,9	35,9	39,9	
	Producción fácilmente valorizable	Obras	t/año	56.000	90.000	100.000	
		Total anhidro	t/año	53.200	85.500	95.000	
			Ktep/año	22,3	35,9	39,9	
Residuos podas y jardines	Producción total	Materia húmeda	t/año	25.511	26.021	26.541	27.072
		Materia anhidra	t/año	17.857	18.215	18.579	18.950
			Ktep/año	7,9	8,1	8,2	8,4
	Producción fácilmente valorizable	Materia húmeda	t/año	19.133	19.516	19.906	20.304
		Materia anhidra	t/año	13.005	13.265	13.934	14.213
			Ktep/año	5,8	5,9	6,2	6,3

2.4.6 SÍNTESIS

Finalmente, se exponen en las Tablas 2.20 y 2.21 a modo de resumen global, una síntesis de la producción potencial y fácilmente valorizable estimada para los años 2015 y 2020 en Castilla y León, según el Plan de la Bioenergía de Castilla y León, PBCyL, de las tipologías abordadas.

Tabla 2.20: Síntesis de la producción potencial y fácilmente valorizable para 2015 en Castilla y León. ^[15]

2015			BM POTENCIAL			BM FÁCILMENTE VALORIZABLE			
			Recurso en origen (t/año)	Superficie (ha/año)	Energía primaria (ktep/año)	Recurso en origen (t/año)	Superficie (ha/año)	Energía primaria (ktep/año)	
BM forestal	Fracción leñosa		14.000.000	–	3.157	523.000	41.900	117	
	Fracción maderable		8.875.000	–	1.997	1.143.000	21.600	257	
	TOTAL		22.875.000	3.000.000	5.154	1.666.000	63.500	374	
BM agrícola	Cultivos energéticos	Herbáceos	regadío	2.550.000	510.000	1.020	114.750	22.950	40
			secano	6.827.534	2.897.347	2.512	748.964	318.708	261
		Leñosos		15.300.000	510.000	3.519	127.000	4.200	29
		TOTAL		24.677.534	–	7.051	990.714	345.858	330
	Restos agrícolas	Herbáceos	regadío	2.550.000	510.000	1.058	309.825	45.900	103
			secano	4.139.766	2.669.883	1.457	372.579	186.289	131
		Leñosos		226.164	92.612	97	11.308	4.631	5
		TOTAL		6.915.930	3.272.495	2.612	693.712	266.820	239
	TOTAL		31.593.464	–	9.663	1.684.426	–	569	
	BM industrial	Industrias de madera		1.590.000	–	468	507.000	–	156
Industrias agroalimentarias		977.367	–	115	186.693	–	22		
TOTAL		2.567.367	–	583	693.693	–	178		
BM urbana	Madera de residuos construcción-demolición		80.000	–	32	56.000	–	22	
	Residuos podas de calles y jardines		25.511	–	8	19.133	–	6	
	TOTAL		105.511	–	40	75.133	–	28	

Tabla 2.21: Síntesis de la producción potencial y fácilmente valorizable para 2020 en Castilla y León. ^[15]

2020			BM POTENCIAL			BM FÁCILMENTE VALORIZABLE			
			Recurso en origen (t/año)	Superficie (ha/año)	Energía primaria (ktep/año)	Recurso en origen (t/año)	Superficie (ha/año)	Energía primaria (ktep/año)	
BM forestal	Fracción leñosa		15.000.000	–	3.381	678.000	45.500	153	
	Fracción maderable		9.500.000	–	2.139	1.499.000	28.300	337	
	TOTAL		24.500.000	3.000.000	5.520	2.177.000	73.800	490	
BM agrícola	Cultivos energéticos	Herbáceos	regadío	2.550.000	510.000	1.020	204.000	40.800	71
			secano	6.827.534	2.897.347	2.512	1.021.315	434.602	355
		Leñosos		15.300.000	510.000	3.519	200.000	6.700	45
		TOTAL		26.677.534	–	7.051	1.425.315	482.102	471
	Restos agrícolas	Herbáceos	regadío	2.550.000	510.000	1.058	306.000	61.200	102
			secano	4.139.766	2.669.883	1.457	471.933	280.569	195
		Leñosos		226.164	92.612	97	18.093	7.409	8
		TOTAL		6.915.930	3.272.495	2.612	796.026	349.178	305
	TOTAL		31.593.464	–	9.663	2.221.341	–	776	
	BM industrial	Industrias de madera		1.869.000	–	547	745.000	–	230
Industrias agroalimentarias		994.904	–	117	229.461	–	27		
TOTAL		2.863.904	–	664	974.461	–	257		
BM urbana	Madera de residuos construcción-demolición		90.000	–	36	90.000	–	36	
	Residuos podas de calles y jardines		26.021	–	8	19.516	–	6	
	TOTAL		116.021	–	44	109.516	–	42	

CAPÍTULO 3

BIOCOMBUSTIBLES SÓLIDOS

3.1 INTRODUCCIÓN

La materia prima biomásica tiene a menudo unas características poco favorables para su uso directo como combustible: como la heterogeneidad en formas y tamaños, la elevada humedad, la baja densidad, etc. [17] Por este motivo, las tendencias actuales para el aprovechamiento energético de la biomasa aplican tratamientos que mejoran sus propiedades iniciales optimizando su utilización como combustibles.

La densificación es un modo de producir biocombustibles sólidos, fácilmente transportables, manejables y almacenables, con una calidad comercial óptima. Los biocombustibles sólidos densificados son las briquetas y los pélets.

En los ensayos realizados se utilizaron pélets de diversas procedencias, por este motivo, en el resto de capítulo se amplía el concepto del pélet junto con su proceso de obtención y las características aplicables.

3.2 PÉLETS

Según la UNE EN 14588^[18], el pélet es un biocombustible densificado hecho de biomasa pulverizada con o sin aditivos, usualmente con forma cilíndrica, longitud aleatoria típicamente entre 3.15 mm y 40 mm y extremos rotos.

Al aumentar la densidad del material de partida se mejora el almacenaje del producto y su transporte, abaratándolo.

Los pélets son fabricados principalmente a partir de residuos de la industria maderera como serrines y virutas, o también a partir de residuos forestales, agrícolas, agroindustriales y de los cultivos energéticos.

El Comité Técnico CEN/TC 335^[19] de los biocombustibles sólidos distingue entre dos clases de pélets, según el origen de su materia prima:

- Pélets de madera: su procedencia se encuentra en la biomasa leñosa del monte, de una plantación o de otra madera virgen, en los subproductos y residuos de la industria del procesado de la madera, o en la madera usada.
- Pélets no leñosos: son obtenidos de la biomasa herbácea, de la biomasa de frutos o conjuntos y de mezclas de biomasa.

El proceso de obtención de los pélets difiere en función de las características del material de origen. Es decir, propiedades como el contenido de humedad, la distribución de tamaños de partículas, la densidad,... tienen una gran influencia en la producción.

A continuación, se presentan las principales etapas de la fabricación de pélets.

3.2.1. PROCESO DE PELETIZADO

En la mayoría de las ocasiones será necesario acondicionar los productos para las posteriores etapas hasta lograr las condiciones necesarias para la densificación. La cantidad de etapas dependerá de la materia prima, la forma en que se presente y sus características. En esencia, esta fase de **pretratamiento** consiste en dotar a la materia prima del tamaño y del contenido de humedad adecuados.

Los principales procesos aplicados son los siguientes:

A. Recepción

Se agrupan las materias primas en función de los distintos tamaños y humedades. También son clasificadas según el tipo de calidad.

B. Fraccionamiento mecánico

En el caso de materia de gran tamaño, como residuos forestales y agrícolas obtenidos tras podas, desbroces, etc., será necesario cortarlos, descortezarlos y astillarlos para facilitar las operaciones posteriores.

C. Secado

La materia cuyo contenido de humedad sea superior al permitido deberá ser sometida a un proceso de secado. El objetivo son niveles de humedad entorno al 13 - 15% partiendo de valores de hasta el 50 - 60%.

Existen dos métodos: el secado natural y el secado forzado.

El secado natural está limitado por las condiciones climáticas del lugar. Además presentan riesgos como la fermentación, el desarrollo de bacterias... Para el secado forzado pueden ser empleados sistemas neumáticos o rotatorios. Los primeros, orientados para residuos de pequeño tamaño y baja humedad, se basan en el arrastre mediante un flujo térmico que extrae la humedad. Los secadores rotatorios de tipo tromel se aplican a fracciones gruesas y/o materiales muy húmedos. ^[20]

D. Molienda y tamizado

Si el material ya hubiese estado seco, tras el astillado, se procedería a reducir aun más el tamaño de las partículas para optimizar la fabricación de los pélets. Se debe llegar a los 3 - 4 mm. Para ello se emplean molinos de martillo.

En cuanto al tamizado, resulta imprescindible para el aprovechamiento diferencial de las distintas fracciones granulométricas.

Una vez se dispone de las condiciones adecuadas, se procede a la propia operación de peletizado.

E. Peletizado

El principio operativo más común se basa en la presión ejercida por una serie de rodillos sobre el material, situados sobre una matriz metálica dotada de orificios de calibre variable. La materia prima atraviesa la matriz al mismo tiempo que se comprime. A la salida de la matriz, un dispositivo compuesto de cuchillas corta los cilindros, aún blandos, a la medida de la longitud deseada. [18]

En las tecnologías existentes, las prensas pueden tener los orificios en el fondo del cilindro, matrices planas, o en las paredes laterales, matrices cilíndricas o anulares.

En este proceso se alcanzan elevadas temperaturas del orden de 90 a 120°C y se consigue reducir entre 2 - 3% de humedad. [23]

La compactación puede ser natural, a partir de la lignina de la propia materia prima que actúa como aglomerante, o mediante la utilización de elementos químicos, aditivos, no contaminantes.

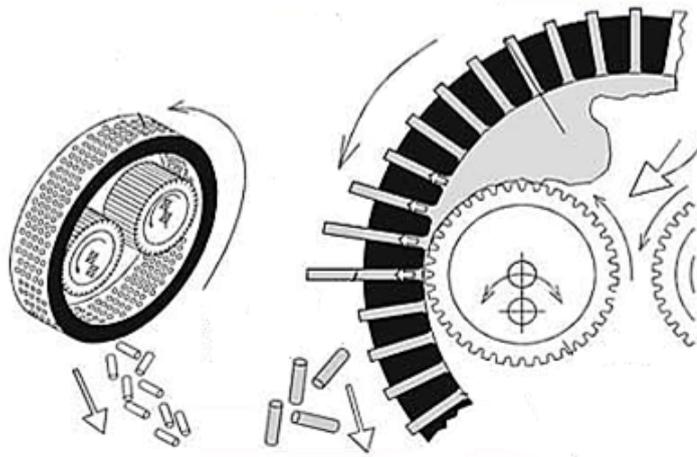


Figura 3.1 Matriz cilíndrica. [21]

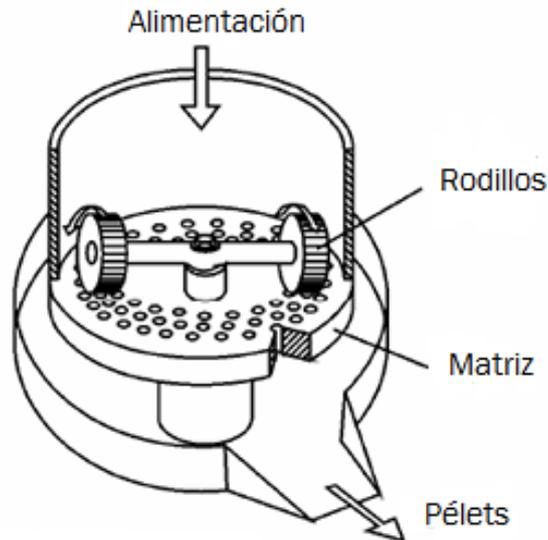


Figura 3.2 Matriz plana. [22]

Una vez extruidos los pélets, se les aplica las últimas operaciones que constituyen el **postratamiento**:

F. Enfriamiento

A la salida de la prensa, se hacen pasar los pélets por una fase de enfriamiento mediante un flujo de aire para conferirle durabilidad y resistencia, ya que un descenso rápido de la temperatura de los pélets aumenta su dureza. [13]

G. Cribado

Se procede a tamizar por última vez los pétes para eliminar el serrín y el polvo generado.

H. Ensacado/Almacenado

Existen dos opciones para finalizar el procesamiento de los pélets: o bien se ensacan en sacos de 15 kg y posteriormente se paletizan (manual o automáticamente); o bien se almacenan a granel para venderlos directamente o distribuidos en bigbags, remolques o camiones.

3.3 CARACTERIZACIÓN DE LOS COMBUSTIBLES

Una caracterización completa aporta información para determinar si un producto es susceptible de ser empleado en sistemas y equipos de combustión. Para evaluar las posibilidades de aprovechamiento energético es determinante analizar sus propiedades físicas, químicas y energéticas. [13]

3.3.1. CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS

Los parámetros que aportan la descripción química del combustible se determinan mediante el análisis inmediato y el análisis elemental.

A partir del análisis inmediato se obtienen los porcentajes en masa de los contenidos de humedad, volátiles, cenizas y carbono fijo de la biomasa en cuestión. Los compuestos volátiles y el carbono fijo almacenan la energía de la biomasa mientras que la humedad y las cenizas son la fracción inerte.

Por su parte, el análisis elemental permite establecer el porcentaje en masa de carbono (C), hidrógeno (H) nitrógeno (N), oxígeno (O), azufre (S) y cloro (Cl). A excepción del cloro, todos ellos intervienen en las reacciones de oxidación y, por tanto, definen el potencial calorífico del biocombustible.

Antes de explicar cada uno de los análisis en mayor profundidad, es importante diferenciar que los resultados pueden ser aportados en dos bases diferentes: en base húmeda, *bh*, y en base seca, *bs*. Todos los resultados han de estar referidos a una base para poder comparar correctamente.

A. ANÁLISIS INMEDIATO

El análisis inmediato es realizado mediante analizadores termogravimétricos basados en las características del proceso de calentamiento progresivo de una muestra de biomasa. Lo que ocurre es que a medida que se calienta la masa se van desprendiendo una serie de productos y elementos del material. En primer lugar se desprende la humedad, tras ella las sustancias volátiles, después se produce la quema del carbono fijo para finalmente restar las cenizas. Cada una de las fracciones se obtiene a una temperatura distinta, con ciertas condiciones atmosféricas y ocasionando una pérdida de peso concreta en el material.

Por tanto, los analizadores termogravimétricos registran la pérdida de peso experimentada a medida que se calienta la muestra en condiciones controladas de temperatura, velocidad de calentamiento y atmósfera.

En la figura 3.3 se muestra la evolución de las temperaturas y el peso de la muestra durante un ensayo termogravimétrico.

En ella se observa que el mayor contenido en peso es de los compuestos volátiles (70–90%) seguido del carbono fijo (10–30%) y de las cenizas (1–20%). La cantidad de humedad es muy variable.

A continuación, se abordan cada una de las fracciones tratadas y lo que implican en el aprovechamiento energético del material.

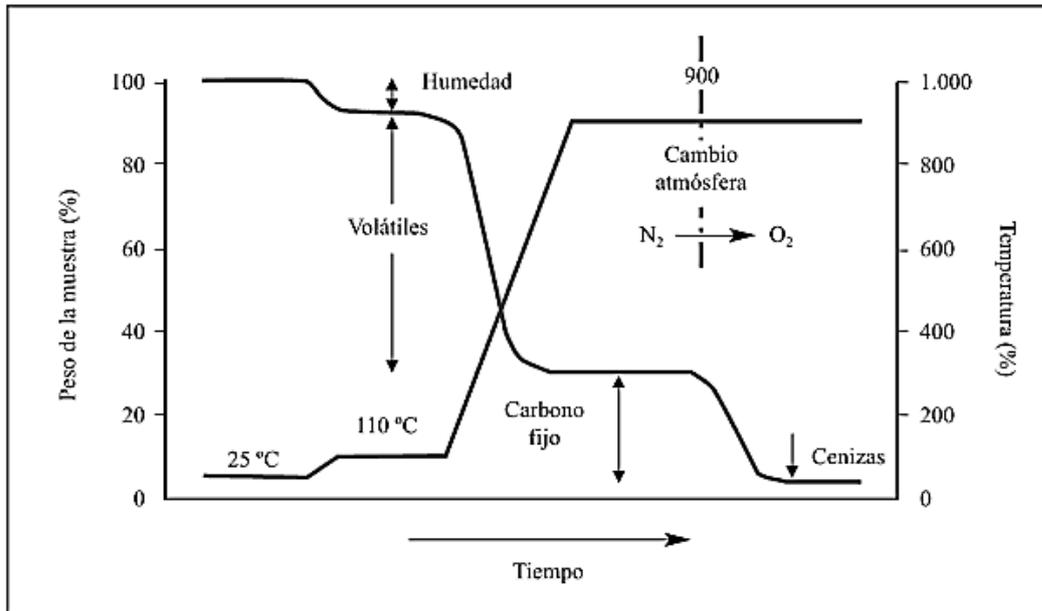


Figura 3.3 Curva termogravimétrica de un combustible. [24]

- **Humedad**

La Norma UNE EN 14774^[25] establece el método de ensayo mediante el secado en estufa. En él se somete a la muestra a una temperatura de 105°C hasta que la masa se mantenga constante.

Según la precisión buscada se aplican una serie de correcciones por fenómenos como la flotabilidad, consistente en la pérdida de peso por el aumento de temperatura del material.

El porcentaje de humedad se calcula a partir de la pérdida de masa de la muestra y generalmente es expresado en base húmeda, ecuación 3.1, aunque en ocasiones se hace en base seca, ecuación 3.2.

$$M_{bh} = 100 \cdot \frac{m_{0m} - m_{ms}}{m_{0m}} \quad (Ec. 3.1)$$

$$M_{bs} = 100 \cdot \frac{m_{0m} - m_{ms}}{m_{ms}} \quad (Ec. 3.2)$$

donde

M_{bh} es la humedad en base húmeda (%)

M_{bs} es la humedad en base seca (%)

m_{0m} es la masa inicial de la muestra (g)

m_{ms} es la masa de la muestra seca (g)

Éste análisis adquiere una gran importancia debido a la influencia de la humedad en aspectos como el aprovechamiento energético (a mayor humedad menor aprovechamiento), la densidad aparente (la humedad es un peso añadido sin valor energético), el aumento del consumo de energía en los pretratamientos de la biomasa o la disminución de la calidad del combustible favoreciendo la aparición de hongos, bacterias, etc.,.

- **Volátiles**

Acorde a la UNE EN 15148^[26], la materia volátil se determina mediante la pérdida de masa que experimenta la muestra menos la debida a la pérdida de humedad, cuando el biocombustible sólido se calienta durante 7 minutos a 900°C, aproximadamente, sin contacto con el aire.

Por tanto, el contenido de materia volátil de la muestra, expresado en porcentaje en peso y en base seca, se calcula mediante la ecuación 3.3.

$$V_{bs} = \left[\frac{100 \cdot m_{mc}}{m_{0m}} - M_{bs} \right] \cdot \left(\frac{100}{100 - M_{bs}} \right) \quad (Ec. 3.3)$$

donde

V_{bs}	es la materia volátil de la muestra en base seca (%)
m_{0m}	es la masa inicial de la muestra (g)
m_{mc}	es la masa de la muestra calentada (g)
M_{bs}	es el contenido de humedad en base seca (%)

- **Cenizas**

Las cenizas es un residuo sólido procedente de la materia prima biomásica al someterla a un proceso de combustión.

El contenido de cenizas queda determinado mediante el procedimiento expuesto en la UNE EN 14775^[27]. Este trata de calentar una muestra del biocombustible en aire bajo condiciones estrictamente controladas de tiempo y peso a una temperatura controlada de 550° aproximadamente. Con ello se produce una pérdida de masa en la muestra a partir de la cual se contabiliza el contenido de cenizas.

De tal forma que el contenido de cenizas en base seca queda expresado como muestra la ecuación 3.4:

$$A_{bs} = \frac{m_c}{m_{0m}} \cdot 100 \cdot \frac{100}{100 - M_{bs}} \quad (Ec. 3.4)$$

donde

A_{bs}	es el contenido de cenizas en base seca (%)
m_c	es la masa de cenizas (g)
m_{0m}	es la masa inicial de la muestra (g)
M_{bs}	es el contenido de humedad en base seca (%)

Como consecuencia del contenido de cenizas en el combustible se obtiene una reducción de la energía disponible. Es decir, a mayor cantidad de cenizas menor es el aprovechamiento energético disponible en el combustible y por tanto peor es su calidad como tal.

El tratamiento posterior que recibe la ceniza suele ser en forma de residuo, aunque otras veces, debido a su alto contenido en minerales, se presenta como un óptimo fertilizante del suelo.

- **Carbono fijo**

El carbono fijo es la fracción residual del combustible que resta una vez se ha pirolizado el material volátil durante el ensayo expuesto en la UNE EN 15148^[26], y habiendo descontado las cenizas.

Por tanto, su cuantificación se obtiene mediante la ecuación 3.5:

$$C_{F,bs} = 100 - V_{bs} - A_{bs} \quad (Ec. 3.5)$$

donde

$C_{F,bs}$	es el contenido de carbono fijo en base seca (%)
V_{bs}	es el contenido de material volátil en base seca (%)
A_{bs}	es el contenido de cenizas en base seca (%)

En el caso de que los valores estén referidos en base húmeda se emplea la ecuación 3.6:

$$C_{F,bh} = 100 - M_{bh} - V_{bh} - A_{bh} \quad (Ec. 3.6)$$

donde

$C_{F,bh}$	es el contenido de carbono fijo en base húmeda (%)
M_{bh}	es el contenido de humedad en base húmeda (%)
V_{bh}	es el contenido de material volátil en base húmeda (%)
A_{bh}	es el contenido de cenizas en base húmeda (%)

B. ANÁLISIS ELEMENTAL

La determinación fiable de carbono, hidrógeno y nitrógeno es importante para el control de calidad y los resultados se pueden usar como parámetros de entrada para los cálculos aplicados a la combustión de los biocombustibles sólidos. [28]

El nitrógeno interviene en la formación los NO_x , óxidos de nitrógeno. Se tratan de gases contaminantes desarrollados durante la combustión. En el mismo sentido, el carbono forma parte de las emisiones de CO_2 . Por tanto, tanto el contenido de nitrógeno como el de carbono tiene una gran importancia mediomambiental.

En cuanto al contenido de hidrógeno es relevante para el cálculo del poder calorífico neto.

Los ensayos a aplicar en la determinación de los contenidos de los elementos mencionados vienen descritos en la Norma UNE EN 15104. [28]

El procedimiento presentado consiste en combustionar una muestra de biomasa en presencia de oxígeno de tal forma que los productos gaseosos obtenidos, principalmente dióxido de carbono, vapor de agua y nitrógeno o nitrógeno elemental, sean recolectados en tubos de adsorción para su posterior cuantificación.

El método más fiable para determinar el contenido de nitrógeno es el método Kjeldahl.

Con los datos obtenidos, se registran los resultados en base seca y como porcentaje en masa, usando las ecuaciones 3.7, 3.8 y 3.9 para los cálculos:

- Contenido en carbono en base seca, C_{bs} :

$$C_{bs} = C_d \cdot \frac{100}{100 - M_d} \quad (\text{Ec. 3.7})$$

- Contenido en nitrógeno en base seca, N_{bs} :

$$N_{bs} = N_d \cdot \frac{100}{100 - M_d} \quad (\text{Ec. 3.8})$$

- Contenido en hidrógeno en base seca, H_{bs} :

$$H_{bs} = \left(H_d - \frac{M_d}{8.937} \right) \cdot \frac{100}{100 - M_d} \quad (\text{Ec. 3.9})$$

donde

- d es determinado;
- M_d es el contenido de humedad de la muestra para análisis general cuando se realiza.

Respecto a los contenidos de azufre y cloro son variables en los biocombustibles sólidos. Su determinación es significativa ya que durante la combustión, generalmente, se transforman en óxidos de azufre y cloruros que contribuyen a los efectos de corrosión y a las emisiones contaminantes.

La Norma EN 15289 [29] plantea como mejor opción para obtener dichos contenidos la realización de una combustión con oxígeno en una bomba de oxígeno cerrada. Una ventaja del método es que la digestión se puede realizar en relación con la determinación del poder calorífico de acuerdo a la Norma EN 14918 [30]. Existen otros métodos como la descomposición en recipientes cerrados, la combustión a alta temperatura en un horno tubular y el método Eschka.

Los resultados se registran en base seca y como porcentaje en masa, usando las ecuaciones 3.10, 3.11 y 3.12 para los cálculos.

- Contenido de cloro:

$$Cl_{bs} = \frac{(c - c_0) \cdot V}{m} \cdot 100 \cdot \frac{100}{(100 - M_d)} \quad (Ec. 3.10)$$

donde

- Cl_{bs} es el contenido de cloro en base seca (%)
- d es determinado
- c es la concentración de cloruro en la disolución (mg/l)
- c_0 es la concentración de cloruro en la disolución del ensayo del blanco (mg/l)
- V es el volumen de la disolución (l)
- m es la masa de la porción de ensayo utilizada (mg)
- M_d es el contenido de humedad de la muestra de ensayo en (%)

- Contenido en azufre:

$$S_{bs} = \frac{(c - c_0) \cdot V}{m} \cdot 0.3338 \cdot 100 \cdot \frac{100}{(100 - M_d)} \quad (Ec. 3.11)$$

donde

S_{bs}	es el contenido de azufre en base seca (%)
d	es determinado
c	es la concentración de sulfato en la disolución (mg/l)
c_0	es la concentración de sulfato en la disolución del ensayo del blanco (mg/l)
V	es el volumen de la disolución (l)
m	es la masa de la porción de ensayo utilizada (mg)
0.3338	es la relación estequiométrica de las masas molares relativas del azufre y sulfato.
M_d	es el contenido de humedad de la muestra de ensayo en (%)

En cuanto al porcentaje de oxígeno se calcula como la diferencia entre el 100% menos la suma de los porcentajes de los elementos anteriores:

$$O_{bs} = 100 - C_{bs} - N_{bs} - H_{bs} - Cl_{bs} - S_{bs} \quad (Ec. 3.12)$$

donde

O_{bs}	es el contenido de oxígeno en base seca (%)
----------	---

Los porcentajes, en peso, de estos elementos, para una biomasa sin humedad, se sitúan en torno al 30-60% en el caso del carbono, el 30-40% para el oxígeno, seguidamente el hidrógeno rondaría el 5-6% y por último el nitrógeno, el azufre y el cloro se establecerían por debajo del 1%.

De esta manera, el análisis elemental de la biomasa permite estimar a partir de un balance de materia la cantidad de productos que generarán en su combustión y la cantidad de comburente necesaria en cada caso. También se puede estimar su poder calorífico.

3.3.2. CARACTERÍSTICAS ENERGÉTICAS

El conocimiento de la capacidad energética disponible en un biocombustible es fundamental para determinar las características de una instalación. Por ejemplo, la cantidad necesaria del combustible para cubrir la potencia demandada.

Existen múltiples parámetros que caracterizan los combustibles energéticamente: la conductividad térmica, el calor específico, la reactividad, la capacidad de autoignición. No obstante, el principal parámetro empleado es el poder calorífico.

El poder calorífico de un biocombustible sólido es la cantidad de energía desprendida por unidad de masa al oxidarse completamente en condiciones normalizadas, a presión o volumen constante, para una temperatura de referencia de 25°C.

Se distinguen dos formas de poder calorífico en función del estado en que se encuentra el agua, proveniente de la humedad y de la combustión del hidrógeno del combustible, en los productos de la combustión:

- En el **poder calorífico superior** (PCS) o bruto (PCB): el H₂O se encuentra en estado líquido y, por tanto, se desarrolla un aporte de calor debido a la condensación del vapor de agua de los gases de combustión.
- En el **poder calorífico inferior** (PCI) o neto (PCN): el H₂O está en forma de vapor de agua, de modo que no hay aporte adicional de calor, sino que únicamente se dispone de la energía generada en la oxidación del combustible.

El poder calorífico superior puede ser obtenido experimentalmente a partir de la combustión de una muestra del combustible en una bomba calorimétrica. Este ensayo está normalizado por la CEN/TS 14918.^[30]

La bomba calorimétrica es un recipiente adiabático que contiene en su interior la bomba de combustión y agua. Además, también dispone de un agitador, un termómetro y el cableado necesario para la ignición de la muestra. La figura 3.4 es una representación de una bomba calorimétrica.

La energía aportada por el combustible durante su oxidación genera un aumento de la temperatura del agua que rodea a la bomba de combustión. A partir de este incremento de temperatura se calcula el poder calorífico superior a volumen constante y en base húmeda, $PCS_{v,bh}$.

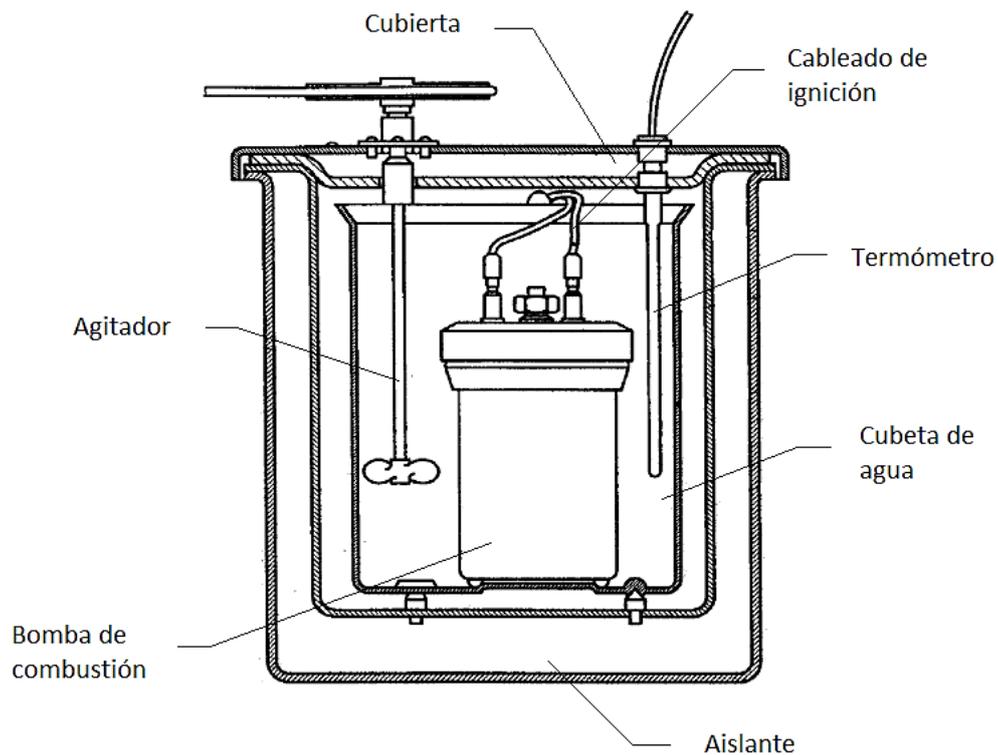


Figura 3.4 Bomba calorimétrica. (Adaptación [30])

Conocida la humedad que presentaba la muestra, puede ser calculado el poder calorífico a volumen constante en base seca mediante la siguiente expresión, ecuación 3.13.

$$PCS_{v,bs} = \frac{PCS_{v,bh}}{1 - \frac{M_d}{100}} \quad (Ec. 3.13)$$

donde

$PCS_{v,bh}$ es el poder calorífico superior a volumen constante en base húmeda, (J/g)

$PCS_{v,bs}$ es el poder calorífico superior a volumen constante en base seca, (J/g)

M_d es el contenido de humedad de la muestra en base húmeda y % en masa

El poder calorífico inferior es calculado a partir del poder calorífico superior. Tiene principal interés su cálculo a presión constante por la razón de que la tecnología empleada en los procesos de combustión de los biocombustibles sólidos opera en esas condiciones.

Para el cálculo de dicho poder calorífico, será preciso disponer con anterioridad del contenido de hidrógeno, oxígeno y nitrógeno del combustible, expresado en porcentaje en masa y en base seca. Todos ellos se obtienen del análisis elemental que anteriormente se explica.

En definitiva, el poder calorífico inferior a presión constante y en base seca viene dado por la ecuación 3.14:

$$PCI_{p,bs} = PCS_{v,bs} - 212.2 \cdot H_{bs} - 0.8 (O_{bs} - N_{bs}) \quad (Ec. 3.14)$$

donde

$PCI_{p,bs}$ es el poder calorífico inferior a presión constante en base seca, (J/g)

$PCS_{v,bs}$ es el poder calorífico superior a volumen constante en base seca, (J/g)

H_{bs} es el contenido de hidrógeno en base seca y % en masa

O_{bs} es el contenido de oxígeno en base seca y % en masa

N_{bs} es el contenido de nitrógeno en base seca y % en masa

El poder calorífico inferior a presión constante se calcula en base húmeda a partir de la ecuación 3.15:

$$PCI_{p,bh} = PCI_{p,bs}(1 - 0.01M_d) - 24.23M_d \quad (Ec. 3.15)$$

donde

$PCI_{p,bh}$ es el poder calorífico inferior a presión constante en base húmeda, (J/g)

$PCI_{p,bs}$ es el poder calorífico inferior a presión constante en base seca, (J/g)

M_d es el contenido de humedad de la muestra en base húmeda y % en masa

3.3.3. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS

Las características físicas de los pélets están íntimamente ligadas al origen de su biomasa de partida y a su proceso de producción.

Tienen una gran influencia en ciertos aspectos como las condiciones de almacenaje y transporte. Además, son necesarias para determinar algunos de los parámetros de la combustión; tal es el caso del tiempo de residencia necesario y de la superficie específica de las partículas donde se producirán las reacciones de combustión.

Seguidamente, se presentan las principales características empleadas en el aprovechamiento termoquímico de los combustibles sólidos.

- **Tamaño y forma**

En los pélets, como en el resto de biocombustibles sólidos, es importante el conocimiento del tamaño y la forma de las partículas en el momento de introducirlos en el reactor ya que determinan, junto con las características superficiales, la facilidad para fluir de una partícula. Este factor es clave durante el transporte, por ejemplo, en los tornillos sinfín o en la salida de los silos. Con este motivo la Norma, UNE EN 14961-2 ^[34] en el caso de los pélets de madera y UNE EN 14961-6^[32] para los pélets no leñosos, establece las especificaciones oportunas.

La forma de los pélets, con generalidad, siempre es cilíndrica.

Para determinar la longitud y el diámetro, la Norma UNE EN 16127^[33] describe el método aplicable. Consiste en la realización de mediciones de ambas características a una muestra representativa de pélets mediante un calibre. La longitud de un pélet siempre se mide a lo largo del eje del cilindro y el diámetro se mide perpendicularmente al eje. La figura 3.5 representa el proceso de medida.

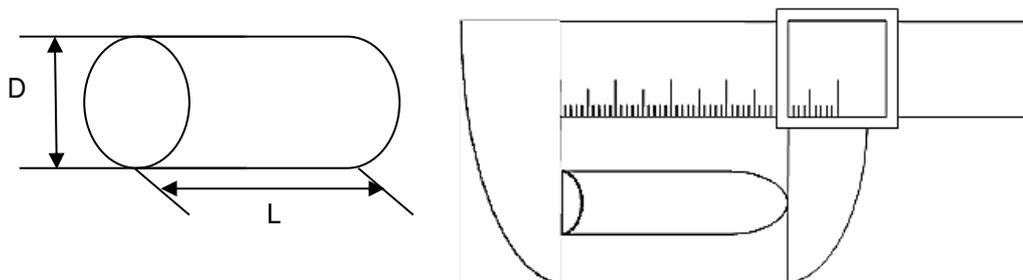


Figura 3.5 Dimensiones de un pélet y método de calibración. ^[33]

Además, el tamaño del biocombustible trasciende en el dimensionamiento del reactor a utilizar y en el tiempo de residencia.

En cuanto a las fracciones de menor tamaño, los finos, la Norma UNE EN 14961^[31] impone que sea inferior al 1%, ya que estas partículas generan problemas respiratorios o propician ambientes inflamables.

Otro parámetro utilizable es la superficie específica de la partícula. Se calcula mediante el cociente entre la superficie de la partícula y su volumen. Cuanto mayor es más rápido se producen las reacciones de combustión.

- **Densidad**

Se distinguen dos tipos de densidades según se incluya o no el volumen del aire contenido en el material en los cálculos. La densidad aparente o a granel toma en cuenta el volumen ocupado por la fase sólida y el volumen del aire que incorpora. La densidad de partícula considera únicamente el volumen del sólido.

El método de evaluación de la densidad aparente viene especificado en la Norma CEN/TS 15103^[34]. Consiste en pesar un recipiente lleno del material analizado. El volumen de dicho recipiente se conoce y está normalizado.

Hay factores, como el grado de compactación o la humedad, que hacen variar la densidad aparente de un material. En el caso de tener un mayor contenido de humedad, el volumen del material se incrementa haciendo descender la densidad. De modo que será preciso especificar el nivel de humedad de la muestra en el momento del ensayo para ser factibles futuras comparaciones.

En cuanto a la densidad de partícula, o también llamada por algunos autores como densidad real, aunque tiene en cuenta los poros del propio material no considera los huecos entre partículas.

El proceso de análisis está basado en el principio de Arquímedes: “Todo cuerpo sumergido en un fluido experimenta un empuje vertical hacia arriba igual al peso del fluido desalojado”.

En el ensayo, descrito en la UNE EN 15150^[35], primeramente se pesa un grupo de pélets al aire y, tras tarar el instrumental empleado (incluido el líquido), se vuelve a pesar sumergido en el líquido. La diferencia de peso entre la medida en aire y la realizada en el líquido determina la flotabilidad del material que junto con la densidad del líquido usado permite calcular el volumen del material.

El instrumental empleado para la cuantificación de la densidad de partícula de los pélets se representa en la figura 3.6.

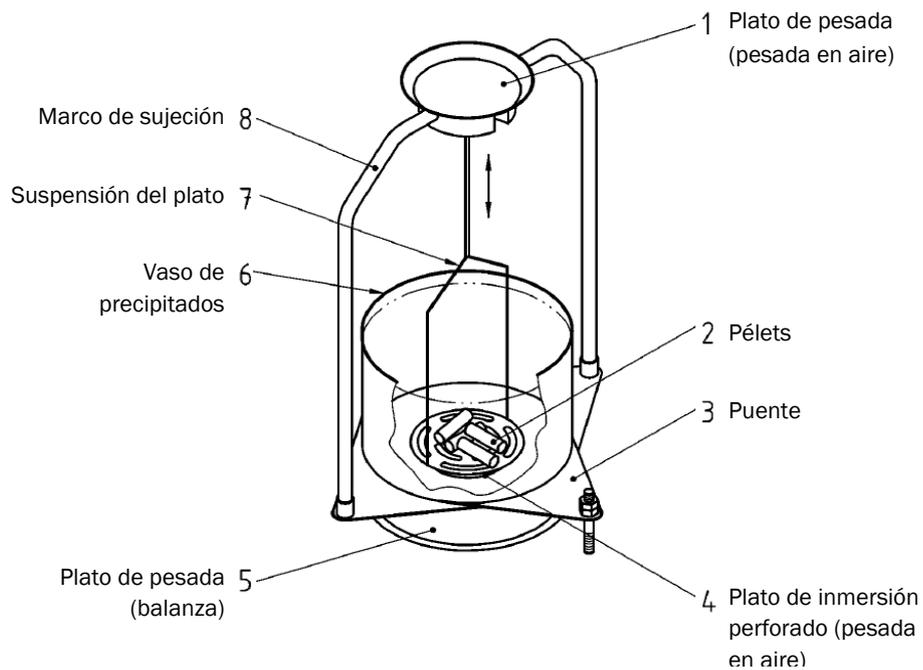


Figura 3.6 Instrumental de cálculo de la densidad de partícula. [35]

El cálculo a emplear para su determinación se muestra en la ecuación 3.16.

$$\rho_M = \frac{m_a}{m_a - m_l} \cdot \rho_l \quad (\text{Ec. 3.16})$$

donde

ρ_M	es la densidad de cada grupo de pélets con un contenido de humedad M, (g/cm ³)
m_a	es la masa de la muestra en aire (incluyendo la humedad) (g)
m_l	es la masa de la muestra en el líquido (incluyendo la humedad) (g)
ρ_l	es la densidad del líquido empleado (g/ cm ³)

La densidad de partícula es empleada en la evaluación de la conductividad térmica y la descomposición térmica. Ambos son relevantes en el proceso de combustión del material.

- **Durabilidad**

Tal y como describe la Norma, UNE EN 15210^[36], la durabilidad es la medida de la resistencia de los combustibles densificados a los golpes y/o abrasión como consecuencia de los procesos de manejo y transporte. También es llamada friabilidad.

Dicha norma establece, a su vez, el método de ensayo para determinar la durabilidad mecánica de una muestra. Esta es sometida a golpes controlados mediante la colisión de los pélets entre ellos mismos y contra las paredes de una cámara de ensayo rotatoria definida. La durabilidad se calcula a partir de la masa de la muestra que queda después de la separación de las partículas finas erosionadas y rotas, mediante la ecuación 3.17:

$$DU = \frac{m_A}{m_E} \cdot 100 \quad (\text{Ec. 3.17})$$

donde

DU	es la durabilidad mecánica (%)
m_E	es la masa de los pélets pre-cribados antes del volteo (g)
m_A	es la masa de los pélets cribados después del volteo (g)

3.4 NORMALIZACIÓN DE LOS PÉLETS

Desde hace años, países como Austria, Alemania, Suecia o Italia entre otros, en los que el empleo de la biomasa como fuente energética es una práctica desarrollada, disponen de normativas nacionales para la regulación de las características de los pélets. Ejemplo de ello es la norma alemana DINPlus^[37] o la austriaca ÖNORM 7135^[38].

La función de estas normas es la de establecer unos criterios propios a partir de valores mínimos o máximos, según el parámetro en cuestión, que garantizasen la calidad del combustible empleado.

Hoy día, el Comité Técnico CEN/TC 335^[49] de biocombustibles sólidos a través de la norma EN UNE 14961-2^[34], también denominada normativa EnPlus, unifica los criterios de referencia para los pellets en toda Europa garantizando una calidad homogénea y estable. En ella se establecen tres calidades de pélets, A1, A2 y B, en función del origen de la madera, tratamientos recibidos y contenidos de cenizas, nitrógeno y cloro.

La tabla 3.1 recoge las características y parámetros controlados para cada una de las calidades mencionadas.

Tabla 3.1 Especificaciones de pélets de madera para uso no industrial. [31]

PROPIEDAD	UNIDAD	EN-PLUS (EN 14961-2)		
		A1	A2	B
ORIGEN		Madera no tratada químicamente	Madera no tratada químicamente	Cualquier tipo de madera o corteza
Diámetro (D)	mm	6 (±1) y 8 (±1)	6 (±1) y 8 (±1)	6 (±1) y 8 (±1)
Longitud (L)	mm	3.15 ≤ L ≤ 40	3.15 ≤ L ≤ 40	3.15 ≤ L ≤ 40
Densidad a granel (BD)	Kg/m ³	≥ 600	≥ 600	≥ 600
Humedad (M)	%(b.h)	≤ 10	≤ 10	≤ 10
Durabilidad (DU)	%(b.h)	≥ 97.5	≥ 97.5	≥ 96.5
Ceniza (A)	%(b.s)	≤ 0.7	≤ 1.5	≤ 3.0
Finos (F)	%(b.h)	≤ 1	≤ 1	≤ 1
Aditivos	%(b.h)	≤ 2	≤ 2	≤ 2
PCI (Q)	MJ/kg (b.h)	≥ 16.5	≥ 16.3	≥ 16
N	%(b.s)	≤ 0.3	≤ 0.5	≤ 1.0
S	%(b.s)	≤ 0.03	≤ 0.03	≤ 0.04
Cl	%(b.s)	≤ 0.02	≤ 0.02	≤ 0.03
As	mg/kg %(b.s)	≤ 1	≤ 1	≤ 1
Cd	mg/kg %(b.s)	≤ 0.5	≤ 0.5	≤ 0.5
Cr	mg/kg %(b.s)	≤ 10	≤ 10	≤ 10
Cu	mg/kg %(b.s)	≤ 10	≤ 10	≤ 10
Pb	mg/kg %(b.s)	≤ 10	≤ 10	≤ 10
Hg	mg/kg %(b.s)	≤ 0.1	≤ 0.1	≤ 0.1
Ni	mg/kg %(b.s)	≤ 10	≤ 10	≤ 10
Zn	mg/kg %(b.s)	≤ 100	≤ 100	≤ 100
Fusibilidad	°C	Informativa		

3.5 CARACTERIZACIÓN DE LAS MUESTRAS ESTUDIADAS

Para este trabajo de estudio se comenzó considerando catorce muestras de pélets. Cada una de ellas pertenecía a una marca comercial diferente, a la cual se solicitaron las características y propiedades descritas a lo largo de este capítulo. La mayoría se presentaron reacias a suministrar sus datos. Sólo facilitaban su certificado ENPlus^[31], indicando que cumplían las características exigidas. Por dicha razón, el tamaño de estudio tuvo que ser reducido a ocho muestras de las que se consiguieron, al menos, los datos necesarios para la realización de los análisis de combustión.

A continuación, para cada muestra, se presenta la caracterización obtenida junto con una imagen del pélet ensayado, mediante las tablas 3.2 a 3.9 y las figuras 3.7 a 3.14, respectivamente.

3.5.1. CARACTERIZACIÓN MUESTRA 1



Figura 3.7 Muestra 1

Tabla 3.2 Caracterización química, energética y física de la muestra 1.

Análisis elemental		
Carbono, C	% (b.s)	47,3
Hidrógeno, H	% (b.s)	6,4
Nitrógeno, N	% (b.s)	0,13
Azufre, S	% (b.s)	0,99
Cloro, Cl	% (b.s)	-
Oxígeno, O	% (b.s) (calculado)	45,18
Análisis inmediato		
Humedad total, M	% (b.h)	7
Volátiles	% (b.h)	83,7
Cenizas, A	% (550°C, b.h)	0,8
Carbono fijo	% (b.h) (calculado)	8,5
Poder calorífico		
PCI	(kcal/kg)	4445.51
PCS	(kcal/kg)	
Parámetros físicos		
Diámetro, D	mm	6 a 8
Longitud, L	mm	-
Densidad aparente	Kg/m ³	650
Densidad partícula	g/m ³	-
Finos, F	%	-
Durabilidad, DU	%	-

3.5.2. CARACTERIZACIÓN MUESTRA 2



Figura 3.8 Muestra 2

Tabla 3.3 Caracterización química, energética y física de la muestra 2.

Análisis elemental	Unidades	BS	BH
Carbono, C	(%)	49.88	44.56
Hidrógeno, H	(%)	6.27	6.79
Nitrógeno, N	(%)	0.15	0.13
Azufre, S	(%)	0.03	0.03
Cloro, Cl	(%)	-	-
Oxígeno, O	(calculado, %)	43,1	47,98
Análisis inmediato	Unidades	BS	BH
Humedad total, M	(%)	-	10.66
Volátiles	(%)	79.05	70.62
Cenizas, A	(815º, %)	0.57	0.51
Carbono fijo	(calculado, %)	20.38	18.21
Poder calorífico	Unidades	BS	BH
PCI	(kcal/kg)	4323	3800
PCS	(kcal/kg)	-	-
Parámetros físicos	Unidades		
Diámetro, D	(mm)	6	
Longitud, L	(mm)	15-35	
Densidad aparente	(Kg/m ³)	580	
Densidad partícula	(g/m ³)	-	
Finos, F	(%)	1.01	
Durabilidad, DU	(%)	-	

3.5.3. CARACTERIZACIÓN MUESTRA 3



Figura 3.9 Muestra 3

Tabla 3.4 Caracterización química, energética y física de la muestra 3.

Análisis elemental		
Carbono, C	% (b.s)	50.5
Hidrógeno, H	% (b.s)	6.2
Nitrógeno, N	% (b.s)	0.1
Azufre, S	% (b.s)	0.02
Cloro, Cl	% (b.s)	0.02
Oxígeno, O	% (b.s) (calculado)	43.16
Análisis inmediato		
Humedad total, M	% (b.h)	9.8
Volátiles	% (b.s)	84.6
Cenizas, A	% (550°C, b.s)	0.4
Carbono fijo	% (b.s) (calculado)	15
Poder calorífico		
PCI	(kcal/kg)	4565
PCS	(kcal/kg)	4851.8
Parámetros físicos		
Diámetro, D	mm	6 a 8
Longitud, L	mm	16.6
Densidad aparente	Kg/m ³	680
Densidad partícula	g/m ³	1.16
Finos, F	%	1.3
Durabilidad, DU	%	98.4

3.5.4. CARACTERIZACIÓN MUESTRA 4



Figura 3.10 Muestra 4

Tabla 3.5 Caracterización química, energética y física de la muestra 4.

Análisis elemental		
Carbono, C	% (b.s)	48.2
Hidrógeno, H	% (b.s)	5.96
Nitrógeno, N	% (b.s)	0.06
Azufre, S	% (b.s)	0.014
Cloro, Cl	% (b.s)	0.01
Oxígeno, O	% (b.s) (calculado)	45.756
Análisis inmediato		
Humedad total, M	% (b.h)	6.8
Volátiles	% (b.s)	-
Cenizas, A	% (550°C, b.s)	0.29
Carbono fijo	% (b.s) (calculado)	-
Poder calorífico		
PCI	(kcal/kg)	4780
PCS	(kcal/kg)	-
Parámetros físicos		
Diámetro, D	mm	6.06
Longitud, L	mm	21.32
Densidad aparente	Kg/m ³	-
Densidad partícula	g/m ³	1.26
Finos, F	%	-
Durabilidad, DU	%	98.71

3.5.5. CARACTERIZACIÓN MUESTRA 5



Figura 3.11 Muestra 5

Tabla 3.6 Caracterización química, energética y física de la muestra 5.

Análisis elemental		
Carbono, C	% (b.s)	49.02
Hidrógeno, H	% (b.s)	6.31
Nitrógeno, N	% (b.s)	0.13
Azufre, S	% (b.s)	0.009
Cloro, Cl	% (b.s)	0.01
Oxígeno, O	% (b.s) (calculado)	44.521
Análisis inmediato		
Humedad total, M	% (b.h)	5.3
Volátiles	% (b.s)	-
Cenizas, A	% (550°C, b.s)	0.48
Carbono fijo	% (b.s) (calculado)	-
Poder calorífico		
PCI	(kcal/kg)	4421.61
PCS	(kcal/kg)	-
Parámetros físicos		
Diámetro, D	mm	6.1
Longitud, L	mm	-
Densidad aparente	Kg/m ³	690
Densidad partícula	g/m ³	-
Finos, F	%	< 0.1
Durabilidad, DU	%	99.2

3.5.6. CARACTERIZACIÓN MUESTRA 6



Figura 3.12 Muestra 6

Tabla 3.7 Caracterización química, energética y física de la muestra 6.

Análisis elemental		
Carbono, C	% (b.s)	50.25
Hidrógeno, H	% (b.s)	6.02
Nitrógeno, N	% (b.s)	0.07
Azufre, S	% (b.s)	0.016
Cloro, Cl	% (b.s)	0.007
Oxígeno, O	% (b.s) (calculado)	43.637
Análisis inmediato		
Humedad total, M	% (b.h)	4.6
Volátiles	% (b.s)	84.04
Cenizas, A	% (550°C, b.s)	0.51
Carbono fijo	% (b.s) (calculado)	15.45
Poder calorífico		
PCI	(kcal/kg)	4500
PCS	(kcal/kg)	-
Parámetros físicos		
Diámetro, D	mm	6.3
Longitud, L	mm	3.15 < L < 40
Densidad aparente	Kg/m ³	680
Densidad partícula	g/m ³	-
Finos, F	%	0.2
Durabilidad, DU	%	98.6

3.5.7. CARACTERIZACIÓN MUESTRA 7



Figura 3.13 Muestra 7

Tabla 3.8 Caracterización química, energética y física de la muestra 7.

Análisis elemental		
Carbono, C	% (b.s)	49.14
Hidrógeno, H	% (b.s)	6.15
Nitrógeno, N	% (b.s)	0.1
Azufre, S	% (b.s)	0.018
Cloro, Cl	% (b.s)	-
Oxígeno, O	% (b.s) (calculado)	44.592
Análisis inmediato		
Humedad total, M	% (b.h)	8.45
Volátiles	% (b.s)	-
Cenizas, A	% (550°C, b.s)	-
Carbono fijo	% (b.s) (calculado)	-
Poder calorífico		
PCI	(kcal/kg)	4700
PCS	(kcal/kg)	-
Parámetros físicos		
Diámetro, D	mm	6.12
Longitud, L	mm	7.88
Densidad aparente	Kg/m ³	661.2
Densidad partícula	g/m ³	1.18
Finos, F	%	0.18
Durabilidad, DU	%	97.47

3.5.8. CARACTERIZACIÓN MUESTRA 8



Figura 3.14 Muestra 8

Tabla 3.9 Caracterización química, energética y física de la muestra 8.

Análisis elemental		
Carbono, C	% (b.s)	48.7
Hidrógeno, H	% (b.s)	6.53
Nitrógeno, N	% (b.s)	0.016
Azufre, S	% (b.s)	0.023
Cloro, Cl	% (b.s)	-
Oxígeno, O	% (b.s) (calculado)	44.587
Análisis inmediato		
Humedad total, M	% (b.h)	8.41
Volátiles	% (b.s)	-
Cenizas, A	% (550°C, b.s)	-
Carbono fijo	% (b.s) (calculado)	-
Poder calorífico		
PCI	(kcal/kg)	4600
PCS	(kcal/kg)	-
Parámetros físicos		
Diámetro, D	mm	6.1
Longitud, L	mm	7.8
Densidad aparente	Kg/m ³	690
Densidad partícula	g/m ³	1.26
Finos, F	%	0.47
Durabilidad, DU	%	98.39

CAPÍTULO 4

LA COMBUSTIÓN

4.1 INTRODUCCIÓN

El objetivo de este capítulo es aportar el marco teórico de los ensayos realizados, estableciendo los parámetros que influyen en la combustión y que deben ser controlados para optimizar dicho proceso y a su vez cumplir las diferentes normativas que lo regulan.

En primer lugar, se presentan los fundamentos y principales características de la combustión de la biomasa.

Por otro lado, la estequiometría de las reacciones implicadas permite obtener algunos de los parámetros comentados: las necesidades de comburente y los caudales y composición de los humos o gases generados.

La eficiencia del proceso y el impacto ambiental que provoca son algunos de los aspectos regulados. Para la determinación del rendimiento se plantea el método indirecto, usual en este tipo de instalaciones, en el cual se precisa el poder calorífico del combustible y las pérdidas que presenta la combustión. Para el impacto ambiental serán controlados los gases de efecto invernadero y contaminantes a partir de las concentraciones en que se presenten en los humos.

Por las limitaciones de los analizadores de humos, se desarrolla una hoja de cálculo a partir de lo expuesto a lo largo del capítulo a fin de realizar los cálculos y obtener los parámetros planteados para cada uno de los ensayos.

4.2 FUNDAMENTOS DE LA COMBUSTIÓN

La combustión es el conjunto de reacciones químicas de oxidación mediante las cuales se produce la conversión de la energía química residente en los combustibles en energía térmica.

El desarrollo de la combustión tiene lugar en el momento en que los elementos constitutivos del combustible entran en contacto, bajo ciertas condiciones, con el oxígeno. El oxígeno puro sólo suele ser empleado en aplicaciones especiales como el corte o la soldadura; generalmente, para la combustión, el oxígeno proviene de una mezcla de sustancias, en la que está contenido, denominada comburente. El comburente más común es el aire.

La composición típica de una muestra de aire seco se da en la Tabla 4.1. En forma de simplificación todos los componentes diferentes al oxígeno y

nitrógeno se incluyen en el porcentaje de este último. Por consiguiente, la composición simplificada del aire tiene un 21% de oxígeno y un 79% de nitrógeno en base molar. A partir de la relación entre ambos componentes se fija que en las reacciones por cada mol de oxígeno habrá 3.76 moles de nitrógeno. [39]

Tabla 4.1 Composición estándar del aire.

Aire	% en volumen		% en peso	
	Real	Uso	Real	Uso
Nitrógeno	78,03	79	75,45	76,8
Oxígeno	20,99	21	23,2	23,2
Argón	0,94	0	1,3	0
CO ₂	0,03	0	0,05	0
Otros	0,01	0	Despreciable	0
Peso molecular (Kg/kmol)				28,967

Durante las reacciones de combustión los enlaces de las moléculas reactivas se rompen, y los átomos y electrones se reagrupan formando los productos. Los productos obtenidos dependen de muchos factores. [40] Entre otros, de la composición y cantidad de los reactivos, combustible y comburente, y de las condiciones de temperatura y presión en las que se producen estas reacciones. Con el empleo del aire los productos más comunes son el CO₂, H₂O, O₂, CO, NO_x, SO_x, además del N₂ que como el combustible reacciona solo con el oxígeno pasa íntegro sin reaccionar. Además de los productos gasificados, según el combustible empleado, se generan algunos residuos como por ejemplo la ceniza.

4.2.1 TIPOS DE COMBUSTIÓN

En función del grado de oxidación del combustible se pueden distinguir entre:

- Combustión **completa**. En esta reacción todo el combustible es oxidado. No hay presencia de elementos aún combustibles en los productos.
- Combustión **incompleta**. Se produce cuando no se alcanza el grado máximo posible de oxidación del combustible, ocasionando la aparición de partículas combustibles o inquemados en los productos.

Otra clasificación posible se establece a partir de la cantidad de aire implicada en la reacción:

- Combustión **estequiométrica**. En ella interviene la mínima cantidad de aire que aporta el oxígeno necesario para desarrollar la combustión de forma completa. Dicha cantidad depende de la composición del combustible y se establece a partir de la reacción estequiométrica de la oxidación.
- Combustión con **exceso de aire**. Con la intención de asegurar la oxidación completa del combustible comúnmente se aporta mayor cantidad de aire que la teóricamente necesaria.

En la práctica se ha demostrado que lo ideal es trabajar con un ligero exceso, haciendo las proporciones de inquemados y las pérdidas por chimenea mínimas y optimizando la eficiencia del proceso.

En general, a menor relación de volumen masa/superficie de las partículas del combustible mayor volumen de exceso de aire se necesita para una combustión óptima.

- Combustión con **defecto de aire**. Son combustiones con menor cantidad de aire que el estequiométrico. Este es un tipo de reacción típicamente de combustión incompleta, con la consiguiente aparición de inquemados en los gases o humos y pérdidas de eficiencia.

Para medir el exceso o defecto de aire se define el *índice de exceso*^[41], n , establecido por la Ecuación 4.1:

$$n = \frac{\text{aire real}}{\text{aire estequiométrico}} \quad (\text{Ec 4.1})$$

Será:

$n > 1$ para la combustión con exceso de aire

$n = 1$ para la combustión estequiométrica

$n < 1$ para la combustión con defecto de aire

O también el *porcentaje de exceso de aire* por la Ecuación 4.2:

$$\% \text{ exceso de aire} = \frac{\text{aire real} - \text{aire estequiométrico}}{\text{aire estequiométrico}} \cdot 100 \quad (\text{Ec 4.2})$$

4.3 ETAPAS EN LA COMBUSTIÓN DE BIOMASA

En la combustión de un biocombustible sólido, como los pélets, se producen los siguientes procesos termoquímicos:^[42]

- 1) **Calentamiento del combustible ($T < 100^{\circ}\text{C}$).** En un primer momento el combustible introducido en la caldera se encuentra en condiciones ambientales, entre 10°C y 25°C . Posteriormente, según va aumentando la temperatura en el interior de la caldera, el combustible se va calentando y adquiriendo las condiciones para las sucesivas etapas.
- 2) **Secado del combustible ($100^{\circ}\text{C} < T < 150^{\circ}\text{C}$).** Una vez se alcanzan los 100°C , la humedad contenida en el combustible comienza a vaporizarse.
- 3) **Pirólisis ($150^{\circ}\text{C} < T < 230^{\circ}\text{C}$).** Los componentes de la madera inician su descomposición térmica alrededor de los 150°C . Durante este proceso se libera la materia volátil, las largas cadenas de elementos que forman el combustible se rompen y se generan compuestos líquidos como el alquitrán e hidrocarburos gaseosos, C_xH_y , como el metano. Se produce en ausencia de oxígeno.
- 4) **Punto de inflamación.** Una vez se alcanza el punto de inflamación, suele rondar los 230°C , empieza la entrada de aire primario y el desarrollo de las reacciones exotérmicas.
- 5) **Gasificación del combustible seco ($230^{\circ}\text{C} < T < 500^{\circ}\text{C}$).** Con la influencia del oxígeno y alcanzado el punto de inflamación, el combustible seco se gasifica. Tiene lugar principalmente en el lecho del combustible sólido. Cuando el oxígeno del aire primario reacciona con los productos gaseosos de la pirólisis se emite calor que, a su vez, hace reaccionar al resto de productos pirolíticos (sólidos y líquidos).
- 6) **Gasificación del carbón sólido ($500^{\circ}\text{C} < T < 700^{\circ}\text{C}$).** En esta fase, bajo influencia del dióxido de carbono (CO_2), disponibilidad del vapor de agua y el oxígeno (O_2), se genera el monóxido de carbono. La gasificación del carbón sólido es exotérmica y emite los rayos de luz y de calor en forma de llama.
- 7) **Oxidación de los gases combustibles ($700^{\circ}\text{C} < T < 1400^{\circ}\text{C}$).** Para la oxidación de todos los gases combustibles resultantes de las etapas precedentes se introduce aire secundario. Su combustión limpia y completa supondrá el final de la combustión.

La Figura 4.1 presenta una ilustración esquemática de las anteriores etapas.

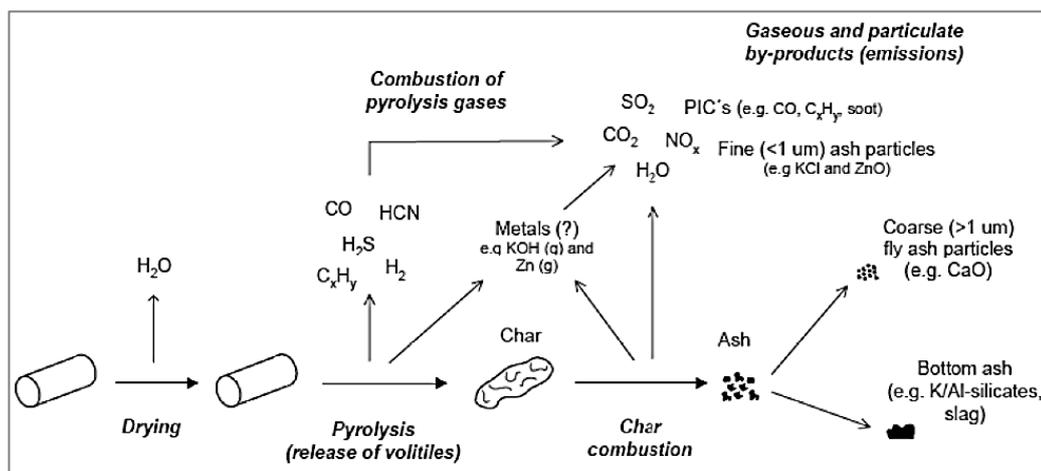


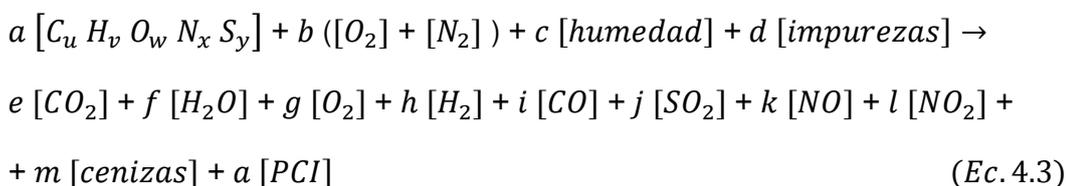
Figura 4.1 Esquema etapas combustión partícula de biomasa. [43]

Como ha sido indicado en las etapas, existe una división del aire aportado en aire primario y aire secundario. Además, cada uno de ellos es aportado en un lugar distinto: el aire primario se introduce en el lecho mientras que la entrada del aire secundario se produce en la cámara de combustión. Este hecho, aplicado en las calderas modernas, se diseña para crear las condiciones técnicas convenientes, garantizando la combustión completa y la reducción de las emisiones

4.4 ESTEQUIOMETRÍA DE LA COMBUSTIÓN

La estequiometría consiste en la aplicación del principio de conservación de la masa a los componentes de las reacciones químicas. El ajuste de estas ecuaciones permite determinar las cantidades de reactivos y de productos que participan.

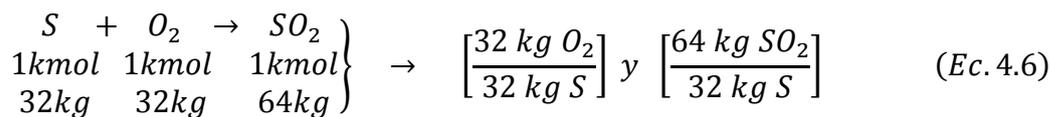
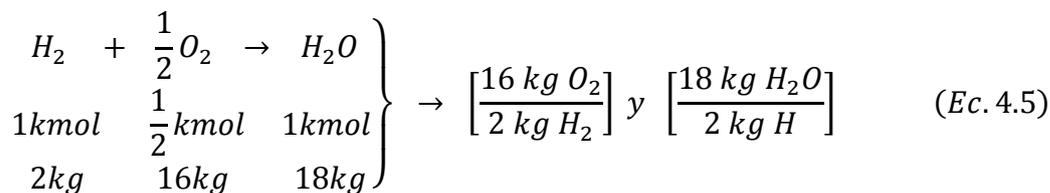
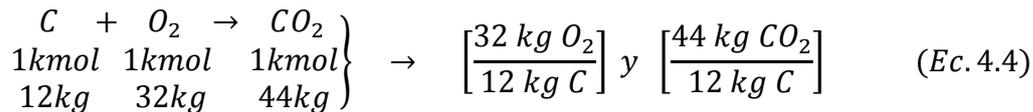
A continuación, se plantea una reacción real genérica, Ecuación 4.3, de un reactor de combustión teniendo en cuenta todas las variables, incluida la humedad las impurezas y las cenizas:



Donde: $[C_u H_v O_w N_x S_y]$ es un mol del combustible. Generalmente, suele ajustarse la reacciones para un mol de combustible, $a = 1$, o bien para un mol de producto gaseoso, $e + f + g + h + i + j + k + l = 1$.

La reacción de combustión permite, conocida la composición del combustible y la composición del aire comburente, determinar en el caso ideal, combustión completa, la cantidad de aire necesario y las cantidades de productos generados.

Aplicando balances de masas o de moles en las siguientes reacciones elementales, y conocidos los pesos moleculares de cada elemento, se obtienen las relaciones másicas entre ellos para reacciones completas. [39]



De modo que, conocida la composición elemental del combustible en tanto por uno (C, H, S, O, N) se puede determinar la cantidad mínima de oxígeno necesaria para desarrollar la combustión completa, a partir de las relaciones planteadas en las Ecuaciones 4.4, 4.5 y 4.6. Ambas cantidades expresadas por kg de combustible.

$$\begin{aligned} M_{O_2} &= \left[\frac{32 \text{ kg } O_2}{12 \text{ kg } C} \right] \cdot C + \left[\frac{16 \text{ kg } O_2}{2 \text{ kg } H_2} \right] \cdot H + \left[\frac{32 \text{ kg } O_2}{32 \text{ kg } S} \right] \cdot S - \left[\frac{32 \text{ kg } O_2}{32 \text{ kg } O_2} \right] \cdot O_2 = \\ &= 2,666 C + 8 H + 1 S - O \quad (\text{kg } O_2/\text{kg combustible}) \quad (\text{Ec. 4.7}) \end{aligned}$$

A partir de la masa de oxígeno necesario, Ecuación 4.7, se establece la cantidad de aire seco estequiométrico a introducir en el reactor por kg de combustible. Dado que el porcentaje en masa del oxígeno en el aire es del 23.2%, mediante la Ecuación 4.8 se determina:

$$\begin{aligned} M_{\text{aire},s} &= M_{O_2} \cdot \left[\frac{1 \text{ kg aire}}{0.232 \text{ kg } O_2} \right] = 4,32 M_{O_2} = \\ &= 11,52 C + 34,56 H + 4,32 S - 4,32 O \left(\frac{\text{kg aire seco}}{\text{kg de combustible}} \right) \end{aligned} \quad (\text{Ec. 4.8})$$

Como la densidad del aire en condiciones normales es de $1,293 \text{ kg/Nm}^3$, se puede expresar la necesidad de aire seco en volumen como:

$$V_{\text{aire},s} = M_{O_2} \cdot \left[\frac{1 \text{ kg aire}}{0.232 \text{ kg } O_2} \right] \cdot \left[\frac{1 \text{ Nm}^3 \text{ aire}}{1,293 \text{ kg aire}} \right] = 3,332 M_{O_2} =$$

$$= 8,885 C + 26,656 H + 3,332 S - 3,332 O \left(\frac{\text{Nm}^3 \text{ aire seco}}{\text{kg combustible}} \right)$$

(Ec. 4.9)

Expresando estas cantidades en base húmeda, para aire con una humedad específica X ($\text{kg agua/m}^3 \text{ aire seco}$), serán precisos:

$$M_{\text{aire},X} = M_{\text{aire},s} + V_{\text{aire},s} \cdot X \quad \left(\frac{\text{kg aire húmedo}}{\text{kg de combustible}} \right)$$

(Ec. 4.10)

$$V_{\text{aire},X} = V_{\text{aire},s} \left[1 + X \left[\frac{22.4 \text{ Nm}^3 \text{ H}_2\text{O}_{\text{vap}}}{18 \text{ kg H}_2\text{O}_{\text{vap}}} \right] \right] \left(\frac{\text{Nm}^3 \text{ aire húmedo}}{\text{kg de combustible}} \right)$$

(Ec. 4.11)

Determinado el aire estequiométrico, si se conoce el índice o porcentaje de exceso de aire requerido en la combustión es posible determinar la cantidad de aire real ya que:

$$V_{\text{aire real}} = V_{\text{aire estequiométrico}} \cdot n \quad \text{(Ec. 4.12)}$$

Las relaciones planteadas en las Ecuaciones 4.4, 4.5 y 4.6, también permiten conocer los volúmenes y masas de los productos más típicos en una combustión estequiométrica. Las Ecuaciones de la 4.13 a 4.18 recogen los cálculos a realizar para su determinación.

$$M_{CO_2} = \frac{44 \text{ kg } CO_2}{12 \text{ kg } C} \cdot C \quad (\text{kg } CO_2/\text{kg combustible}) \quad \text{(Ec. 4.13)}$$

$$V_{CO_2} = M_{CO_2} \cdot \left[\frac{22.4 \text{ Nm}^3 CO_2}{44 \text{ kg } CO_2} \right] \left(\frac{\text{Nm}^3 CO_2}{\text{kg combustible}} \right) \quad \text{(Ec. 4.14)}$$

$$M_{H_2O} = \frac{18 \text{ kg } H_2O}{2 \text{ kg } H} \cdot H \quad (\text{kg } H_2O/\text{kg combustible}) \quad \text{(Ec. 4.15)}$$

$$V_{H_2O} = M_{H_2O} \cdot \left[\frac{22.4 \text{ Nm}^3 H_2O}{18 \text{ kg } H_2O} \right] \left(\frac{\text{Nm}^3 H_2O}{\text{kg combustible}} \right) \quad \text{(Ec. 4.16)}$$

$$M_{SO_2} = \frac{64 \text{ kg } SO_2}{32 \text{ kg } S} \cdot S \quad (\text{kg } SO_2/\text{kg combustible}) \quad (\text{Ec. 4.17})$$

$$V_{SO_2} = M_{SO_2} \cdot \left[\frac{22.4 \text{ Nm}^3 SO_2}{64 \text{ kg } SO_2} \right] \left(\frac{\text{Nm}^3 SO_2}{\text{kg combustible}} \right) \quad (\text{Ec. 4.18})$$

En cuanto a los humos totales o gases generados, de manera similar pueden ser calculados ya sea en base seca o base húmeda. Ha de distinguirse si la combustión presenta o no exceso de aire.

En el caso de no haber exceso de oxígeno, las Ecuaciones 4.19, 4.20, 4.21 y 4.22 presentan los cálculos a partir de los cuales se obtiene la masa y el volumen estequiométrico de gases secos, M_{hs} y V_{hs} respectivamente, y la masa y el volumen estequiométrico de los gases húmedos, M_{hx} y V_{hx} respectivamente, son:

$$M_{hs} = \left[\frac{44 \text{ kg } CO_2}{12 \text{ kg } C} \right] \cdot C + \left[\frac{64 \text{ kg } SO_2}{32 \text{ kg } S} \right] \cdot S + N + N_{2,aire} \quad (\text{Ec. 4.19})$$

Donde,

$$N_{2,aire} = 0.768 \cdot M_{aire,s} = \frac{0.768 \text{ kg } N_2}{0.232 \text{ kg } O_2} \cdot M_{O_2} \text{ kg } O_2 \quad (\text{Ec. 4.20})$$

Por lo tanto, sustituyendo las Ecuaciones 4.7 y 4.20 en la Ecuación 4.19.

$$\begin{aligned} M_{hs} &= \left[\frac{44}{12} + \frac{0.77}{0.23} \cdot \frac{32}{12} \right] \cdot C + \left[\frac{0.77}{0.23} \cdot 8 \right] \cdot H + \left[2 + \frac{0.77}{0.23} \right] \cdot S + N - \left[\frac{0.77}{0.23} \right] \cdot O = \\ &= 12,52 C + 26,56 H + 5,32 S + N - 3,32 O \quad (\text{kg gases/kg combustible}) \end{aligned} \quad (\text{Ec. 4.21})$$

Para expresarlo en volumen se recurre a las Ecuaciones 4.22, 4.23 y 4.24.

$$V_{hs} = V_{CO_2} + V_{SO_2} + V_{N_2} + V_{N_{2,aire}} \quad (\text{Ec. 4.22})$$

Donde,

$$V_{N_2} + V_{N_{2,aire}} = \left[\frac{22.4 \text{ Nm}^3 N_2}{28 \text{ kg } N_2} \right] N + \left[\frac{22.4 \text{ Nm}^3 N_2}{28 \text{ kg } N_2} \right] N_{2,aire} \quad (\text{Ec. 4.23})$$

Sustituyendo las Ecuaciones 4.14, 4.18, 4.20 y 4.23 en la Ecuación 4.22 y expresándolo en función de la composición elemental del combustible, se obtiene el volumen total de gases en base seca.

$$V_{hs} = 8,89 C + 21,07 H + 3,33 S + 0,8 N - 2,63 O \left(\frac{Nm^3 \text{ gases secos}}{kg \text{ de combustible}} \right)$$

(Ec. 4.24)

Para expresarlos en base húmeda se deberá considerar el vapor de agua generado y la humedad tanto del aire, X , como del combustible, w . Al final se obtienen mediante las Ecuaciones 4.25 y 4.26.

$$M_{hx} = M_{hs} + 9 H + w + V_{aire,s} X \left(\frac{kg \text{ gases húmedos}}{kg \text{ de combustible}} \right)$$

(Ec. 4.25)

$$V_{hx} = V_{hs} + 11,2 H + 1,224 (w + V_{aire,s} X) \left(\frac{Nm^3 \text{ gases húmedos}}{kg \text{ de combustible}} \right)$$

(Ec. 4.26)

En el caso de operar con exceso de aire, se deberán emplear las Ecuaciones 4.27, 4.28, 4.29 y 4.30 para conocer las masas y volúmenes en base seca y húmeda.

$$M_{hs,1} = M_{hs} + M_{aire,s} (n - 1) \left(\frac{kg \text{ gases secos}}{kg \text{ de combustible}} \right) \quad (Ec. 4.27)$$

$$V_{hs,1} = V_{hs} + V_{aire,s} (n - 1) \left(\frac{Nm^3 \text{ gases secos}}{kg \text{ de combustible}} \right) \quad (Ec. 4.28)$$

$$M_{hx,1} = M_{hx} + M_{aire,x} (n - 1) \left(\frac{kg \text{ gases húmedos}}{kg \text{ de combustible}} \right) \quad (Ec. 4.29)$$

$$V_{hx,1} = V_{hx} + V_{aire,x} (n - 1) \left(\frac{Nm^3 \text{ gases húmedos}}{kg \text{ de combustible}} \right) \quad (Ec. 4.30)$$

4.5 RENDIMIENTO DE LA COMBUSTIÓN

La situación ideal para el máximo aprovechamiento del proceso de combustión sería que la energía generada en la reacción fuese la energía que estuviese disponible para ser consumida. Esta es tarea imposible debido a la existencia de pérdidas energéticas.

La Figura 4.2 es un esquema de las pérdidas asociadas a la generación de energía por combustión. Toda la energía almacenada en el combustible no es utilizada debido a la presencia de inquemados. Esta fracción representa energía que ha estado disponible pero que no ha sido utilizada ya que el combustible no ha sido oxidado completamente. Por otro lado de la energía que sí ha sido liberada, no toda es recibida por el fluido portador. El origen de ello está en las pérdidas de calor emitidas por los humos de la combustión. Por último, existen además pérdidas por convección y radiación con el exterior que implican que la energía transportada por el fluido aún no sea la energía realmente aprovechada.

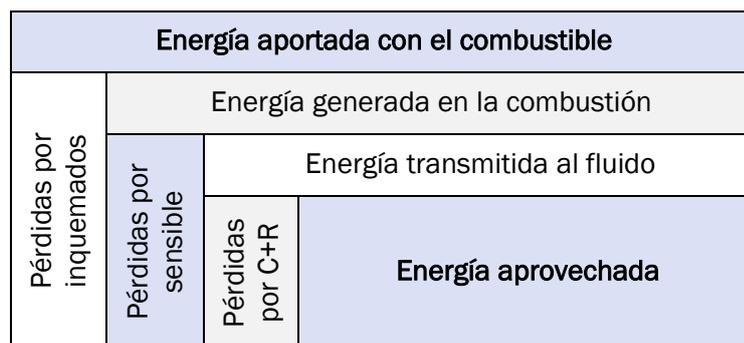


Figura 4.2 Esquema de pérdidas y energía aprovechada. ^[44]

Para tener conocimiento de cuánta es la energía generada disponible y así poder determinar qué cantidad de combustible es preciso poner en reacción para cubrir cierta demanda, será necesario evaluar dichas pérdidas.

- **Pérdidas por convección y radiación:**

Son pérdidas con el entorno debidas a los fenómenos de transmisión de calor. El porcentaje que suponen se establece mediante la Ecuación 4.31.

$$P_{C+R} = \frac{Q_{frontal} + Q_{trasera} + Q_{envolvente}}{\dot{m}_{combustible} \cdot PCI} \cdot 100 \quad (Ec. 4.31)$$

Siendo $Q_{frontal}$, $Q_{trasera}$ y $Q_{envolvente}$ determinados por las Ecuaciones 4.32, 4.33 y 4.34, respectivamente.

$$Q_{frontal} = A_{frontal} \cdot h_{C+R,1} \cdot (T_{frontal} - T_{aire}) \quad (Ec. 4.32)$$

$$Q_{trasera} = A_{trasera} \cdot h_{C+R,2} \cdot (T_{trasera} - T_{aire}) \quad (Ec. 4.33)$$

$$Q_{envolvente} = A_{envolvente} \cdot h_{C+R,3} \cdot (T_{envolvente} - T_{aire}) \quad (Ec. 4.34)$$

Donde: P_{C+R} son las pérdidas por radiación y convección en porcentaje [%]; $Q_{frontal}$, $Q_{trasera}$ y $Q_{envolvente}$ son el flujo de calor que se escapa en [W]; $h_{C+R,1}$, $h_{C+R,2}$ y $h_{C+R,3}$ son los coeficientes de película combinados para las distintas partes en [$W/m^2\text{°C}$]; A es el área de intercambio en [m^2]; $(T_{xxx} - T_{aire})$ es el salto térmico entre la parte de la caldera y el exterior en [°C].

La reducción de estas pérdidas se produce incrementando el aislamiento del equipo de operación.

▪ **Pérdidas por calor sensible:**

Son pérdidas por la temperatura de salida de los humos y son mayores cuanto más altas sean dichas temperaturas. También aumentan con el exceso de aire, ya que con este aumenta el volumen de humos, transportando mayor cantidad de calor.

En su cálculo, con la Ecuación 4.35^[44], se expresa el porcentaje de energía interna de los humos respecto a la temperatura de entrada de los productos de la combustión.

$$P_s = \frac{M_{hx,1} \cdot C_{p,h} \cdot (T_h - T_{ref})}{PCI} \cdot 100 \quad (Ec. 4.35)$$

Donde: P_s son las pérdidas por calor sensible en porcentaje [%]; $M_{hx,1}$ es la masa de humos húmedos no estequiométricos por kilogramos de combustible [$kg/kgcomb$]; $C_{p,h}$ es el calor específico de los humos en [$kJ/kg\text{°C}$]; T_h es la temperatura de humos a la salida [°C]; T_{ref} es la temperatura de referencia o de entrada de los elementos a la combustión en [°C].

El calor específico medio de los humos se calcula a partir de la Ecuación 4.36.

$$C_{p,h} = \sum C_{p,i} \cdot x_i \quad (Ec. 4.36)$$

Donde: $C_{p,i}$ es el calor específico de cada componente determinado en función de la temperatura de los humos en [$kJ/kg\text{°C}$]; x_i es el porcentaje, en tanto por uno, en que forma parte el componente en los humos.

- **Pérdidas por inquemados:**

Se presentan en el caso de combustiones incompletas, siendo más altas las pérdidas cuanto mayor sea la cantidad de inquemados. Como ya se ha dicho representa energía química sin liberar. Es calculada como porcentaje sobre el PCI a partir de las concentraciones de CO, CH, O y de la opacidad de los humos como se indica en la Ecuación 4.37. ^[44]

$$P_i = \frac{21}{21 - [O_2]_{\%}} \left(\frac{[CO]_{ppm}}{3100} + \frac{[CH]_{ppm}}{1000} + \frac{[OP]_{\%}}{65} \right) \quad (Ec. 4.37)$$

Donde: P_i son las pérdidas por inquemados en porcentaje [%]; $[O_2]_{\%}$ es el porcentaje de oxígeno en los humos; $[CO]_{ppm}$ son las partes por millón de monóxido de carbono en los humos; $[CH]_{ppm}$ son las partes por millón de hidrocarburos en los humos; $[OP]_{\%}$ es el porcentaje de opacidad de los humos.

Una vez conocidas estas pérdidas es posible establecer el rendimiento o eficiencia del proceso de combustión empleado. El rendimiento de combustión representa la relación entre el calor útil de la combustión y el calor nominal del combustible, es decir, evalúa la energía aprovechada en referencia al PCI del combustible.

Pueden definirse dos tipos de rendimientos según el tiempo de medida considerado: estacional, cuando la medida se extiende a un periodo largo en el cual se incluyen las pérdidas por parada y arranque de la caldera, e instantáneo, para medidas en un momento concreto.

En este trabajo se considerará el rendimiento instantáneo bajo las hipótesis de régimen estacionario y únicamente teniendo en cuenta las pérdidas propias del proceso de combustión. No obstante para presentar el cálculo del rendimiento instantáneo también se atiende a las pérdidas por transmisión de calor, convección y radiación, como indica la Ecuación 4.38. ^[44]

$$\eta = \frac{Q_u}{Q_n} = \frac{Q_n - \sum \text{pérdidas}}{Q_n} = 1 - \frac{(P_i + P_s + P_{C+R})}{100} \quad (Ec. 4.38)$$

Donde: η es el rendimiento de la combustión por kg de combustible; Q_u es el calor útil de la combustión en $[kJ/kg]$; Q_n es el calor nominal del combustible en $[kJ/kg]$; P_i son las pérdidas por inquemados en porcentaje [%]; P_s son las pérdidas por calor sensible en porcentaje [%]; P_{C+R} son las pérdidas por radiación y convección en porcentaje [%];

En cuanto a la eficiencia, existen valores mínimos exigidos por normativa, en función de la potencia de los equipos de combustión y del combustible empleado.

La Norma UNE-EN 303-5 ^[45] dispone tres clases de calderas, clase 3, clase 4 y clase 5, cada una más restrictiva, para las cuales la eficiencia mínima queda determinada por las Ecuaciones 4.39, 4.40 y 4.41, respectivamente.

$$\text{Clase 3 (} Q < 300\text{kW): } \eta = 67 + 6 \log(Q) \quad (\text{Ec. 4.39})$$

$$\text{Clase 4 (} Q < 100\text{kW): } \eta = 80 + 2 \log(Q) \quad (\text{Ec. 4.40})$$

$$\text{Clase 5 (} Q < 100\text{kW): } \eta = 87 + \log(Q) \quad (\text{Ec. 4.41})$$

Por consiguiente, se comprobarán estos requisitos en los futuros cálculos presentados.

4.6 CARACTERIZACIÓN DEL PROCESO DE COMBUSTIÓN. EMISIONES.

La combustión está indiscutiblemente condicionada por el combustible y el sistema de combustión empleado. Por ello, para caracterizar un proceso de combustión, es imprescindible caracterizar el combustible, como se abordó en el capítulo 3, y definir la tecnología utilizada para la combustión, aspecto que se desarrolla en el capítulo 5.

Igualmente será preciso caracterizar los productos generados. Para ello se determina la eficiencia, el efecto invernadero y la contaminación que conlleva dicho proceso. En cuanto la eficiencia o rendimiento, descrito en el apartado anterior, el interés se dispone en lograr el mayor valor posible. Para el efecto invernadero se controla el CO₂ emitido. Finalmente, para la contaminación ocasionada, se registran los NO_x, el CO, los SO_x y las partículas emitidas.

El análisis de humos es un procedimiento indispensable a la hora de realizar esta última caracterización, permitiendo determinar las concentraciones de contaminantes.

4.6.1 EMISIONES

Las principales emisiones y gases de combustión ya han sido mencionadas a lo largo de este capítulo. A continuación se expresan los motivos que los originan y las características que presentan:

- **Oxígeno, O₂.** Con exceso de aire en la combustión, la parte que no reacciona aparece entre los gases generados. Su medida permite obtener el rendimiento del proceso y ajustar los parámetros de operación.

- **Nitrógeno, N₂.** Pese a no reaccionar con el combustible durante la combustión, tanto la porción contenida en el aire como la que presente el propio combustible contribuye a la formación de los NO_x.
- **Vapor de agua, H₂O_v.** Se genera en la oxidación del hidrógeno del combustible. Proviene también de la propia humedad del combustible y del aire. En función de la temperatura de los gases aparece en forma de vapor o condensada.
- **Dióxido de carbono, CO₂.** Siempre está presente en los productos de la combustión por la reacción del carbono del combustible con el oxígeno del aire. No es tóxico pero contribuye de forma notable al efecto invernadero del proceso.
- **Monóxido de carbono, CO.** Es producto de una combustión incompleta motivada por bajas temperaturas o mala mezcla del combustible con el aire y de la disociación del CO₂ a altas temperaturas como las producidas durante la combustión. Es tóxico, se fija en los glóbulos rojos impidiendo la absorción del oxígeno pudiendo así producir la muerte.
- **Óxidos de nitrógeno, NO_x.** Se generan por la combinación del oxígeno con el nitrógeno, del combustible o del aire, a elevadas temperaturas fundamentalmente. Esta designación genérica abarca al NO y NO₂. En primer lugar se forma el óxido nítrico, NO. Si posteriormente se combina de nuevo con el oxígeno en exceso de los gases se genera el dióxido de nitrógeno, NO₂. Ocasionan problemas respiratorios, la destrucción de la capa de ozono y, en presencia de agua, ácido nítrico.
- **Óxidos de azufre, SO_x.** Debidos a la oxidación del azufre presente en el combustible, son gases tóxicos que provocan problemas respiratorios y tienen mal olor. Combinados con agua o condensados se convierten en ácido sulfúrico o sulfuroso. Producen lluvia ácida en la atmósfera.
- **Hidrocarburos, HC o C_xH_y.** Generados por combustiones incompletas, son nocivos y contribuyen al efecto invernadero. Los HC policíclicos aromáticos, PAH, y derivados nitrogenados, NPAH, son cancerígenos.
- **Partículas sólidas.** Su origen son las cenizas suspendidas en el aire. Ocasionan problemas respiratorios e irritaciones.
- **Dioxinas y furanos.** Son generados en presencia de carbono, cloro, oxígeno a temperaturas entre los 250°C y 450°C. Su aparición está

favorecida por las combustiones incompletas. Pueden formar ya parte del combustible en forma de impurezas y catalizadores metálicos como el cobre, el aluminio o el hierro también inducen a su aparición. Temperaturas superiores a 800°C provocarían su destrucción y la disposición de compuestos de nitrógeno y azufre los inhibiría. [46]

- **Otros.** Puede haber presencia de otros compuestos como: el amoníaco (NH₃) que se emplea para la disolución de los óxidos de nitrógeno; los cianuros de hidrógeno (HCN) que son altamente tóxicos y perjudiciales para el medio ambiente; y los haluros de hidrógeno (HCl y HF).

Existen normas reguladoras que limitan las emisiones admisibles para estos productos. De igual modo que ocurría con el rendimiento, los valores, en este caso máximos, dependen de la potencia nominal y del combustible empleado.

La instalación empleada para el desarrollo de los ensayos es de baja potencia térmica. La potencia nominal de la caldera, como se indica en el quinto capítulo de este trabajo, es de 30kW. La regulación de este tipo de instalaciones es aplicada mediante la normativa UNE-EN-303-5[45], destinada a calderas especiales para combustibles sólidos, de carga manual y automática y potencia útil nominal hasta 500kW. En ella se fija que, para instalaciones con una potencia inferior a 50kW, de carga automática y alimentada de combustibles biogénicos, los valores límites según las clases establecidas en el anterior apartado para la eficiencia son los indicados en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2 Emisiones límite de CO, HC y partículas, en mg/Nm³ al 10% de O₂.

	CO	HC	Partículas
Clase 3	3000	100	150
Clase 4	1000	30	60
Clase 5	500	20	40

Por otro lado, al no existir un valor límite de NO_x en la norma, será empleado como referencia el límite establecido por la norma austriaca, que se recoge en el Anexo A1 – apartado A.1.2 de la norma UNE- EN- 303-5[45].

Este valor, en el caso de que el combustible sea pélets de madera, está fijado en 150 mg/MJ. Calculado en base al PCI del combustible y corregido al 10% de O₂.

Consecuentemente, serán analizadas las emisiones medidas en los ensayos a fin de determinar si son o no son ambientalmente admisibles.

4.7 EXCEL PARA EL ANÁLISIS DE LA COMBUSTIÓN EXPERIMENTAL

Los analizadores de humos miden la concentración de oxígeno en los gases y con ella realizan los cálculos oportunos. Para ello disponen de una base de datos con las composiciones de los combustibles. El inconveniente está en que dicha base de datos únicamente abarca los principales combustibles comerciales, de modo que para uno distinto no es capaz de determinar todos los productos generados. La biomasa no forma parte de esa base de datos por ello se ha desarrollado una hoja Excel, a partir de los cálculos planteados en los apartados anteriores.

En primer lugar, la hoja de cálculo precisa de la caracterización elemental del combustible, la humedad del aire y la humedad de la muestra de estudio. Con ello se calculan las necesidades de aire y las cantidades de gases generados, como ilustra las Figura 4.3.

En el Excel también se recogen los datos obtenidos por el analizador de humos y se calcula el C_p de los humos, Figuras 4.4 y 4.5 respectivamente. Finalmente, y como también indica la Figura 4.5, se plantean los cálculos asociados a la emisión de CO_2 , pérdidas de combustión y el rendimiento.

CÁLCULOS TEÓRICOS PARA EL AIRE Y LOS GASES GENERADOS:					
Composición elemental combustible			Necesidades mínimas de comburente (estequiométrico)		
Elemento	Símbolo	%m/m	Masa oxígeno	simb	1.38532 kg O ₂ / kg comb
Carbono	C	0.5025	Volumen de oxígeno	simb	0.96972 Nm ³ O ₂ / kg comb
Hidrógeno	H	0.0602	Masa aire seco	simb	5.97121 kg aire seco/ kg comb
Azufre	S	0.00016	Volumen de aire seco	simb	4.61810 Nm ³ aire seco/ kg comb
Nitrógeno	N	0.0007	Masa de aire húmedo	simb	5.97133 kg aire húmedo/ kg comb
Oxígeno	O	0.43644	Volumen de aire húmedo	simb	4.61825 Nm ³ aire húmedo/ kg comb
Agua	H ₂ O	0.046	Comburente real		
Cenizas	A	0.0051	Volumen de aire real seco	simb	6.00496 Nm ³ aire seco/ kg comb
índice de exceso	n	1.300309598	Vol. aire real húmedo	simb	6.00516 Nm ³ aire húmedo/ kg comb
humedad aire		0.00002586	Gases generados en la combustión completa (estequiométrica)		
%CO máx			Masa de CO ₂	simb	1.8425 kg CO ₂ / kg comb
PCI (kcal/kg)		4500	Volumen de CO ₂	simb	0.9380 Nm ³ CO ₂ / kg comb
			Masa de H ₂ O	simb	0.5418 kg H ₂ O kg comb
			Volumen de H ₂ O	simb	0.6742 Nm ³ H ₂ O/ kg comb
			Masa de SO ₂	simb	0.0003 kg SO ₂ / kg comb
			Volumen de SO ₂	simb	0.0001 Nm ³ SO ₂ / kg comb
			Masa de N ₂	simb	0.0007 kg N ₂ / kg comb
			Volumen de N ₂	simb	0.0006 Nm ³ N ₂ / kg comb
			Masa total de gases secos	simb	6.4428 kg gases secos / kg comb
			Volumen total de gases secos	simb	4.5889 Nm ³ gases secos / kg comb
			Masa total de gases húmedos	simb	7.0307 kg gases húmedos/ kg comb
			Volumen total de gases húmedos	simb	5.3196 Nm ³ gases húmedos/ kg comb
			Gases generados en la combustión con exceso de aire		
			Masa total de gases secos	simb	8.236 kg gases secos / kg comb
			Volumen total de gases secos	simb	5.976 Nm ³ gases secos / kg comb
			Masa total de gases húmedos	simb	8.824 kg gases húmedos/ kg comb
			Volumen total de gases húmedos	simb	6.706 Nm ³ gases húmedos/ kg comb

Figura 4.3 Pantalla de los datos del combustible, el aire necesario y los gases generados para la muestra de estudio.

DATOS OBTENIDOS MEDIANTE EL ANALIZADOR DE HUMOS		
Oxígeno	%	4.85
Exceso de aire		1.300309598
CO ₂ -IR	%	15.86
CO	ppm	7
NO	ppm	128
NO ₂	ppm	-
NOx	ppm	134
SO ₂	ppm	-
CxHy	ppm	-
H ₂	ppm	3
Temp. amb.	°C	25.2
Temp. humos	°C	138.7
Pér. por chim	%	4.2
O ₂ ref	%	13
CO ₂ max	%	20
Punto rocío	°C	26
REN	%	95.8
Pabsoluta	hPa	944.2
Tiro	mbar	-
Índice Bacharach		-

Figura 4.4 Pantalla de los datos recogidos del analizador de humos.

DATOS TEÓRICOS DE EMISIONES		
Exceso Aire		1.3003096
CO ₂	%	15.7217122
Pér. por humos (calor sensible)	%	22.9388811
Pér. por inquemados	%	0.00293618
CO ₂ máx	%	20.4430932
REN	%	77.0581827

CALCULO CP GASES DE COMBUSTIÓN		
COMPUESTO	PROPORCIÓN (%)	Cp(Kj/Kg K)
N ₂	0.78754	n2 1.04498013
O ₂	0.04850	o2 0.94537974
H ₂ O	0.00674	H2O 1.90780074
CO ₂	0.15722	CO2 0.94777651
TOTAL	1.00000	SO2 0.68517589
Pm gases (kg/mol)	0.03064	
1er termino	0.82296	
2o termino	0.04585	
3er termino	0.01286	
4o termino	0.149006695	
TOTAL Cp (KcalKg-1K-1)	1.03068	

Figura 4.5 Pantalla con los cálculos y resultados del calor específico de los humos, emisiones de CO₂, pérdidas de combustión y rendimiento.

CAPÍTULO 5

INSTALACIÓN EXPERIMENTAL

5.1 INTRODUCCIÓN

El presente capítulo hace una descripción detallada de la instalación experimental utilizada en la combustión de las diferentes muestras objeto de estudio. La instalación experimental se compone de elementos comerciales, que conforman una instalación convencional para la climatización del edificio. Este sistema ya disponía de los dispositivos y accesos necesarios para poder caracterizar energéticamente la combustión y las emisiones.

Por otro lado, se describe el protocolo utilizado en los ensayos experimentales y se incluyen los diagramas de flujo del proceso seguido y de la actuación interna de la caldera.

5.2 INSTALACIÓN

Los ensayos experimentados para este trabajo han sido realizados en la sala de calderas del edificio Cenit Solar ubicado en el Parque Tecnológico de Boecillo, en Valladolid.

La instalación experimental se compone de:

- Depósito de alimentación de pélets;
- Caldera de combustión;
- Instalación de disipación;
- Sistema de control y medida.

A continuación se describen con mayor profundidad cada uno de ellos.

5.2.1 SISTEMA DE ALIMENTACIÓN

La alimentación de la cámara de combustión se realiza mediante el depósito de reserva ubicado en el lateral de la caldera. Este se llena manualmente con los kg seleccionados de las muestras de pélets estudiadas. A través del tornillo sinfín se transportan los pélets automáticamente hasta la cámara de llenado de la caldera para su combustión. La Figura 5.1 ilustra la disposición y acople del depósito de alimentación de la caldera.

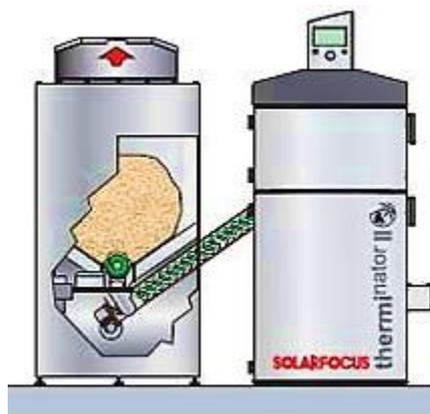
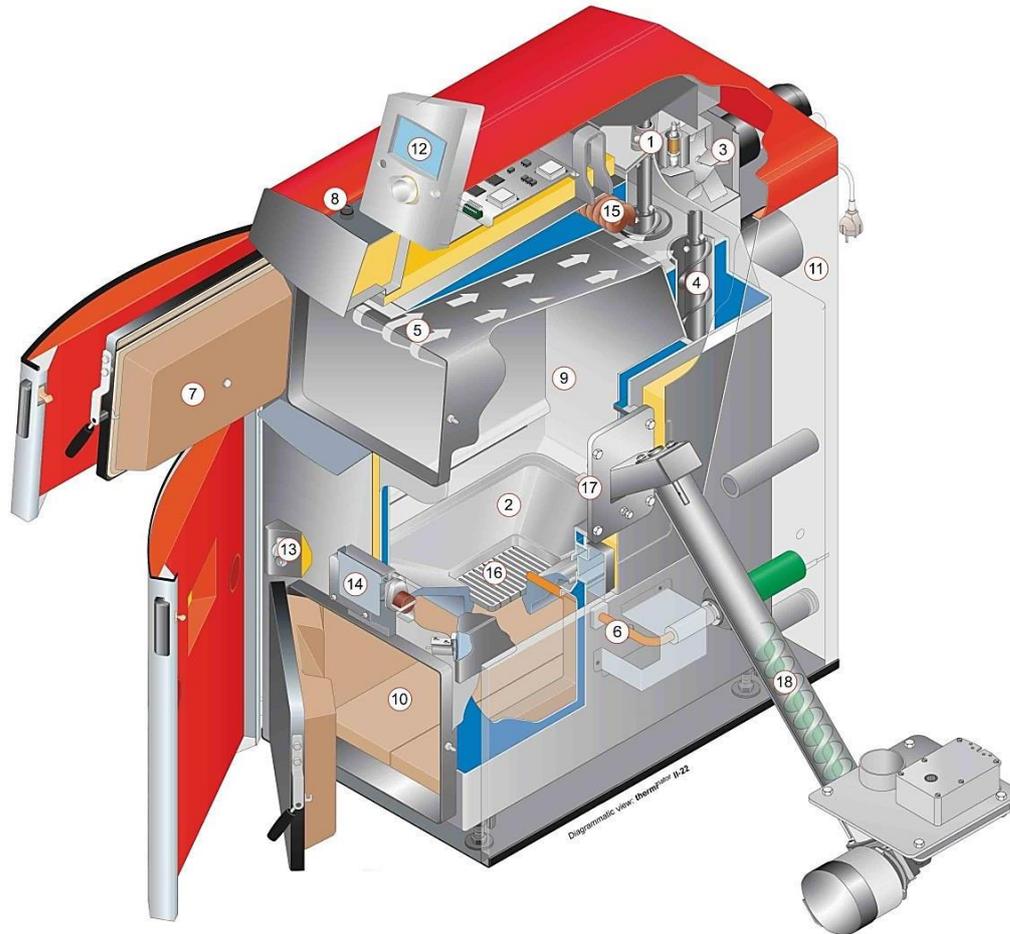


Figura 5.1 Sistema de alimentación.

5.2.2 CALDERA DE COMBUSTIÓN

Se trata de una caldera comercial de biomasa modelo Thermiⁿator II de la marca Solarfocus. Es una caldera combinada, permite trabajar con leña y pélets, en función de la configuración adoptada. Es de acero y su potencia nominal es de 30kW. La Figura 5.2 representa la caldera en cuestión e indica los diferentes elementos que la componen.



- | | |
|--|--------------------------------------|
| 1 Sonda lambda | 9 Cámara de carga |
| 2 Parrilla con embudo | 10 Cenicero |
| 3 Ventilador de tiro por aspiración | 11 Revestimiento |
| 4 Limpieza automática del intercambiador de calor | 12 Centralita de regulación |
| 5 Aspiración del gas de destilación lenta | 13 Regulación del aire principal |
| 6 Encendido automático con ventilador de aire caliente | 14 Regulación del aire secundario |
| 7 Puerta de llenado | 15 Batería de seguridad |
| 8 Limitador temperatura de seguridad (LTS) | 16 Plato del quemador |
| | 17 Brida para carga automática |
| | 18 Husillo de alimentación de pélets |

Figura 5.2 Componentes de la caldera de la instalación Thermiⁿator II. [47]

Como refleja la Figura 5.2 la caldera está equipada con una sonda lambda (1) que ajusta el coeficiente de aire optimizando los valores de combustión.

A través del ventilador de tiro por aspiración (3) se aspira controladamente el aire de combustión necesario en las diferentes zonas de rendimiento. Su control lo realiza el microprocesador integrado en la regulación, mediante los valores detectados por la sonda lambda.

Para la limpieza del intercambiador de calor (4), la caldera está equipada de sinfines helicoidales que tocan tangencialmente el intercambiador, a poca distancia, transportando las deposiciones hacia el cenicero. La limpieza se realiza a intervalos predeterminados.

Independientemente de la configuración adoptada en la caldera, trabajo con pélets o con leña, dispone de sistema encendido automático (6) consistente en un ventilador de aire caliente.

El cenicero (10) es amplio a fin de lograr intervalos de descarga prolongados.

El aire secundario es regulado por un servomotor (14). El volumen de aire, determinado por la sonda lambda, es dirigido hacia la punta de las llamas.

En caso de fallo de corriente, la batería de seguridad (15) tiene la función de impedir el sobrecalentamiento del equipo.

La Tabla 5.1 presenta las dimensiones de la caldera, su capacidad de agua y de llenado de combustible.

Tabla 5.1 Características Therminator II – 30kW. [47]

Profundidad (sin ventilador)	[cm]	102	Peso	[kg]	534
Alto	[cm]	130	Contenido de agua	[l]	90
Ancho	[cm]	62	Cámara de carga	[l]	145

Recogiendo los cometidos de los anteriores componentes, el sistema de funcionamiento de la caldera es el siguiente:

Una vez ha sido llenado el compartimento de carga, el encendido se produce automáticamente mediante un flujo de aire caliente. Posteriormente, el aire primario sale de las rejillas y atraviesa el combustible provocando su gasificación. Con ayuda del ventilador de tiro, los gases resultantes se succionan, atravesando la rejilla, hasta la cámara de combustión. Allí se oxidan en presencia del aire secundario. Este último es regulado por el

sistema de control a partir de los datos recogidos por la sonda lambda. El sistema descrito aplica la técnica de combustión descendente. En la cámara de combustión se llegan a generar temperaturas de unos 1200°C. Gracias a la llama invertida, el aprovechamiento es mayor ya que se consigue quemar las partes aún combustibles presentes en las cenizas. La Figura 5.3 esquematiza el proceso de combustión descendente, mientras que la figura 5.4 es un modelo de la oxidación desarrollada en la cámara de combustión.

Posteriormente, el ventilador de tiro inducido arrastra los gases finales a través del intercambiador vertical para realizar la transferencia de calor al agua de calefacción. Finalmente, los gases de escape son dirigidos por el conducto de humos hasta la chimenea.

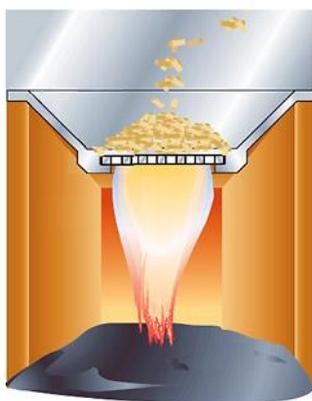


Figura 5.4 Esquema de una combustión descendente. [47]



Figura 5.4 Oxidación gases en la cámara de combustión. [47]

La unidad de control garantiza el sistema de funcionamiento automático y permite registrar con la frecuencia deseada los valores adquiridos por las sondas existentes en la caldera.

Para este trabajo se prestó atención a los valores registrados por las sondas de:

- Temperatura de los humos, TH. Se dispone en la salida de los gases de escape de la caldera.
- Temperatura de la caldera, TC. Refleja la temperatura del agua de la caldera mediante una sonda inmersa. Está situada en la parte superior de la caldera registrando los valores de la temperatura del agua a su salida. No obstante, al ser una caldera pequeña, dicha temperatura es representativa del total del agua contenida.
- Coeficiente de aire o sonda lambda, CA.

5.2.3 INSTALACIÓN DE DISIPACIÓN

La caldera forma parte de una instalación que respondía a las necesidades de calefacción del edificio en cuestión a través de Fancoils situados en cada dependencia y a su vez abastecía a una máquina de absorción para la refrigeración por suelo refrescante en las épocas de verano. Esta situación era idónea para los ensayos ya que permitía el trabajo continuo y alcanzar regímenes estacionarios.

La Figura 5.5 esquematiza dicha instalación y refleja la presencia de sensores exteriores a la caldera, termómetros y manómetros, para el control de las condiciones de impulsión y retorno del agua.

Por otro lado, en vistas a la protección de la caldera contra condensaciones y corrosión, se dispone de una válvula mezcladora entre el depósito de inercia y la caldera. El cometido de esta válvula es elevar la temperatura del retorno, que en los primeros instantes, y en función de la temperatura del depósito de inercia, será inferior a la alcanzada en la caldera. La figura 5.6 se muestra la caldera, el depósito de alimentación y el de inercia en la instalación descrita.

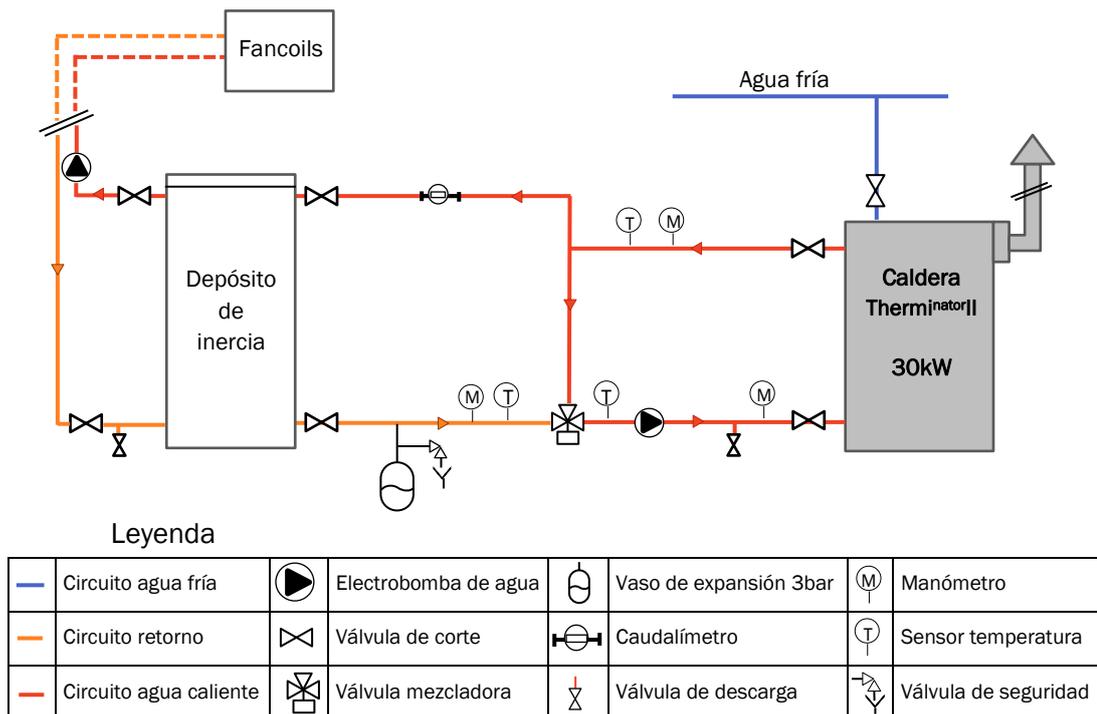


Figura 5.5 Instalación de disipación.



Figura 5.6 Caldera, depósito de inercia y depósito de alimentación.

5.3 SISTEMA DE CONTROL Y MEDIDA

El funcionamiento de la instalación es controlado por medio de sondas de presión y temperatura distribuidas por la misma, y ya representadas en la Figura 5.5. Estas, junto con los registros de la propia caldera, indicaban el momento en que se establecía el régimen estacionario para poder comenzar con la toma de datos en cada uno de los ensayos. La Tabla 5.2 recoge los parámetros controlados.

Tabla 5.2 Parámetros de control de la instalación.

Parámetro	Descripción
T_1	Temperatura del agua en el circuito de ida
T_2	Temperatura del agua en el circuito de retorno a la caldera procedente del depósito de inercia.
P_1	Presión del agua a la salida de la caldera, antes del depósito de inercia.
P_2	Presión del agua en su retorno a la caldera.
$T_{caldera}$	Temperatura del agua a su paso por la caldera.
T_{amb}	Temperatura ambiente.

Para el análisis de los productos de combustión se emplea un analizador de gases de combustión, que permite medir en los humos las concentraciones de: oxígeno, monóxido de carbono y óxidos de nitrógeno. Igualmente, mide la presión de tiro en la chimenea y la temperatura de los humos.

El analizador de gases de combustión es de la marca TESTO modelo 350-S. Cuenta con sonda de oxígeno, monóxido de carbono y óxidos de nitrógeno. Las hojas de calibración del equipo se disponen en el Anexo 1. A parte, las principales características del equipo de medición y sondas se recogen en la tabla 5.10.

Tabla 5.3 Características equipo de medida TESTO modelo 350-S.

Analizador de humos TESTO modelo 350-S	
Sonda de O ₂ electroquímica	Rango 0 % a 25 %
Sonda de CO (con compensación de H)	Rango 0 a 10000 ppm.
Sonda de NO celda electrolítica	Rango 0 a 4.000 ppm
Sonda de temperatura	
Termopar tipo	K
Intervalo de medida	-40° a 1.200°C ± 0,5 °C
Sonda de presión	
Manómetros tipo	Espiral
Intervalo presión impulsión	1 a 40 bar precisión 1 %
Intervalo presión aspiración	0,2 a 1 bar precisión 1 %

5.4 METODOLOGÍA DE ENSAYO

El protocolo de ensayo fue desarrollado del mismo modo con cada muestra:

Antes de la introducción del pélet correspondiente al estudio desarrollado, se procedía a la limpieza del equipo. Se eliminaban los restos de cualquier pélet anterior tanto del depósito de almacenamiento como del sinfín de extracción y de introducción. En la caldera se limpiaba la cámara de combustión, la parrilla y el cenicero de las cenizas y restos de combustiones previas. Las Figuras 5.7, 5.8, 5.9 y 5.10 lo ilustran.



Figura 5.7 Limpieza parrilla.



Figura 5.8 Limpieza cámara de combustión.



Figura 5.9 Limpieza del cenicero.



Figura 5.10 Limpieza de cenizas de la chimenea.

Seguidamente se procedía a introducir el nuevo pélet en el depósito de alimentación. Para que en el momento del encendido de la caldera los pélets estén disponibles, se llena el sinfín introductor activando la alimentación a través del display.

A continuación, se procedía a activar la demanda energética del edificio (calefacción, Fancoils de la nave, suelo refrescante,...) para asegurar una combustión continuada a lo largo de todo el ensayo.

La caldera está programada para ponerse en marcha en el momento en que haya una solicitud energética que no pueda ser abastecida por el depósito de inercia.

La caldera presenta una serie de estados de funcionamiento que nos indica la situación o fase en la que se encuentra o la acción que está realizando a través del display de control. La tabla 5.4 recoge los diferentes estados por los que pasa a lo largo del proceso de trabajo.

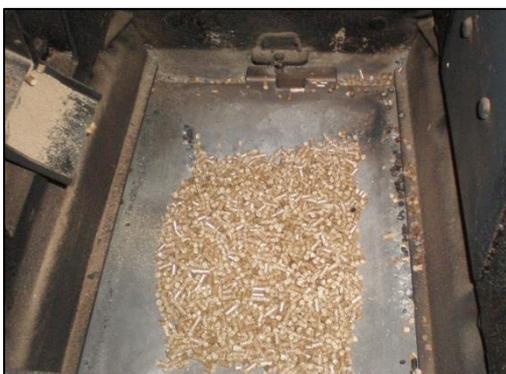


Figura 5.11 Parrilla cubierta de pélets.

En el momento en que la caldera se activa, procede a cargar la cámara de combustión. Cuando la parrilla ya se encuentra cubierta de pélets, como muestra la Figura 5.11, se pasa a la fase de encendido en la que se inicia la combustión a partir de un soplete encendedor. La fase de encendido finaliza en el momento en que bien el coeficiente de aire es inferior a 1.5 - 1.8, o sino cuando la temperatura de los humos supere los 95°C.

Las primeras etapas de la combustión constituyen la fase de inicio. En ella las condiciones térmicas de los humos y la caldera ascienden hasta establecerse en régimen estacionario y pasar al modo trabajo pélets.

Tabla 5.4 Estados de trabajo de la caldera.

Estado de trabajo	Descripción		
Disponibilidad	Caldera disponible para arrancar		
Corredera se abre	Comienza la aspiración de pélets. Se abre la compuerta anti-retorno de llama.		
Caldera cargándose	Se transportan los primeros pélets a la cámara de combustión.		
Fase de encendido	Tras cubrirse la parrilla con pélets, se prenden mediante impulsos con el soplete encendedor.		
	Acción	Coef. de aire	T_{HUMOS}
	Inicio impulso encendido	> 1.9	---
	Fin fase encendido	2 min en $< 1.5 - 1.8$	- 1ª vez = 95 °C - resto: recalculado por la caldera
Fase de Inicio	Tras alcanzarse la temperatura de humos configurada y mantener el coef. de aire en torno a 1-1.4. El nivel de llenado de pélets se regula según el coef. de aire.		
Modo trabajo pélets	Las revoluciones del ventilador y el llenado de la cámara de combustión varían según la temperatura de la caldera, de los humos y el coeficiente de aire.		
Sin peticiones, prolongación del ventilador	Atendida de la demanda de energía, se finaliza el trabajo de la caldera, y se realiza una prolongación del ventilador para descender las temperaturas.		

Si durante la fase de encendido e inicio no se planteaban problemas en el desarrollo de la combustión, entorno a la hora u hora y media del encendido de la caldera, el régimen de funcionamiento ya era estacionario y se procedía a realizar el análisis de los productos de la combustión.

Para el análisis de los humos, las sondas del equipo de medición eran introducidas en el conducto de la chimenea a través de un orificio destinado a tal fin. Este se encontraba al comienzo del conducto de humos, anterior al regulador de tiro.

Finalmente, los datos recogidos por la caldera durante el desarrollo de la combustión eran anotados para su posterior estudio.

En ocasiones, había problemas durante el desarrollo de la combustión. La caldera en estos casos avisaba del motivo y procedía a la prolongación del ventilador para restablecer los valores adecuados. Estos problemas eran detectados con la temperatura de humos, con la temperatura de la caldera o bien con el coeficiente de aire.

Para finalizar la explicación, se presenta en la Figura 5.12 el esquema del funcionamiento interno de la caldera y en la Figura 5.13 el diagrama de flujo del proceso seguido en los ensayos.

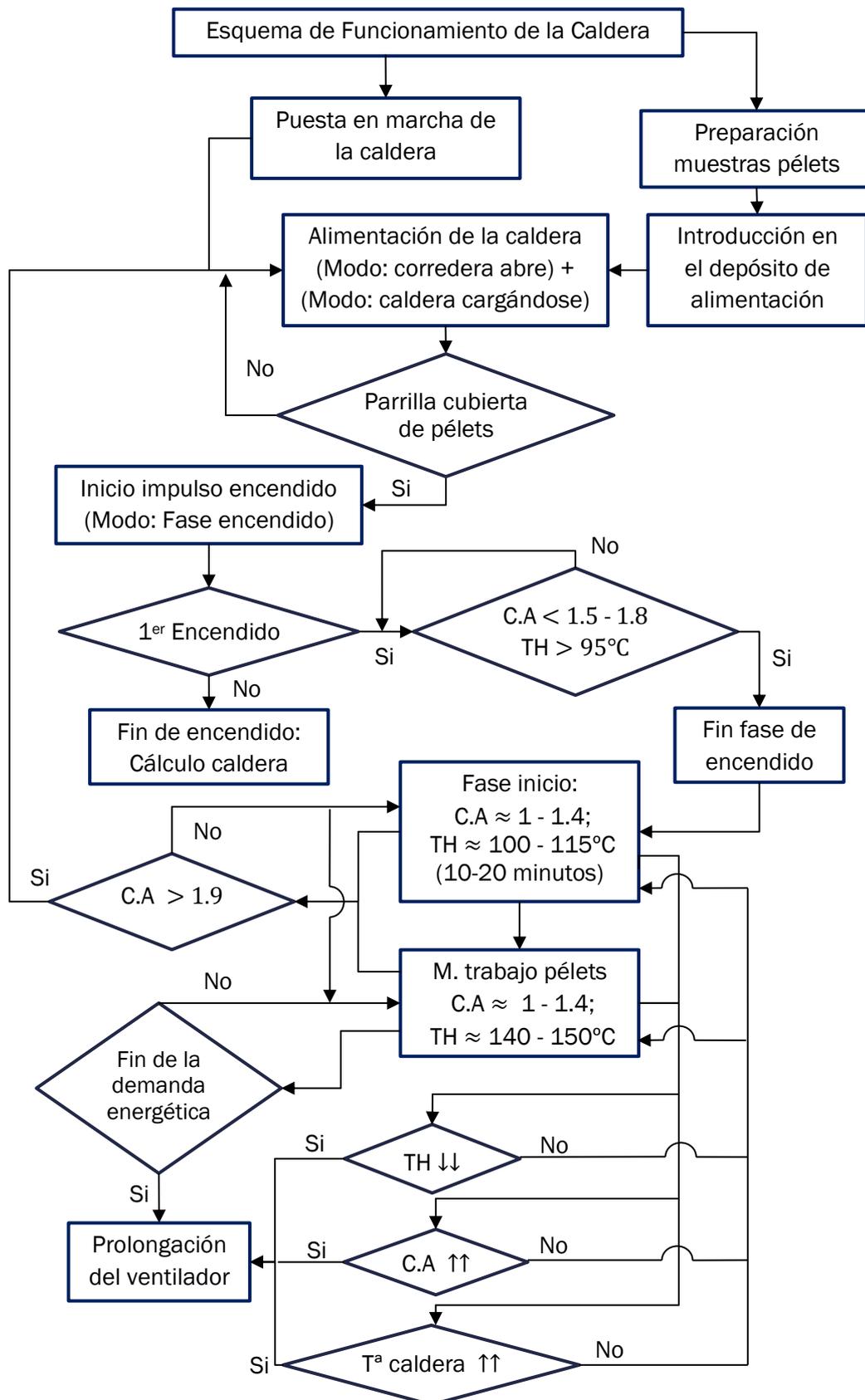


Figura 5.12 Esquema del funcionamiento interno de la caldera.

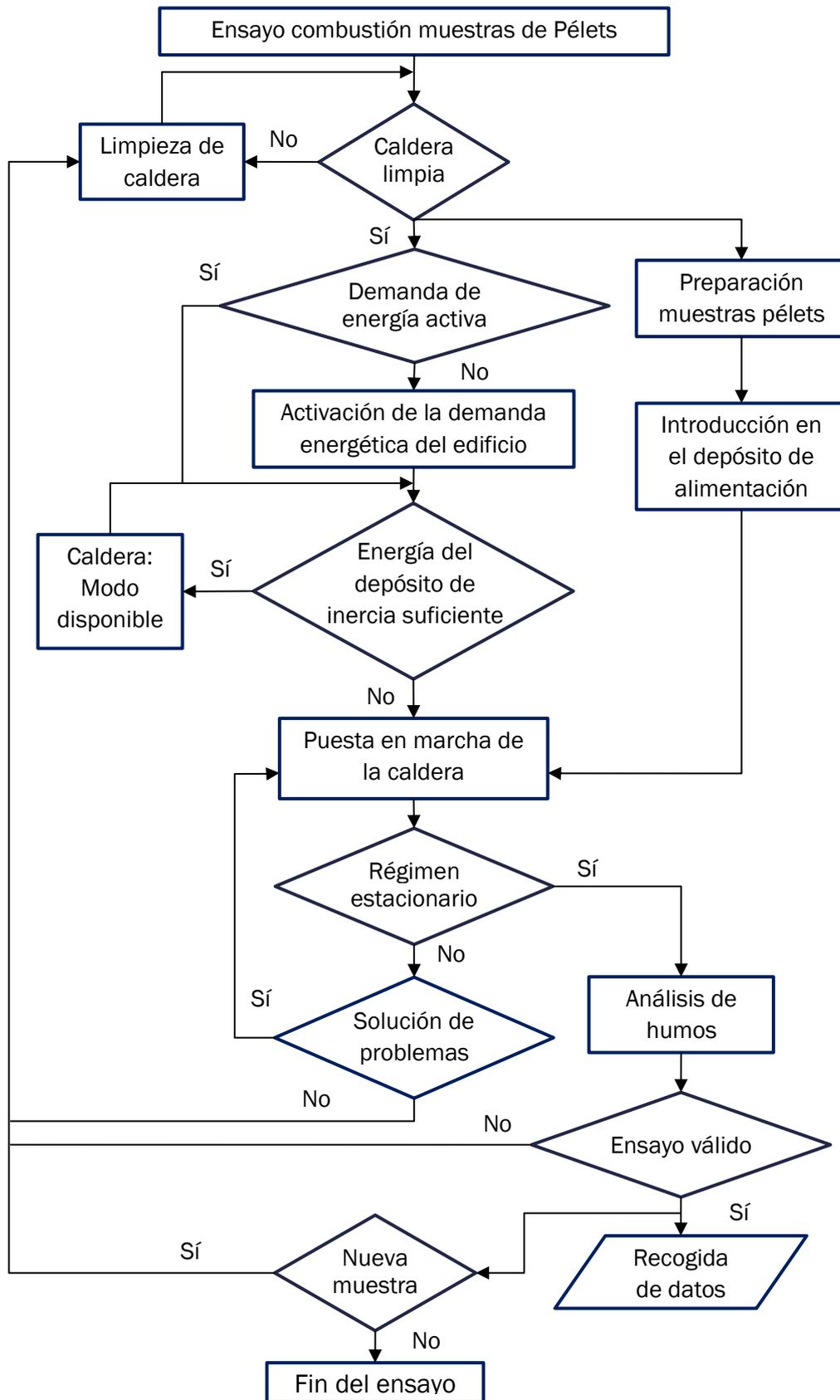


Figura 5.13 Diagrama de flujo del proceso seguido durante los ensayos.

CAPÍTULO 6

DATOS EXPERIMENTALES

6.1 INTRODUCCIÓN

El objeto de este capítulo es la presentación de los datos experimentales recopilados durante los ensayos de combustión realizados a las diferentes muestras.

Además de los valores obtenidos de la caldera y el analizador de humos, se exponen los resultados alcanzados mediante el empleo de la hoja Excel, explicada en el capítulo 4 y, desarrollada para el análisis de cada combustión.

Previamente, se indica el procedimiento seguido para su exposición.

6.2 EXPOSICIÓN DE LOS RESULTADOS

A la vista de su posterior análisis, los datos almacenados a lo largo de los ocho ensayos han sido tratados y clasificados para su óptimo entendimiento.

Con todas las muestras utilizadas la caldera llegó a funcionar durante como mínimo cuatro horas. Las duraciones exactas de cada combustión están indicadas en la Tabla 6.1, diferenciando entre los periodos transitorios y en régimen estacionario.

Indicar que como nomenclatura abreviada se empleará la letra M mayúscula acompañada del número que cada muestra representa.

Tabla 6.1 Datos de los ensayos: duración y combustible empleado.

Muestra	Duración del ensayo (hh:mm:ss)		
	Transitorio	Estacionario	Total
M1	0:38:34	6:41:18	7:19:52
M2	0:30:11	4:00:33	4:30:44
M3	0:31:49	3:47:02	4:18:51
M4	0:33:46	6:20:14	6:54:00
M5	0:42:08	4:24:14	5:06:26
M6	0:40:57	7:00:00	7:40:57
M7	0:44:08	4:26:12	5:10:20
M8	0:39:28	6:55:25	7:34:53

Como se indicó en el anterior capítulo, se ha prestado especial interés en los datos obtenidos de los sensores de la caldera referidos a la temperatura de salida de los humos, a la temperatura del agua de la caldera y al índice de exceso de aire.

Para el registro de estas tres variables, la caldera establece intervalos de funcionamiento. Los primeros coinciden con las fases de encendido y de inicio; tras entrar en el modo trabajo pélets, la duración de los intervalos pasa a ser de una hora, hasta que concluye la combustión. En las Tablas 6.2, 6.12, 6.22, 6.32, 6.42, 6.52, 6.62 y 6.72, cada cuadro corresponde a un intervalo.

En cada uno de los periodos se recogen los valores máximo y mínimo de las tres variables. A su vez, quedaba reflejado el instante temporal en que estos se alcanzaban.

Se ha de señalar que, los datos de tiempo fueron tratados para que el inicio del registro coincidiese con el comienzo del proceso de la combustión y el momento final indicase la duración total del mismo.

Las fases de encendido e inicio al igual que el periodo en el que se produce el final de la combustión constituyen el régimen transitorio del proceso. Con el modo trabajo pellet, las condiciones de funcionamiento de la caldera ya están establecidas y por tanto, como primer acercamiento, se considera el régimen estacionario.

Para facilitar la distinción entre los distintos periodos en las tablas de datos, se ha identificado mediante colores cada uno:

- Estado inicial de la caldera (color gris)
- Régimen transitorio inicial (color verde)
- Régimen estacionario (color azul)
- Régimen transitorio final (color naranja)

Por otro lado, las Tablas 6.3, 6.13, 6.23, 6.33, 6.43, 6.53, 6.63 y 6.73 incluyen los datos más relevantes de los análisis de humos realizados.

Finalmente, los parámetros y valores calculados mediante la hoja Excel se recogen en las Tablas 6.4 a 6.11, 6.14 a 6.21, 6.24 a 6.31, 6.34 a 6.41, 6.44 a 6.51, 6.54 a 6.61, 6.64 a 6.71, 6.74 a 6.81.

6.3 RESULTADOS

6.3.1 ENSAYO MUESTRA 1

DATOS DE LA CALDERA

Tabla 6.2 Datos recogidos del display de la caldera en el ensayo de la muestra 1.

Estado Inicial	mín	máx
Duración fase	0:00:00	
Temperatura Humos	19 °C	
Temperatura Caldera	17 °C	
Coefficiente de Aire	7.4	

Fase encendido	mín	máx
Duración fase	0:00:00	0:18:36
Temperatura Humos (hh:mm)	19 °C (0:00)	66 °C (0:18)
Temperatura Caldera (hh:mm)	17 °C (0:00)	35 °C (0:18)
Coefficiente de Aire (hh:mm)	1 (0:04)	7.4 (0:00)

Fase inicio	mín	máx
Duración fase	0:18:36	0:33:04
Temperatura Humos (hh:mm)	66 °C (0:18)	97 °C (0:33)
Temperatura Caldera (hh:mm)	35 °C (0:18)	54 °C (0:33)
Coefficiente de Aire (hh:mm)	1.00 (0:33)	2.16 (0:18)

Modo Trabajo Pellets	mín	máx
Duración fase	0:33:04	1:33:04
Temperatura Humos (hh:mm)	97 °C (0:33)	128 °C (1:33)
Temperatura Caldera (hh:mm)	54 °C (0:33)	56 °C (1:33)
Coefficiente de Aire (hh:mm)	1.00 (0:39)	1.84 (1:15)

Modo Trabajo Pellets	mín	máx
Duración fase	1:33:04	2:33:04
Temperatura Humos (hh:mm)	128 °C (1:33)	132 °C (2:28)
Temperatura Caldera (hh:mm)	56 °C (1:33)	61 °C (2:30)
Coefficiente de Aire (hh:mm)	1.05 (1:59)	1.65 (2:10)

Modo Trabajo Pellets	mín	máx
Duración fase	2:33:04	3:33:04
Temperatura Humos (hh:mm)	133°C (2:33)	135 °C (3:25)
Temperatura Caldera (hh:mm)	61°C (2:33)	63 °C (2:50)
Coefficiente de Aire (hh:mm)	1.22 (2:46)	2.01 (3:12)

Modo Trabajo Pellets	mín	máx
Duración fase	3:33:04	4:33:04
Temperatura Humos (hh:mm)	130 °C (4:10)	136 °C (3:35)
Temperatura Caldera (hh:mm)	62 °C (4:09)	63 °C (3:33)
Coefficiente de Aire (hh:mm)	1.13 (3:45)	1.29 (4:05)

Modo Trabajo Pellets	mín	máx
Duración fase	4:33:04	5:33:04
Temperatura Humos (hh:mm)	127 °C (5:29)	133 °C (4:33)
Temperatura Caldera (hh:mm)	61 °C (5:16)	62 °C (4:33)
Coefficiente de Aire (hh:mm)	1.00 (4:40)	1.50 (5:22)

Modo Trabajo Pellets	mín	máx
duración fase	5:33:04	6:33:04
Temperatura Humos (hh:mm)	126 °C (6:21)	129 °C (5:38)
Temperatura Caldera (hh:mm)	61 °C (5:33)	62 °C (6:19)
Coefficiente de Aire (hh:mm)	1.21 (5:39)	2.15 (5:54)

Modo Trabajo Pellets	mín	máx
duración fase	6:33:04	7:14:22
Temperatura Humos (hh:mm)	103 °C (7:13)	119 °C (6:33)
Temperatura Caldera (hh:mm)	62 °C (6:33)	63 °C (7:01)
Coefficiente de Aire (hh:mm)	1.30 (6:36)	4.08 (7:06)

Caída TH	mín	máx
duración fase	7:14:22	7:19:52
Temperatura Humos (hh:mm)	88 °C (7:19)	100 °C (7:14)
Temperatura Caldera (hh:mm)	60 °C (7:16)	62 °C (7:14)
Coefficiente de Aire (hh:mm)	1.89 (7:19)	2.71 (7:14)

ANÁLISIS DE HUMOS

Tabla 6.3 Análisis de humos del ensayo de la muestra 1.

Oxígeno (%)	4'84
CO (ppm)	14
NO (ppm)	104
NOx (ppm)	109
H ₂ (ppm)	21

Temp. amb. (°C)	23'9
Temp. humos (°C)	130'8
Pabsoluta (hPa)	937'3
CO ₂ -IR (%)	13'34
O ₂ ref (%)	13

ANÁLISIS MEDIANTE HOJA EXCELL

Tabla 6.4 Parámetros de combustión de la muestra 1.

Índice de exceso	1.2995	Humedad específica del aire	$2.586 \cdot 10^{-5}$ kg _{agua} /m ³ de aire seco
------------------	--------	-----------------------------	---

Tabla 6.5 Necesidades estequiométricas de la muestra 1.

Necesidades mínimas de comburente (estequiométrico)			
Masa oxígeno	M_{O_2}	1.33143	kg O ₂ / kg combustible
Volumen de oxígeno	V_{O_2}	0.932	Nm ³ O ₂ / kg combustible
Masa aire seco	$M_{aire,s}$	5.73894	kg aire seco/ kg combustible
Volumen de aire seco	$V_{aire,s}$	4.43847	Nm ³ aire seco/ kg combustible
Masa de aire húmedo	$M_{aire,x}$	5.73905	kg aire húmedo/ kg combustible
Volumen de aire húmedo	$V_{aire,x}$	4.43861	Nm ³ aire húmedo/ kg comb

Tabla 6.6 Masa y volumen del comburente empleado para la muestra 1.

Comburente real			
Volumen de aire real seco	$V_{aire,s\ real}$	5.76781	Nm ³ aire seco/ kg combustible
Volumen de aire real húmedo	$V_{aire,X\ real}$	5.76799	Nm ³ aire húmedo/ kg comb

Tabla 6.7 Masa y volumen estequiométrico de los gases productos de la muestra 1.

Gases generados en la combustión completa (estequiométrica)			
Masa de CO ₂	M_{CO_2}	1.7343	kg CO ₂ / kg combustible
Volumen de CO ₂	V_{CO_2}	0.8829	Nm ³ CO ₂ / kg combustible
Masa de H ₂ O	M_{H_2O}	0.5760	kg H ₂ O/ kg combustible
Volumen de H ₂ O	V_{H_2O}	0.7168	Nm ³ H ₂ O/ kg combustible
Masa de SO ₂	M_{SO_2}	0.0198	kg SO ₂ / kg combustible
Volumen de SO ₂	V_{SO_2}	0.0069	Nm ³ SO ₂ / kg combustible
Masa de N ₂	M_{N_2}	4.4088	kg N ₂ / kg combustible
Volumen de N ₂	V_{N_2}	3.5202	Nm ³ N ₂ / kg combustible

Tabla 6.8 Gases totales estequiométricos generados por la muestra 1.

Gases totales generados en la combustión completa (estequiométrica)			
Masa total de gases secos	M_{hs}	6.1758	kg gases secos / kg combustible
Volumen total de gases secos	V_{hs}	4.3992	Nm ³ gases secos / kg comb
Masa total de gases húmedos	M_{hx}	6.8219	kg gases húmedos/ kg comb
Volumen total de gases húmedos	V_{hx}	5.2018	Nm ³ gases húmedos/ kg comb

Tabla 6.9 Gases totales generados con exceso de aire por la muestra 1.

Gases generados en la combustión con exceso de aire			
Masa total de gases secos	$M_{hs,1}$	7.895	kg gases secos / kg combustible
Volumen total de gases secos	$V_{hs,1}$	5.729	Nm ³ gases secos / kg comb
Masa total de gases húmedos	$M_{hx,1}$	8.541	kg gases húmedos/ kg comb
Volumen total de gases húmedos	$V_{hx,1}$	6.531	Nm ³ gases húmedos/ kg comb

Tabla 6.10 Cp de los gases de escape de la muestra 1.

Cp	Kcal/(Kg·K)	1.02950
-----------	-------------	---------

Tabla 6.11 Porcentajes de CO₂, pérdidas y rendimiento alcanzados por la muestra 1.

CO₂ máx	%	20.2277
CO₂	%	15.5657
Pérdidas por humos	%	21.1436
Pérdidas por inquemados	%	0.0059
Rendimiento de la combustión	%	78.8506

6.3.2 ENSAYO MUESTRA 2

DATOS DE LA CALDERA

Tabla 6.12 Datos recogidos del display de la caldera en el ensayo de la muestra 2.

Estado Inicial	mín	máx
Duración fase	0:00:00	
Temperatura Humos	22 °C	
Temperatura Caldera	23 °C	
Coeficiente de Aire	7.4	

Fase encendido	mín	máx
Duración fase	0:00:00	0:09:12
Temperatura Humos (hh:mm)	22 °C (0:00)	55 °C (0:09)
Temperatura Caldera (hh:mm)	23 °C (0:00)	30 °C (0:09)
Coeficiente de Aire (hh:mm)	1 (0:03)	7.4 (0:00)

Fase inicio	mín	máx
Duración fase	0:09:12	0:22:13
Temperatura Humos (hh:mm)	55 °C (0:09)	88 °C (0:22)
Temperatura Caldera (hh:mm)	30 °C (0:09)	47 °C (0:22)
Coeficiente de Aire (hh:mm)	1.26 (0:22)	2.24 (0:11)

Modo Trabajo Pellets	mín	máx
Duración fase	0:22:13	1:22:13
Temperatura Humos (hh:mm)	88 °C (0:22)	138 °C (0:54)
Temperatura Caldera (hh:mm)	47 °C (0:22)	66 °C (0:57)
Coeficiente de Aire (hh:mm)	1.16 (0:27)	1.78 (0:58)

Modo Trabajo Pellets	mín	máx
Duración fase	1:22:13	2:22:13
Temperatura Humos (hh:mm)	141 °C (1:22)	147 °C (2:12)
Temperatura Caldera (hh:mm)	67 °C (1:22)	69 °C (2:15)
Coeficiente de Aire (hh:mm)	1.22 (1:59)	1.63 (2:01)

Modo Trabajo Pellets	mín	máx
Duración fase	2:22:13	3:22:13
Temperatura Humos (hh:mm)	146 °C (2:22)	147 °C (2:26)
Temperatura Caldera (hh:mm)	68 °C (2:29)	69 °C (2:22)
Coeficiente de Aire (hh:mm)	1.22 (2:46)	1.67 (2:50)

Modo Trabajo Pellets	mín	máx
Duración fase	3:22:13	4:22:13
Temperatura Humos (hh:mm)	146 °C (3:22)	146 °C (4:01)
Temperatura Caldera (hh:mm)	68 °C (3:22)	69 °C (4:01)
Coeficiente de Aire (hh:mm)	1.42 (3:58)	1.60 (4:03)

Modo Trabajo Pellets	mín	máx
Duración fase	4:22:13	4:22:46
Temperatura Humos (hh:mm)	146 °C (4:22)	146 °C (4:22)
Temperatura Caldera (hh:mm)	69 °C (4:22)	69 °C (4:22)
Coeficiente de Aire (hh:mm)	1.48 (4:22)	1.50 (4:22)

No hay peticiones	mín	máx
duración fase	4:22:46	4:30:44
Temperatura Humos (hh:mm)	129 °C (4:30)	146 °C (4:22)
Temperatura Caldera (hh:mm)	65 °C (4:31)	69 °C (4:23)
Coeficiente de Aire (hh:mm)	1.28 (4:24)	7.40 (4:26)

ANÁLISIS DE HUMOS

Tabla 6.13 Análisis de humos del ensayo de la muestra 2.

Oxígeno (%)	5,08	Temp. amb. (°C)	27,6
CO (ppm)	17	Temp. humos (°C)	143,1
NO (ppm)	310	Pabsoluta (hPa)	942,9
NOx (ppm)	326	CO ₂ -IR (%)	-
H ₂ (ppm)	7	O ₂ ref (%)	13

ANÁLISIS MEDIANTE HOJA EXCELL

Tabla 6.14 Parámetros de combustión de la muestra 2.

Índice de exceso	1,3191	Humedad específica del aire	$2.586 \cdot 10^{-5}$ kg _{agua} /m ³ de aire seco
------------------	--------	-----------------------------	---

Tabla 6.15 Necesidades estequiométricas de la muestra 2.

Necesidades mínimas de comburente (estequiométrico)			
Masa oxígeno	M_{O_2}	1.3953	kg O ₂ / kg combustible
Volumen de oxígeno	V_{O_2}	0.9767	Nm ³ O ₂ / kg combustible
Masa aire seco	$M_{aire,s}$	6.0144	kg aire seco/ kg combustible
Volumen de aire seco	$V_{aire,s}$	4.6515	Nm ³ aire seco/ kg combustible
Masa de aire húmedo	$M_{aire,X}$	6.0145	kg aire húmedo/ kg combustible
Volumen de aire húmedo	$V_{aire,X}$	4.6516	Nm ³ aire húmedo/ kg comb

Tabla 6.16 Masa y volumen del comburente empleado para la muestra 2.

Comburente real			
Volumen de aire real seco	$V_{aire,s real}$	6.13575	Nm ³ aire seco/ kg combustible
Volumen de aire real húmedo	$V_{aire,X real}$	6.13595	Nm ³ aire húmedo/ kg comb

Tabla 6.17 Masa y volumen estequiométrico de los gases productos de la muestra 2.

Gases generados en la combustión completa (estequiométrica)			
Masa de CO ₂	M_{CO_2}	1.8289	kg CO ₂ / kg combustible
Volumen de CO ₂	V_{CO_2}	0.9311	Nm ³ CO ₂ / kg combustible
Masa de H ₂ O	M_{H_2O}	0.5643	kg H ₂ O/ kg combustible
Volumen de H ₂ O	V_{H_2O}	0.7022	Nm ³ H ₂ O/ kg combustible
Masa de SO ₂	M_{SO_2}	0.0006	kg SO ₂ / kg combustible
Volumen de SO ₂	V_{SO_2}	0.0002	Nm ³ SO ₂ / kg combustible
Masa de N ₂	M_{N_2}	4.6205	kg N ₂ / kg combustible
Volumen de N ₂	V_{N_2}	3.6964	Nm ³ N ₂ / kg combustible

Tabla 6.18 Gases totales estequiométricos generados por la muestra 2.

Gases totales generados en la combustión completa (estequiométrica)			
Masa total de gases secos	M_{hs}	6.4635	kg gases secos / kg combustible
Volumen total de gases secos	V_{hs}	4.6091	Nm ³ gases secos / kg comb
Masa total de gases húmedos	M_{hx}	7.1346	kg gases húmedos/ kg comb
Volumen total de gases húmedos	V_{hx}	5.4420	Nm ³ gases húmedos/ kg comb

Tabla 6.19 Gases totales generados con exceso de aire por la muestra 2.

Gases generados en la combustión con exceso de aire			
Masa total de gases secos	$M_{hs,1}$	8.383	kg gases secos / kg combustible
Volumen total de gases secos	$V_{hs,1}$	6.093	Nm ³ gases secos / kg comb
Masa total de gases húmedos	$M_{hx,1}$	9.054	kg gases húmedos/ kg comb
Volumen total de gases húmedos	$V_{hx,1}$	6.926	Nm ³ gases húmedos/ kg comb

Tabla 6.20 Cp de los gases de escape de la muestra 2.

Cp	Kcal/(Kg·K)	1.03205
-----------	-------------	---------

Tabla 6.21 Porcentajes de CO₂, pérdidas y rendimiento alcanzados por la muestra 2.

CO₂ máx	%	20.2058
CO₂	%	15.3179
Pérdidas por humos	%	24.9647
Pérdidas por inquemados	%	0.00723
Rendimiento de la combustión	%	75.028

6.3.3 ENSAYO MUESTRA 3

DATOS DE LA CALDERA

Tabla 6.22 Datos recogidos del display de la caldera en el ensayo de la muestra 3.

Estado Inicial	mín	máx
Duración fase	0:00:00	
Temperatura Humos	28 °C	
Temperatura Caldera	26 °C	
Coeficiente de Aire	7.4	

Fase encendido	mín	máx
Duración fase	0:00:00	0:09:48
Temperatura Humos (hh:mm)	28 °C (0:00)	60 °C (0:11)
Temperatura Caldera (hh:mm)	26 °C (0:00)	35 °C (0:11)
Coeficiente de Aire (hh:mm)	1 (0:05)	7.4 (0:00)

Fase inicio	mín	máx
Duración fase	0:09:48	0:23:01
Temperatura Humos (hh:mm)	60 °C (0:11)	96 °C (0:23)
Temperatura Caldera (hh:mm)	35 °C (0:11)	52 °C (0:23)
Coeficiente de Aire (hh:mm)	1.13 (0:23)	1.82 (0:12)

Modo Trabajo Pellets	mín	máx
Duración fase	0:23:01	1:23:01
Temperatura Humos (hh:mm)	96 °C (0:23)	135 °C (1:23)
Temperatura Caldera (hh:mm)	52 °C (0:23)	57 °C (1:22)
Coeficiente de Aire (hh:mm)	1.08 (0:30)	1.73 (0:48)

Modo Trabajo Pellets	mín	máx
Duración fase	1:23:01	2:23:01
Temperatura Humos (hh:mm)	137 °C (1:27)	141 °C (2:17)
Temperatura Caldera (hh:mm)	56 °C (1:26)	63 °C (2:18)
Coeficiente de Aire (hh:mm)	1.00 (2:17)	1.80 (2:15)

Modo Trabajo Pellets	mín	máx
Duración fase	2:23:01	3:23:01
Temperatura Humos (hh:mm)	138°C (2:26)	142 °C (3:09)
Temperatura Caldera (hh:mm)	63°C (2:26)	70 °C (3:20)
Coeficiente de Aire (hh:mm)	1.15 (3:09)	1.90 (3:10)

Modo Trabajo Pellets	mín	máx
Duración fase	3:23:01	4:10:03
Temperatura Humos (hh:mm)	129 °C (4:11)	143 °C (3:24)
Temperatura Caldera (hh:mm)	70 °C (3:24)	75 °C (4:01)
Coeficiente de Aire (hh:mm)	1.22 (3:28)	1.96 (3:26)

No hay peticiones	mín	máx
duración fase	4:10:03	4:18:51
Temperatura Humos (hh:mm)	107 °C (4:18)	130 °C (4:13)
Temperatura Caldera (hh:mm)	73 °C (4:18)	75 °C (4:11)
Coeficiente de Aire (hh:mm)	1.00 (4:12)	7.40 (4:14)

ANÁLISIS DE HUMOS

Tabla 6.23 Análisis de humos del ensayo de la muestra 3.

Oxígeno (%)	6.51	Temp. amb. (°C)	24.2
CO (ppm)	5	Temp. humos (°C)	137
NO (ppm)	193	Pabsoluta (hPa)	937'3
NOx (ppm)	203	CO ₂ -IR (%)	13'99
H ₂ (ppm)	5	O ₂ ref (%)	13

ANÁLISIS MEDIANTE HOJA EXCELL

Tabla 6.24 Parámetros de combustión de la muestra 3.

Índice de exceso	1.4493	Humedad específica del aire	$2.586 \cdot 10^{-5}$ kg _{agua} /m ³ de aire seco
------------------	--------	-----------------------------	---

Tabla 6.25 Necesidades estequiométricas de la muestra 3.

Necesidades mínimas de comburente (estequiométrico)			
Masa oxígeno	M_{O_2}	1.41107	kg O ₂ / kg combustible
Volumen de oxígeno	V_{O_2}	0.98775	Nm ³ O ₂ / kg combustible
Masa aire seco	$M_{aire,s}$	6.08218	kg aire seco/ kg combustible
Volumen de aire seco	$V_{aire,s}$	4.70393	Nm ³ aire seco/ kg combustible
Masa de aire húmedo	$M_{aire,x}$	6.08231	kg aire húmedo/ kg combustible
Volumen de aire húmedo	$V_{aire,x}$	4.70408	Nm ³ aire húmedo/ kg comb

Tabla 6.26 Masa y volumen del comburente empleado para la muestra 3.

Comburente real			
Volumen de aire real seco	$V_{aire,s\ real}$	6.81729	Nm ³ aire seco/ kg combustible
Volumen de aire real húmedo	$V_{aire,x\ real}$	6.81751	Nm ³ aire húmedo/ kg comb

Tabla 6.27 Masa y volumen estequiométrico de los gases productos de la muestra 3.

Gases generados en la combustión completa (estequiométrica)			
Masa de CO ₂	M_{CO_2}	1.8517	kg CO ₂ / kg combustible
Volumen de CO ₂	V_{CO_2}	0.9427	Nm ³ CO ₂ / kg combustible
Masa de H ₂ O	M_{H_2O}	0.5580	kg H ₂ O/ kg combustible
Volumen de H ₂ O	V_{H_2O}	0.6944	Nm ³ H ₂ O/ kg combustible
Masa de SO ₂	M_{SO_2}	0.0004	kg SO ₂ / kg combustible
Volumen de SO ₂	V_{SO_2}	0.0001	Nm ³ SO ₂ / kg combustible
Masa de N ₂	M_{N_2}	4.6721	kg N ₂ / kg combustible
Volumen de N ₂	V_{N_2}	3.7377	Nm ³ N ₂ / kg combustible

Tabla 6.28 Gases totales estequiométricos generados por la muestra 3.

Gases totales generados en la combustión completa (estequiométrica)			
Masa total de gases secos	M_{hs}	6.5378	kg gases secos / kg combustible
Volumen total de gases secos	V_{hs}	4.6616	Nm ³ gases secos / kg comb
Masa total de gases húmedos	M_{hx}	7.1939	kg gases húmedos/ kg comb
Volumen total de gases húmedos	V_{hx}	5.4761	Nm ³ gases húmedos/ kg comb

Tabla 6.29 Gases totales generados con exceso de aire por la muestra 3.

Gases generados en la combustión con exceso de aire			
Masa total de gases secos	$M_{hs,1}$	9.270	kg gases secos / kg combustible
Volumen total de gases secos	$V_{hs,1}$	6.775	Nm ³ gases secos / kg comb
Masa total de gases húmedos	$M_{hx,1}$	9.927	kg gases húmedos/ kg comb
Volumen total de gases húmedos	$V_{hx,1}$	7.590	Nm ³ gases húmedos/ kg comb

Tabla 6.30 Cp de los gases de escape de la muestra 3.

Cp	Kcal/(Kg·K)	1.03057
-----------	-------------	---------

Tabla 6.31 Porcentajes de CO₂, pérdidas y rendimiento alcanzados por la muestra 3.

CO₂ máx	%	20.2248
CO₂	%	13.9552
Pérdidas por humos	%	25.2779
Pérdidas por inquemados	%	0.00234
Rendimiento de la combustión	%	74.7197

6.3.4 ENSAYO MUESTRA 4

DATOS DE LA CALDERA

Tabla 6.32 Datos recogidos del display de la caldera en el ensayo de la muestra 4.

Estado Inicial	mín	máx
Duración fase	0:00:00	
Temperatura Humos	28 °C	
Temperatura Caldera	26 °C	
Coeficiente de Aire	7.4	

Fase encendido	mín	máx
Duración fase	0:00:00	0:12:03
Temperatura Humos (hh:mm)	28 °C (0:00)	67 °C (0:12)
Temperatura Caldera (hh:mm)	26 °C (0:00)	38 °C (0:12)
Coeficiente de Aire (hh:mm)	1 (0:04)	7.4 (0:00)

Fase inicio	mín	máx
Duración fase	0:12:03	0:25:13
Temperatura Humos (hh:mm)	67 °C (0:13)	102 °C (0:25)
Temperatura Caldera (hh:mm)	38 °C (0:13)	55 °C (0:25)
Coeficiente de Aire (hh:mm)	1.09 (0:25)	1.96 (0:15)

Modo Trabajo Pellets	mín	máx
Duración fase	0:25:13	1:25:13
Temperatura Humos (hh:mm)	102 °C (0:26)	145 °C (1:10)
Temperatura Caldera (hh:mm)	55 °C (0:26)	69 °C (1:09)
Coeficiente de Aire (hh:mm)	1.09 (0:26)	7.4 (1:10)

Modo Trabajo Pellets	mín	máx
Duración fase	1:25:13	2:25:13
Temperatura Humos (hh:mm)	145 °C (1:26)	151 °C (2:18)
Temperatura Caldera (hh:mm)	69 °C (1:26)	72 °C (2:14)
Coeficiente de Aire (hh:mm)	1.19 (1:39)	2.01 (2:20)

Modo Trabajo Pellets	mín	máx
Duración fase	2:25:13	3:25:13
Temperatura Humos (hh:mm)	149°C (2:26)	152 °C (2:41)
Temperatura Caldera (hh:mm)	71°C (2:26)	73 °C (2:54)
Coeficiente de Aire (hh:mm)	1.19 (2:40)	1.74 (3:14)

Modo Trabajo Pellets	mín	máx
Duración fase	3:25:13	4:25:13
Temperatura Humos (hh:mm)	146 °C (4:10)	150 °C (3:26)
Temperatura Caldera (hh:mm)	73 °C (3:26)	74 °C (4:24)
Coeficiente de Aire (hh:mm)	1.19 (4:16)	1.83 (4:10)

Modo Trabajo Pellets	mín	máx
duración fase	4:25:13	5:25:13
Temperatura Humos (hh:mm)	143 °C (5:06)	148 °C (4:26)
Temperatura Caldera (hh:mm)	73 °C (4:26)	74 °C (4:30)
Coeficiente de Aire (hh:mm)	1.16 (5:08)	1.92 (5:02)

Modo Trabajo Pellets	mín	máx
Duración fase	5:25:13	6:25:13
Temperatura Humos (hh:mm)	141 °C (5:51)	145 °C (5:39)
Temperatura Caldera (hh:mm)	74 °C (5:26)	74 °C (6:25)
Coefficiente de Aire (hh:mm)	1.19 (5:47)	1.83 (6:15)

Modo Trabajo Pellets	mín	máx
Duración fase	6:25:13	6:45:27
Temperatura Humos (hh:mm)	140 °C (6:29)	142 °C (6:34)
Temperatura Caldera (hh:mm)	74 °C (6:26)	75 °C (6:35)
Coefficiente de Aire (hh:mm)	1.18 (6:40)	1.86 (6:28)

No hay peticiones	mín	máx
duración fase	6:45:27	6:54:00
Temperatura Humos (hh:mm)	127 °C (6:54)	140 °C (6:46)
Temperatura Caldera (hh:mm)	71 °C (6:54)	74 °C (6:46)
Coefficiente de Aire (hh:mm)	1.43 (6:48)	7.4 (6:49)

ANÁLISIS DE HUMOS

Tabla 6.33 Análisis de humos del ensayo de la muestra 4.

Oxígeno (%)	4.83
CO (ppm)	20
NO (ppm)	125
NOx (ppm)	131
H ₂ (ppm)	17

Temp. amb. (°C)	24.8
Temp. humos (°C)	145
P absoluta (hPa)	933.7
CO ₂ -IR (%)	15.51
O ₂ ref (%)	13

ANÁLISIS MEDIANTE HOJA EXCELL

Tabla 6.34 Parámetros de combustión de la muestra 4.

Índice de exceso	1.2987	Humedad específica del aire	$2.586 \cdot 10^{-5}$ kg _{agua} /m ³ de aire seco
------------------	--------	-----------------------------	---

Tabla 6.35 Necesidades estequiométricas de la muestra 4.

Necesidades mínimas de comburente (estequiométrico)			
Masa oxígeno	M_{O_2}	1.3046	kg O ₂ / kg combustible
Volumen de oxígeno	V_{O_2}	0.9132	Nm ³ O ₂ / kg combustible
Masa aire seco	$M_{aire,s}$	5.6233	kg aire seco/ kg combustible
Volumen de aire seco	$V_{aire,s}$	4.3491	Nm ³ aire seco/ kg combustible
Masa de aire húmedo	$M_{aire,x}$	5.6235	kg aire húmedo/ kg combustible
Volumen de aire húmedo	$V_{aire,x}$	4.3492	Nm ³ aire húmedo/ kg comb

Tabla 6.36 Masa y volumen del comburente empleado para la muestra 4.

Comburente real			
Volumen de aire real seco	$V_{aire,s\ real}$	5.6481	Nm ³ aire seco/ kg combustible
Volumen de aire real húmedo	$V_{aire,X\ real}$	5.6483	Nm ³ aire húmedo/ kg comb

Tabla 6.37 Masa y volumen estequiométrico de los gases productos de la muestra 4.

Gases generados en la combustión completa (estequiométrica)			
Masa de CO ₂	M_{CO_2}	1.7673	kg CO ₂ / kg combustible
Volumen de CO ₂	V_{CO_2}	0.8997	Nm ³ CO ₂ / kg combustible
Masa de H ₂ O	M_{H_2O}	0.5364	kg H ₂ O/ kg combustible
Volumen de H ₂ O	V_{H_2O}	0.6675	Nm ³ H ₂ O/ kg combustible
Masa de SO ₂	M_{SO_2}	0.0003	kg SO ₂ / kg combustible
Volumen de SO ₂	V_{SO_2}	0.0001	Nm ³ SO ₂ / kg combustible
Masa de N ₂	M_{N_2}	4.3193	kg N ₂ / kg combustible
Volumen de N ₂	V_{N_2}	3.4555	Nm ³ N ₂ / kg combustible

Tabla 6.38 Gases totales estequiométricos generados por la muestra 4.

Gases totales generados en la combustión completa (estequiométrica)			
Masa total de gases secos	M_{hs}	6.0995	kg gases secos / kg combustible
Volumen total de gases secos	V_{hs}	4.3381	Nm ³ gases secos / kg comb
Masa total de gases húmedos	M_{hx}	6.7040	kg gases húmedos/ kg comb
Volumen total de gases húmedos	V_{hx}	5.0889	Nm ³ gases húmedos/ kg comb

Tabla 6.39 Gases totales generados con exceso de aire por la muestra 4.

Gases generados en la combustión con exceso de aire			
Masa total de gases secos	$M_{hs,1}$	7.779	kg gases secos / kg combustible
Volumen total de gases secos	$V_{hs,1}$	5.637	Nm ³ gases secos / kg comb
Masa total de gases húmedos	$M_{hx,1}$	8.384	kg gases húmedos/ kg comb
Volumen total de gases húmedos	$V_{hx,1}$	6.388	Nm ³ gases húmedos/ kg comb

Tabla 6.40 Cp de los gases de escape de la muestra 4.

Cp	Kcal/(Kg·K)	1.03328
-----------	-------------	---------

Tabla 6.41 Porcentajes de CO₂, pérdidas y rendimiento alcanzados por la muestra 4.

CO₂ máx	%	20.7427
CO₂	%	15.972
Pérdidas por humos	%	22.962
Pérdidas por inquemados	%	0.00838
Rendimiento de la combustión	%	78.208

6.3.5 ENSAYO MUESTRA 5

DATOS DE LA CALDERA

Tabla 6.42 Datos recogidos del display de la caldera en el ensayo de la muestra 5.

Estado Inicial	mín	máx
Duración fase	0:00:00	
Temperatura Humos	26 °C	
Temperatura Caldera	23 °C	
Coeficiente de Aire	7.4	

Fase encendido	mín	máx
Duración fase	0:00:00	0:22:35
Temperatura Humos (hh:mm)	25 °C (0:00)	65 °C (0:22)
Temperatura Caldera (hh:mm)	23 °C (0:00)	34 °C (0:22)
Coeficiente de Aire (hh:mm)	1 (0:13)	7.4 (0:00)

Fase inicio	mín	máx
Duración fase	0:22:35	0:35:53
Temperatura Humos (hh:mm)	65 °C (0:23)	109°C (0:35)
Temperatura Caldera (hh:mm)	34 °C (0:22)	51 °C (0:35)
Coeficiente de Aire (hh:mm)	1.09 (0:30)	1.84 (0:24)

Modo Trabajo Pellets	mín	máx
Duración fase	0:35:53	1:35:53
Temperatura Humos (hh:mm)	109 °C (0:35)	149 °C (1:35)
Temperatura Caldera (hh:mm)	51 °C (0:35)	63 °C (1:35)
Coeficiente de Aire (hh:mm)	1.00 (0:36)	2.17 (1:09)

Modo Trabajo Pellets	mín	máx
Duración fase	1:35:53	2:35:53
Temperatura Humos (hh:mm)	148 °C (1:36)	152 °C (2:07)
Temperatura Caldera (hh:mm)	63°C (1:36)	65 °C (2:12)
Coeficiente de Aire (hh:mm)	1.15 (2:04)	1.76 (2:19)

Modo Trabajo Pellets	mín	máx
Duración fase	2:35:53	3:35:53
Temperatura Humos (hh:mm)	151°C (2:36)	154 °C (3:26)
Temperatura Caldera (hh:mm)	65°C (2:36)	68 °C (3:22)
Coeficiente de Aire (hh:mm)	1.15 (2:56)	1.79 (3:28)

Modo Trabajo Pellets	mín	máx
Duración fase	3:35:53	4:35:53
Temperatura Humos (hh:mm)	152 °C (3:36)	157 °C (4:35)
Temperatura Caldera (hh:mm)	68 °C (3:36)	71 °C (4:31)
Coeficiente de Aire (hh:mm)	1.05 (3:49)	1.80 (4:05)

Modo Trabajo Pellets	mín	máx
duración fase	4:35:53	5:00:11
Temperatura Humos (hh:mm)	153 °C (4:53)	156 °C (4:36)
Temperatura Caldera (hh:mm)	71 °C (4:36)	71 °C (4:36)
Coeficiente de Aire (hh:mm)	1.23 (4:40)	1.83 (4:36)

Coef de aire muy alto	mín	máx
Duración fase	5:00:11	5:06:26
Temperatura Humos (hh:mm)	141 °C (5:06)	151 °C (5:00)
Temperatura Caldera (hh:mm)	69 °C (5:06)	71 °C (5:00)
Coeficiente de Aire (hh:mm)	1.95 (5:01)	7.40 (5:06)

ANÁLISIS DE HUMOS

Tabla 6.43 Análisis de humos del ensayo de la muestra 5.

Oxígeno (%)	3.81	Temp. amb. (°C)	21.4
CO (ppm)	17	Temp. humos (°C)	150
NO (ppm)	433	Pabsoluta (hPa)	915.5
NOx (ppm)	455	CO ₂ -IR (%)	16.5
H ₂ (ppm)	0	O ₂ ref (%)	13

ANÁLISIS MEDIANTE HOJA EXCELL

Tabla 6.44 Parámetros de combustión de la muestra 5.

Índice de exceso	1.2216	Humedad específica del aire	$2.586 \cdot 10^{-5}$ kg _{agua} /m ³ de aire seco
------------------	--------	-----------------------------	---

Tabla 6.45 Necesidades estequiométricas de la muestra 5.

Necesidades mínimas de comburente (estequiométrico)			
Masa oxígeno	M_{O_2}	1.3668	kg O ₂ / kg combustible
Volumen de oxígeno	V_{O_2}	0.9568	Nm ³ O ₂ / kg combustible
Masa aire seco	$M_{aire,s}$	5.8913	kg aire seco/ kg combustible
Volumen de aire seco	$V_{aire,s}$	4.5563	Nm ³ aire seco/ kg combustible
Masa de aire húmedo	$M_{aire,x}$	5.8914	kg aire húmedo/ kg combustible
Volumen de aire húmedo	$V_{aire,x}$	4.55644	Nm ³ aire húmedo/ kg comb

Tabla 6.46 Masa y volumen del comburente empleado para la muestra 5.

Comburente real			
Volumen de aire real seco	$V_{aire,s\ real}$	5.56616	Nm ³ aire seco/ kg combustible
Volumen de aire real húmedo	$V_{aire,x\ real}$	5.56634	Nm ³ aire húmedo/ kg comb

Tabla 6.47 Masa y volumen estequiométrico de los gases productos de la muestra 5.

Gases generados en la combustión completa (estequiométrica)			
Masa de CO ₂	M_{CO_2}	1.7974	kg CO ₂ / kg combustible
Volumen de CO ₂	V_{CO_2}	0.9150	Nm ³ CO ₂ / kg combustible
Masa de H ₂ O	M_{H_2O}	0.5679	kg H ₂ O/ kg combustible
Volumen de H ₂ O	V_{H_2O}	0.7067	Nm ³ H ₂ O/ kg combustible
Masa de SO ₂	M_{SO_2}	0.0002	kg SO ₂ / kg combustible
Volumen de SO ₂	V_{SO_2}	0.0001	Nm ³ SO ₂ / kg combustible
Masa de N ₂	M_{N_2}	4.5258	kg N ₂ / kg combustible
Volumen de N ₂	V_{N_2}	3.6207	Nm ³ N ₂ / kg combustible

Tabla 6.48 Gases totales estequiométricos generados por la muestra 5.

Gases totales generados en la combustión completa (estequiométrica)			
Masa total de gases secos	M_{hs}	6.3366	kg gases secos / kg combustible
Volumen total de gases secos	V_{hs}	4.5176	Nm ³ gases secos / kg comb
Masa total de gases húmedos	M_{hx}	6.9576	kg gases húmedos/ kg comb
Volumen total de gases húmedos	V_{hx}	5.2893	Nm ³ gases húmedos/ kg comb

Tabla 6.49 Gases totales generados con exceso de aire por la muestra 5.

Gases generados en la combustión con exceso de aire			
Masa total de gases secos	$M_{hs,1}$	7.642	kg gases secos / kg combustible
Volumen total de gases secos	$V_{hs,1}$	5.527	Nm ³ gases secos / kg comb
Masa total de gases húmedos	$M_{hx,1}$	8.263	kg gases húmedos/ kg comb
Volumen total de gases húmedos	$V_{hx,1}$	6.299	Nm ³ gases húmedos/ kg comb

Tabla 6.50 Cp de los gases de escape de la muestra 5.

Cp	Kcal/(Kg·K)	1.03038
-----------	-------------	---------

Tabla 6.51 Porcentajes de CO₂, pérdidas y rendimiento alcanzados por la muestra 5.

CO₂ máx	%	20.25653
CO₂	%	16.58142
Pérdidas por humos	%	21.91383
Pérdidas por inquemados	%	0.006699
Rendimiento de la combustión	%	75.22951

6.3.6 ENSAYO MUESTRA 6

DATOS DE LA CALDERA

Tabla 6.52 Datos recogidos del display de la caldera en el ensayo de la muestra 6.

Estado Inicial	mín	máx	Fase encendido	mín	máx
Duración fase	0:00:00		Duración fase	0:00:00	0:09:37
Temperatura Humos	68 °C		Temperatura Humos (hh:mm)	68 °C (0:00)	94 °C (0:09)
Temperatura Caldera	65 °C		Temperatura Caldera (hh:mm)	65 °C (0:00)	65 °C (0:09)
Coeficiente de Aire	7.4		Coeficiente de Aire (hh:mm)	1 (0:02)	7.4 (0:00)

Fase inicio	mín	máx	Modo Trabajo Pellets	mín	máx
Duración fase	0:09:37	0:21:57	Duración fase	0:21:57	1:21:57
Temperatura Humos (hh:mm)	94 °C (0:09)	121°C (0:21)	Temperatura Humos (hh:mm)	121 °C (0:22)	153 °C (1:02)
Temperatura Caldera (hh:mm)	65 °C (0:09)	68 °C (0:21)	Temperatura Caldera (hh:mm)	68 °C (0:22)	72 °C (0:45)
Coeficiente de Aire (hh:mm)	1.12 (0:10)	1.63 (0:20)	Coeficiente de Aire (hh:mm)	1.17 (1:17)	1.81 (0:29)

Modo Trabajo Pellets	mín	máx	Modo Trabajo Pellets	mín	máx
Duración fase	1:21:57	2:21:57	Duración fase	2:21:57	3:21:57
Temperatura Humos (hh:mm)	150 °C (1:46)	153 °C (1:22)	Temperatura Humos (hh:mm)	143°C (3:17)	151 °C (2:22)
Temperatura Caldera (hh:mm)	66°C (2:16)	70 °C (1:22)	Temperatura Caldera (hh:mm)	63°C (3:10)	66 °C (2:22)
Coeficiente de Aire (hh:mm)	1.16 (2:13)	2.04 (1:46)	Coeficiente de Aire (hh:mm)	1.18 (2:25)	2.01 (2:52)

Modo Trabajo Pellets	mín	máx	Modo Trabajo Pellets	mín	máx
Duración fase	3:21:57	4:21:57	duración fase	4:21:57	5:21:57
Temperatura Humos (hh:mm)	141 °C (3:36)	145 °C (3:22)	Temperatura Humos (hh:mm)	141 °C (5:10)	144 °C (4:22)
Temperatura Caldera (hh:mm)	62°C (3:36)	64°C (4:03)	Temperatura Caldera (hh:mm)	62 °C (5:21)	66 °C (4:53)
Coeficiente de Aire (hh:mm)	1.10 (3:48)	2.58 (3:45)	Coeficiente de Aire (hh:mm)	1.20 (5:17)	1.78 (5:15)

Modo Trabajo Pellets	mín	máx	Modo Trabajo Pélets	mín	máx
Duración fase	5:21:57	6:21:57	Duración fase	6:21:57	7:21:57
Temperatura Humos (hh:mm)	134 °C (6:11)	141 °C (5:22)	Temperatura Humos (hh:mm)	129 °C (7:16)	136 °C (6:24)
Temperatura Caldera (hh:mm)	60°C (5:48)	62 °C (5:22)	Temperatura Caldera (hh:mm)	59°C (6:26)	60 °C (6:22)
Coefficiente de Aire (hh:mm)	1.20 (6:15)	2.70 (5:30)	Coefficiente de Aire (hh:mm)	1.18 (6:39)	2.01 (6:40)

Limpieza intercambiador	mín	máx
Duración fase	7:21:57	7:40:57
Temperatura Humos (hh:mm)	102 °C (7:40)	124 °C (7:24)
Temperatura Caldera (hh:mm)	56°C (7:39)	60 °C (7:22)
Coefficiente de Aire (hh:mm)	7.40 (7:23)	7.40 (7:23)

ANÁLISIS DE HUMOS

Tabla 6.53 Análisis de humos del ensayo de la muestra 6.

Oxígeno (%)	4.85	Temp. amb. (°C)	25.2
CO (ppm)	7	Temp. humos (°C)	138.7
NO (ppm)	128	Pabsoluta (hPa)	944.2
NOx (ppm)	134	CO ₂ -IR (%)	15.86
H ₂ (ppm)	3	O ₂ ref (%)	13

ANÁLISIS MEDIANTE HOJA EXCELL

Tabla 6.54 Parámetros de combustión de la muestra 6.

Índice de exceso	1.3003	Humedad específica del aire	$2.586 \cdot 10^{-5}$ kg _{agua} /m ³ de aire seco
------------------	--------	-----------------------------	---

Tabla 6.55 Necesidades estequiométricas de la muestra 6.

Necesidades mínimas de comburente (estequiométrico)			
Masa oxígeno	M_{O_2}	1.38532	kg O ₂ / kg combustible
Volumen de oxígeno	V_{O_2}	0.96972	Nm ³ O ₂ / kg combustible
Masa aire seco	$M_{aire,s}$	5.97121	kg aire seco/ kg combustible
Volumen de aire seco	$V_{aire,s}$	4.6181	Nm ³ aire seco/ kg combustible
Masa de aire húmedo	$M_{aire,x}$	5.97133	kg aire húmedo/ kg combustible
Volumen de aire húmedo	$V_{aire,x}$	4.61825	Nm ³ aire húmedo/ kg comb

Tabla 6.56 Masa y volumen del comburente empleado para la muestra 6.

Comburente real			
Volumen de aire real seco	$V_{aire,s\ real}$	6.00496	Nm ³ aire seco/ kg combustible
Volumen de aire real húmedo	$V_{aire,X\ real}$	6.00516	Nm ³ aire húmedo/ kg comb

Tabla 6.57 Masa y volumen estequiométrico de los gases productos de la muestra 6.

Gases generados en la combustión completa (estequiométrica)			
Masa de CO ₂	M_{CO_2}	1.8425	kg CO ₂ / kg combustible
Volumen de CO ₂	V_{CO_2}	0.9380	Nm ³ CO ₂ / kg combustible
Masa de H ₂ O	M_{H_2O}	0.5418	kg H ₂ O/ kg combustible
Volumen de H ₂ O	V_{H_2O}	0.6742	Nm ³ H ₂ O/ kg combustible
Masa de SO ₂	M_{SO_2}	0.0003	kg SO ₂ / kg combustible
Volumen de SO ₂	V_{SO_2}	0.0001	Nm ³ SO ₂ / kg combustible
Masa de N ₂	M_{N_2}	4.5866	kg N ₂ / kg combustible
Volumen de N ₂	V_{N_2}	3.6693	Nm ³ N ₂ / kg combustible

Tabla 6.58 Gases totales estequiométricos generados por la muestra 6.

Gases totales generados en la combustión completa (estequiométrica)			
Masa total de gases secos	M_{hs}	6.4428	kg gases secos / kg combustible
Volumen total de gases secos	V_{hs}	4.5889	Nm ³ gases secos / kg comb
Masa total de gases húmedos	M_{hx}	7.0307	kg gases húmedos/ kg comb
Volumen total de gases húmedos	V_{hx}	5.3196	Nm ³ gases húmedos/ kg comb

Tabla 6.59 Gases totales generados con exceso de aire por la muestra 6.

Gases generados en la combustión con exceso de aire			
Masa total de gases secos	$M_{hs,1}$	8.236	kg gases secos / kg combustible
Volumen total de gases secos	$V_{hs,1}$	5.976	Nm ³ gases secos / kg comb
Masa total de gases húmedos	$M_{hx,1}$	8.824	kg gases húmedos/ kg comb
Volumen total de gases húmedos	$V_{hx,1}$	6.706	Nm ³ gases húmedos/ kg comb

Tabla 6.60 Cp de los gases de escape de la muestra 6.

Cp	Kcal/(Kg·K)	1.03068
-----------	-------------	---------

Tabla 6.61 Porcentajes de CO₂, pérdidas y rendimiento alcanzados por la muestra 6.

CO₂ máx	%	20.4431
CO₂	%	15.7217
Pérdidas por humos	%	22.9389
Pérdidas por inquemados	%	0.00294
Rendimiento de la combustión	%	77.0582

6.3.7 ENSAYO MUESTRA 7

DATOS DE LA CALDERA

Tabla 6.62 Datos recogidos del display de la caldera en el ensayo de la muestra 7.

Estado Inicial	mín	máx
Duración fase	0:00:00	
Temperatura Humos	38 °C	
Temperatura Caldera	36 °C	
Coefficiente de Aire	7.4	

Fase encendido	mín	máx
Duración fase	0:00:00	0:19:41
Temperatura Humos (h:mm)	38 °C (0:00)	84 °C (0:19)
Temperatura Caldera (h:mm)	36 °C (0:00)	48 °C (0:19)
Coefficiente de Aire (h:mm)	1 (0:02)	7.4 (0:00)

Fase inicio	mín	máx
Duración fase	0:19:41	0:32:58
Temperatura Humos (h:mm)	84 °C (0:19)	118°C (0:32)
Temperatura Caldera (h:mm)	48 °C (0:19)	57 °C (0:32)
Coefficiente de Aire (h:mm)	1.00 (0:32)	1.96 (0:21)

Modo Trabajo Pellets	mín	máx
Duración fase	0:32:58	1:32:58
Temperatura Humos (h:mm)	117 °C (0:33)	148 °C (1:31)
Temperatura Caldera (h:mm)	57 °C (0:32)	62 °C (0:55)
Coefficiente de Aire (h:mm)	1.00 (0:36)	2.19 (1:09)

Modo Trabajo Pellets	mín	máx
Duración fase	1:32:58	2:32:58
Temperatura Humos (h:mm)	145 °C (2:01)	150 °C (1:53)
Temperatura Caldera (h:mm)	62°C (1:33)	64 °C (2:15)
Coefficiente de Aire (h:mm)	1.00 (2:04)	3.22 (2:19)

Modo Trabajo Pellets	mín	máx
Duración fase	2:32:58	3:32:58
Temperatura Humos (h:mm)	140°C (3:30)	149 °C (2:58)
Temperatura Caldera (h:mm)	63°C (2:33)	65 °C (2:58)
Coefficiente de Aire (h:mm)	1.00 (2:56)	2.24 (3:28)

Modo Trabajo Pellets	mín	máx
Duración fase	3:32:58	4:32:58
Temperatura Humos (h:mm)	131 °C (4:33)	141 °C (3:33)
Temperatura Caldera (h:mm)	64°C (3:33)	65 °C (3:46)
Coefficiente de Aire (h:mm)	1.00 (3:49)	1.90 (4:05)

Modo Trabajo Pellets	mín	máx
duración fase	4:32:58	4:59:10
Temperatura Humos (h:mm)	121 °C (4:56)	135 °C (4:34)
Temperatura Caldera (h:mm)	62 °C (4:59)	65 °C (4:33)
Coefficiente de Aire (h:mm)	1.00 (4:40)	7.40 (4:36)

Caida TH	mín	máx
Duración fase	4:59:10	5:10:20
Temperatura Humos (h:mm)	79 °C (5:08)	121 °C (4:59)
Temperatura Caldera (h:mm)	62°C (4:59)	68 °C (4:31)
Coefficiente de Aire (h:mm)	1.51 (3:49)	7.40 (5:10)

ANÁLISIS DE HUMOS

Tabla 6.63 Análisis de humos del ensayo de la muestra 7.

Oxígeno (%)	6.11	Temp. amb. (°C)	23.3
CO (ppm)	4	Temp. humos (°C)	149.1
NO (ppm)	119	Pabsoluta (hPa)	942.8
NOx (ppm)	125	CO ₂ -IR (%)	14.29
H ₂ (ppm)	3	O ₂ ref (%)	13

ANÁLISIS MEDIANTE HOJA EXCELL

Tabla 6.64 Parámetros de combustión de la muestra 7.

Índice de exceso	1.4103	Humedad específica del aire	$2.586 \cdot 10^{-5}$ kg _{agua} /m ³ _{de aire seco}
------------------	--------	-----------------------------	--

Tabla 6.65 Necesidades estequiométricas de la muestra 7.

Necesidades mínimas de comburente (estequiométrico)			
Masa oxígeno	M_{O_2}	1.3567	kg O ₂ / kg combustible
Volumen de oxígeno	V_{O_2}	0.9497	Nm ³ O ₂ / kg combustible
Masa aire seco	$M_{aire,s}$	5.84767	kg aire seco/ kg combustible
Volumen de aire seco	$V_{aire,s}$	4.52256	Nm ³ aire seco/ kg combustible
Masa de aire húmedo	$M_{aire,X}$	5.84779	kg aire húmedo/ kg combustible
Volumen de aire húmedo	$V_{aire,X}$	4.52271	Nm ³ aire húmedo/ kg comb

Tabla 6.66 Masa y volumen del comburente empleado para la muestra 7.

Comburente real			
Volumen de aire real seco	$V_{aire,s real}$	6.3784	Nm ³ aire seco/ kg combustible
Volumen de aire real húmedo	$V_{aire,X real}$	6.3786	Nm ³ aire húmedo/ kg comb

Tabla 6.67 Masa y volumen estequiométrico de los gases productos de la muestra 7.

Gases generados en la combustión completa (estequiométrica)			
Masa de CO ₂	M_{CO_2}	1.8018	kg CO ₂ / kg combustible
Volumen de CO ₂	V_{CO_2}	0.9173	Nm ³ CO ₂ / kg combustible
Masa de H ₂ O	M_{H_2O}	0.5535	kg H ₂ O/ kg combustible
Volumen de H ₂ O	V_{H_2O}	0.6888	Nm ³ H ₂ O/ kg combustible
Masa de SO ₂	M_{SO_2}	0.0004	kg SO ₂ / kg combustible
Volumen de SO ₂	V_{SO_2}	0.0001	Nm ³ SO ₂ / kg combustible
Masa de N ₂	M_{N_2}	4.4920	kg N ₂ / kg combustible
Volumen de N ₂	V_{N_2}	3.5936	Nm ³ N ₂ / kg combustible

Tabla 6.68 Gases totales estequiométricos generados por la muestra 7.

Gases totales generados en la combustión completa (estequiométrica)			
Masa total de gases secos	M_{hs}	6.3073	kg gases secos / kg combustible
Volumen total de gases secos	V_{hs}	4.4930	Nm ³ gases secos / kg comb
Masa total de gases húmedos	M_{hx}	6.9454	kg gases húmedos/ kg comb
Volumen total de gases húmedos	V_{hx}	5.2854	Nm ³ gases húmedos/ kg comb

Tabla 6.69 Gases totales generados con exceso de aire por la muestra 7.

Gases generados en la combustión con exceso de aire			
Masa total de gases secos	$M_{hs,1}$	8.707	kg gases secos / kg combustible
Volumen total de gases secos	$V_{hs,1}$	6.349	Nm ³ gases secos / kg comb
Masa total de gases húmedos	$M_{hx,1}$	9.345	kg gases húmedos/ kg comb
Volumen total de gases húmedos	$V_{hx,1}$	7.141	Nm ³ gases húmedos/ kg comb

Tabla 6.70 Cp de los gases de escape de la muestra 7.

Cp	Kcal/(Kg·K)	1.03301
-----------	-------------	---------

Tabla 6.71 Porcentajes de CO₂, pérdidas y rendimiento alcanzados por la muestra 7.

CO₂ máx	%	20.4187
CO₂	%	14.4778
Pérdidas por humos	%	25.8384
Pérdidas por inquemados	%	0.00182
Rendimiento de la combustión	%	74.1598

6.3.8 ENSAYO MUESTRA 8

DATOS DE LA CALDERA

Tabla 6.72 Datos recogidos del display de la caldera en el ensayo de la muestra 8.

Estado Inicial	mín	máx
Duración fase	0:00:00	
Temperatura Humos	34 °C	
Temperatura Caldera	30 °C	
Coeficiente de Aire	7.4	

Fase encendido	mín	máx
Duración fase	0:00:00	0:17:40
Temperatura Humos (h:mm)	34 °C (0:00)	75 °C (0:17)
Temperatura Caldera (h:mm)	30 °C (0:00)	43 °C (0:17)
Coeficiente de Aire (h:mm)	1 (0:01)	7.4 (0:00)

Fase inicio	mín	máx
Duración fase	0:17:40	0:30:52
Temperatura Humos (h:mm)	75 °C (0:17)	105°C (0:30)
Temperatura Caldera (h:mm)	43 °C (0:17)	55 °C (0:30)
Coeficiente de Aire (h:mm)	1.09 (0:29)	1.82 (0:20)

Modo Trabajo Pellets	mín	máx
Duración fase	0:30:52	1:30:52
Temperatura Humos (h:mm)	105 °C (0:32)	150 °C (0:53)
Temperatura Caldera (h:mm)	55 °C (0:30)	63 °C (1:26)
Coeficiente de Aire (h:mm)	1.00 (0:37)	2.54 (1:06)

Modo Trabajo Pellets	mín	máx
Duración fase	1:30:52	2:30:52
Temperatura Humos (h:mm)	147 °C (1:33)	155 °C (2:00)
Temperatura Caldera (h:mm)	63°C (1:30)	65 °C (2:12)
Coeficiente de Aire (h:mm)	1.00 (1:33)	1.84 (2:24)

Modo Trabajo Pellets	mín	máx
Duración fase	2:30:52	3:30:52
Temperatura Humos (h:mm)	152°C (2:50)	156 °C (2:59)
Temperatura Caldera (h:mm)	65°C (2:30)	66 °C (2:54)
Coeficiente de Aire (h:mm)	1.02 (3:03)	1.97 (3:28)

Modo Trabajo Pellets	mín	máx
Duración fase	3:30:52	4:30:52
Temperatura Humos (h:mm)	150 °C (3:39)	156 °C (4:28)
Temperatura Caldera (h:mm)	65°C (3:30)	67 °C (3:55)
Coeficiente de Aire (h:mm)	1.17 (3:44)	2.24 (3:36)

Modo Trabajo Pellets	mín	máx
duración fase	4:30:52	5:30:52
Temperatura Humos (h:mm)	152 °C (5:13)	158 °C (4:34)
Temperatura Caldera (h:mm)	67 °C (4:30)	68 °C (5:30)
Coeficiente de Aire (h:mm)	1.15 (4:39)	2.23 (5:10)

Modo Trabajo Pellets	mín	máx
Duración fase	5:30:52	6:30:52
Temperatura Humos (h:mm)	153 °C (5:32)	168 °C (5:54)
Temperatura Caldera (h:mm)	68°C (5:30)	70 °C (5:45)
Coefficiente de Aire (h:mm)	1.00 (5:35)	3.56 (5:32)

Modo Trabajo Péllets	mín	máx
Duración fase	6:30:52	7:26:17
Temperatura Humos (h:mm)	145 °C (7:10)	170 °C (7:21)
Temperatura Caldera (h:mm)	69°C (7:04)	71 °C (6:32)
Coefficiente de Aire (h:mm)	1.00 (6:34)	7.40 (7:25)

Coef. aire muy alto	mín	máx
Duración fase	7:26:17	7:34:53
Temperatura Humos (h:mm)	97 °C (7:34)	163 °C (7:26)
Temperatura Caldera (h:mm)	68°C (7:32)	71 °C (7:26)
Coefficiente de Aire (h:mm)	7.40 (7:26)	7.40 (7:26)

ANÁLISIS DE HUMOS

Tabla 6.73 Análisis de humos del ensayo de la muestra 8.

Oxígeno (%)	5.73
CO (ppm)	8
NO (ppm)	108
NOx (ppm)	114
H ₂ (ppm)	1

Temp. amb. (°C)	22.5
Temp. humos (°C)	145.4
Pabsoluta (hPa)	940.6
CO ₂ -IR (%)	14.81
O ₂ ref (%)	13

ANÁLISIS MEDIANTE HOJA EXCELL

Tabla 6.74 Parámetros de combustión de la muestra 8.

Índice de exceso	1.3752	Humedad específica del aire	$2.586 \cdot 10^{-5}$ kg _{agua} /m ³ _{de aire seco}
------------------	--------	-----------------------------	--

Tabla 6.75 Necesidades estequiométricas de la muestra 8.

Necesidades mínimas de comburente (estequiométrico)			
Masa oxígeno	M_{O_2}	1.37543	kg O ₂ / kg combustible
Volumen de oxígeno	V_{O_2}	0.96280	Nm ³ O ₂ / kg combustible
Masa aire seco	$M_{aire,s}$	5.92856	kg aire seco/ kg combustible
Volumen de aire seco	$V_{aire,s}$	4.58512	Nm ³ aire seco/ kg combustible
Masa de aire húmedo	$M_{aire,x}$	5.92868	kg aire húmedo/ kg combustible
Volumen de aire húmedo	$V_{aire,x}$	4.58527	Nm ³ aire húmedo/ kg comb

Tabla 6.76 Masa y volumen del comburente empleado para la muestra 8.

Comburente real			
Volumen de aire real seco	$V_{aire,s\ real}$	6.30567	Nm ³ aire seco/ kg combustible
Volumen de aire real húmedo	$V_{aire,X\ real}$	6.30587	Nm ³ aire húmedo/ kg comb

Tabla 6.77 Masa y volumen estequiométrico de los gases productos de la muestra 8.

Gases generados en la combustión completa (estequiométrica)			
Masa de CO ₂	M_{CO_2}	1.7857	kg CO ₂ / kg combustible
Volumen de CO ₂	V_{CO_2}	0.9091	Nm ³ CO ₂ / kg combustible
Masa de H ₂ O	M_{H_2O}	0.5877	kg H ₂ O/ kg combustible
Volumen de H ₂ O	V_{H_2O}	0.7314	Nm ³ H ₂ O/ kg combustible
Masa de SO ₂	M_{SO_2}	0.0005	kg SO ₂ / kg combustible
Volumen de SO ₂	V_{SO_2}	0.0002	Nm ³ SO ₂ / kg combustible
Masa de N ₂	M_{N_2}	4.5547	kg N ₂ / kg combustible
Volumen de N ₂	V_{N_2}	3.6438	Nm ³ N ₂ / kg combustible

Tabla 6.78 Gases totales estequiométricos generados por la muestra 8.

Gases totales generados en la combustión completa (estequiométrica)			
Masa total de gases secos	M_{hs}	6.3541	kg gases secos / kg combustible
Volumen total de gases secos	V_{hs}	4.5347	Nm ³ gases secos / kg comb
Masa total de gases húmedos	M_{hx}	7.0261	kg gases húmedos/ kg comb
Volumen total de gases húmedos	V_{hx}	5.3692	Nm ³ gases húmedos/ kg comb

Tabla 6.79 Gases totales generados con exceso de aire por la muestra 8.

Gases generados en la combustión con exceso de aire			
Masa total de gases secos	$M_{hs,1}$	8.579	kg gases secos / kg combustible
Volumen total de gases secos	$V_{hs,1}$	6.255	Nm ³ gases secos / kg comb
Masa total de gases húmedos	$M_{hx,1}$	9.251	kg gases húmedos/ kg comb
Volumen total de gases húmedos	$V_{hx,1}$	7.090	Nm ³ gases húmedos/ kg comb

Tabla 6.80 Cp de los gases de escape de la muestra 8.

Cp	Kcal/(Kg·K)	1.03285
-----------	-------------	---------

Tabla 6.81 Porcentajes de CO₂, pérdidas y rendimiento alcanzados por la muestra 8.

CO₂ máx	%	20.0504
CO₂	%	14.5795
Pérdidas por humos	%	25.5276
Pérdidas por inquemados	%	0.00355
Rendimiento de la combustión	%	74.4688

CAPÍTULO 7

ANÁLISIS DE RESULTADOS

7.1 INTRODUCCIÓN

El interés presente se centra en análisis de los resultados expuestos en el anterior capítulo con el fin de comparar las ocho muestras de estudio y, a su vez, poder definir cuál se presta como la mejor opción para trabajar en la caldera de estudio.

Para ello, en primer lugar, se estudia la evolución de la temperatura del agua de la caldera, de los humos y del coeficiente de aire, buscando los periodos estacionarios para poder definir los valores medios que los caracterizan. Igualmente, se indican los inconvenientes encontrados en cada ensayo.

Seguidamente, se plantean las emisiones asociadas a cada combustión. Son objeto de ello el porcentaje de CO_2 y las partes por millón de CO y NO_x .

Por último, se establece el rendimiento teórico alcanzado en cada uno de los ensayos.

7.2 EVOLUCIÓN DE LOS PARÁMETROS DE COMBUSTIÓN

Los datos almacenados en el display de la caldera, expuestos en el capítulo 6, permiten plantear la evolución temporal de los siguientes parámetros:

- Temperatura de los humos (TH)
- Temperatura de la caldera (TC)
- Coeficiente de aire (CA)

Su desarrollo establece claramente los estados transitorios y estacionarios de cada experimentación. Como primera aproximación, se identificó la fase estacionaria con el estado “Modo Trabajo Pellets” de la caldera. Ahora, con los gráficos elaborados es posible acotar con mayor precisión el periodo estacionario que ha tenido lugar. Así, los tramos de color verde en la evolución de cada parámetro representan dicho periodo.

El interés de conocer las zonas estables se fija en determinar los valores medios que las caracterizan. En las tablas de datos que acompañan a las gráficas se destaca el intervalo empleado para su cálculo mediante un fondo amarillento.

Por otro lado, también es posible conocer si el comportamiento de la combustión a lo largo del tiempo fue el correcto o por el contrario se produjeron anomalías. Estas anomalías quedarán reflejadas por variaciones bruscas en alguno o varios de los parámetros tratados, pudiendo determinar el origen inmediato de los mismos.

A continuación, se presentan los estudios realizados para cada muestra.

7.2.1 ENSAYO MUESTRA 1

TEMPERATURA DE LOS HUMOS Y TEMPERATURA DE LA CALDERA

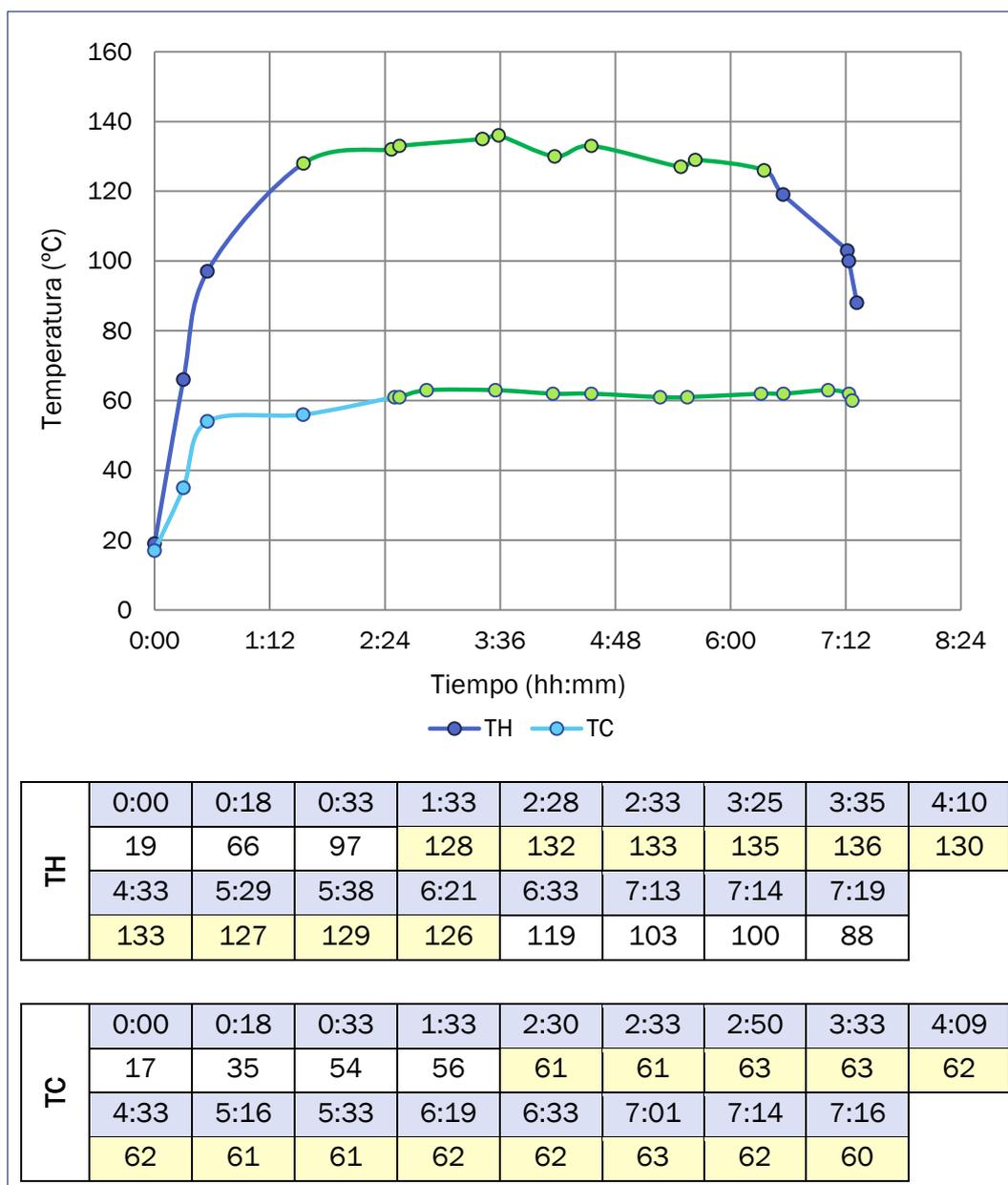


Gráfico 7.1: Evolución temporal de TH y TC durante el ensayo 1.

Tal y como se refleja en el Gráfico 7.1, el estado térmico tanto de los humos como de la caldera asciende bruscamente en las fase de encendido y fase de inicio debido al comienzo de la combustión. Pasadas dos horas y media, ambos parámetros ya presentan valores estables.

En el caso de la temperatura de la caldera, el valor medio resulta de 61.77°C. Para la temperatura de los humos el valor promedio es de 130.9°C, no obstante, tras alcanzar su máximo a las tres horas y media, 136°C, presenta un descenso brusco hasta llegar a los 88°C. Este hecho motivó la alerta de la caldera, por caída de la temperatura de humos, provocando el cese de la combustión y la prolongación del ventilador.

▪ **COEFICIENTE DE AIRE**

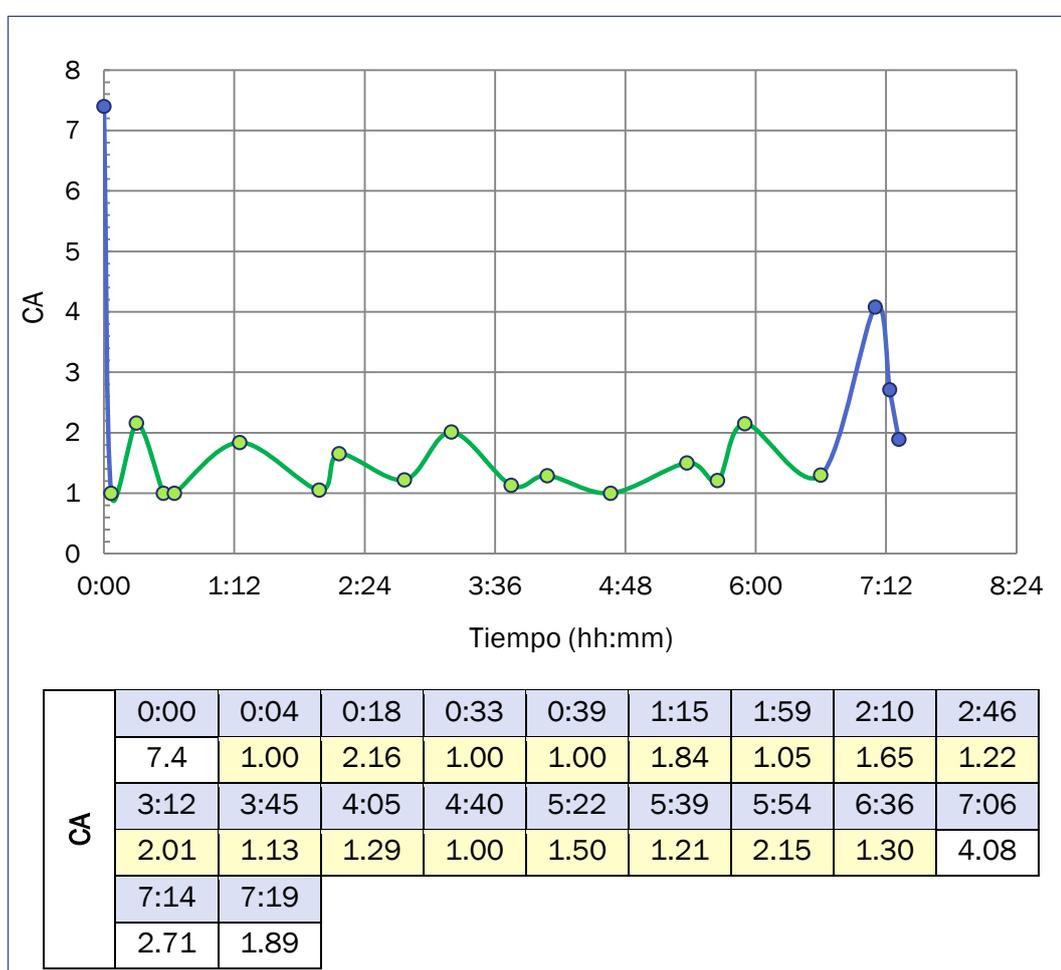


Gráfico 7.2: Evolución temporal del índice de exceso para la muestra 1.

En cuanto al índice de exceso de aire, se observa en el Gráfico 7.2 como partiendo de 7.40, valor indicativo de que aún no ha comenzado la combustión, baja y se mantiene estacionario con valores entre 1 y 2, siendo el valor medio de 1.41.

Con la variabilidad de este índice se adecua la cantidad de aire introducido en función de las condiciones detectadas por la sonda lambda en la cámara de combustión.

A las 6 horas de combustión el índice de exceso se altera alcanzando un valor de 4.08. Viendo que al cabo de diez minutos la combustión finaliza, la anomalía representa que existen problemas en la combustión.

- **PROBLEMÁTICA DURANTE EL ENSAYO DE LA MUESTRA 1**

La caída de la temperatura de los humos, fundamentalmente, acompañada de la elevación del coeficiente de aire, es un síntoma claro de un mal desarrollo de la combustión. Además, y como ya se ha indicado, ocasionó la detección del proceso.

Al abrir la caldera se encontró gran cantidad de inquemados y escorias que taponaban la parrilla, Figura 7.1, e impedía el correcto flujo de los gases combustibles. Estos productos se acumularon a medida que avanzaba la combustión, por lo que el funcionamiento de la caldera era progresivamente más limitado.



Figura 7.1 Acumulación de inquemados en la parrilla.

7.2.2 ENSAYO MUESTRA 2

TEMPERATURA DE LOS HUMOS Y TEMPERATURA DE LA CALDERA

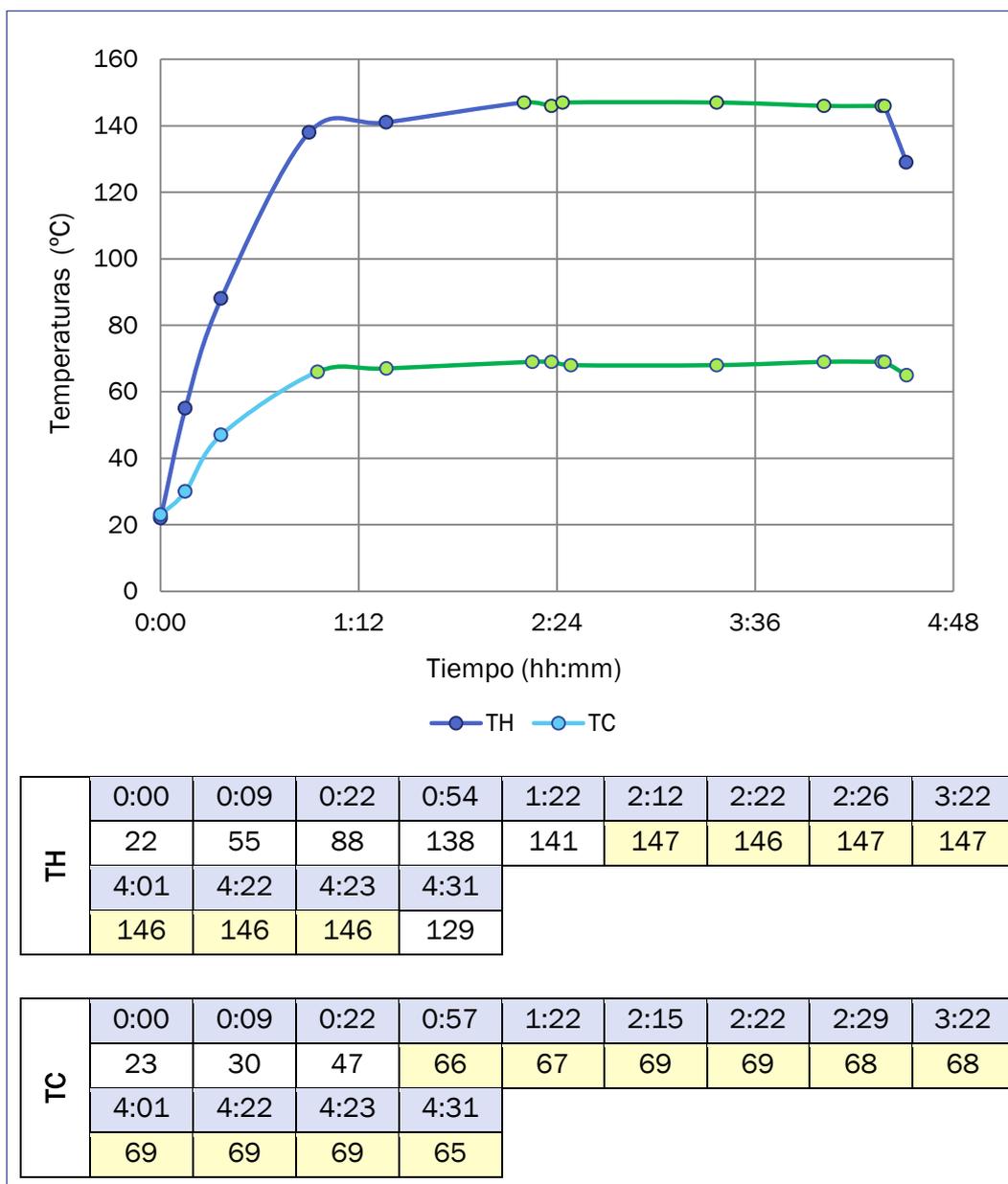


Gráfico 7.3: Evolución temporal de TH y TC durante el ensayo 2.

La evolución térmica de los humos y de la caldera para el ensayo de la muestra 2 es ilustrado en el Gráfico 7.3. Inicialmente se observa un rápido incremento de la temperatura por el inicio de la combustión. La caldera alcanza los 66°C mientras que los humos llegan a los 138°C. Al cabo de dos horas las temperaturas entran en régimen estacionario, y presentan valores medios de 146.43°C en el caso de los humos y 67.9°C para la temperatura del agua de la caldera.

Al final del proceso se acusa un descenso de ambas temperaturas, más notable en los humos (próximo a 20°C), que señala un posible incidente en la combustión.

- **COEFICIENTE DE AIRE**

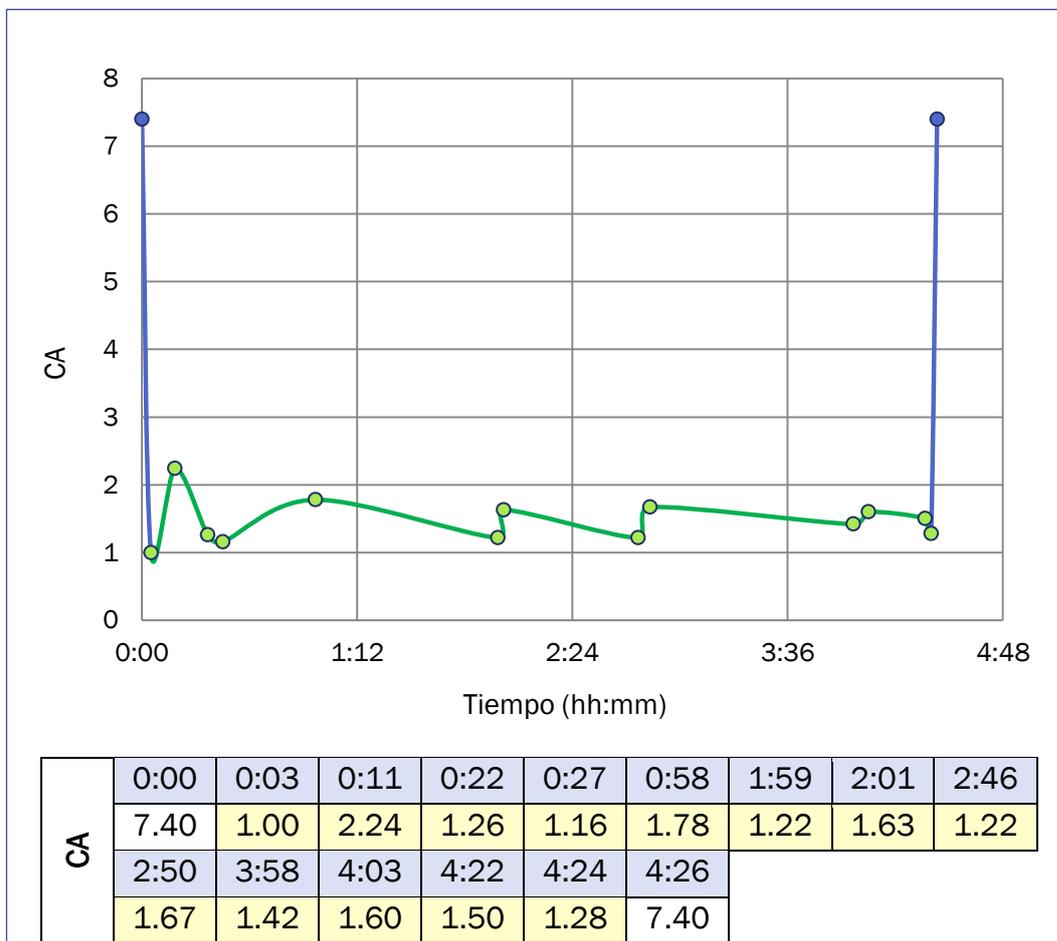


Gráfico 7.4: Evolución temporal del índice de exceso para la muestra 2.

Tras establecerse la combustión, el índice de exceso se estaciona entre 1 y 1.6 fundamentalmente, con breves repuntes, Gráfico 7.4. El valor medio calculado es de 1.46. Los valores no presentan ninguna alteración, con lo cual la combustión ha sido correcta en todo momento.

Únicamente, al final de la combustión el coeficiente de aire alcanza el valor inicial, motivado por la ausencia de demanda energética.

- **PROBLEMÁTICA DURANTE EL ENSAYO DE LA MUESTRA 2**

El ensayo de la muestra 2 no planteó ningún problema a lo largo de la combustión. Con el final de la demanda se dio por concluido el ensayo de esta muestra.

7.2.3 ENSAYO MUESTRA 3

TEMPERATURA DE LOS HUMOS Y TEMPERATURA DE LA CALDERA

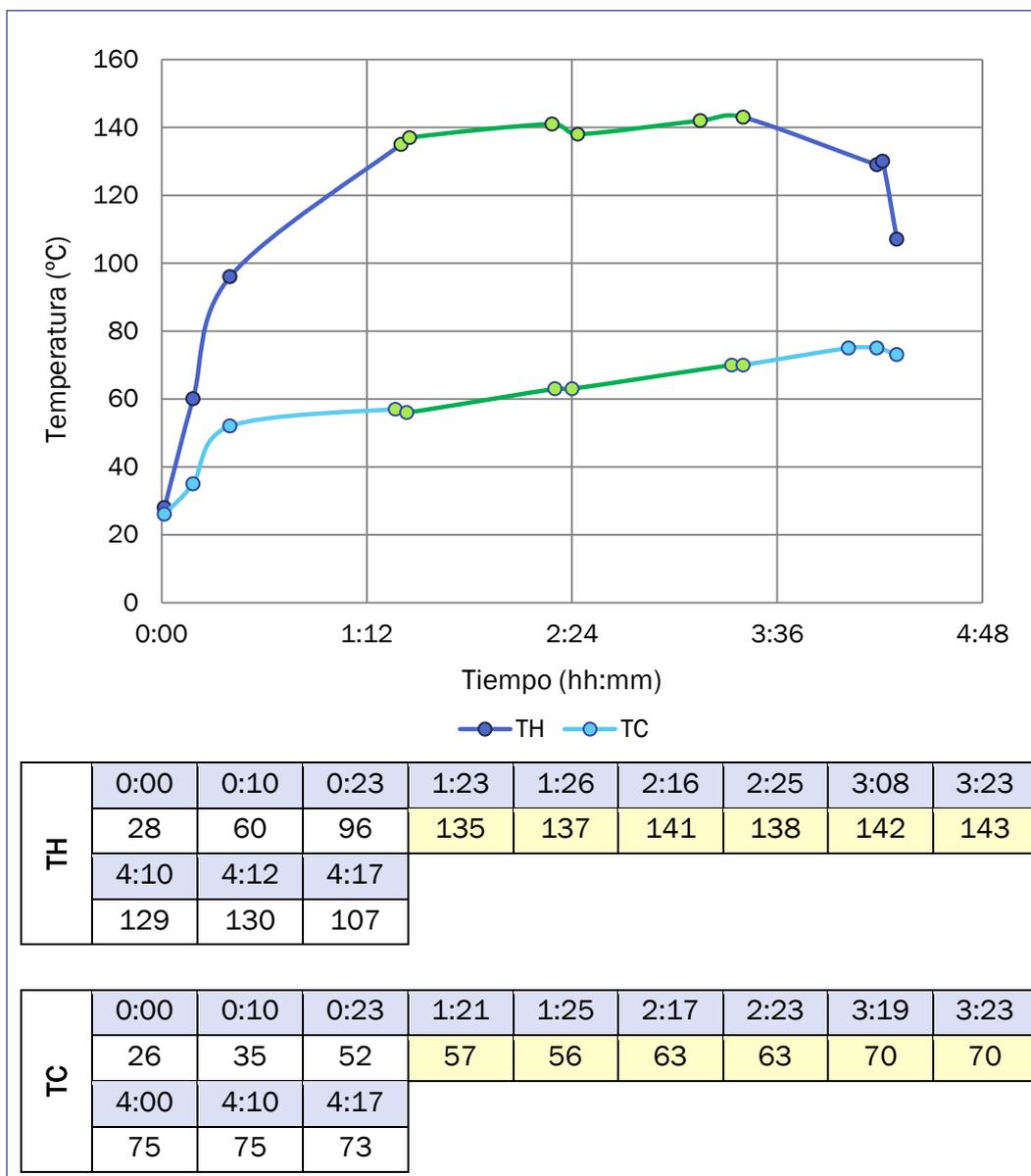


Gráfico 7.5: Evolución temporal de TH y TC durante el ensayo 3.

La evolución térmica de los humos y la caldera para el ensayo de la muestra 3 es ilustrado en el Gráfico 7.5. El incremento térmico inicial debido al comienzo de la combustión es más moderado que en las anteriores muestras.

La temperatura de los humos tarda una hora y media en alcanzar valores estables. La media calculada se presenta de 139.3°C. Tras alcanzar el valor máximo, 143°C, y descender la demanda energética, la temperatura de los humos finaliza en 107°C.

En el caso de la temperatura del agua de la caldera, no llega a estabilizarse, sino que presenta una tendencia siempre ascendente hasta el final de la combustión. Esto no permite definir un intervalo claro para calcular el valor medio de la variable, no obstante se elige el mismo periodo temporal que en el caso de los humos y con él se obtiene un promedio de 63.2°C.

- **COEFICIENTE DE AIRE**



Gráfico 7.6: Evolución temporal del índice de exceso para la muestra 3.

Tras el comienzo de la combustión, esta se desarrolla con valores de exceso de aire entre 1 y 2, como muestra el Gráfico 7.6. El valor medio obtenido resulta 1.399. Por último y debido a la ausencia de peticiones energéticas, el coeficiente retorna al valor inicial de 7.4 poniendo fin a la combustión.

- **PROBLEMÁTICA DURANTE EL ENSAYO DE LA MUESTRA 3**

El ensayo de la muestra 3 no planteó ningún problema a lo largo de la combustión. Con el final de la demanda se dio por concluido el ensayo de dicha muestra.

7.2.4 ENSAYO MUESTRA 4

TEMPERATURA DE LOS HUMOS Y TEMPERATURA DE LA CALDERA

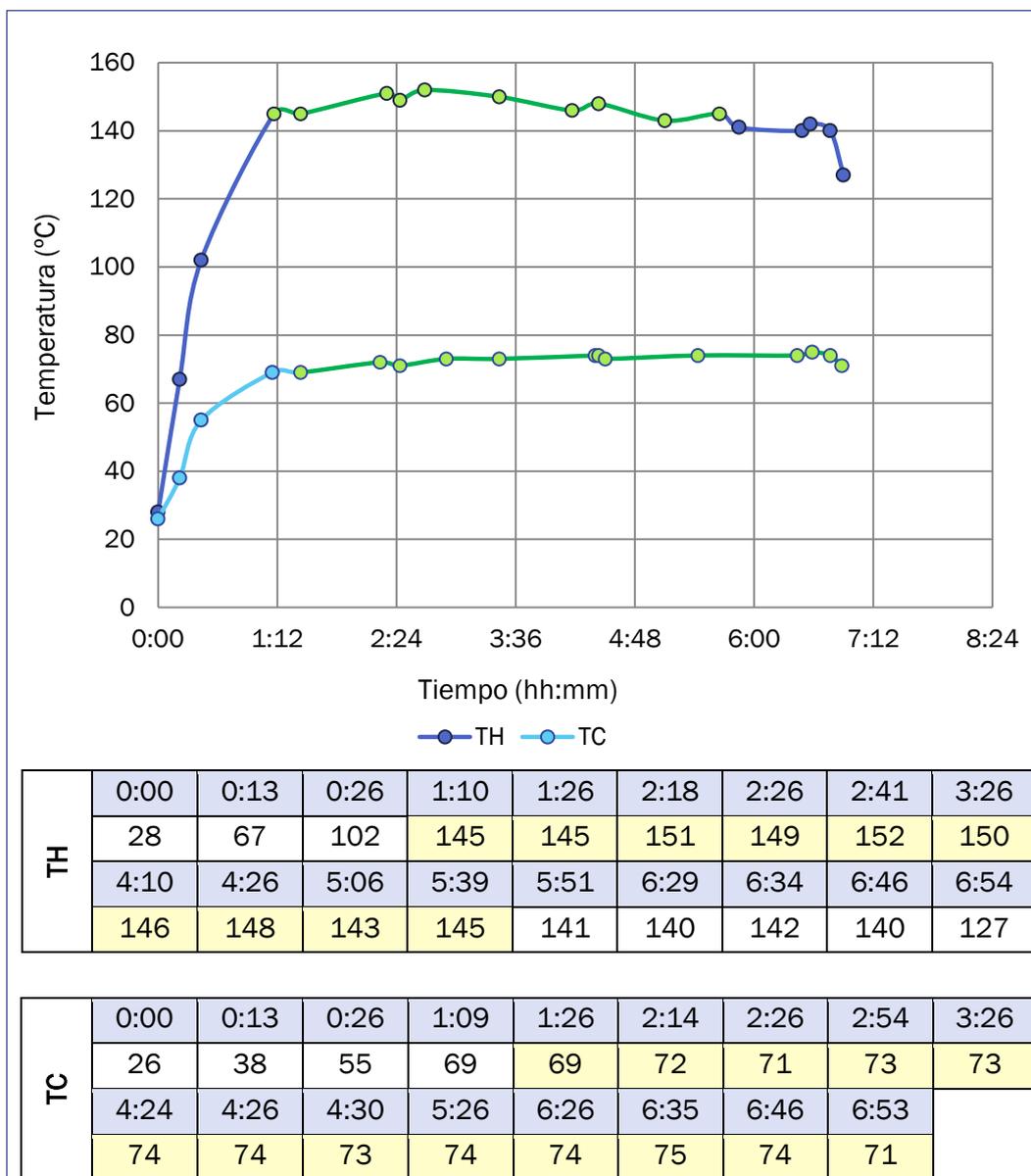


Gráfico 7.7: Evolución temporal de TH y TC durante el ensayo 4.

El Gráfico 7.7 refleja la evolución térmica de los humos y de la caldera para el ensayo de la muestra 4. Las primeras fases de combustión provocan un rápido incremento de ambas temperaturas, para luego estabilizarse.

En el caso de la temperatura de la caldera la media se sitúa en los 72.85°C. Para los humos, la temperatura media es de 147.4°C. La evolución térmica de los humos, como se observa en el Gráfico 7.7, aunque de forma ligera, presenta una tendencia descendente: tras llegar a 152°C, pasadas las cinco horas los valores se sitúan en torno a 141 -142°C. Finalmente, debido a la

ausencia de demanda la temperatura de los humos en los últimos momentos de combustión disminuye hasta 127°C.

▪ **COEFICIENTE DE AIRE**

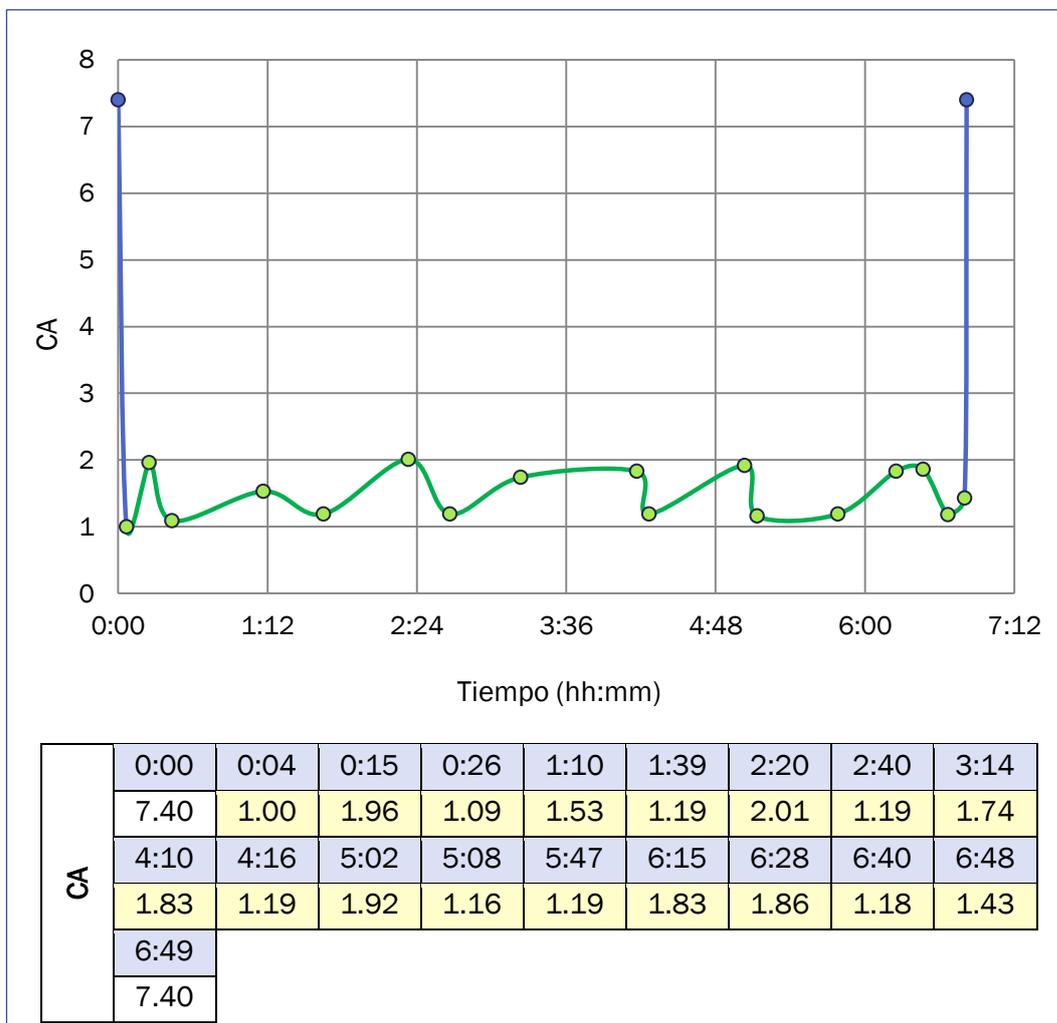


Gráfico 7.8: Evolución temporal del índice de exceso para la muestra 4.

Tras establecerse la combustión, el índice de exceso se estaciona entre 1 y 2 para todo el proceso de ensayo, como muestra el Gráfico 7.8. El valor medio obtenido es de 1.488.

Los valores no presentan ninguna alteración, con lo cual la combustión ha sido correcta en todo momento.

Al final, debido a la ausencia de peticiones energéticas, el coeficiente retorna al valor inicial de 7.4 poniendo fin a la combustión.

- **PROBLEMÁTICA DURANTE EL ENSAYO DE LA MUESTRA 4**

El ensayo de la muestra 4 no planteó ningún problema a lo largo de la combustión. El pélet no generaba escorias ni exceso de inquemados, tal y como ilustra la Figura 7.2 correspondiente al estado de la parrilla tras finalizar la combustión.



Figura 7.2 Estado final de la parrilla en la combustión de la muestra 4.

La conclusión de las peticiones energéticas supuso el final del ensayo de la muestra 4.

7.2.5 ENSAYO MUESTRA 5

TEMPERATURA DE LOS HUMOS Y TEMPERATURA DE LA CALDERA

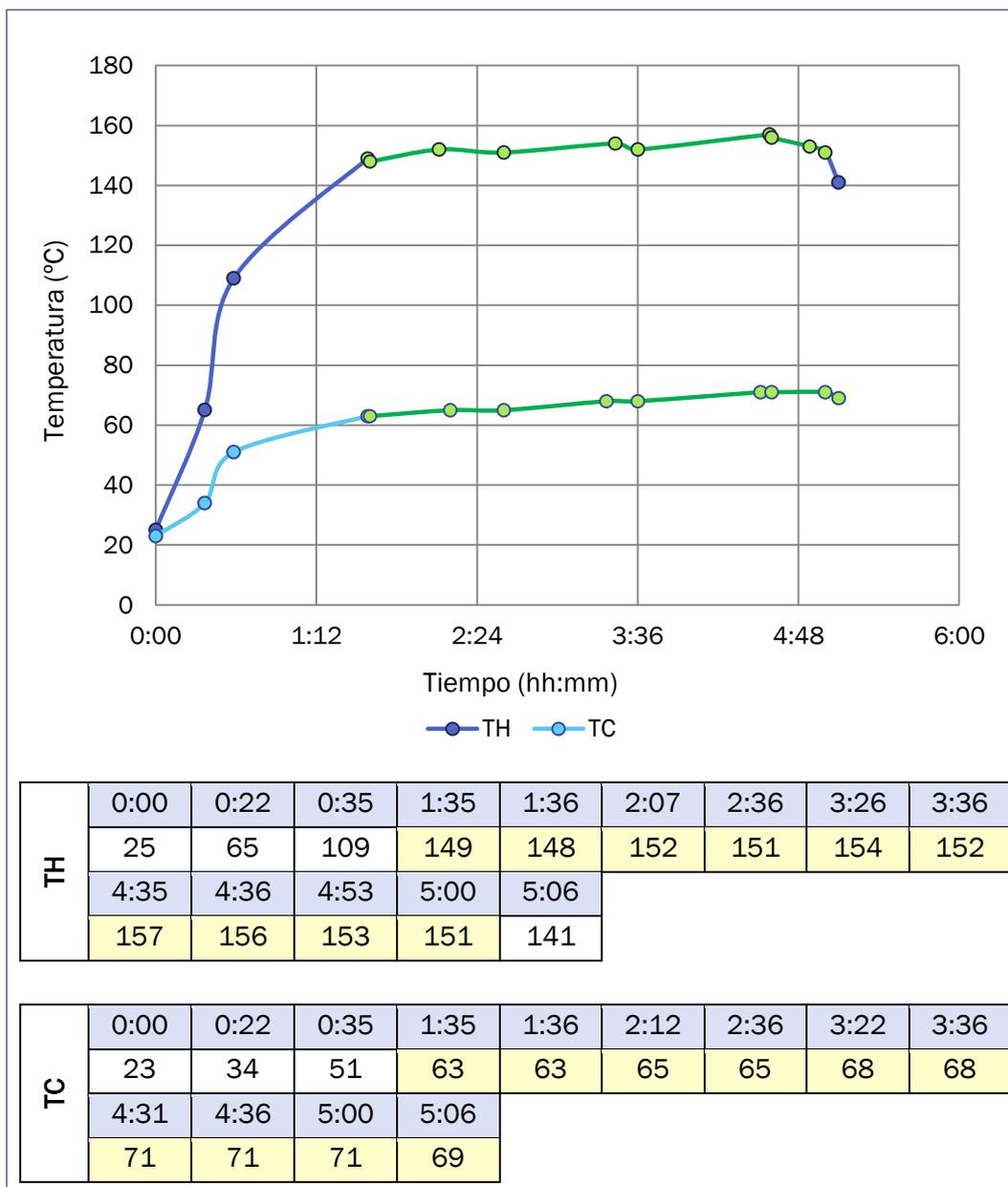


Gráfico 7.9: Evolución temporal de TH y TC durante el ensayo 5.

La evolución térmica de los humos y de la caldera para el ensayo de la muestra 5 es ilustrado en el Gráfico 7.9.

Las primeras fases de combustión elevan el estado térmico de los humos hasta 149°C. Posteriormente sigue ascendiendo ligeramente la temperatura situando el valor medio en 152.3°C. Igualmente ocurre con la temperatura del agua de la caldera. Su valor medio es de 68.5°C.

Al finalizar la combustión la temperatura de los humos decae.

- **COEFICIENTE DE AIRE**

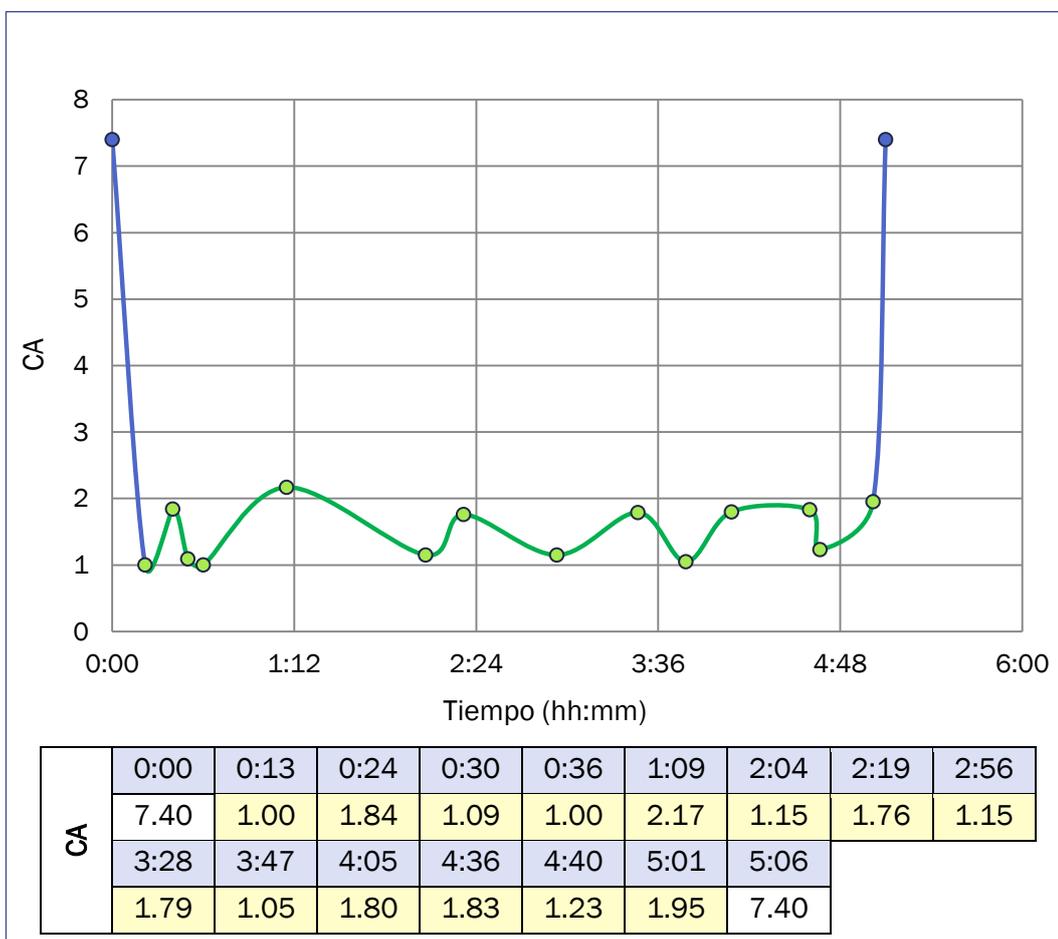


Gráfico 7.10: Evolución temporal del índice de exceso para la muestra 5.

Tras la fase de encendido, el resto de la combustión discurre con un índice de exceso de aire entre 1 y 2, como muestra la Gráfico 7.10. Su valor promedio es 1.486.

La caldera finalizó la combustión al alertar de un coeficiente de aire excesivo. Este retornó al valor inicial, 7.4, como se observa en la anterior figura.

- **PROBLEMÁTICA DURANTE EL ENSAYO DE LA MUESTRA 5**

Como se mencionó en el anterior punto, la caldera finalizó la combustión al detectar un coeficiente de aire excesivo. La razón se encontró en el agotamiento del combustible del depósito de alimentación.

Por otro lado, al observar la situación final de la parrilla se localizan los inquemados, conglomerados y escorias indicados en las Figuras 7.3 y 7.4. Pese a no afectar a la combustión para la cantidad de muestra empleada,

45kg, seguramente un mayor consumo induciría problemas por obturación de la parrilla que supondrían un desarrollo incorrecto de la combustión.



Figura 7.3 Inquemados y escoria al final la combustión de la muestra 5.



Figura 7.4 Detalle de la escoria generada por la muestra 5.

7.2.6 ENSAYO MUESTRA 6

TEMPERATURA DE LOS HUMOS Y TEMPERATURA DE LA CALDERA

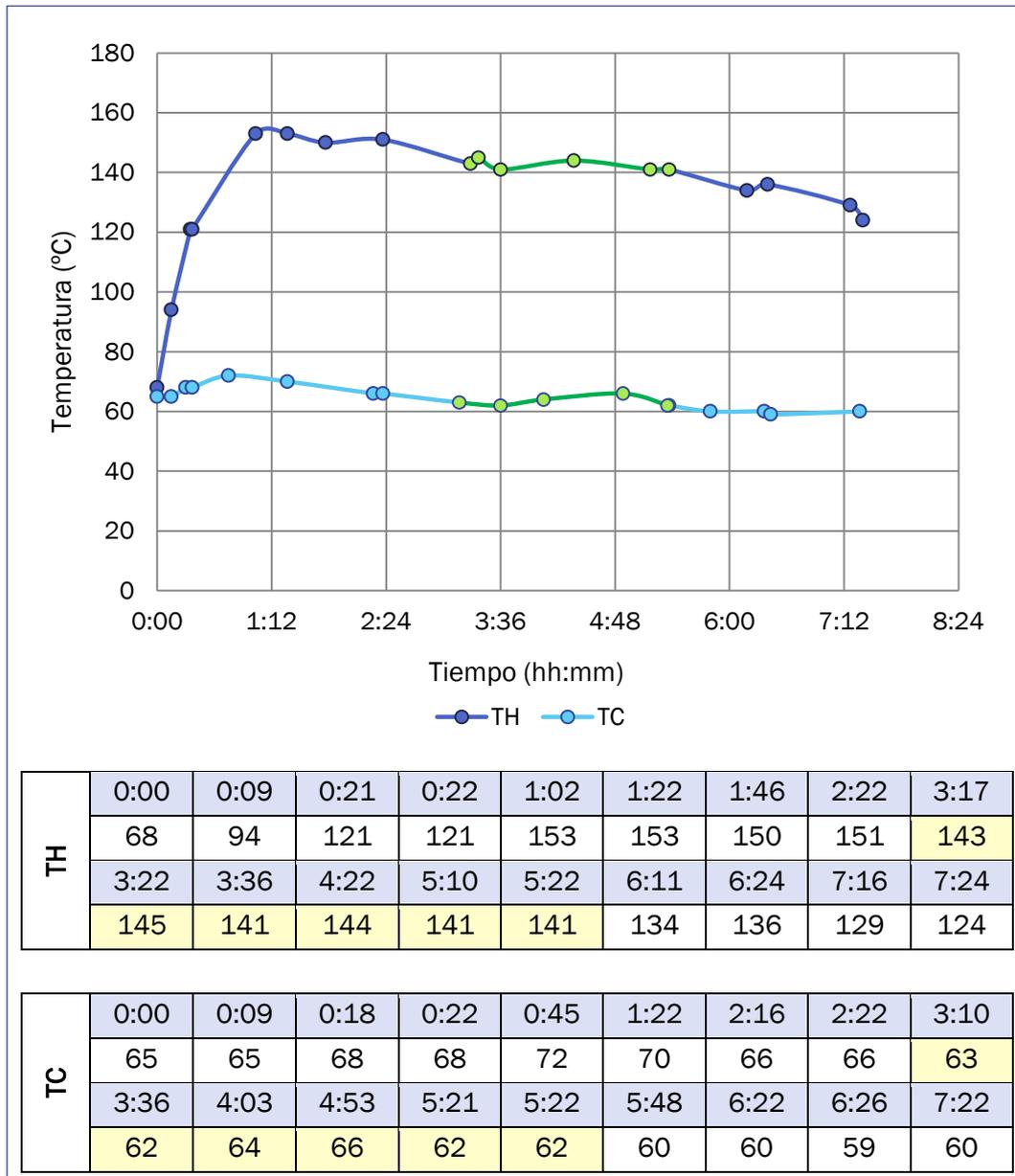


Gráfico 7.11: Evolución temporal de TH y TC durante el ensayo 6.

El estado térmico inicial tanto de la caldera como de los humos se sitúa en los 65°C y 68°C, respectivamente, debido a que la realización de este ensayo fue posterior a otro.

En el Gráfico 7.11 se observa que la temperatura de la caldera, tras un ligero ascenso en las primeras etapas de la combustión, se estabiliza entorno al valor inicial, siendo el valor medio calculado de 63.2°C.

En el caso de los humos, la temperatura aumenta rápidamente hasta los 153°C al comienzo de la combustión. Posteriormente, existe un descenso de la temperatura y se estabiliza ligeramente a partir de las tres y hasta las cinco horas y media de combustión aproximadamente. En este periodo el estado térmico medio calculado es de 142.5°C. Tras ello, la temperatura continúa descendiendo durante la siguiente hora y media hasta la finalización del ensayo.

▪ **COEFICIENTE DE AIRE**

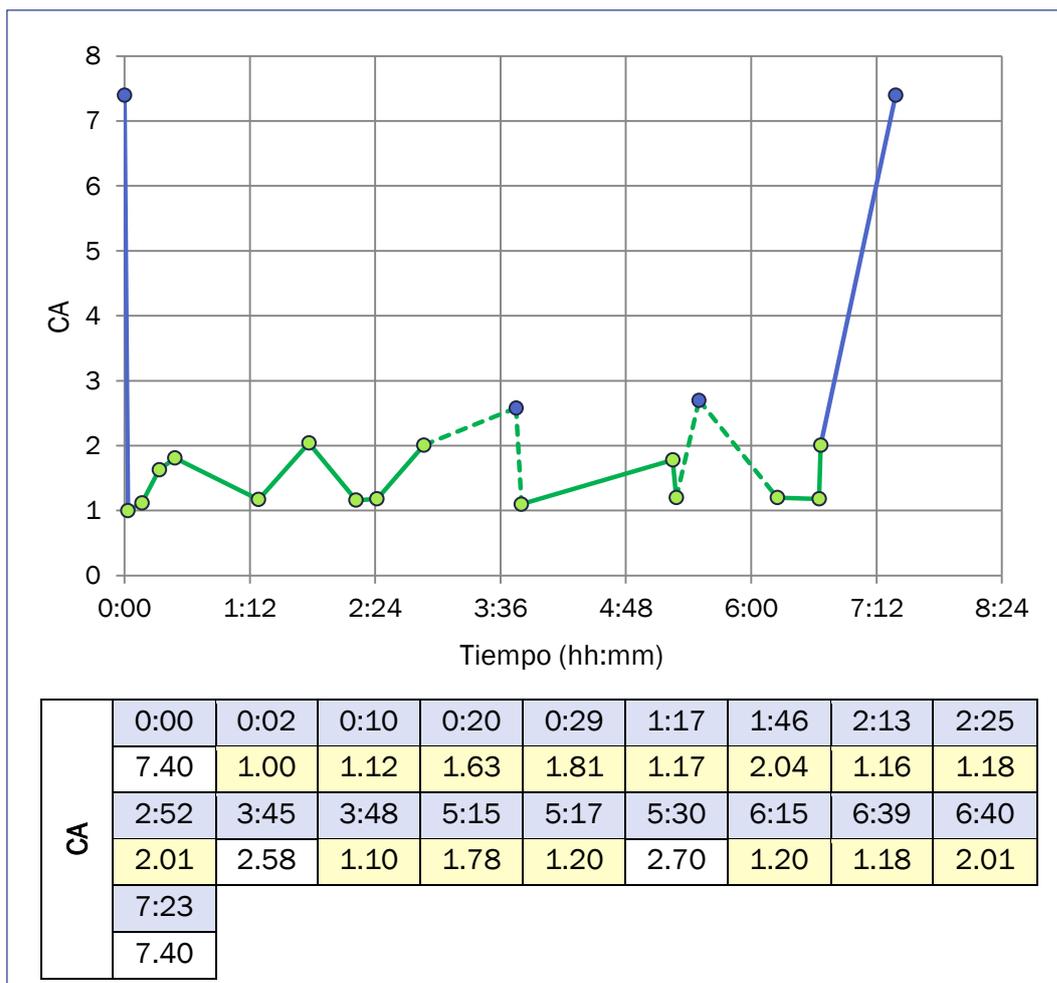


Gráfico 7.12: Evolución temporal del índice de exceso para la muestra 6.

Como se observa en el Gráfico 7.12, el coeficiente de aire varía en un intervalo más amplio que los anteriores ensayos debido a los dos instantes en los que supera el 2.5 de valor. No obstante, eliminando dichos valores puntuales, la media se sitúa en 1.439.

En el gráfico también se observa que, tras casi siete horas y media, el coeficiente aumenta excesivamente y seguidamente la combustión termina.

- **PROBLEMÁTICA DURANTE EL ENSAYO DE LA MUESTRA 6**

Durante este ensayo son reseñables varios incidentes.

En primer lugar, indicar que la finalización de la combustión fue forzada por la caldera al tener programado la limpieza del intercambiador de calor. Este aviso provocó la parada de la caldera y con ello el aumento del índice de exceso de aire.

Por otro lado, el descenso continuado de la temperatura de los humos, trascurridas cinco horas desde el inicio de la combustión, es debido a las capas de escoria y la acumulación de inquemados que progresivamente iban dificultando el correcto desarrollo de la combustión. Las Figuras 7.5 y 7.6 así lo reflejan.



Figura 7.5 Parrilla al finalizar el ensayo de la muestra 6.



Figura 7.6 Cámara de combustión tras el ensayo de la muestra 6.

7.2.7 ENSAYO MUESTRA 7

TEMPERATURA DE LOS HUMOS Y TEMPERATURA DE LA CALDERA

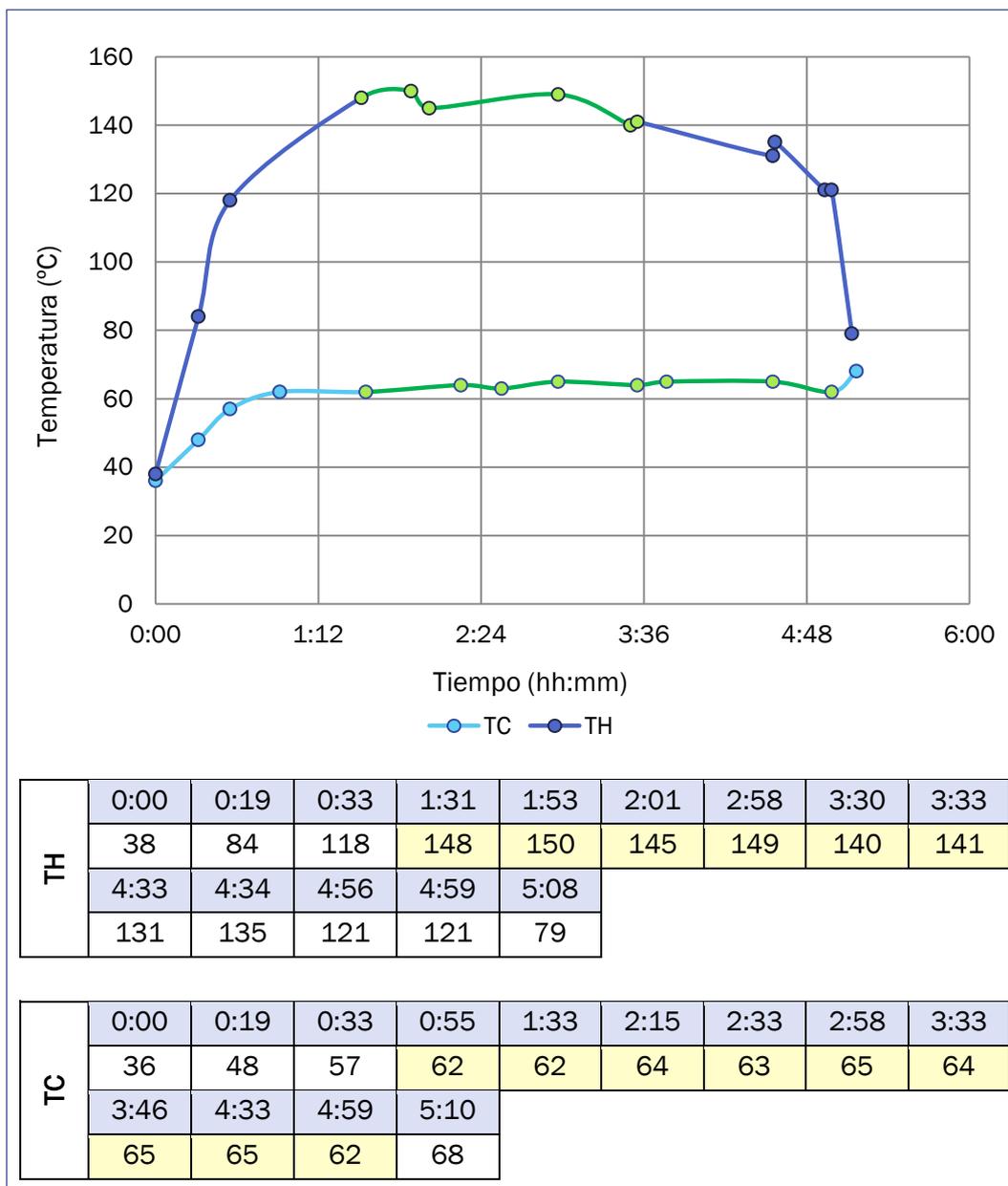


Gráfico 7.13: Evolución temporal de TH y TC durante el ensayo 7.

Con el inicio de la combustión el estado térmico de los humos y de la caldera asciende como se refleja en el Gráfico 7.13.

Para la caldera, la temperatura se estabiliza en menos de una hora con un promedio de 63.55°C. No sucede igual con los humos, en los que la temperatura oscila durante casi tres horas entre 141°C y 150°C, hasta que cae a los 79°C. La media del intervalo más estable es de 145.5°C.

- **COEFICIENTE DE AIRE**

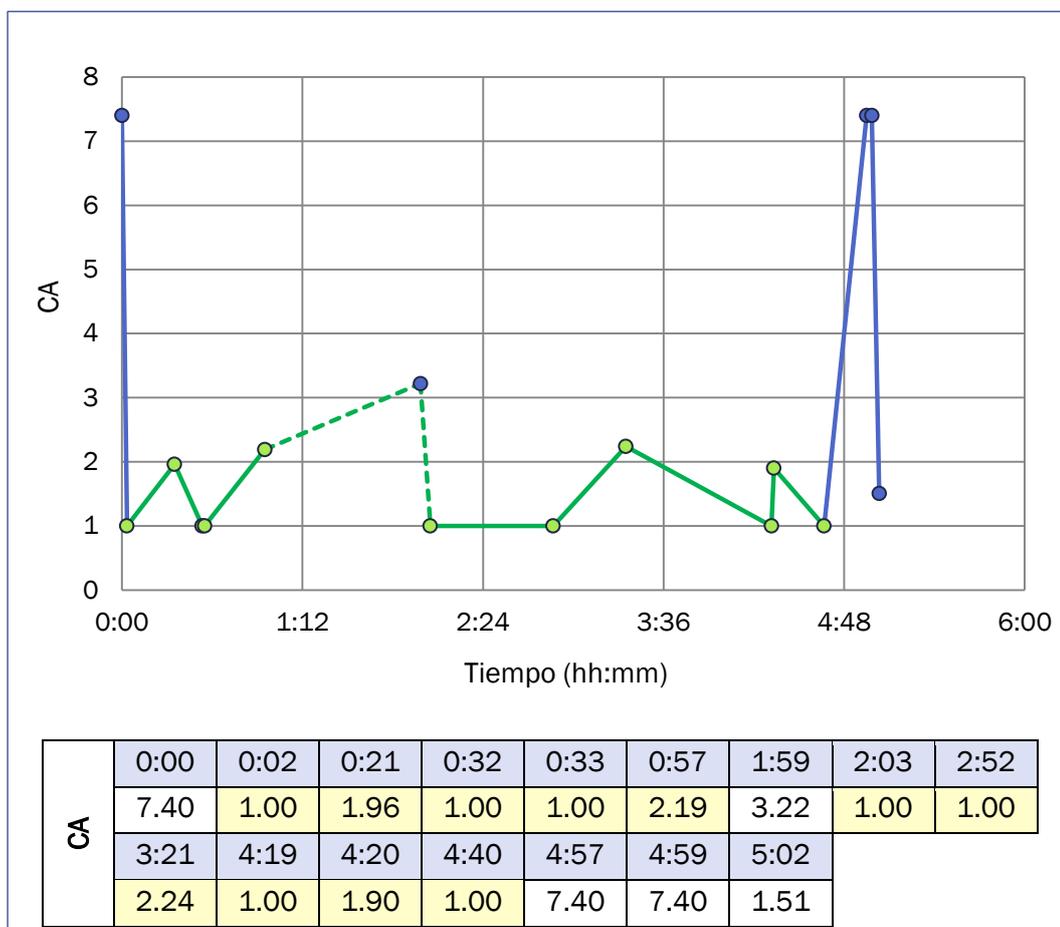


Gráfico 7.14: Evolución temporal del índice de exceso para la muestra 7.

El coeficiente de aire presenta gran variabilidad a lo largo de la combustión. Fundamentalmente sus valores se encuentran entre 1 y 2.5, exceptuando un instante puntual, a las dos horas, en el cual el índice llegó a ser de 3.22. Sin tener en cuenta este último para los cálculos, el valor medio es de 1.39. A las cinco horas de combustión, el coeficiente vuelve a elevarse hasta el valor inicial de combustión, 7.40, por problemas en el desarrollo de la misma. Todo ello se muestra en el Gráfico 7.14.

- **PROBLEMÁTICA DURANTE EL ENSAYO DE LA MUESTRA 7**

Tal y como refleja la caída de temperatura de humos y el excesivo coeficiente de aire, la combustión no se desarrolló correctamente. El origen de estos índices fuera de rango, se encuentra nuevamente en la obturación de la parrilla. A medida que avanzaba la combustión, se formaban escorias de mayor tamaño que obstruían la parrilla provocando la acumulación de inquemados y no permitiendo el paso adecuado de los gases y de la llama.

Las Figuras 7.7, 7.8 y 7.9 recogen la situación en que se encontraba la parrilla al pararse la caldera por la caída de la temperatura de humos, y tras enfriarse.



Figura 7.7 Parrilla al parar la caldera durante el ensayo de la muestra 7.



Figura 7.8 Cámara de combustión tras enfriarse del ensayo de la muestra 7.



Figura 7.9 Situación final de la parrilla en el ensayo de la muestra 7.

7.2.8 ENSAYO MUESTRA 8

TEMPERATURA DE LOS HUMOS Y TEMPERATURA DE LA CALDERA

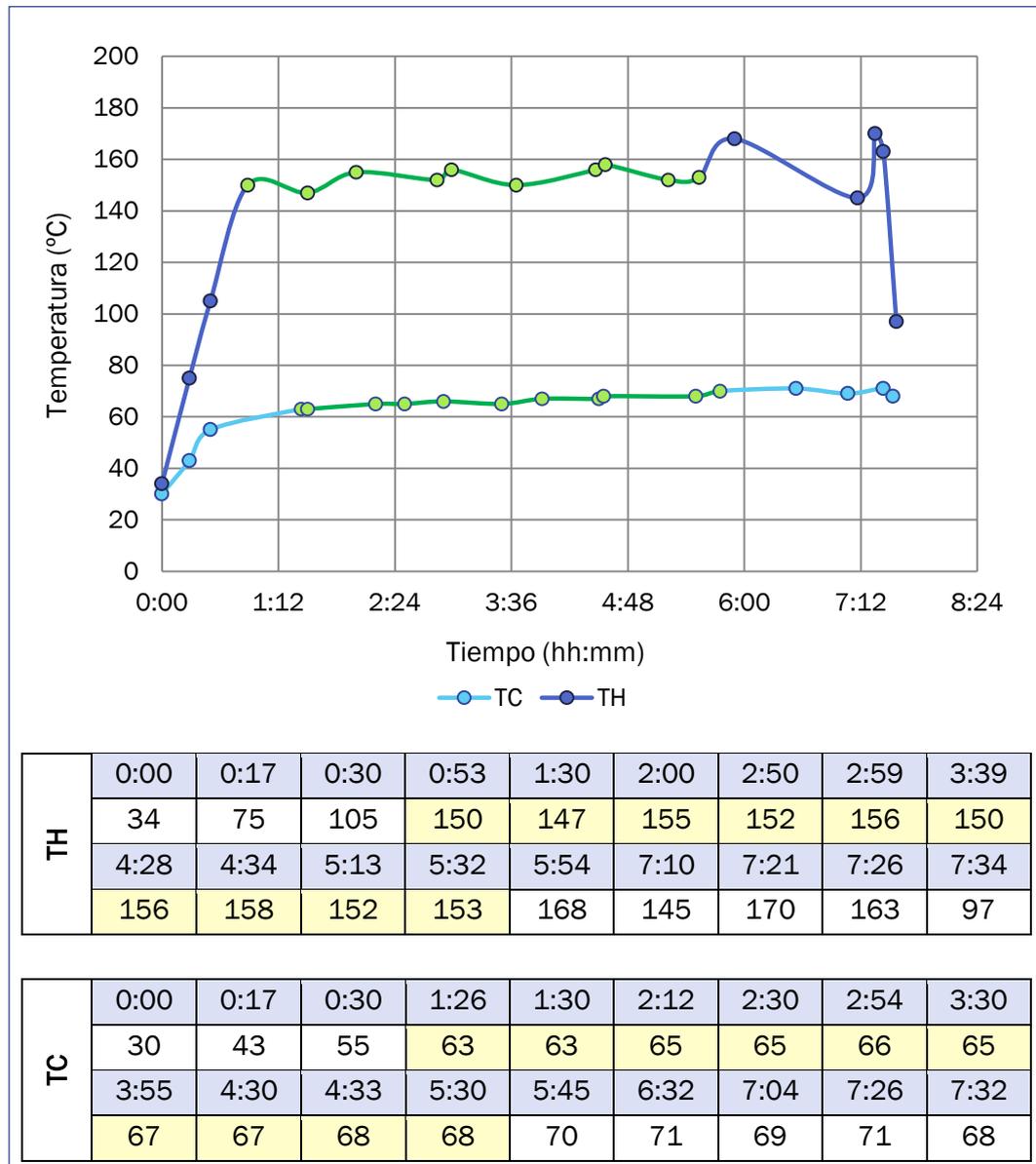


Gráfico 7.15: Evolución temporal de TH y TC durante el ensayo 8.

Durante las primeras fases de combustión el estado térmico de los humos y de la caldera asciende como presenta el Gráfico 7.15. Una vez establecido el proceso, la temperatura de la caldera se estaciona con un promedio de 67°C.

Para los humos, la estabilidad se alcanza casi a la hora de combustión alargándose hasta las cinco horas y media con un promedio de 152.9°C. Pasadas siete horas, tras perder la estabilidad, la temperatura de los humos decae súbitamente suponiendo el final de la combustión.

▪ **COEFICIENTE DE AIRE**

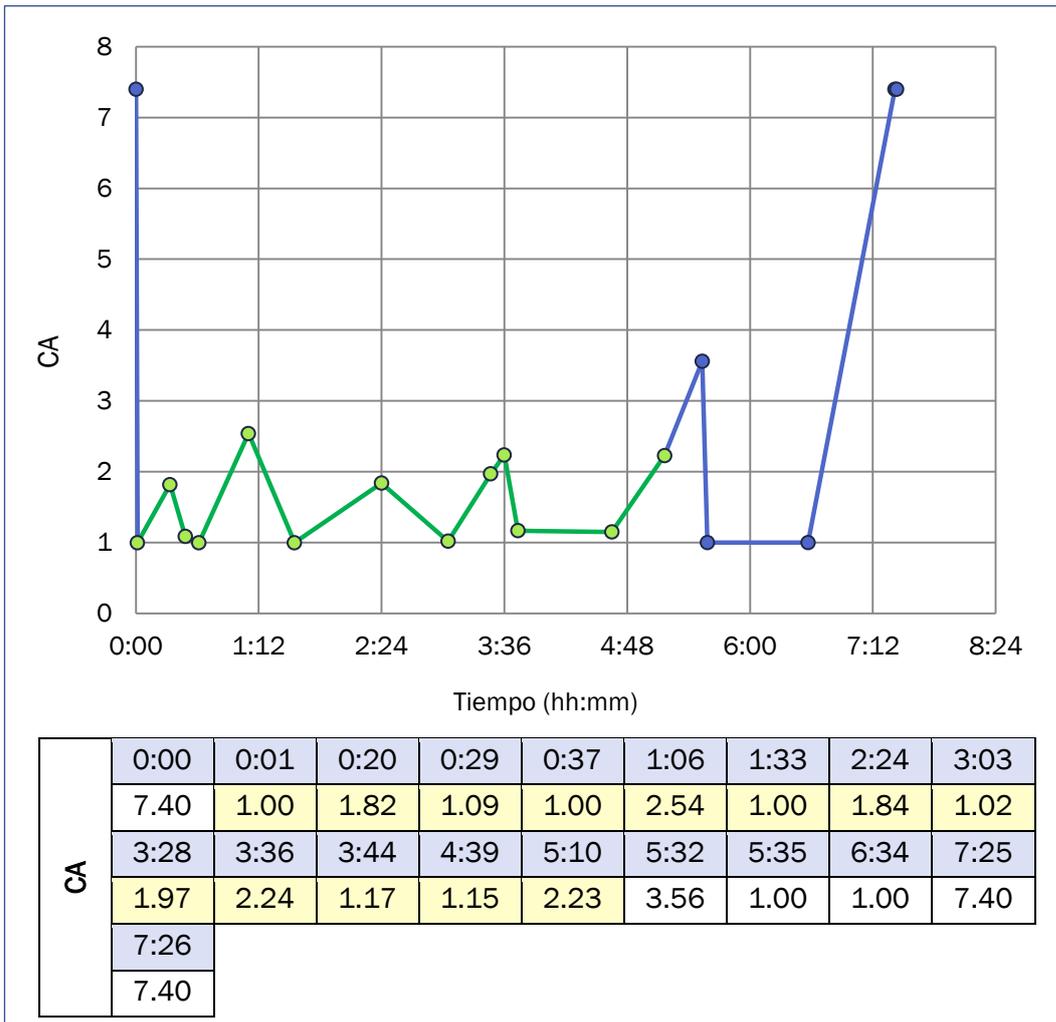


Gráfico 7.16: Evolución temporal del índice de exceso para la muestra 8.

Inicialmente, el coeficiente de aire vuelve a estar acotado entre 1 y valores superiores a 2, llegando a 2.5. Dentro de este periodo, el promedio obtenido es 1.54.

A las cinco horas y media el índice se eleva y alcanza un exceso de 3.56, como muestra el Gráfico 7.16.

Posteriormente, trascurridas más de siete horas, el coeficiente aumenta drásticamente regresando al valor de partida, 7.4, y dando lugar a la parada de la caldera por índice de aire excesivo.

- **PROBLEMÁTICA DURANTE EL ENSAYO DE LA MUESTRA 8**

La combustión finalizó por el aumento excesivo del coeficiente de aire debido a que el combustible se había agotado. Esto trajo consigo, y explica, la caída brusca en la temperatura de los humos.

No obstante el desarrollo de la combustión fue correcto, al observar la cámara de combustión no se encontraron residuos apreciables que interrumpieran el proceso o diesen muestras de combustión incompleta. Así se muestra en las Figuras 7.10 y 7.11.



Figura 7.10 Situación de la cámara de combustión finalizado el ensayo de la muestra 8.



Figura 7.11 Situación de la parrilla finalizado el ensayo de la muestra 8.

7.2.9 COMPARACIÓN DE LAS VARIABLES MEDIAS

Se han representado los valores medios calculados, para cada una de las variables comentadas, a fin de establecer una comparación entre las ocho muestras.

En el Gráfico 7.17 recoge los promedios para la temperatura del agua de la caldera y la temperatura de los gases de escape.

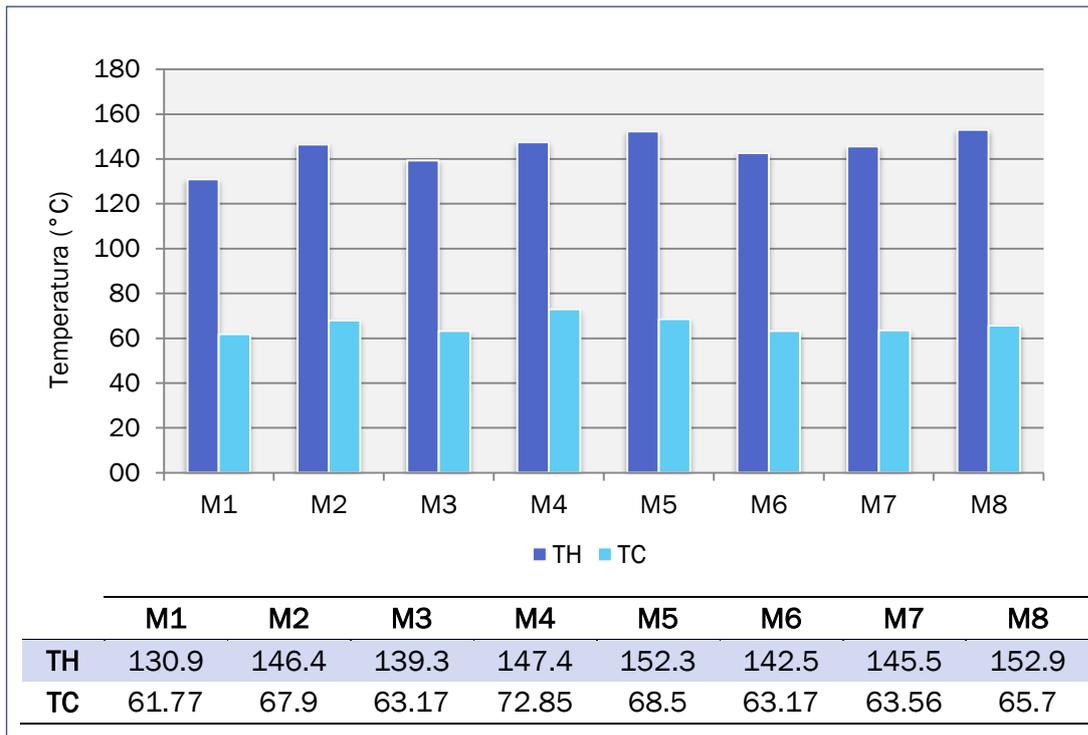


Gráfico 7.17 Valores promedio de la temperatura de caldera y de humos.

La muestra 1 presenta el menor estado térmico de todos los ensayos para ambas variables. La mayor temperatura de humos es alcanzada con la muestra 8, mientras que la temperatura de salida del agua más alta fue con la muestra 4.

Respecto al índice de aire, las medias obtenidas se expresan en el Gráfico 7.18. El mínimo valor fue de 1.39 y corresponde a la muestra 7. El ensayo realizado con la muestra 8 presenta el valor más alto, 1.54. Para el resto de muestras los valores se encuentran entre 1.4 y 1.49. Estos son valores correctos para el funcionamiento de la caldera según se planteó en el quinto capítulo.

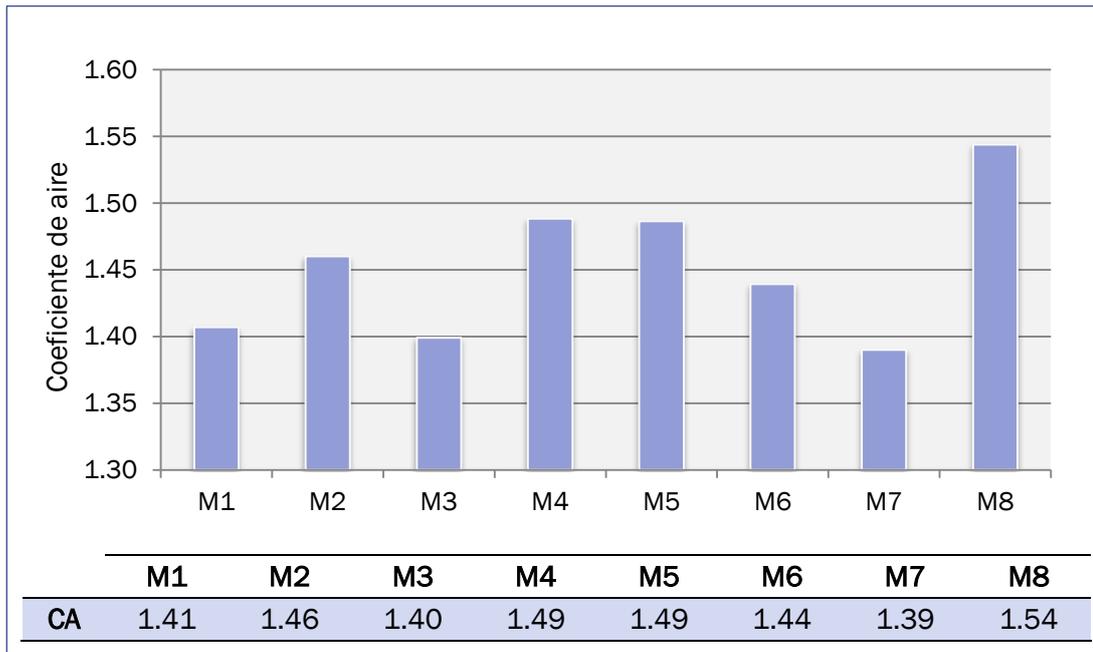


Gráfico 7.18 Valores promedio del coeficiente de aire.

7.3 ESTUDIO DE LAS EMISIONES

El control de las emisiones contaminantes de un proceso de combustión es una exigencia legal. En este caso, se encuentran las emisiones de CO y NO_x, cuyos límites ambientalmente admisibles ya fueron expuestos en el cuarto capítulo. En el caso de la biomasa, las emisiones de CO₂ no se consideran ya que su aportación al efecto invernadero se supone neutra. No obstante, también se incluye un estudio comparativo de las concentraciones de CO₂ que presenta cada muestra.

7.3.1. EMISIONES DE CO₂

Cada combustible, debido a su composición, tiene asociado un porcentaje máximo de CO₂, determinado según la ecuación 7.1:

$$CO_{2,m\acute{a}x} = \frac{V_{CO_2}}{V_{hs}} \cdot 100 [=] \% \quad Ec. 7.1$$

Donde: V_{CO_2} es el volumen estequiométrico de CO₂; V_{hs} es el volumen estequiométrico total de gases secos generados en la combustión.

Pero este es un porcentaje teórico que en la práctica no es posible alcanzar. Para el cálculo de los valores de CO₂ de cada muestra se ha empleado la hoja Excell desarrollada. El CO₂ se obtiene a partir del CO_{2m\acute{a}x} y el índice de exceso de aire como establece la ecuación 7.2:

$$CO_2 = \frac{CO_{2,m\acute{a}x}[\%]}{n} [=] \% \quad Ec. 7.2$$

El Gráfico 7.19 representa los contenidos de CO₂ en los gases obtenidos para cada una de las muestras ensayadas. Es fácilmente observable que todas las muestras presentan un contenido máximo del CO₂ del 20%, siendo este el valor típico para combustibles como la biomasa.

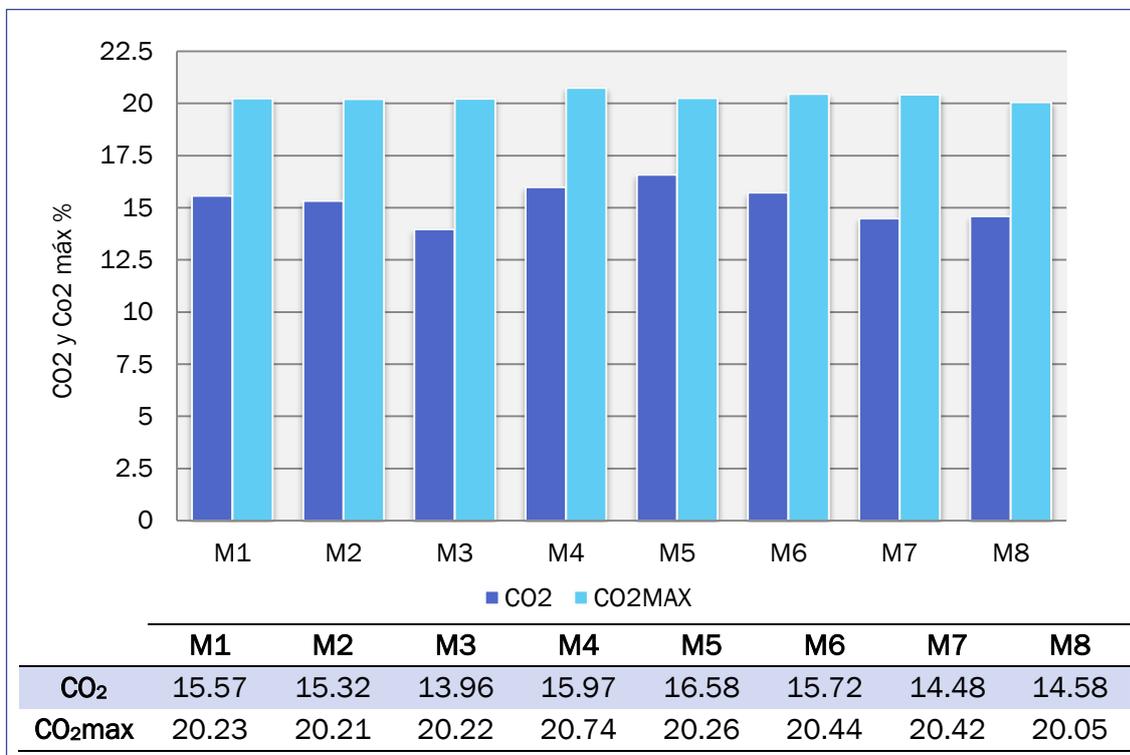


Gráfico 7.19 Concentraciones de CO₂máx y CO₂ para las muestras de estudio.

En cuanto al CO₂, las mayores concentraciones en los gases pertenecen a las muestras 5 y 4, con 16.58% y 17.95%, respectivamente. El ensayo de la muestra 3 dispuso de la menor de las concentraciones con un porcentaje del 13.96%.

7.3.2. EMISIONES DE CO

En cuanto a las emisiones de CO, la Gráfico 7.20 expone las concentraciones, en ppm, medidas con el analizador de humos en cada uno de los ensayos.

El Gráfico 7.20 presenta una gran variabilidad entre las muestras. El máximo valor medido corresponde al ensayo de la muestra 4 con 20 ppm. Las muestras 2 y 5 quedaron próximas con 17 ppm. La menor de las emisiones se encuentra en la muestra 7 con 4 ppm, seguida de la muestra 3 con 5 ppm.

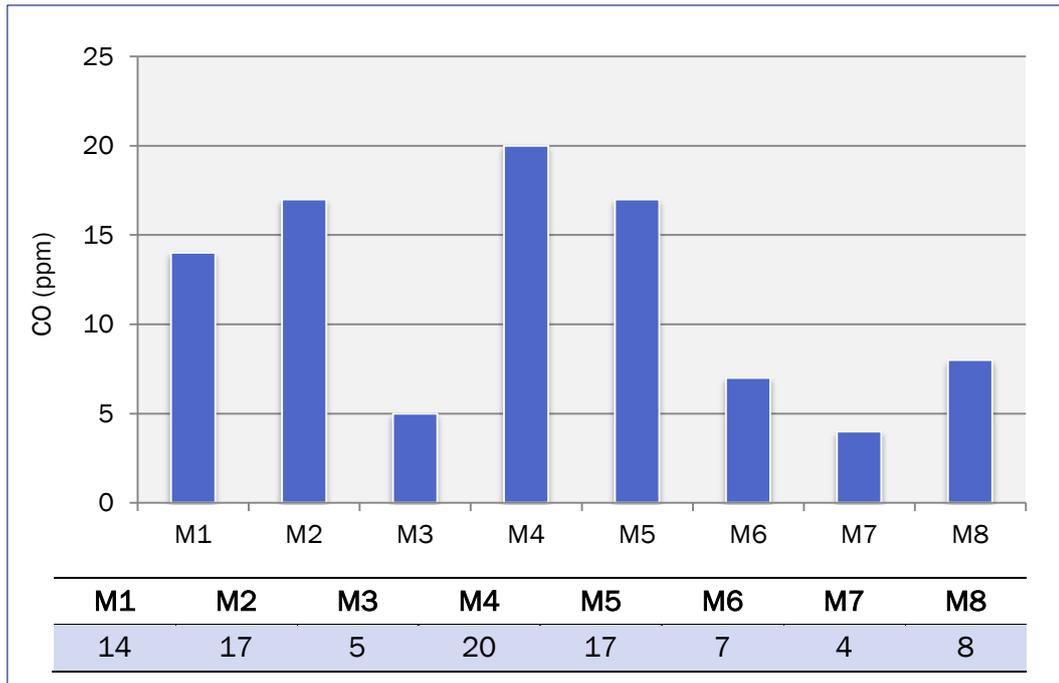


Gráfico 7.20 Emisiones de CO medidas en los ensayos de las muestras.

El valor máximo admisible según la Norma EN-UNE- 303-5⁴⁴ es de 5000 mg/Nm³ para calderas clase 3, 1200 mg/Nm³ en el caso de calderas clase 4 y 700 mg/Nm³ para calderas clase 5.

Para poder conocer si los medidos son inferiores, será preciso realizar un cambio de unidades, mediante la Ecuación 7.3.

$$CO(mg/m^3) = \frac{21 - O_{2,referencia}}{21 - O_2} \cdot CO(ppm) \cdot 1.25 \quad (Ec. 7.3)$$

Donde: $O_{2,referencia}$ es el porcentaje de oxígeno al que se corrige la medición; O_2 es el porcentaje de oxígeno medido en el análisis de humos.

Por tanto, dado que la norma fija sus emisiones para un valor de referencia del 10% de O_2 , los resultados equivalentes a los valores medidos son los indicados en la Tabla 7.1.

Tabla 7.1 Emisiones de CO expresadas en mg/Nm³

M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8
11.91	14.68	4.74	17.01	13.60	5.96	3.69	7.20

Todas las muestras, respecto a la concentración de CO, son ambientalmente admisibles.

7.3.3. EMISIONES DE NO_x

Otra de las emisiones contaminantes medidas durante las combustiones de cada muestra fueron los óxidos nitrosos, NO_x. Los resultados adquiridos con el analizador de humos se han representado en el Gráfico 7.21.

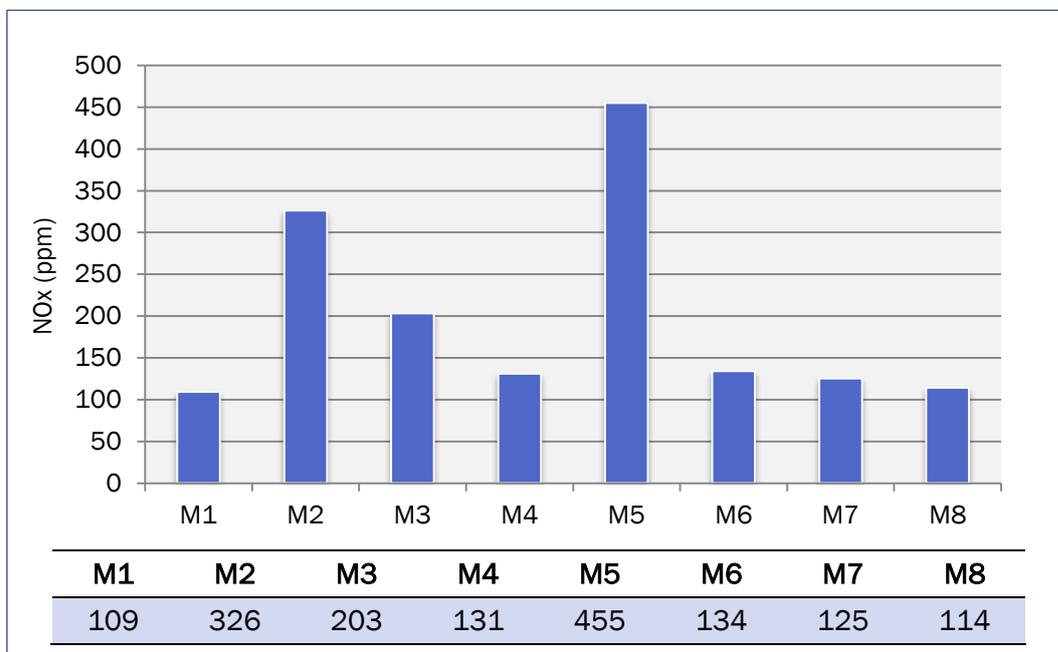


Gráfico 7.21 Emisiones de NO_x medidas en los ensayos de las muestras.

La muestra 5 presenta la concentración de NO_x más elevada de todos los ensayos superando los 450 ppm, seguida por las muestras 2 y 3 con 326 y 203 ppm, respectivamente. El resto de ensayos emitieron valores menores a los indicados, situándose entre los 110 y 130 ppm, fundamentalmente.

En el caso de los NO_x, la emisión límite fijada era de 150 mg/MJ según se indicó en el capítulo 4.

Nuevamente, para poder comparar el valor límite con los valores medidos, se ha de pasar de ppm a mg/MJ, esta vez mediante la Ecuación 7.4.

$$NO_x(mg/MJ) = \frac{21 - O_{2,referencia}}{21 - O_2} \cdot NO_x(ppm) \cdot 2.05 \cdot \frac{V_{hs,1}}{PCI} \quad (Ec. 7.4)$$

Donde: $O_{2,referencia}$ es el porcentaje de oxígeno al que se corrige la medición en [%]; O_2 es el porcentaje de oxígeno medido en el análisis de humos de cada muestra en [%]; $V_{hs,1}$ es el volumen real de los gases de escape secos en [Nm³/kg combustible]; PCI es el poder calorífico del combustible en [MJ/kg combustible].

Igualmente, referidas al 10% de O₂ las emisiones equivalentes se indican en la Tabla 7.2.

Tabla 7.2 Emisiones de NO_x expresadas en mg/MJ

M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8
46.85	155.56	112.06	51.49	178.33	59.38	61.12	54.72

A la vista de estos resultados, las muestras 2 y 5 son ambientalmente inadmisibles, al superar el límite establecido. La muestra 3 supera los 100 mg/MJ. El resto no plantea problemas, con valores muy inferiores al límite.

7.4 ESTUDIO DEL RENDIMIENTO

La eficiencia de las combustiones ha sido calculada mediante las ecuaciones expuestas en el cuarto capítulo.

El rendimiento está principalmente determinado por las pérdidas asociadas a los humos, es decir, las pérdidas de calor sensible. Las pérdidas por inquemados también intervienen, sin embargo se ha comprobado que su aportación es menor al 0.3% en cualquier caso. Por consiguiente, debido a la ausencia de datos acerca de los hidrocarburos generados y del índice de opacidad, únicamente se consideran las pérdidas por humos.

En el Gráfico 7.22 se exponen los rendimientos obtenidos en cada uno de los ensayos.

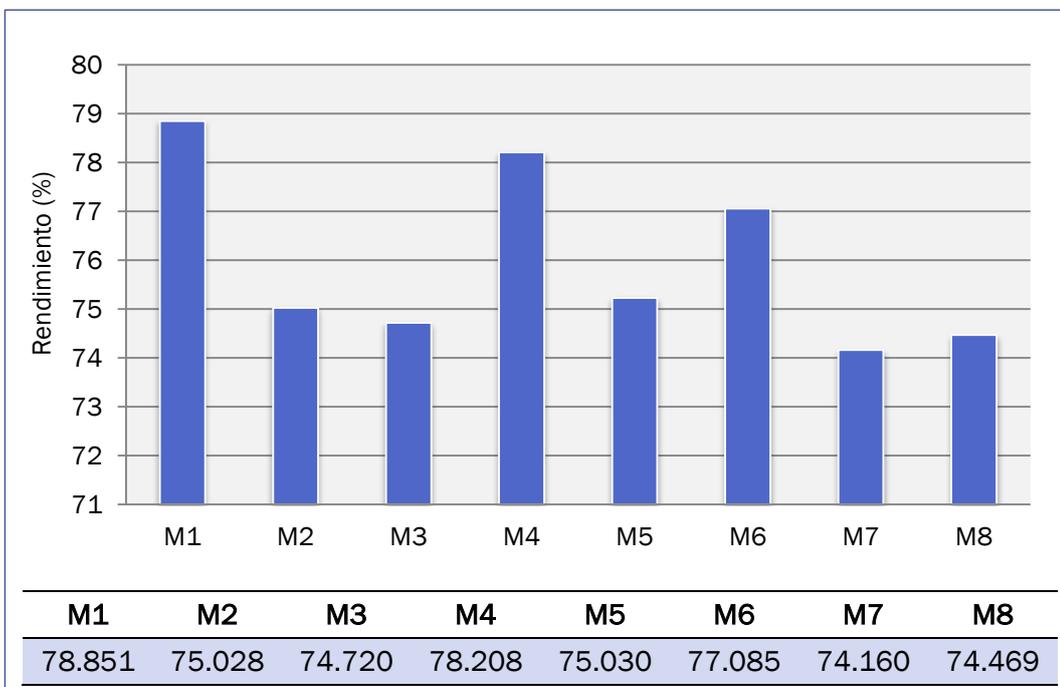


Gráfico 7.22 Rendimiento de la combustión para las muestras de estudio.

El mejor resultado es presentado por la primera de las muestras alcanzado prácticamente un rendimiento del 79%. Próximas, las muestras 4 y 6 presentan eficiencias del 78.21% y 77.1%, respectivamente. El resto se sitúan entre el 74 y 75%.

Atendiendo a la normativa mencionada en el capítulo 4, y conocido que la potencia nominal de la caldera empleada es de 30kW, la eficiencia mínima que debería presentar la caldera según la clase a la que perteneciese sería:

$$\text{Clase 3: } \eta = 67 + 6 \log(30) = 75.86$$

$$\text{Clase 4: } \eta = 80 + 2 \log(30) = 82.95$$

$$\text{Clase 5: } \eta = 87 + \log(30) = 88.48$$

Con estos resultados, ninguno de los ensayos alcanzaría los rendimientos mínimos de las clases 4 y 5. Para la clase 3, únicamente, se aceptan las muestras 1, 4 y 6, en las que como mínimo se alcanza el 77%. No obstante, próximos a la eficiencia fijada por la clase 3, se sitúan las muestras 2 y 5, con el 75%.

7.5 COMPARACIÓN FINAL

A fin de dar respuesta al objetivo inicial, en el Gráfico 7.23, se comparan todas las muestras en función del rendimiento alcanzado y las emisiones de monóxido de carbono y óxidos de nitrógeno.

A primera vista, la muestra 1 se presta como la mejor opción a emplear. Presenta la mayor eficiencia, 78.85%, ya que la temperatura de los humos es baja y por tanto, las pérdidas por calor sensible son menores. Por otra parte, su concentración de NO_x es la menor de todas y tanto esta como la emisión de CO son inferiores a las permitidas. Sin embargo, atendiendo al desarrollo de la combustión, se observó que generaba gran cantidad de inquemados y escorias lo cual provocó la parada de la caldera.

Frente a esto, la muestra 4 es la que presenta el siguiente rendimiento más elevado, con las menores emisiones de NO_x y CO, cumpliendo las exigencias establecidas por las normativas. El comportamiento de este pélet a lo largo de la combustión fue bueno, no generó indicios de escoria ni de inquemados. Por tanto esta muestra es la que mejor responde a las expectativas demandadas en la utilización de pélets como combustible.

Como siguiente opción se encuentra la muestra 6. Igualmente, supera las exigencias de rendimiento mínimo y sus emisiones son inferiores a los límites establecidos. No obstante, sin llegar a presentar la problemática de la primera

muestra, durante su combustión sí se produjo cierta cantidad de escorias e inquemados, lo cual para el correcto funcionamiento de la caldera implicará un mayor mantenimiento.

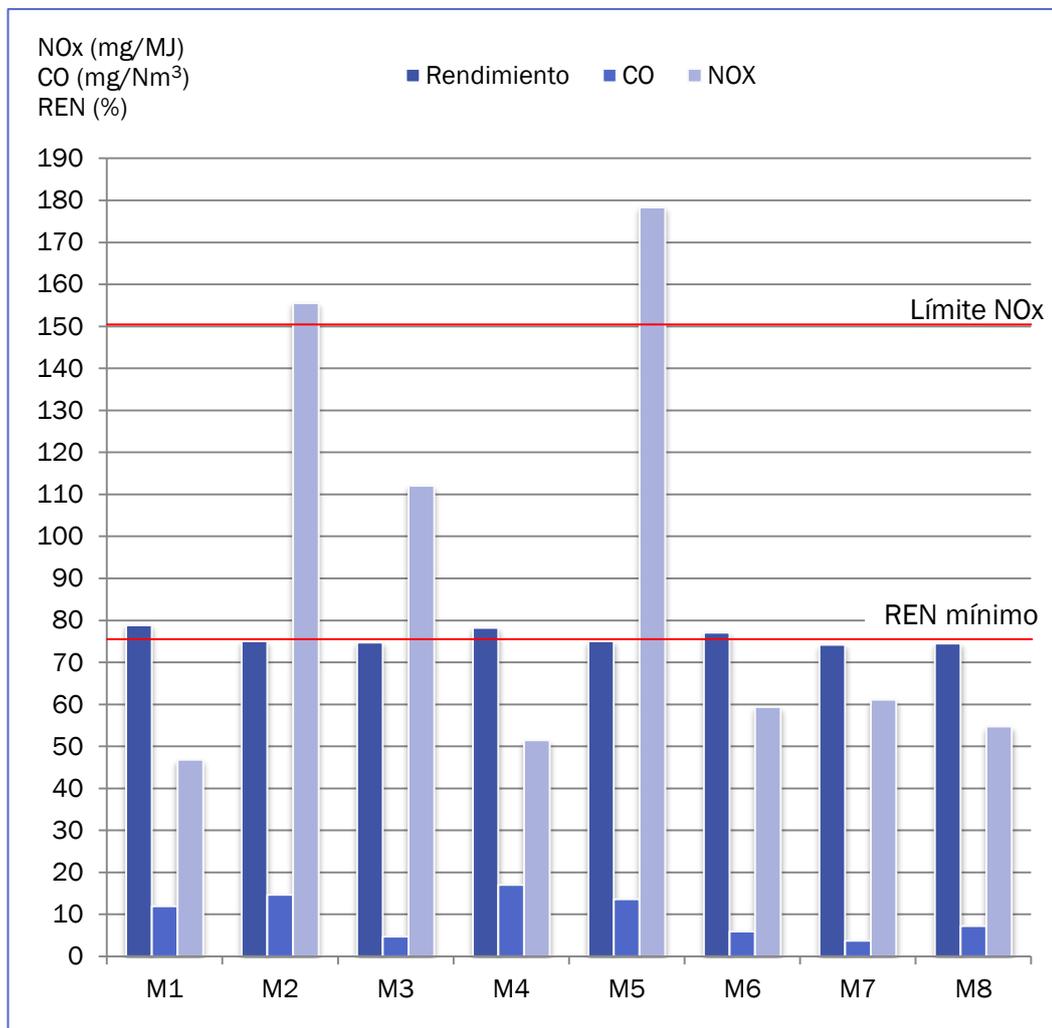


Gráfico 7.23 Comparación final de las muestras de estudio.

El resto de muestras directamente no serían seleccionadas al no llegar al rendimiento mínimo exigido, aunque presenten un óptimo comportamiento o no superen las emisiones límite.

Queda constancia de que no todos los pélets dan las mismas prestaciones. Es importante elegir un combustible que se adapte lo mejor posible a las características de la instalación para obtener el mayor rendimiento, con el mínimo mantenimiento y las menores emisiones.

CAPÍTULO 8

CONCLUSIONES

8.1 CONCLUSIONES

Se han caracterizado ocho muestras de pélets diferentes. No obstante, únicamente ha sido posible adquirir el análisis completo de la muestra 3 de estudio. La mayoría de las casas comerciales se limitan a indicar el cumplimiento de las especificaciones de calidad impuestas por las normas reguladoras.

El análisis elemental y energético del combustible ha sido un requisito imprescindible para aceptar la muestra en el estudio, por ser ambos requeridos para el análisis teórico de la combustión. Las ocho muestras presentan una composición elemental media de 49.12% de carbono, 6.23% de hidrógeno, 0.112% de nitrógeno, 0.14% de azufre y 44.39% de oxígeno. En cuanto al poder calorífico inferior, PCI, la media es de 4541.9 kcal/kg.

Los actuales analizadores de humos están programados únicamente para los combustibles fósiles convencionales que disponen en su base de datos. Por ello se ha desarrollado una hoja de cálculo que permite el estudio de las combustiones a partir de los datos concretos de cada muestra.

Respecto a las necesidades de aire, la media de las muestras resultó de 6.078 Nm³/kg de combustible. La muestra 3 presenta el mayor volumen con 6.817 Nm³/kg de combustible, mientras que la mínima cantidad, 5.566 Nm³/kg de combustible, pertenece a la muestra 5.

En el caso de los gases totales secos generados, el volumen medio fue de 6.042 Nm³/kg de combustible, siendo el máximo de 6.774 Nm³/kg de combustible y el mínimo 5.527 Nm³/kg de combustible, los cuales pertenecen a las muestras 3 y 5, respectivamente.

Las muestras 1 y 7 dieron evidencias durante sus ensayos de una importante formación de escorias y acumulación de inquemados. Estos han impedido el correcto desarrollo de la combustión, dificultando el buen progreso del flujo de los gases y de la llama y provocando la detección de la caldera. En el caso de las muestras 5 y 6, dicha formación no fue tan acusada, pero con un consumo mayor será preciso un constante mantenimiento para evitar los problemas que han presentado las dos muestras anteriores.

Por otro lado, se ha realizado un análisis de los resultados de combustión en base a las emisiones de CO, NO_x y eficiencia.

Como se indica en el capítulo 7, todos los ensayos alcanzaron un rendimiento mínimo del 74%, siendo la muestra 1 la que presenta el mayor porcentaje, 78.85%. No obstante, únicamente las combustiones de las muestras 1, 4 y 6 son admitidas al superar el 75.86% mínimo marcado por la normativa.

En el caso de las emisiones de CO, el máximo valor medido fue de 17.01 mg/Nm³ obtenido por la muestra 4. Este es muy inferior al límite máximo fijado en el capítulo 4, luego todas las muestras resultaron admisibles en ese sentido.

Respecto a las emisiones de NO_x, las muestras 2 y 5 superaron el límite tomado como referencia de la norma austriaca, 150 mg/MJ, por lo que no se consideran admisibles ambientalmente. El resto, exceptuando la muestra 3 con 112 mg/MJ, presentaron valores muy inferiores entre 46 y 61 mg/MJ.

En base al comportamiento durante la combustión, a la generación de inquemados y cenizas, al cumplimiento de las normativas referentes a las emisiones de CO, NO_x y rendimiento, la muestra 4 presenta los mejores resultados. La muestra 6 también cumple con las normativas, sin embargo su empleo implica un mayor mantenimiento para el correcto funcionamiento de la caldera.

Queda reflejado que, pese a que las propiedades de los combustibles cumplan los requisitos de calidad, el comportamiento que luego estos desarrollan es muy variable.

8.2 DESARROLLOS FUTUROS

Una caracterización más fiable de los combustibles aportaría resultados más precisos. La realización de análisis propios procedentes del mismo laboratorio daría mayor seguridad en la veracidad de los resultados.

En ese mismo sentido, disponer de analizadores más completos y con mayor cantidad de parámetros calculados, evitaría la necesidad de desarrollar modelos teóricos para su cálculo.

Por otro lado, ajustar la configuración de la caldera con el fin de encontrar las condiciones óptimas de combustión en cada combustible permitiría una comparación más real de las eficiencias y emisiones que cada pélet alcanza.

Otro punto de estudio, sería analizar la influencia de la composición de cada muestra en las emisiones y comprobar que se dan en dichas experiencias las conclusiones abordadas por las normas de calidad y otros estudios. ^[48]

Finalmente, el análisis también podría extenderse a la cuantificación de los residuos sólidos generados, cenizas y escorias. En el caso de las cenizas, diferenciando entre las localizadas en el intercambiador y las del cenicero.

BIBLIOGRAFÍA

Libros

- [2] Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE). Plan de Acción Nacional de Energías Renovables (PANER) 2011-2020. 2010.
- [3] Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE). Plan de Energías Renovables (PER) 2011-2020.
- [4] Asociación de Productores de Energías Renovables (APPA). Estudio del impacto macroeconómico de las energías renovables en España. 2012.
- [6] Sánchez-Macías, José Ignacio, et al. Expectativas del sector de la bioenergía en Castilla y León. 2009.
- [7] Ministerio de la Presidencia. Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios, (RITE). 2013.
- [9] European Biomass Association (AEBIOM). European bioenergy Outlook. Diciembre 2013.
- [14] Food and Agriculture Organization of the United Nations, Methodology WISDOM: Woodfuel Integrated Supply/Demand Overview mapping.
- [15] Plan Regional de Ámbito Sectorial de la Bioenergía de Castilla y León (Decreto 2/2011, de 20 de enero, BOCyL nº 17 de 26 de enero de 2011).
- [17] Plataforma Tecnológica Española de la Biomasa (BioPlat). Pélets de biomasa en España.
- [20] Lomas Esteban, José María, et al. Valorización de la biomasa del País Vasco. 2001
- [22] Horta Nogueira, Luis Augusto, et al. Wood Energy: Principles and Applications. 2002.
- [23] Antolín Giraldo, Gregorio. Observatorio de biomasa: procesos y tecnologías de peletizado.
- [24] Sebastián Nogués Fernando .Energía de la Biomasa (volumen I). Universidad de Zaragoza, 2010.

[40] Moran, M.J, Shapiro, H.N. Fundamentos de termodinámica técnica. Editorial Reverté. 2ª edición. 2004.

[43] Boman, Christoffer. "Particulate and gaseous emissions from residential biomass combustion". 5-7, Umeå, Sweden, April, 2005.

[46] Comisión Nacional de Energía (Chile). Guía para evaluación ambiental. Energías renovables no convencionales. Proyectos de biomasa. 2007.

[48] Valter Francesato, Eliseo Antonini, et al. Manual de combustibles de madera. Producción, requisitos de calidad y comercialización. 2008.

Normas

[18] UNE EN 14588: 2011. Biocombustibles sólidos. Terminología, definiciones y descripciones.

[19] Comité Técnico CEN/TC 335: Biocombustibles sólidos.

[25] UNE EN 14774: 2010. Biocombustibles sólidos. Determinación del contenido de humedad.

[26] UNE EN 15148: 2010. Biocombustibles sólidos. Determinación del contenido en materias volátiles.

[27] UNE EN 14775: 2010. Biocombustibles sólidos. Método para la determinación del contenido en cenizas.

[28] UNE EN 15104: 2011. Biocombustibles sólidos. Determinación del contenido total de carbono, hidrógeno y nitrógeno. Métodos instrumentales.

[29] UNE EN 15289: 2011. Biocombustibles sólidos. Determinación del contenido total de azufre y cloro.

[30] UNE EN 14918: 2011. Biocombustibles sólidos. Determinación del poder calorífico.

[31] UNE EN 14961-2: 2012. Biocombustibles sólidos. Especificaciones y clases de combustibles. Parte 2: Pélets de madera para uso no industrial.

[32] UNE EN 14961-6: 2012. Biocombustibles sólidos. Especificaciones y clases de combustibles. Parte 6: Pélets no leñosos para uso no industrial.

[33] UNE EN 16127: 2012. Biocombustibles sólidos. Determinación de la longitud y el diámetro de pélets.

[34] UNE EN 15103: 2010. Biocombustibles sólidos. Determinación de la densidad a granel.

[35] UNE EN 15150: 2012. Biocombustibles sólidos. Determinación de la densidad de partículas.

[36] UNE EN 15210-1: 2010. Biocombustibles sólidos. Determinación de la durabilidad mecánica de pélets y briquetas. Parte 1: Pélets.

[37] DIN EN 14961-2: 2011 – 09 (DINPlus) versión alemana de EN 14961-2:2011.

[38] ÖNORM M 7135: 2000. Compressed wood and compressed bark in natural state. Pellets and briquettes. Requirements and test specifications.

[45] UNE EN 303-5: 2013. Calderas de calefacción. Parte 5: Calderas especiales para combustibles sólidos, de carga manual y automática y potencial útil nominal hasta 500 kW. Terminología, requisitos, ensayos y marcado.

Tesis y proyectos

[11] Rodríguez Moriyón, M^a Isabel. Proyecto fin de carrera: Caracterización y combustión de aceites vegetales para su utilización en la producción de energía térmica. Valladolid, 2013.

[42] Toscano Morales, Luis Alberto. Tesis de grado. Análisis de los parámetros y selección de hornos para la combustión de biomasa. 2009.

Artículos y ensayos

[8] Rakos, Christian. El futuro del mercado del pellet. Bioenergy International n° 23. Abril 2014.

[12] González Barragán, Isabel. Peletizado de *C. cardunculus* para su aprovechamiento energético en calderas de biomasa. Agricultura n° 900. Octubre, 2007.

[13] González Barragán, Isabel. Aprovechamiento energético de sarmiento en calderas de biomasa mediante peletizado. Agricultura n° 901. Noviembre, 2007.

[39] DT.02.29.SA.OA-UVA01. Ensayos de comprobación o determinación de parámetros de combustión. Noviembre, 2009.

Apuntes

[41] Velasco Gómez, Eloy. “Reacciones de combustión”, Lección V.1: Generación de calor por combustión, Ingeniería Térmica. Universidad de Valladolid. 2012.

[44] Velasco Gómez, Eloy. “Rendimiento de los procesos de combustión”, Lección V.2: Tecnología de la combustión, Ingeniería Térmica. Universidad de Valladolid. 2012.

Manuales

[47] SOLARFOCUS. Therminator II – Caldera combianda. 2006.

Sitios web

[1] Ministerio de Industria, Energía y Turismo. www.minetur.gob.es/ (consulta realizada el 8 de Mayo de 2014)

[5] Instituto Nacional de Estadística (INE), www.ine.es/ (consulta realizada el 8 de Mayo del 2014)

[10] Ical. Castilla y León fabrica la quinta parte de los pellets de España. www.diariodeleon.es/ (consulta realizada el 23 de Junio de 2014)

[16] Centro de Servicios y Promoción Forestal y de su Industria de Castilla y León, (CESEFOR). www.cesefor.com (consulta realizada el 01 de Marzo de 2014)

[21] www.pelletprocess.de (Consulta realizada el 15 de Marzo 2014)

ANEXO 1

Este anexo contiene la calibración del analizador de humos empleado en la experimentación realizada para este TFG.

Datos del analizador de combustión

Marca: TESTO

Modelo: 350S

Ref. Testo: 0563 0368

n/s 01383899 // 01380189

Solicitante: CENIT SOLAR
PARQUE TECNOLÓGICO. AVDA FCO. VALLES, 17
47151 - BOECILLO (VALLADOLID)

n/Ref. A17193

s/Ref. 7571

**Fecha/s de
calibración:** 29 DE MARZO DE 2011

Este certificado de calibración se ha emitido en base a una garantía de calidad para Instrumentación y Servicios de Calibración, S.L. del laboratorio de Calibración de Instrumentos Testo, S.A.

Este documento garantiza:

- La trazabilidad de las medidas de los instrumentos utilizados en el laboratorio para las calibraciones con los estándares nacionales y/o internacionales del Sistema Internacional de unidades (SI).
- Que todos los gases utilizados en la calibración, se han controlado, ensayado y, dentro de lo ya establecido, son conforme en todos los puntos con las principales especificaciones de Testo.
- Que los instrumentos usados como referencia, así como los gases patrón empleados en la calibración, tienen garantizada su trazabilidad a través de los laboratorios reconocidos por ENAC u otra entidad firmante del acuerdo EA (European cooperation for Accreditation).

Para el cálculo de incertidumbre en gases se ha tenido en cuenta la incertidumbre del gas patrón, la resolución del instrumento a calibrar y la desviación estándar de una serie de medidas experimentales.

La calibración en temperatura se ha realizado por comparación con un termómetro patrón, en el seno de un pozo seco termostático de uniformidad y estabilidad conocidas.

La calibración en presión se ha realizado por comparación con un manómetro patrón, en un circuito presurizado.

Los valores reflejados en la tabla de resultados corresponden al valor medio de las series realizadas.

La incertidumbre expandida de medida se ha obtenido multiplicando la incertidumbre típica de medición por el factor de cobertura $k=2$ que, para una distribución normal, corresponde a una probabilidad de cobertura de aproximadamente el 95%. La incertidumbre típica de medida se ha determinado conforme al documento EA-4/02 (Antigua EAL-R2).

El proceso de calibración se llevó a cabo según la instrucción técnica de régimen interno IT-PC-05-08.

La reproducción de este certificado en su totalidad sólo está permitida previa autorización del emisor. Cualquier reproducción parcial o valoración de los resultados de medición sólo la puede autorizar el Laboratorio de Calibración de Instrumentos Testo.



CONDICIONES AMBIENTALES			
Parámetro	Unidad medición	Valores límites	Valor al inicio de la prueba
Temperatura	°C	18...26	20
Humedad rel.	%hr	Inferior al 75%	45

 Fabricante: **TESTO**

Modelo	Número de serie
0563 0368	01383899 // 01380189

TABLA DE VALORES DE LA CALIBRACIÓN

Parámetro	Unidad de medición	Valor de referencia	Valor medido	Límite mínimo	Límite máximo	Incertidumbre expandida	Nº certificado del patrón
Temperatura	°C	100,3	100,0	98,7	101,9	0,50	17701
Oxígeno (O2)	% O2	1,348	1,46	1,1	1,5	0,010	284997.004
Monóxido de Carbono (CO)	ppm CO	990	999	940	1040	10	284997.004
Óxido nítrico (NO)	ppm NO	84,07	80	79	89	0,79	L-0156/10
Dióxido de Carbono (CO2)	% CO2	16,97	16,97	16,50	17,44	0,070	L-0248/08
Tiro	mbar	-1,051	-1,05	-1,08	-1,02	0,013	17725

29 de marzo de 2011

Laboratorio de calibración de gases


Sergio Iglesias Fernández

Jefe de Laboratorio


Instrumentación y Servicios de Calibración
 CIF: B - 39959261
 Políg. Ind. Rocas 4-c/, Benjamín Franklin, 351, Nave 4
 33211 GIJÓN
 T: +34 985 19 50 62 • 33211 GIJÓN
 E: correo@iscal.net

INSTRUMENTACIÓN Y SERVICIOS DE CALIBRACIÓN, S.L.

POL. IND. ROCES 4, C/ BENJAMÍN FRANKLIN 351 NAVE 4

33211 - GIJÓN (ASTURIAS)

Tfno. +34 985 19 50 62

Fax +34 985 13 24 91

e-mail: correo@iscal.net



ENAC
CALIBRACIÓN
N° 62/LC109
N° 62/LC209
N° 62/LC452

CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN

Certificate of Calibration

Número 17725
Number

Página 1 de 4 páginas
Page 1 of 4 pages

Calibración Asistencia Técnica, S.L.
Basters, 17
Polígono Industrial Riera de Caldes
08184 Palau-Solità i Plegamans (Barcelona)
Tel. 93 863 91 61. Fax 93 864 85 42
laboratorio@catbcn.com www.catbcn.com



**Calibración
Asistencia
Técnica**

Objeto CALIBRADOR DE PRESION
Item

Marca DHI
Mark

Modelo RPM3
Model

Identificación 1499
Identification

Solicitante INSTRUMENTACION Y SERVICIOS DE CALIBRACION, S.L.
Applicant C/BENJAMIN FRANKLIN, 351 NAVE 4 - P.I. DE ROCES 4
33211 GIJON
ASTURIAS

Fechas de calibración 27/05/2010
Date/s of calibration

Signatario/s autorizado/s
Authorized signatory/ies

Carlos Prats Aymerich
Jefe de Laboratorio



**Calibración
Asistencia
Técnica**
C/ Basters, 17
Pol. Ind. Riera de Caldes
08184 Palau-Solità i Plegamans
Tel. 938 639 161 • Fax 938 648 542

Fecha de emisión 27/05/2010
Date of issue

CODIGO INTERNO: C-06557 / A-10389

Este certificado se expide de acuerdo con las condiciones de la acreditación concedida por ENAC que ha comprobado las capacidades de medida del laboratorio y su trazabilidad a patrones nacionales.

Este certificado no podrá ser reproducido parcialmente sin la aprobación por escrito del laboratorio que lo emite y de ENAC.

This certificate is issued in accordance with the conditions of accreditation granted by ENAC which has assessed the measurement capability of the laboratory and its traceability to national standards.

This certificate may not be partially reproduced, except with the prior written permission of the issuing laboratory and ENAC.

Calibración

Antes de proceder a la calibración el instrumento permaneció durante un periodo de 24 horas en condiciones ambientales estables de (22 ± 2) °C y humedad relativa menor del 60% hr. La temperatura durante la calibración fue de (22 ± 2) °C y la humedad relativa menor del 60% hr.

El instrumento fue operado a baterías y permaneció encendido el tiempo suficiente para alcanzar la estabilidad térmica.

Los procedimientos utilizados para la calibración fueron:
ITC-112, ITC-113.

Patrones utilizados:
P-066 N/S: 209 y el P-067 N/S: 696.

Los patrones utilizados tienen garantizada su trazabilidad a través de los laboratorios nacionales reconocidos por ENAC (ENAC es uno de los organismos firmantes del Acuerdo Multilateral EAL para el reconocimiento mutuo de los certificados de calibración).

Antes de proceder a la calibración se desperezó el instrumento. Para la calibración se realizaron tres series de lecturas tomadas en orden creciente y decreciente. Los valores reflejados en la tabla de resultados corresponden al valor medio de las series realizadas.

En la tabla se expresa el valor de la corrección con su signo y es igual al valor de referencia del patrón menos la lectura del instrumento.

El equipo se calibró en posición horizontal.

El gas utilizado para la calibración fue aire.

Incertidumbre

La incertidumbre expandida de medida se ha obtenido multiplicando la incertidumbre típica de medición por el factor de cobertura $k = 2$ que, para una distribución normal, corresponde a una probabilidad de cobertura de aproximadamente 95 %. La incertidumbre típica de medida se ha determinado conforme al documento EA-4/02 (Antigua EAL-R2).

Los valores que aparecen en las tablas se entienden corresponden al momento de la medida, no haciéndose consideración alguna sobre la estabilidad del instrumento.

Incertidumbre

En la tabla de resultados obtenidos se expresan las siguientes columnas:

Presión de referencia: Corresponde a los valores de presión leídos en el patrón, en las unidades de presión indicadas.

Lectura del instrumento: Corresponde a los valores de presión leídos en el instrumento, en las unidades de presión indicadas.

Corrección: Cantidad a sumar algebraicamente a la lectura del instrumento para obtener la lectura del patrón.

Incertidumbre: Es la incertidumbre expandida de medida (con el factor de cobertura k indicado), en unidades de presión en cada punto.

La unidad de presión del Sistema Internacional de Unidades es el pascal.

$$1 \text{ mbar} = 100 \text{ Pa}$$

Observaciones

En la columna de "TOLERADO" se han reflejado las especificaciones sobre precisión dadas por el fabricante en el manual de instrucciones del instrumento.

La columna de "RESUL." indica lo siguiente:

PASA: El instrumento cumple las especificaciones señaladas en el punto calibrado para un nivel de confianza mayor del 95 %.

NO PASA: El instrumento está fuera de las especificaciones señaladas en el punto calibrado para un nivel de confianza mayor del 95 %.

(1) Debido a la incertidumbre asignada en el punto calibrado, no puede asegurarse para un nivel de confianza superior al 95 % que el instrumento se encuentre dentro de las especificaciones señaladas.

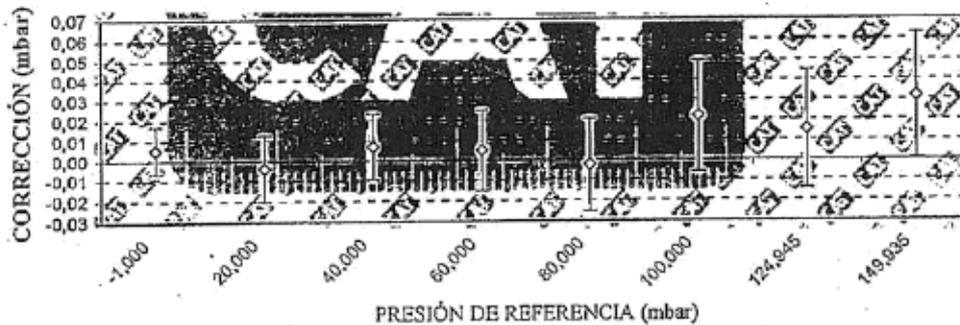
No se realizaron ajustes.

Fecha de recepción del instrumento: 30/04/2010.

Resultados obtenidos

Rango: (-1 a 150) mbar N/S: 1499							
CAMPO	PRÉSION		LECTURA			INCERT.	
INSTRUM.	REFERENCIA	(unidad)	INSTRUM.	CORRECCION	TOLERADO	(1σ2)	RESUL.
(unidad)	(unidad)		(unidad)	(unidad)	(± unidad)	(± unidad)	
(-1 a 150)	-1,000	mbar	-1,005	0,005	0,075	0,012	PASA
	20,000	mbar	20,004	-0,004	0,075	0,016	PASA
	40,000	mbar	39,993	0,007	0,075	0,016	PASA
	60,000	mbar	59,995	0,005	0,075	0,020	PASA
	80,000	mbar	80,002	-0,002	0,075	0,023	PASA
	100,000	mbar	99,978	0,022	0,075	0,028	PASA
	124,945	mbar	124,930	0,015	0,075	0,030	PASA
	149,935	mbar	149,903	0,032	0,075	0,031	PASA

REPRESENTACIÓN GRÁFICA





ENAC
 CALIBRACIÓN
 Nº 62/LC109
 Nº 62/LC209
 Nº 62/LC452

CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN

Certificate of Calibration

Número 17701
 Number

Página 1 de 3 páginas
 Page 1 of 3 pages

Calibración Asistencia Técnica, S.L.
 Basters, 17
 Polígono Industrial Riera de Caldes
 08184 Palau-Solità i Plegamans (Barcelona)
 Tel. 93 863 91 61 — Fax 93 864 85 42
 laboratorio@catbcn.com — www.catbcn.com



**Calibración
 Asistencia
 Técnica**

Objeto
 Item TERMOMETRO DIGITAL

Marca
 Mark TESTO

Modelo
 Model 720

Identificación
 Identification 01497335

Solicitante
 Applicant INSTRUMENTACION Y SERVICIOS DE CALIBRACION, S.L.
 C/BENJAMIN FRANKLIN, 351 NAVE 4 - P.I. DE ROCES 4
 33211 GIJON
 ASTURIAS

Fechas de calibración
 Date/s of calibration 19/05/2010 al 26/05/2010

Signatario/s autorizado/s
 Authorized Signatory/ies

Carlos Prats Aymerich
 Jefe de Laboratorio



Fecha de emisión
 Date of issue 26/05/2010

CODIGO INTERNO: C-11838 / A-10440

Este certificado se expide de acuerdo con las condiciones de la acreditación concedida por ENAC que ha comprobado las capacidades de medida del laboratorio y su trazabilidad a patrones nacionales.
 Este certificado no podrá ser reproducido parcialmente sin la aprobación por escrito del laboratorio que lo emite y de ENAC.

This certificate is issued in accordance with the conditions of accreditation granted by ENAC which has assessed the measurement capability of the laboratory and its traceability to national standards.

This certificate may not be partially reproduced, except with the prior written permission of the issuing laboratory and ENAC.

Certificado de Calibración

Número: 17 701

Página 2 de 3

CAT Calibración
Asistencia
Técnica

Calibración

Antes de proceder a la calibración el instrumento permaneció durante un período de 24 horas en condiciones ambientales estables de (22 ± 2) °C y humedad relativa menor del 60% hr. La temperatura durante la calibración fue de (22 ± 2) °C y la humedad relativa menor del 60% hr.

El instrumento fue operado a baterías y permaneció encendido el tiempo suficiente para alcanzar la estabilidad térmica.

Las medidas se realizaron con el termómetro de resistencia de platino ID: 01497735, conectado al canal de entrada del equipo.

La inmersión del sensor durante la calibración fue de 180 mm.

La calibración se realizó en el margen de 0 °C a 150 °C, por comparación con Termómetros de Resistencia de Platino en baño de temperatura controlada, de acuerdo con el procedimiento interno ITC-306.

Patrones utilizados: T-014, T-015, T-018, T-019, T-029

La estabilidad del instrumento durante la calibración ha sido estimada como la diferencia entre lecturas en el punto de fusión del hielo antes y después del resto de medidas.

Los patrones utilizados tienen garantizada su trazabilidad a través de los laboratorios nacionales reconocidos por ENAC. (ENAC es uno de los organismos firmantes del Acuerdo Multilateral EAL para el reconocimiento mutuo de los certificados de calibración).

Incertidumbre

La incertidumbre expandida de medida se ha obtenido multiplicando la incertidumbre típica de medición por el factor de cobertura $k=2$ que, para una distribución normal, corresponde a una probabilidad de cobertura de aproximadamente 95 %. La incertidumbre típica de medida se ha determinado conforme al documento EA-4/02 (Antigua EAL-R2).

Los valores que aparecen en las tablas se entienden corresponden al momento de la medida, no haciéndose consideración alguna sobre la estabilidad del instrumento a más largo plazo.

Observaciones

Los puntos de calibración que aparecen en la tabla de resultados han sido seleccionados a petición del cliente.

Fecha de recepción del instrumento: 13/05/2010

Resultados obtenidos

TEMPERATURA DE REFERENCIA (°C)	INDICACION INSTRUMENTO (°C)	CORRECCION (°C)	INCERTIDUMBRE ENBANDIDA (°C)
0,00	-0,2	0,2	0,16
49,88	49,7	0,2	0,16
99,82	99,4	0,4	0,16
150,16	149,6	0,6	0,17
0,00	-0,2	0,2	0,16

REPRESENTACIÓN GRÁFICA



PRAXAIR ESPAÑA, S.L.

Domicilio Social:

C/Orense, 11 5º
28020 Madrid
Tfno.: (+34) 914533000
Fax: (+34) 915554307

Laboratorio:

Ctra. Villaverde-Vallecas km. 4.8
28053 Madrid
Tfno.: (+34) 917860298
Fax: (+34) 917856810



OBJETO

Item

MEZCLA DE MONOXIDO DE NITROGENO EN NITROGENO

MARCA

Mark

PRAXAIR, PRODUCCION ESPAÑA, S.L.

MODELO

Model

20HA

IDENTIFICACIÓN

Identification

PXE403574

SOLICITANTE

Applicant

**INSTRUMENTACION SERV.CALIBRACION,S.L
P.ROCES,4-C.BENJAMIN F.351-N.4 - 33211 GIJON (ASTURIAS)**

Pedido Nº:5093

FECHAS DE CALIBRACIÓN

Date/s of calibration

13/09/2010, 07/09/2010, 30/08/2010

Signatario/s autorizado/s

Authorized signatory/es

Fecha de Emisión

Date of Issue

15/09/2010


Alvaro García Rodríguez - Director Técnico

Este certificado se expide de acuerdo con las condiciones de la acreditación concedida por ENAC, que ha comprobado las capacidades de medida del laboratorio y su trazabilidad a patrones nacionales e internacionales.

This certificate is issued in accordance with the conditions of accreditation guaranteed by ENAC, which has assessed the measurement capability of the laboratory and its traceability to national and international standards.

ENAC es firmante del Acuerdo de Reconocimiento Mutuo (MLA) de certificados de calibración de European Cooperation for Accreditation (EA) y de International Laboratories Accreditation Cooperation (ILAC).

ENAC is one of the signatories of the Multilateral Agreement of the European Cooperation for Accreditation (EA) and the International Laboratories Accreditation Cooperation (ILAC).

PRAXAIR ESPAÑA, S.L.

Domicilio Social:
C/Orense, 11 5ª
28020 Madrid
Tfno.: (+34) 914533000
Fax: (+34) 915554307

Laboratorio:
Ctra. Villaverde-Vallecas km. 4.8
28053 Madrid
Tfno.: (+34) 917860298
Fax: (+34) 917856810



FECHA DE RECEPCIÓN
Receipt Date

23/08/2010

RESULTADO
Result

La calibración se ha realizado aplicando el procedimiento PT-06,10 de Praxair España, S.L., utilizando patrón/es trazable/s a Organismo/s firmante/s del Acuerdo de Reconocimiento mutuo de EA.

The calibration has been made according to the procedure from Praxair España, S.L. PT-06,10, by using standard/s traceable/s to Organization/s signatories to the Multilateral Agreement of EA.

Nº DE BOTELLA <i>Cylinder Nº</i>	Nº DE CERTIFICADO <i>Certificate Nº</i>
PXE1112171	3221210-01
PXE1112174	3221210-02
PXE1112175	3221210-03
PXE1123983	3221209-06A
PXE63079	3221209-03

El resultado de la calibración ha sido el siguiente:

The following result of the calibration has been found:

$(84.07 \pm 0.54) \times 10^{-6}$ mol/mol MONOXIDO DE NITROGENO
Balance NITROGENO

k = 2

La incertidumbre expandida de medida se ha obtenido multiplicando la incertidumbre típica de medición por el factor de cobertura K=(ver en resultado) que, para una distribución normal, corresponde a una probabilidad de cobertura de aproximadamente el 95%. La incertidumbre típica de medida se ha determinado conforme al documento EA 4/02.

The expanded uncertainty for the measure has been obtained multiplying the measure typical uncertainty by the coverage factor K=2, that for a normal distribution, corresponds with a coverage probability of approximately 95%. The measure typical uncertainty has been calculated according to EA 4/02 guide.

OTRA INFORMACIÓN SOBRE LA MEZCLA GASEOSA *Additional Information on Gas Mixture*

Nº BOTELLA <i>Cyl number</i>	TIPO DE ENVASE <i>Cyl Type</i>	20HA	NÚMERO DE PEDIDO PRAXAIR <i>Praxair Orden Number</i>
PXE403574			54460

La observación de mezclas similares evidencia que el producto puede verse alterado por un tratamiento impropio de la botella. Particularmente debe evitarse la retrodifusión de la humedad y del oxígeno, que pueden dar lugar a una pérdida de concentración. También deben evitarse velocidades de flujo superiores a 5 L/min que pueden dar lugar a modificaciones de la concentración.

Observing of similar gas mixtures gives evidence that the product can be altered if it suffers improper treatments. In particular moisture or oxygen backdiffusion is to be avoided, as they can create concentration losses. Also, flow speed above 5 L/min must be avoided can give place to modifications of the concentration.

OBSERVACIONES *Observations*

Este certificado no podrá ser reproducido total o parcialmente sin la aprobación por escrito del laboratorio que lo emite y de ENAC.

This certificate can't be duplicated totally or partially without the wrote approval from the laboratory and from ENAC.

Este certificado se refiere a la muestra calibrada en un intervalo de temperatura de 15 a 30°C y una humedad relativa máxima del 70%.

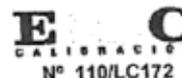
This certificate is referred to the calibrate sample in an interval of temperature between 15°C and 30°C and a relative humidity of 70%.

CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN



Nº:

L-0248/08



PRAXAIR ESPAÑA, S.L.

Domicilio Social:

C/Órense, 11 5ª
28020 Madrid
Tfno.: (+34) 914533000
Fax: (+34) 915554307

Laboratorio:

Ctra. Villaverde-Vallelds Mil. 4.0
28053 Madrid
Tfno.: (+34) 917860298
Fax: (+34) 917856810

PETICIONARIO:	INSTRUMENTACION SERV.CALIBRACION,S.L. P.ROCÉS,4-C.BENJAMIN F.351-N.4 - 33211 GIJON (ASTURIAS)		Pedido Nº:A03322
PRODUCTO:	MEZCLA DE DIOXIDO DE CARBONO EN NITROGENO		
FABRICANTE:	PRAXAIR PRODUCCION ESPAÑA, S.L.		
MODELO:			
TIPO DE ENVASE:	20H Rfa. 39343	FECHA DE RECEPCIÓN:	26/09/2008
IDENTIFICACION DEL ENVASE:	PXE533426	FECHA DE CALIBRACIÓN:	29/09/2008

RESULTADO:

La calibración se ha realizado aplicando el procedimiento: **PT-05,8** de Praxair España, S.L., utilizando patrón/es trazable/s a Organismo/s firmante/s del Acuerdo de Reconocimiento mutuo de EA.

Botella Número: 467760	Nº de Certificado: 316888-01
Botella Número: PXE200082	Nº de Certificado: 3220839-06
Botella Número: PXE482926	Nº de Certificado: 3220839-04
Botella Número: PXE49367	Nº de Certificado: 3220839-05
Botella Número: PXE9354A	Nº de Certificado: 3220839-07

El resultado de la calibración ha sido el siguiente:

$(16.97 \pm 0.07) \times 10^{-2}$ mol/mol DIOXIDO DE CARBONO $k = 2$
Balance NITROGENO

La incertidumbre expandida de medida se ha obtenido multiplicando la incertidumbre típica de medición por el factor de cobertura K=(ver en resultado) que, para una distribución normal, corresponde a una probabilidad de cobertura de aproximadamente el 95%. La incertidumbre típica de medida se ha determinado conforme al documento EA 4/02.

Observaciones:

--

Firma Autorizada

Alvaro García Rodríguez - Director Técnico

Fecha de emisión:

30/09/2008

Este certificado se expide de acuerdo con las condiciones de la acreditación concedida por ENAC, que ha comprobado las capacidades de medida del laboratorio y su trazabilidad a patrones nacionales e internacionales.

Este certificado no podrá ser reproducido total o parcialmente sin la aprobación por escrito del laboratorio que lo emite y de ENAC.

Este certificado se refiere a la muestra calibrada en las condiciones indicadas.

ENAC es firmante del Acuerdo de Reconocimiento Mutuo (MLA) de certificados de calibración de European Cooperation for Accreditation (EA) y de International Laboratories Accreditation Cooperation (ILAC).



PRAXAIR ESPAÑA S.L.

Domicilio Social

Orense, 11 - 5ª
28020 Madrid

Tel.: 91 453 30 00

Fax: 91 555 43 07

Laboratorio

Ctra. Villaverde a Vallecas, Km. 4,8
28053 Madrid

Tel.: 91 786 02 98

Fax: 91 785 68 10

Fecha: 30/09/2008

Nº Pedido: A03322

Ref: Praxair: 39343

Nº Certificado: 13810

CERTIFICADO DE GARANTIA - MEZCLA DE GASES

CLIENTE: INSTRUMENTACION SERV.CALIBRACION,S.L

Por la presente, PRAXAIR certifica la calidad del gas contenido en las botellas cuyas características se indican a continuación:

Nº de botella: PXE533426

TIPO DE ENVASE: 20H

COMPONENTE TOXICO: NO

TIPO DE GRIFO: M (BR-O).

MEZCLA INFLAMABLE: NO

VOLUMEN DE MEZCLA: 3,00 M3

FECHA DE FABRICACION: 23/09/2008

PRESION A 21º C: 150,00 bar

PERIODO DE ESTABILIDAD: 36 Meses

TEMPERATURA USO/ALMACENAMIENTO: Entre 0 y 50 ºC

PRESION MINIMA DE UTILIZACION: - 10% presión balance.

TIPO DE MEZCLA: SEGUN SOLICITUD

COMPONENTES	CONCENTRACION SOLICITADA	VALOR CERTIFICADO	INCERTIDUMBRE DE MEDIDA
DIOXIDO DE CARBONO	17,00 %mol	16,97 % mol/mol	Ver Certificado
NITROGENO	Balance	Balance	de Calibracion nº L-0248/08

Esta Botella ha sido preparada de acuerdo a las normas: ISO 6142, 6143 y/o 6146. El procedimiento de fabricación es según M.O Cap. 43.000. Siendo trazable a estándares de peso del C.E.M.: CEM-C-06/0154-2.0 y CEM-C-06/0153-2.1 y/o a patrones oficiales del NIST y/o NMI. La incertidumbre de medida ha sido calculada para un factor K - ver Certificado de Calibración.

Basilio Trascasa Panofiega
Responsable de Producción



PRAXAIR

Gases Especiales

PRAXAIR, emite este certificado bajo su exclusiva responsabilidad. No garantizamos la conveniencia del uso de esta información para algún propósito particular. Esta información se ofrece entendiendo que su uso queda a la discreción y riesgo del usuario. Este certificado sólo es válido si la firma y sello son originales.



Belgische Accreditatie Organisatie



Praxair N.V.
Nijverheidsstraat 4
B-2260 Oevel - Belgium

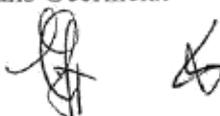
Accreditation Certificate N° 159-CAL
BELAC has signed the EA Multilateral Agreement for Mutual Recognition of Calibration Certificates.

CALIBRATION CERTIFICATE Calibration Mixture according to ISO/IEC-17025

Delivered to :	PRAXAIR ESPANA S.A. CTRA. VILLAVERDE- VALLECAS KM. 4.8 28053 MADRID SPANJE
Date of Calibration:	1/3/2011
Number of Calibration:	284997.004
Date of delivery:	1/3/2011
Total Number of Pages:	2

Signature

Technical Director
Frans Geerinckx



This certificate is delivered in agreement with the Accreditation Conditions of the Belgian Organisation for Accreditation. This certificate shall be reproduced completely, except when a written permission for partial reproduction has been obtained from the laboratory.

Accreditation Certificate N° 159-CAL

Calibration certificate **Praxair n.v. certificate nr. 284997.004**

page 2 of 2 pages

Annex:None

Description: Gasmixture : CO, O2 in Nitrogen
Cilindernumber : BN20582F

Method of Certification: **Class B**
The concentration is determined by comparison to appropriate reference materials and conform to norm ISO 6143:2001 (Gas Analysis-Comparison methods for determining and checking the composition of calibration gas mixtures)

Analytical Result : CO : $(990 \pm 10) \times 10^{-6}$ mol / mol
O2 : $(1,348 \pm 0,008) \times 10^{-2}$ mol / mol

Analytical Uncertainty :
The reported uncertainty is based on the standard uncertainty multiplied with a coverage factor $k = 2$, which corresponds to a confidence interval of approximately 95%.
The standard uncertainty is calculated according to EA-4/02.

Traceability : The concentration is traceable to CRM(Certified ReferenceMaterial) of NMI-Vsl or to other reference materials-with traceability to BELAC.

Package: Cilindertype : 50 liter
Valve connection: Din 14
Pressure : 150 bara
Content : 7500 Liter

Use and stability Do not use/stock below -20 °C or above $+50$ °C.
The stability of similar mixtures in this type of cilinder has been checked regularly. There is no indication of change of the composition in a period of 2 years.

Remarks:

Date and signature Oevel ,1/3/2011
Praxair N.V

Frans Geerinckx

