



Universidad de León



Escuela Superior y Técnica
de Ingenieros de Minas

GRADO EN INGENIERÍA DE LA ENERGÍA

TRABAJO FIN DE GRADO

ESTUDIO DE VIABILIDAD TÉCNICO- ECONÓMICO PARA EL USO DE PELLETS CON BIOMASA RESIDUAL TORREFACTADA EN CALDERAS.

León, Julio de 2016

Autor: Laura Losada Asensio

Tutor: Jorge Cara Jiménez

Cotutora: María Luz Muñoz Contreras

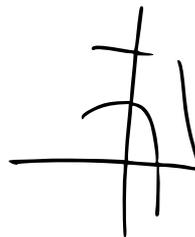
El presente proyecto ha sido realizado por Dña. Laura Losada Asensio, alumna de la Escuela Superior y Técnica de Ingenieros de Minas de la Universidad de León para la obtención del título de Grado en Ingeniería de la Energía.

La tutoría de este proyecto ha sido llevada a cabo por D. Jorge Cara Jiménez, profesor del Grado en Ingeniería de la Energía.

La cotutoría de este proyecto ha sido llevada a cabo por Dña. María Luz Muñoz Contreras, profesora del Grado en Ingeniería de la Energía.

Visto Bueno

Visto Bueno



Fdo.: Dña. Laura Losada
Asensio

Fdo.: D. Jorge Cara Jiménez
El Tutor del Trabajo Fin de
Grado

Fdo.: Dña. María Luz Muñoz
Contreras

La autora del Trabajo Fin de
Grado

La cotutora del Trabajo de
Fin de Grado

RESUMEN

Actualmente, existen inconvenientes derivados de la gran generación y cantidad de residuos acumulados debidos a la actividad humana, que, sin embargo, pueden ser paliados mediante su aprovechamiento. Los residuos procedentes del sector agrícola presentan un gran potencial y es por ello que en el presente estudio se analiza la viabilidad del uso de poda de vid, o sarmiento. Dadas sus excelentes características, se busca optimizar la producción de pellets a partir de la mezcla de residuo de poda de vid crudo con residuo de poda de vid torrefactado. La torrefacción es un proceso térmico con el que se mejoran en gran medida las cualidades energéticas de la biomasa, pero supone un aumento del coste del proceso productivo. Por tanto, se considerará la producción de pellets de la mezcla descrita, con el objeto de obtener un producto de excelentes características para su uso como combustible, a un precio de venta competitivo.

ABSTRACT

Nowadays, disadvantages exist due to the big waste amount generated by current lifestyle. However, the effect of these problems can be reduced by its exploitation. Agricultural waste represents a big percentage of these residues, so this study is focused on taking advantage of vine yard waste. Because of the excellent characteristics of vine yard waste, one of the objectives is looking for the most optimal pellet production, made by mixing torrefacted vine yard and raw vine yard. Torrefaction is a thermal process that improves, in a great extent, the energy characteristics of biomass, but supposes also a big cost. Therefore, the mixed pellet production previously described is looked for in this research, with the aim of finding an ideal energy product able to be used as a biofuel and also to be sold in a competitive price.

ÍNDICE

Contenido

RESUMEN	4
ABSTRACT.....	4
ÍNDICE	I
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VII
ÍNDICE DE TABLAS.....	X
1 Características generales de la biomasa.....	1
1.1 Ventajas del uso de biomasa	2
1.2 Inconvenientes del uso de biomasa.....	3
1.3 Tipos de biomasa	3
1.4 Estructura de la biomasa.....	4
1.5 Propiedades físicas y químicas de la biomasa	5
1.5.1 Densidad	5
1.5.2 Tamaño de la biomasa.....	5
1.5.3 Análisis elemental.....	5
1.5.4 Análisis inmediato.....	7
1.5.5 Poder calorífico	8
2 Situación actual de la biomasa en España	9
2.1 Evaluación del potencial de los recursos de biomasa en España	13
2.2 Características generales de los pellets	14
2.3 Situación actual del mercado de pellets de madera en España	16
2.4 Legislación aplicable al ámbito de la biomasa	17
2.5 Futuro de la biomasa en España	17
3 Antecedentes.....	18
4 Objetivos.....	21
5 Caracterización del residuo	22
5.1 El recurso en Castilla y León.....	22
5.2 Poda de vid.....	23
5.3 Caracterización de la madera del sarmiento de vid.....	24
5.4 Coste de la poda de vid a utilizar	25
6 Transporte de la materia prima.....	26

6.1	Transporte	26
6.2	Recepción	26
6.3	Almacenaje	27
6.4	Transporte interno	27
6.4.1	Cinta transportadora	27
6.5	Costes del proceso de logística	27
6.6	Emisiones de CO ₂	29
7	Localización de la central de producción de pellets de sarmiento torrefactado	30
7.1	Datos de la parcela	33
8	Descripción de la planta de obtención de pellets de mezcla de sarmiento torrefactado y sarmiento crudo	35
8.1	Características de operación de la planta	35
8.2	Descripción de la planta y proceso	35
8.3	Superficie necesaria e infraestructuras	35
8.4	Recepción	36
8.5	Almacenamiento de la materia prima	36
8.5.1	Localización del almacén	36
8.5.2	Sistema de almacenamiento	36
8.5.3	Tipo de establecimiento	36
8.5.4	Superficie del almacén	37
8.5.5	Determinación de la superficie	40
8.6	Planta de preparación de la biomasa	42
8.7	Planta de torrefacción, mezclado, pelletización y almacenamiento	43
8.8	Oficinas	44
9	Proceso de torrefacción	45
9.1	Productos	48
9.2	Ventajas de la torrefacción	51
9.3	Etapas del proceso	52
9.3.1	Presecado y secado	52
9.3.2	Postsecado	52
9.3.3	Torrefacción	53
9.3.4	Enfriado	54
9.4	Propiedades de la biomasa torrefactada	55
9.4.1	Densidad y volumen	55

9.4.2	Capacidad de molienda	56
9.4.3	Capacidad hidrófoba.....	57
9.4.4	Resistencia a la formación de polvo	57
9.5	Tecnologías de torrefacción.....	57
9.5.1	Clasificación según el modo de calentamiento	58
9.5.2	Clasificación según el modo de la mezcla gas-sólido	61
10	Diseño del proceso de torrefacción.....	62
10.1	Capacidad de la planta de torrefacción.....	62
10.2	Planta de pretratamiento de la biomasa a torrefactar	62
10.2.1	Reducción de tamaño de partícula.....	62
10.3	Secado	62
10.4	Elección del tipo de reactor y características.....	63
10.4.1	Superficie de contacto	65
10.4.2	Sistema de fluido térmico.....	65
10.5	Parámetros de diseño del reactor	66
10.5.1	Temperatura de torrefacción	66
10.5.2	Tiempo de residencia.....	68
10.5.3	Tamaño de partícula	68
10.5.4	<i>Design Input</i>	69
10.5.5	Rendimiento energético (<i>Energy yield</i>)	70
10.5.6	Rendimiento másico (<i>Mass yield</i>).....	71
10.5.7	Balances de materia y energía.....	72
11	Características del producto de torrefacción obtenido.....	78
11.1	Producto sólido.....	78
11.1.1	Poder calorífico de la biomasa tras el proceso de torrefacción	78
11.1.2	Densidad de la biomasa torrefactada.....	81
11.1.3	Propiedades químicas de la biomasa torrefactada	81
11.1.4	Fusibilidad de las cenizas del material torrefactado	82
11.2	Densificación de la biomasa torrefactada: pelletización	82
11.2.1	Producción de pellets a partir de biomasa torrefactada.....	82
11.2.2	Densidad energética	82
11.2.3	Incremento del aumento de la densidad energética	83
11.3	Producto gaseoso	84
11.3.1	Aprovechamiento del gas de torrefacción	86

11.3.2	Gestión medioambiental de los gases de torrefacción	86
12	Producto final: Pellet de mezcla de sarmiento torrefactado y sarmiento crudo	87
12.1	Análisis elemental.....	87
12.2	Fusibilidad de cenizas	88
12.3	Propiedades de los pellets de mezcla	88
13	Logística del producto final.....	90
13.1	Gestión de la calidad	90
13.2	Costes de transporte de pellets de sarmiento	90
13.2.1	Emisiones de CO ₂	91
13.3	Costes de transporte de pellets de mezcla de sarmiento crudo y sarmiento torrefactado al 50%	91
13.3.1	Emisiones de CO ₂	91
14	Uso de pellets de mezcla de sarmiento torrefactado y sin torrefactar en calderas ...	93
14.1	Introducción	93
14.1.1	Comparativa entre el uso de distintos tipos de combustibles	95
14.2	Combustión de pellets.....	96
14.3	Emisiones calderas	96
14.4	Caldera de biomasa	98
14.4.1	Tipos de calderas de biomasa.....	98
14.4.2	Componentes de las calderas de biomasa	100
14.5	Principales factores del cambio de las características de los pellets a tener en cuenta	104
14.6	Modificaciones	107
14.6.1	Consumo de combustible	107
14.6.2	Capacidad de almacenamiento	108
14.6.3	Software de regulación.....	110
14.6.4	Sistema de retirada de cenizas	110
14.6.5	Sistema de limpieza en el intercambiador	111
15	Estudio de viabilidad económica	112
15.1	Inversión inicial.....	112
15.1.1	Proyecto, licencia y permisos	112
15.1.2	Adquisición del terreno	113
15.1.3	Obra civil e infraestructuras	113
15.1.4	Maquinaria.....	114

15.1.5	Total de la inversión inicial	118
15.2	Costes	118
15.2.1	Costes directos.....	119
15.2.2	Costes indirectos.....	119
15.2.3	Costes fijos	121
15.2.4	Gastos del periodo	121
15.2.5	Costes totales.....	121
15.3	Ingresos.....	122
15.4	Financiación	122
15.4.1	Depreciación	123
15.5	Flujo de caja.....	124
15.6	Valor actual neto (VAN) y tasa interna de rentabilidad (TIR).....	124
15.7	Periodo de retorno o <i>Pay-back</i>	125
15.8	Conclusiones del estudio económico	125
16	Comparativa de pellets convencionales y pellet de mezcla de biomasa torrefactada y biomasa sin torrefactar.....	127
16.1	Propiedades físicas	127
16.1.1	Densidad	127
16.1.2	Higroscopicidad y formación de polvo	127
16.2	Propiedades químicas.....	127
16.2.1	Poder calorífico	127
16.2.2	Humedad.....	128
16.2.3	Cenizas	128
16.3	Coste de producción y precio de venta	128
16.4	Proceso logístico	128
16.5	Uso en calderas	129
16.6	Almacenamiento	129
16.7	Tabla comparativa	129
17	Conclusiones	131
	Lista de referencias	133
18	ANEXOS	137
18.1	ANEXO 1: CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE MOLINOS DE MARTILLO Y CUCHILLAS.....	138
	MOLINO DE CUCHILLAS	139

18.2	ANEXO 2: CARACTERÍSTICAS DEL SECADERO DE TAMBOR ROTATIVO	142
18.3	ANEXO 3: CARACTERÍSTICAS DEL MEZCLADOR DE BIOMASA	144
18.4	ANEXO 4: CARACTERÍSTICAS DE LA PELLETIZADORA	147
18.5	ANEXO 5: CÁLCULO DEL VOLUMEN DE LOS SILOS	151
18.6	ANEXO 6: CARACTERÍSTICAS DE LOS SILOS	153
18.7	ANEXO 7: DIAGRAMA DE PROCESO DE LA PLANTA	154
18.8	ANEXO 8: ESTUDIO ECONÓMICO	156
18.8.1	COSTES DE EXPLOTACIÓN	157
18.8.2	Ingresos	160
18.8.3	Cash-Flow	161
18.9	ANEXO 9: CARACTERÍSTICAS DE LA NAVE	163
18.9.1	Características de las vigas	164
18.8	ANEXO 8: PLANOS DE LA NAVE	

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1.- Formación de la biomasa por absorción de la energía solar, dióxido de carbono y agua durante el proceso de fotosíntesis [27]	1
Figura 1.2.- Principales constituyentes de la biomasa de madera [1].....	4
Figura 1.3.- Clasificación de combustibles sólidos según su ratio H/C y O/C [2].....	6
Figura 2.1.- Consumo de biomasa de distintos sectores [3].....	10
Figura 2.2.- Cadena de producción de pellets [63].....	16
Figura 3.1.-Pellets de biomasa torrefactada.....	18
Figura 3.2.-Planta Piloto de Torrefacción del CENER.....	19
Figura 5.1.-Sarmiento de vid.....	25
Figura 6.1.- Costes de la logística de diferentes tipos de biomasa [9]	26
Figura 6.1.-Camión transportando sarmiento	29
Figura 7.1 Situación de Aranda de Duero, en la provincia de Burgos (Castilla y León) [12]	30
Figura 7.2.- Localización de Aranda de Duero (señalizado con el marcador rojo) y superficie de viñedos de Castilla y León. Las zonas más oscuras poseen mayor densidad de viñedos [13]	31
Figura 7.3.- Accesos a Aranda de Duero por carretera [14]	32
Figura 7.4.- Señalizadas en color rojo las áreas industriales de Aranda de Duero [15]	32
Figura 7.5.- Datos catastrales [14]	34
Figura 7.6.- Vista aerea de las parcelas [14]	34
Figura 8.1.- Esquema de establecimiento industrial tipo C [17]	37
Figura 8.6.- Sarmientos apilados. Fuente: Pellet Combustible de la Mancha	40
Figura 9.1 Fenómenos producidos en materiales lignocelulósicos durante la torrefacción [20].....	46
Figura 9.2 Balance de materia y energía del proceso de torrefacción [21]	47
Figura 9.3.- Productos obtenidos de la torrefacción de biomasa [1]	48
Figura 9.4.- Rendimiento del grupo de productos (concentración en peso) [21]	49
Figura 9.5.- Composición de los productos gaseosos [21]	49
Figura 9.7.- Evolución de los volátiles durante la torrefacción [23]	50
Figura 9.6.- Composición del producto orgánico líquido [21]	50
Figura 9.8.- Balance de materia y energía durante en proceso de torrefacción [1]	51
Figura 9.9.-Fases de torrefacción [21]	54
Figura 9.10.-Capacidad de molienda de distintos tipos de biomasa [24]	57
Figura 9.11.-Reactor de tipo <i>Moving Bed</i>	58

Figura 9.12.- Reactor <i>torbed</i>	59
Figura 9.13.-Reactor de tambor rotativo	60
Figura 9.14.-Reactor de eje estacionario	60
Figura 9.15.- Reactor Microondas	60
Figura 10.1.- Esquema de reactor de tambor rotatorio de la empresa BioEndev (Suecia) [60].....	63
Figura 10.2.- Reactor de tambor rotatorio [59].....	64
Figura 10.3.-Sección esquematizada del tambor rotativo [25]	64
Tabla 10.2.- Organismos desarrolladores de tecnologías de torrefacción [59]	65
Figura 10.4.- Sistema de fluido térmico [26]	65
Figura 10.4.- (A) rendimiento másico de la torrefacción disminuye con la temperatura. (B) Rendimiento energético de la torrefacción disminuye con la temperatura [27].....	67
Figura 10.5.- Efecto del tiempo de residencia en la biomasa (madera de 25 mm de diámetro y 76 mm de largo) durante la torrefacción [1]	68
Figura 10.6.-Esquema de proceso de planta de torrefacción (CENER)	70
Figura 10.7.- Rendimiento másico para partículas de 25.4 mm torrefactadas a 250°C [25]	71
Figura 10.8.- Balance de materia del reactor de torrefacción.....	73
Figura 10.9.- Balance de energía del proceso.....	73
Figura 14.1.- Reducción de gases de efecto invernadero en distintitos escenarios planteados para 6 escenarios de suministro y consumo de biomasa en la UE en el período 2010-2050 [37].....	93
Figura 14.2.- Fluctuaciones de precios para Fueloil y para pellets [38]	94
Figura 14.3.-Evolución del comercio del pellet en España [40].....	95
Figura 14.4.- Esquema típico de caldera de biomasa [43].....	98
Figura 14.5.-Esquema de los tipos de calderas de biomasa [43].....	99
Figura 14.6.- Clasificación de las calderas de biomasa [45]	100
Figura 14.7.- Caldera de biomasa compacta. 1: caldera; 2: alimentador; 3: Cenicero; 4: protección contra desbordamiento; 5: limpiador de partículas; 6: intercambiador de calor; 7: rascadores; 8: Chimenea; 9: sonda [66]	100
Figura 14.8.- Sistema de alimentación inferior. . 1: tornillo de alimentación; 2: biomasa; 3: aire primario; 4: aire secundario; 5: hogar; 6: intercambiador de calor; 7: ciclón; 8: cenicero [66]	101
Figura 14.9.-Extractor de transporte de tornillo sinfín rotativo [43]	102
Figura 14.10.-Vista superior de in intercambiador vertical de calor con sistema de limpieza integrado en una caldera de biomasa [44]	102
Figura 14.11.-Sistema de depósito de cenizas [45]	103

Figura 14.12.-Caldera de biomasa [43].....104
Figura 15.1.- Coste del torrefactor según la capacidad de éste [27].....117

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1.- Factores de emisión de CO ₂ para usos térmicos [57]	2
Tabla 1.2.- Comparación del análisis elemental (base seca) de distintos tipos de biomasa [32]	7
Tabla 2.1.- Consumo de energía primaria en 2013 y 2014 [3]	11
Tabla 2.2.- Consumo de energía final en 2013 y 2014 [3]	12
Tabla 2.3.- Consumo primario de EERR (ktep) [3]	12
Tabla 2.4.- Precios de la biomasa para usos térmicos, en el 4º trimestre de 2015 [3]	13
Tabla 2.5.- Potencial total disponible de biomasa no industrial disponible en España [3]	14
Tabla 2.6.- Tipos de madera permitidos para utilizarse en la producción de pellets de madera [4]	15
Tabla 2.7.- Valores límites para los parámetros más importantes de los pellets [4]	15
Tabla 2.8.- Evolución del precio del pellet [5]	16
Tabla 5.1.- Recurso de biomasa disponible en España por CCAA [4]	23
Tabla 5.2.- Caracterización química de la madera de poda de vid [7]	24
Tabla 6.1.- Energía primaria consumida en el transporte y preparación de biomasa [10]	27
Tabla 6.2.- Parámetros característicos de los camiones de transporte [11]	28
Tabla 8.1.- Características de operación de la planta de producción de pellets de mezcla	35
Tabla 8.2.- Grado de peligrosidad de los combustibles [15]	37
Tabla 8.3.- Máxima superficie construida admisible de cada sector de incendio [15]	38
Tabla 8.4.- Nivel de riesgo intrínseco según la densidad de carga de fuego ponderada [17]	39
Tabla 8.5.- Altura máxima de almacenamiento [17]	40
Tabla 8.6.- Tabla resumen de los datos del almacén	42
Tabla 9.1.- Procesos ocurridos durante la torrefacción [1]	45
Tabla 9.2.- Cambios en la densidad durante la torrefacción [1]	56
Tabla 9.3.- Clasificación de los reactores por modo de transferencia de calor y contacto fluido-sólido [1]	61
Tabla 10.1.- Características de operación de la planta	62
Tabla 10.2.- Organismos desarrolladores de tecnologías de torrefacción [59]	65
Tabla 10.3.- Rangos de temperatura sugeridos por diferentes investigadores [1]	66
Tabla 10.4.- Parámetros de entrada al reactor	70
Tabla 10.5.- Balance de materia y energía para diferentes parámetros del proceso de torrefacción [56]	75
Tabla 10.6.- Calor específico de la madera y el char procedente de madera [27]	76

Tabla 11.1.- Características del sarmiento de vid crudo.	78
Tabla 11.2.- Parámetros del proceso a tener en cuenta a la hora de calcular las características del producto sólido obtenido tras la torrefacción.	78
Tabla 11.3.- Propiedades de pino torrefactado [30]	80
Tabla 11.4.- Propiedades de madera torrefactada, pellets de madera y pellets de madera torrefactada o TOP pellets [22]	81
Tabla 11.5.- Análisis elemental del sarmiento torrefactado	82
Tabla 11.6.- Densidad energética por unidad de volumen y Densidad energética por unidad de masa del sarmiento crudo y del sarmiento torrefactado.....	84
Tabla 11.7.-Composición del producto gaseoso (libre de nitrógeno y agua) [30], Universidad Politécnica de Catalunya	85
Tabla 11.8.- Composición de los productos gaseosos de diferentes tipos de biomasa en base libre de nitrógeno y agua [30]	85
Tabla 11.9.- Poder calorífico de productos gaseosos [29].....	86
Tabla 12.1 Parámetros característicos de los pellets de sarmiento crudo y de sarmiento torrefactado	87
Tabla 12.2.- Análisis elemental de los pellets de mezcla (producto final)	88
Tabla 12.3.-Propiedades de los pellets obtenidos como resultado de la mezcla de sarmiento tras el proceso de torrefacción y sarmiento crudo.	88
Tabla 14.1.- Comparativa de distintos tipos combustibles	95
Tabla 14.2.- Valores límites de NOx para combustibles sólidos [44]	97
Tabla 14.3.- Valores límites de SO ₂ para combustibles sólidos [44].....	97
Tabla 14.4.- Valores límites de emisión de partículas para combustibles sólidos [44].....	97
Tabla 14.5.- Temperatura de gases de la caldera [44]	97
Tabla 14.6.- Características del pellet de mezcla de sarmiento de vid torrefactado y sin torrefactar.....	105
Tabla 14.8.- Características químicas del pellet de mezcla	106
Tabla 14.7.- Valores límites para los parámetros más importantes de los pellets.	106
Tabla 15.1.-Costes y bonificaciones de asesorías, trabajo de ingeniería y licencias.....	112
Tabla 15.2.- Coste del terreno	113
Tabla 15.3.- Costes de obra civil	114
Tabla 15.4.- Coste de los equipos de la maquinaria	115
Tabla 15.5.-Costes de los equipos	116
Tabla 15.6.- Coste total de los equipos.....	116
Tabla 15.7.- Coste de otras adquisiciones necesarias	117
Tabla 15.8.- Inversión inicial total.....	118

Tabla 15.9.- Potencia consumida.....	119
Tabla 15.10.- Coste de la energía eléctrica.....	120
Tabla 15.11.- Consumo de combustible	120
Tabla 15.12.- Consumo de Gas natural.....	120
Tabla 15.13.- Costes indirectos totales.....	120
Tabla 15.14.- Costes fijos: Mano de obra	121
Tabla 15.15.- Gastos del periodo	121
Tabla 15.16.- Amortización del préstamo	123
Tabla 15.17.- Depreciación	124
Tabla 15.18.-VAN y TIR obtenidos	125
Tabla 16.1.- Tabla comparativa entre pellets de mezcla de biomasa torrefactada y sin torrefactar y pellets convencionales	130
Tabla 18.7.1.- Costes de explotación (año 1-año 12)	157
Tabla 18.7.2.- Costes de explotación (año 12-año 20)	159
Tabla 18.7.3.1.- Cash flow o flujo de caja de año 1 a año 9	161
Tabla 18.7.3.2.- Cash flow o flujo de caja de año 10 a año 20	162

1 Características generales de la biomasa

La biomasa es el conjunto de materia orgánica procedente de procesos biológicos, vegetales o animales, que puede ser aprovechada como fuente de energía, y del que se excluye aquel material de origen biológico que ha sido englobado en formaciones geológicas sufriendo un proceso de mineralización [1].

Se trata de una fuente de energía renovable (siempre y cuando se realice un uso sostenible del recurso) y se puede considerar una forma de energía procedente de la radiación solar, gracias a la que las plantas pueden realizar el proceso de fotosíntesis.

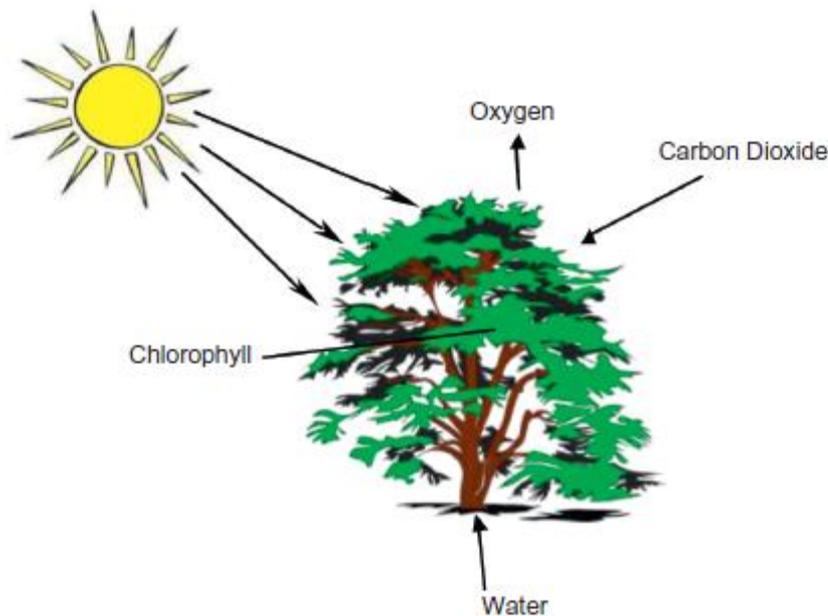


Figura 1.1.- Formación de la biomasa por absorción de la energía solar, dióxido de carbono y agua durante el proceso de fotosíntesis [27]

La energía acumulada durante el proceso de fotosíntesis puede ser transformada en energía eléctrica, térmica o en biocarburantes.

Un biocombustible es aquel que procede de una biomasa valorizada, según la definición de la Norma Europea EN 14588 [2].

La biomasa presenta numerosas ventajas, ya que además de tratarse de una fuente renovable y respetuosa con el medio ambiente, puede utilizarse en las mismas aplicaciones que los combustibles fósiles y con costes mucho más económicos.

Asimismo, presentan la ventaja de posibles hibridaciones y mezclas de diferentes tipos de biomasa para una misma caldera, o incluso, el uso conjunto de combustibles biomásicos con combustibles fósiles.

1.1 Ventajas del uso de biomasa

Otras ventajas derivadas del uso de este recurso natural son:

- ✓ **Medioambientales**
- ❖ Disminución de emisión de contaminantes con respecto a combustibles fósiles
- ❖ Mejora de la gestión de los residuos de la limpieza y poda de los bosques
- ❖ Menor riesgo de propagación de incendios
- ❖ Aumento de la retención de la humedad en el suelo
- ❖ Disminución de la erosión del suelo
- ❖ Balance neutro de emisiones de CO₂

Las emisiones de CO₂ vertidas a la atmósfera durante la combustión de la biomasa se consideran neutras debido a que la cantidad que es emitida queda en equilibrio con aquella que absorben las plantas durante el proceso de fotosíntesis.

Tabla 1.1.- Factores de emisión de CO₂ para usos térmicos [57]

Factores de Emisión para Usos Térmicos

Fuente Energética	Conversión TJ/ktep	Factor de Emisión de Carbono (t C/TJ)	Fracción oxidada	Emisiones CO ₂ / Emisiones de Carbono (t CO ₂ /t C)	Factor de Emisión (kt CO ₂ /ktep)
Hulla+antracita nacional	41,868	26,8	0,980	3,667	4,032
Carbón importado	41,868	26,8	0,980	3,667	4,032
Lignito negro	41,868	26,2	0,960	3,667	3,861
Lignito pardo	41,868	27,6	0,940	3,667	3,983
Gas siderúrgico	41,868	20	0,995	3,667	3,055
GLP	41,868	17,2	0,990	3,667	2,614
Coque de petróleo	41,868	27,5	0,980	3,667	4,137
Gasolina	41,868	18,9	0,990	3,667	2,872
Gasóleo A y B	41,868	20,2	0,990	3,667	3,070
Gasóleo C	41,868	20,2	0,990	3,667	3,070
Queroseno	41,868	19,5	0,990	3,667	2,964
Fueloil	41,868	21,1	0,990	3,667	3,207
Gas de refinería	41,868	18,2	0,990	3,667	2,766
Gas Natural	41,868	15,3	0,995	3,667	2,337
Biomasa	–	–	–	–	Neutro
Biocarburantes	–	–	–	–	Neutro
Solar Térmica Baja Temperatura	–	–	–	–	0

✓ Socioeconómicas

- ❖ Incremento del desarrollo rural y actividad agrícola
- ❖ Creación de puestos de trabajo
- ❖ Disminución de la dependencia a los combustibles fósiles
- ❖ Ahorro en el consumo de energía
- ❖ Fácil almacenamiento

1.2 Inconvenientes del uso de biomasa

De igual manera, se citan a continuación las desventajas que supone el uso de la biomasa:

- ❖ Baja densidad energética
- ❖ Logística más cara respecto a combustibles fósiles
- ❖ Falta de políticas que impulsen el desarrollo del sector

1.3 Tipos de biomasa

La biomasa se clasifica de la siguiente forma:

1. Biomasa lignocelulósica
 - Herbáceos
 - No herbáceos
2. Cultivos agrícolas
 - Cosechas regulares alimentarias
 - Cultivos energéticos
3. Residuos ¹
 - RSU
 - Lodos de depuradora
 - Restos de la industria maderera

La mayoría de la biomasa es lignocelulósica, es decir, aquella que no puede ser destinada a la industria agroalimentaria, y es aquella parte de las plantas formada por celulosa, hemicelulosa y lignina.

Los cultivos lignocelulósicos tienen un período corto de crecimiento y una alta productividad, por lo que presentan muy buenas características en cuanto a su aprovechamiento energético.

¹ Se considera biomasa primaria a aquella producida directamente a través de la fotosíntesis por los seres autótrofos, y la biomasa secundaria a la obtenida a partir de la primaria mediante procesos de transformación biológica llevados a cabo por los seres heterótrofos, por lo que se consideran residuos.

1.4 Estructura de la biomasa

Los principales componentes de la biomasa son:

- Sustancias extractivas: existentes tanto en tejidos animales como vegetales, son proteínas, aceites, almidón y azúcar.
- Pared celular: formada por carbohidratos y lignina, de manera que los carbohidratos – celulosa y hemicelulosa principalmente- proporcionan la rigidez estructural y la lignina aporta dureza y permite que las fibras se mantengan unidas.
- Cenizas: parte inorgánica de las plantas.

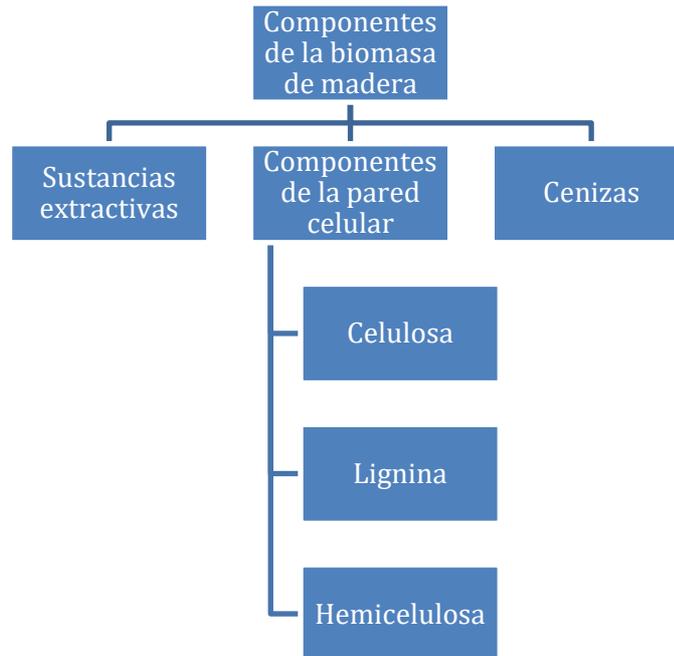


Figura 1.2.- Principales constituyentes de la biomasa de madera [1]

La celulosa es el componente principal de la pared celular. Es un polímero de cadena larga con un alto peso molecular. Su estructura es cristalina y está formada por moléculas de glucosa. La función de la celulosa es la de proporcionar fuerza a la estructura de la planta.

Por el contrario, la estructura de la hemicelulosa es aleatoria y amorfa y no proporciona fuerza a la estructura. Está formada por carbohidratos de cadena ramificada con un bajo grado de polimerización. La mayor parte de sus componentes son polisacáridos, como xilosa o glucosa. Existe mucha diversidad en cuanto a la estructura de la hemicelulosa, lo que interfiere en el proceso de torrefacción y hace que este difiera de un tipo de biomasa a otro.

La lignina es un polímero con un alto peso molecular, como consecuencia de la unión de ácidos y alcoholes fenolpropílicos de forma aleatoria y dando lugar a una estructura molecular tridimensional y muy compleja,

La lignina es la responsable de que las fibras que conforman la planta se mantengan unidas.

1.5 Propiedades físicas y químicas de la biomasa

1.5.1 Densidad

Existen cuatro tipos de densidad: verdadera, aparente, de pila y de crecimiento.

1.5.1.1 Densidad verdadera

Es la masa por cantidad de volumen ocupado por el constituyente sólido de la biomasa.

$$\text{Densidad verdadera} = \frac{\text{masa total de biomasa}}{\text{volumen sólido de biomasa}}$$

1.5.1.2 Densidad aparente

La densidad aparente es aquella que tiene en cuenta la porosidad del material, por lo que es la masa de la biomasa entre el volumen ocupado por ésta, contando con la porosidad.

$$\text{Densidad aparente} = \frac{\text{masa total de biomasa}}{\text{volumen aparente de biomasa incluyendo poros internos}}$$

1.5.1.3 Densidad de pila

Para calcular la densidad de pila se tiene en cuenta el espacio total ocupado por una cantidad de biomasa apilada, por lo que se incluye el volumen intersticial entre las partículas.

$$\text{Densidad de pila} = \frac{\text{masa total de la pila de biomasa}}{\text{volumen de la pila ocupada por la biomasa}}$$

1.5.1.4 Densidad de crecimiento

Designa la biomasa disponible por unidad de área. Se expresa como la cantidad de materia orgánica generada por árboles por unidad de área.

1.5.2 Tamaño de la biomasa

Puesto que la biomasa presenta gran variedad de tamaños, la forma en que va a ser recogida y almacenada puede variar en gran medida, afectando también al coste logístico.

Igualmente afectará al precio de producción al tener que utilizar maquinaria de reducción de tamaño, que dependiendo de en qué manera va a ser utilizada se triturará a determinados valores de tamaño.

1.5.3 Análisis elemental

En el análisis elemental se indica la composición del material en cuanto a sus elementos básicos: carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno y azufre.

Mediante este análisis se pueden obtener los ratios H/C y O/C, lo que permite observar que cantidades relativamente altas de oxígeno e hidrógeno suponen una disminución del poder calorífico.

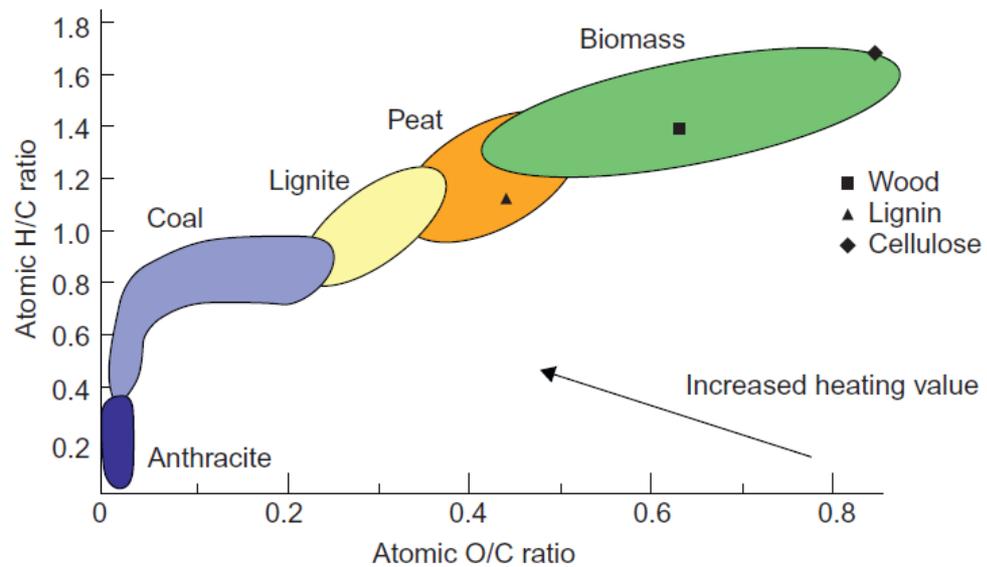


Figura 1.3.- Clasificación de combustibles sólidos según su ratio H/C y O/C [2]

El contenido en sulfuro es considerablemente bajo y se encuentra, generalmente, por debajo del 0,4% en peso. Esto supone una gran ventaja en cuanto a la reducción de los gases generados durante el proceso de combustión, como el SO_2 , y haciendo que sea más fácilmente eliminable, mediante técnicas tradicionales, como lechos de dolomita [2].

Tabla 1.2.- Comparación del análisis elemental (base seca) de distintos tipos de biomasa [32]

TABLE 3.10 Comparison of Ultimate Analysis (dry basis) of Some Biomass and its Comparison with Other Fossil Fuels

	C (%)	H (%)	N (%)	S (%)	O (%)	Ash (%)	HHV (kJ/kg)	Source
Maple	50.6	6.0	0.3	0	41.7	1.4	19,958	Tillman (1978)
Douglas fir	52.3	6.3	9.1	0	40.5	0.8	21,051	Tillman (1978)
Douglas fir (bark)	56.2	5.9	0	0	36.7	1.2	22,098	Tillman (1978)
Redwood	53.5	5.9	0.1	0	40.3	0.2	21,028	Tillman (1978)
Redwood waste	53.4	6.0	39.9	0.1	0.1	0.6	21,314	
Sewage sludge	29.2	3.8	4.1	0.7	19.9	42.1	16,000	
Straw-rice	39.2	5.1	0.6	0.1	35.8	19.2	15,213	Tillman (1978)
Husk-rice	38.5	5.7	0.5	0	39.8	15.5	15,376	Tillman (1978)
SW	47.2	6.5	0	0	45.4	1.0	20,502	Wen et al. (1974)
Paper	43.4	5.8	0.3	0.2	44.3	6.0	17,613	Bowerman (1969)
MSW	47.6	6.0	1.2	0.3	32.9	12.0	19,879	Sanner et al. (1970)
Animal waste	42.7	5.5	2.4	0.3	31.3	17.8	17,167	Tillman (1978)
Peat	54.5	5.1	1.65	0.45	33.09	5.2	21,230	
Lignite	62.5	4.38	0.94	1.41	17.2	13.4	24,451	Bituminous Coal Research (1974)
PRB coal	65.8	4.88	0.86	1.0	16.2	11.2	26,436	Probststein and Hicks (2006), p. 14
Anthracite	83.7	1.9	0.9	0.7	10.5	2.3	27,656	Basu et al. (2000), p. 25
Petcoke	82	0.5	0.7	0.8	10.0	6.0	28,377	Basu et al. (2000), p. 25

Source: Reed (2002).Fuel

1.5.4 Análisis inmediato

Ofrece información acerca de la composición de la biomasa en cuanto a humedad, materia volátil, cenizas y carbono fijo.

1.5.4.1 Humedad

El contenido en humedad (H) disminuye considerablemente la energía obtenida de la biomasa, así como los costes de transporte, por lo que es una característica a conocer antes de diseñar el proceso de logística.

El contenido de humedad en la biomasa hace que existan dos bases para expresar el porcentaje de los componentes:

❖ Base seca:

$$\text{Masa en base seca} = \frac{\text{Masa húmeda} - \text{Masa seca}}{\text{Masa seca}}$$

❖ Base húmeda:

$$\text{Masa en base húmeda} = \frac{\text{Masa húmeda} - \text{Masa seca}}{\text{Masa húmeda}}$$

1.5.4.2 *Materia volátil*

La materia volátil (MV) es aquella formada por vapor condensable y no condensable, liberados cuando la biomasa es calentada.

1.5.4.3 *Cenizas*

Las cenizas (Ash) es el residuo sólido inorgánico que permanece después de calentar la biomasa en un ensayo estipulado. Se forman a partir de sílices, aluminio, magnesio, sodio, potasio, etc, contenidos en la biomasa

1.5.4.4 *Carbono fijo*

Teniendo en cuenta todos los parámetros anteriores, el carbono fijo se determina de la siguiente manera:

$$CF = 1 - H - VM - ASH$$

El carbono fijo es aquel que permanece en la biomasa después de que se haya producido la volatilización del material.

1.5.5 *Poder calorífico*

El poder calorífico representa la energía contenida en la biomasa cuando el material ha sido completamente quemado en la presencia exacta de oxígeno, por lo que se trata de una de las características más importantes. En general, el valor del poder calorífico de la biomasa es muy bajo.

Cabe distinguir entre poder calorífico superior, que se define como la cantidad de calor liberada por unidad de masa, teniendo en cuenta el calor latente de vaporización del agua, y el poder calorífico inferior, en el que no se tiene en cuenta el calor de vaporización del agua en el producto de combustión.

2 Situación actual de la biomasa en España

La energía procedente de la biomasa ha sido utilizada desde la prehistoria, y ha sufrido una gran evolución histórica, puesto que desde el hallazgo del fuego, y mediante la combustión, ha servido para satisfacer necesidades de calefacción, cocina, generación de vapor e incluso electricidad.

A lo largo de los años, la evolución tecnológica ha proporcionado que el uso de los recursos biomásicos sea cada vez más abundante, a la vez que más limpio con el planeta, a través de la conversión en combustibles sólidos, líquidos o gaseosos, permitiendo así su aprovechamiento con más tipos de técnicas además de la combustión, como mediante procesos bioquímicos o termoquímicos.

Todos los recursos biomásicos están formados por materia orgánica y dependen del tipo de recurso que se trate así como de la localización física, tipo de suelo, densidad de población, región o clima y por ello, también va a depender qué técnicas de recolección, manejo o almacenamiento se emplearán.

Las principales fuentes de estos recursos son la agricultura, incluyendo tanto residuos agrícolas como cultivos energéticos, y la biomasa residual procedente de las explotaciones forestales y la industria de transformación de la madera. Asimismo, los residuos generados en los centros urbanos, como los residuos sólidos urbanos (RSU) o lodos de depuradora, pueden ser aprovechados mediante distintos procesos.

En España, entre el 90 y 95% de la biomasa de origen forestal empleada como biomasa proviene de madera de industrias madereras, como serrines, apeas o de fábricas de palets. En cuanto a la biomasa de origen agrícola, ésta proviene de residuos de cultivos, como paja, cañote o poda, de industrias como almazaras (hueso de aceituna) y partidoras de almendras o piñones.

En los últimos años ha existido una tendencia a la alza en el consumo de biomasa sólida en nuestro país, tanto en el consumo de clientes particulares como en el público y empieza a afianzarse, como ya se hizo en otros países europeos, como Francia, Alemania o Italia, debido al desarrollo de tecnologías limpias y asequibles y al control de calidad de los biocombustibles.

Además, existe en España una seguridad de suministro de biocombustibles muy elevada, ya que se estima que únicamente se aprovecha el 35% de la madera que crece en este país, mientras que en otros países europeos este porcentaje es del 61%. Con lo que se garantiza la estabilidad en el precio teniendo en cuenta un consumo sostenible de los recursos.

Otra de las ventajas que ofrece el uso de recursos naturales y propios del país es la disminución a la dependencia de combustibles fósiles, de los cuales no se puede garantizar la continuidad de suministro y la estabilidad en el precio, debido, principalmente, a motivos geopolíticos y naturales. Es por ello que una de las principales razones por las que aumenta el número de consumidores de biocombustibles es el elevado precio de los combustibles fósiles.

Como se expresaba anteriormente, el consumo de los recursos siempre es sostenible ya que existen planes de sostenibilidad de los montes y según varios expertos, la gestión de éstos ayuda en la prevención de incendios.

De acuerdo con el aumento de instalaciones de biomasa entre 2014 y 2015 (se instalaron 28.000 estufas y 3.400 calderas), las expectativas de consumo siguen aumentando, y

según AVEBIOM (Asociación Española de Valorización Energética de la Biomasa), se consumieron más de 1,3 millones de toneladas de biocombustibles en 2014. (AVEBIOM)

De la biomasa total que se consume en España, el 80% se usa en plantas de generación y cogeneración, y el 20% restante en instalaciones térmicas en edificios públicos, industriales, de servicios o privados; de los biocombustibles sólidos, el más usado es el pellet (40%), seguido de la astilla de madera (26%), hueso de aceituna (25%) y cáscaras de frutos de secos y otros (9%).

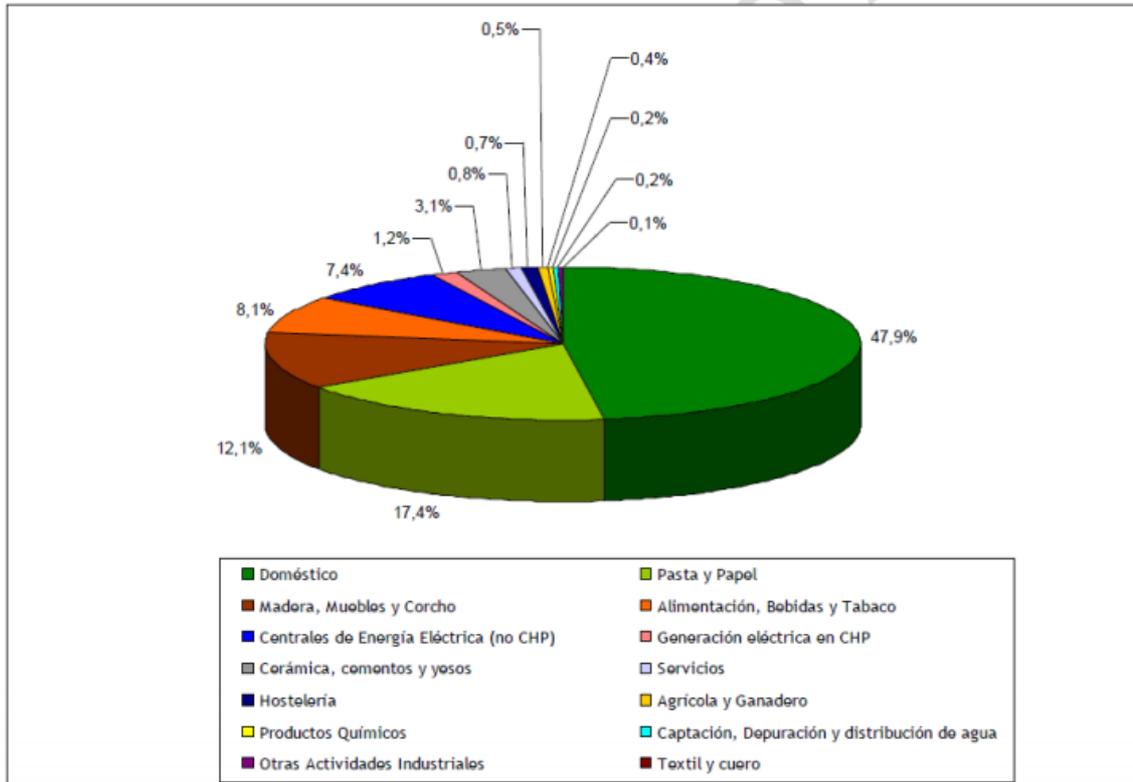


Figura 2.1.- Consumo de biomasa de distintos sectores [3]

De todos los biocombustibles, el pellet es el biocombustible más usado, y AEBIOM (Asociación Europea de la Biomasa) estima que su uso pase de 10 a 20 millones de toneladas consumidas en 2020 en Europa.

En España, las empresas productoras de pellet certificado aumentan cada año, y el consumo de pellets ha pasado de 150.000 toneladas en 2011 a 450.000 toneladas en 2014, y según las estimaciones, se superarán las 1.150.000 toneladas en el 2020. Aunque la capacidad productiva sea mayor de 950.000 toneladas anuales, se fabrican 410.000 toneladas, 70.000 son exportadas a Francia e Italia, y 110.000 toneladas de pellets son importados para satisfacer la demanda nacional.

En términos de energía primaria en España, la biomasa supuso un 4,5% de la estructura en 2014 con 5.302 ktep².

Tabla 2.1.-Consumo de energía primaria en 2013 y 2014 [3]

	2013		2014		2014/2013
	(ktep)	Estructura (%)	(ktep)	Estructura (%)	Variación (%)
CARBÓN	11.348	9,4	11.639	9,8	2,6
PETROLEO	51.318	42,4	50.447	42,6	-1,7
GAS NATURAL	26.158	21,6	23.662	20,0	-9,5
NUCLEAR	14.783	12,2	14.934	12,6	1,0
ENERGÍAS RENOVABLES	17.772	14,7	17.796	15,0	0,1
-HIDRÁULICA	3.170	2,6	3.369	2,8	6,2
-OTRAS ENERGÍAS RENOVABLES	14.601	12,1	14.428	12,2	-1,2
-Eólica	4.786	4,0	4.473	3,8	-6,5
-Biomasa y residuos	6.061	5,0	5.859	4,9	-3,3
-R. S. U.	200	0,2	204	0,2	2,2
-Biomasa	5.382	4,4	5.302	4,5	-1,5
-Biogas	479	0,4	353	0,3	-26,3
-Biocarburantes	909	0,8	969	0,8	6,6
-Geotérmica	18	0,0	19	0,0	4,1
-Solar	2.828	2,3	3.107	2,6	9,9
-Fotovoltaica	716	0,6	707	0,6	-1,3
-Solar termoeléctrica	1.873	1,5	2.142	1,8	14,4
-Solar termica	239	0,2	259	0,2	8,2
RESIDUOS NO RENOVABLES	200	0,2	204	0,2	2,2
SALDO ELECTR.(Imp.-Exp.)	-581	-0,5	-293	-0,2	-49,5
TOTAL	120.998	100	118.389	100	-2,2

Asimismo, la energía final en ese mismo año, y también según datos de IDAE, es pareja a los términos de energía primaria, y se aprecia un ligero crecimiento de todas las renovables en aplicaciones térmicas, excepto la biomasa con fines de cogeneración. Se observa también que la biomasa cubre tres cuartas partes de las aplicaciones térmicas, en las que se ha calculado que un 87% están formadas por instalaciones térmicas, calderas, estufas y chimeneas, de sectores industrial, residencial y servicios.

² En 2014 se midieron menores demandas, tanto térmicas como eléctricas, que afectaron a fuentes de energía primaria renovable y no renovable, por lo que se aprecia un ligero descenso en el consumo de biomasa.

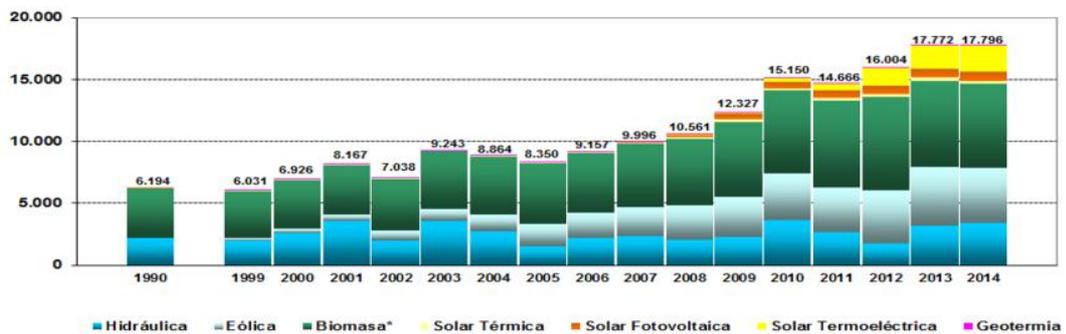
Tabla 2.2.- Consumo de energía final en 2013 y 2014 [3]

	2013		2014		2014/2013
	(ktep)	Estructura (%)	(ktep)	Estructura (%)	Variación (%)
CARBÓN	1.752	2,1	1.367	1,6	-22,0
PRODUCTOS PETROLIFEROS	39.054	45,7	38.642	46,5	-1,1
GAS	14.784	17,3	14.293	17,2	-3,3
ELECTRICIDAD	19.787	23,2	19.513	23,5	-1,4
ENERGÍAS RENOVABLES	5.063	5,9	5.109	6,2	0,9
- Biomasa y otros	3.772	4,4	3.762	4,5	-0,3
- Biomasa térmica	3.337	3,9	3.362	4,0	0,7
- Calor util de la cogeneración	435	0,5	400	0,5	-8,0
- Biogas	125	0,1	101	0,1	-19,3
- Biogás térmico	23	0,0	23	0,0	1,0
- Calor util de la cogeneración	102	0,1	78	0,1	-23,8
- Biocarburantes	909	1,1	969	1,2	6,6
- Solar térmica	239	0,3	259	0,3	8,2
- Geotérmica	18	0,0	19	0,0	4,1
Total consumo final energético	80.440	94,1	78.925	95,1	-1,9
Usos no energéticos:					
- Carbón	0	0,0	0	0,0	
- Productos petrolíferos	4.549	5,3	3.622	4,4	-20,4
- Gas	470	0,6	485	0,6	3,1
Total consumo final no energético	5.020	5,9	4.107	5,3	-18,2
TOTAL CONSUMO FINAL	85.460	100,0	83.031	100,0	-2,8

La evolución general del consumo de energías renovables en España ha seguido un camino de ascenso lento aunque continuado, y cabe destacar que en ese camino la biomasa ocupa un papel importante.

Se ha pasado de 6.926 ktep de consumo de energías renovables en el año 2000 a 17.796 ktep en 2014 y la tendencia es a la alza.

Tabla 2.3.- Consumo primario de EERR (ktep) [3]



Los precios de la biomasa para usos térmicos a finales de 2015 fueron los siguientes³:

³ Pellet A1 se corresponde con el sistema de certificación que se explica en la tabla Tabla 2.7.- Valores límites para los parámetros más importantes de los pellets.

Tabla 2.4.- Precios de la biomasa para usos térmicos, en el 4º trimestre de 2015 [3]

Valores medios de precios para cada producto			
Producto	Precio Segundo Trimestre 2015 (euros/t)	Precio Tercer Trimestre 2015 (euros/t)	Precio Cuarto Trimestre 2015 (euros/t)
Leñas	108,82	123,18	125,01
Astilla elaborada	99,86	96,98	95,49
Pellet A1 ensacado	196,59	187,72	187,61
Pellet A1 granel	180,06	174,96	167,09
Pellet no certificado ensacado	188,69	N.D.	N.D.
Pellet no certificado granel	175,50	164,44	166,89
Hueso de aceituna ensacado	141,73	141,12	138,43
Hueso de aceituna granel	100,92	116,19	107,29
Cáscaras de fruto a granel	N.D.	61,18	57,65

N.D. Precio no disponible por no cumplir con los requisitos de calidad establecidos en la metodología

En general, los precios obtenidos son "en punto de entrega". En el caso de haber obtenido un precio Ex-Works (en origen) en la encuesta, a éste se le ha añadido un coste de transporte, equivalente a considerar la distancia media de transporte para el trimestre que hayan aportado los distintos agentes en la encuesta. El precio que se indica es a consumidor final con la excepción de los productos ensacados, que son al distribuidor minorista. Los precios no incluyen IVA, con la excepción de la leña.

En conclusión, la actualidad de la biomasa en nuestro país queda definida con un suave aumento del consumo, principalmente para aplicaciones térmicas y en usos domésticos, y generalmente motivada por el alto e inestable precios de los combustibles fósiles y el aumento de empresas locales productoras de biomasa con sellos de calidad.

2.1 Evaluación del potencial de los recursos de biomasa en España

De acuerdo con los estudios llevados a cabo para realizar el *Plan de Energías Renovables 2011-2020 (PER 2011-2020)* existe en España un potencial más que suficiente, siendo evidente que hay un exceso de estos recursos.

Según el PER 2011-2020, se originan en España 18.715.000 t/año de biomasa procedente de las masas forestales existentes. Además, se estima que se obtienen aproximadamente 30.550.000 t/año a partir de restos agrícolas. Es decir, que alrededor de 49 millones de toneladas de biomasa apta para su valorización energética son generadas cada año en nuestro país, teniendo en cuenta solamente aquella biomasa procedente de los aprovechamientos forestales y de la actividad agrícola.

Si al mismo tiempo tenemos en cuenta la disponibilidad de suelo para la implantación de masas herbáceas o leñosas en España, el potencial total de biomasa no industrial -aquella que no procede de industrias agroforestales- aumenta a más de 88 millones de toneladas al año de biomasa generada.

Tabla 2.5.- Potencial total disponible de biomasa no industrial disponible en España [3]

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

Datos en toneladas en verde (45% de humedad).

Coste de obtención de biomasa en verde, el precio de venta puede incrementarse entre 1,5 a 2,2 veces según la distancia de transporte, el margen de los agentes que intervienen hasta su puesta en planta y la humedad con la que se vende.

Además existe en nuestros montes una acumulación de biomasa que da lugar a un colapso de las masas forestales con la consiguiente disminución del crecimiento y calidad de la madera, y aumento de riesgo de incendios.

2.2 Características generales de los pellets

La definición de pellet de madera, según la norma UNE EN 14961-2:2011, es “biocombustible densificado a partir de biomasa leñosa pulverizada con o sin aditivos, generalmente con una forma cilíndrica, de longitud aleatoria y por lo general de 5 mm a 40 mm, con los extremos rotos”.

Actualmente la calidad del pellet en Europa es cubierto mediante un sistema de certificación denominado ENplus®, que distingue tres calidades de pellets, ENplus-A1, ENplus-A2 y EN-B, y los tipos de madera permitidos en cada una son los siguientes:

Tabla 2.6.- Tipos de madera permitidos para utilizarse en la producción de pellets de madera [4]

ENplus-A1		ENplus-A2		EN-B	
1.1.3	Madera del fuste	1.1.1	Árboles enteros sin raíces	1.1	Forestal, plantaciones y otras maderas no usadas ni tratadas
1.2.1	Residuos de la industria de la Madera no tratados químicamente	1.1.3	Madera del fuste	1.2.1	Residuos y sub-productos de la industria de la Madera no tratados químicamente
		1.1.4	Residuos de tala		
		1.1.6	Corteza		
		1.2.1	Residuos y sub productos de la industria de la Madera no tratados químicamente	1.3.1	Madera reciclada no tratada químicamente ^{b)}

a) La madera de demolición está excluida. La madera de demolición es madera reciclada proveniente de demolición de edificios u otras obras civiles..

Las características del pellet deben cumplir con la norma EN-14961-2 y las propiedades más importantes son:

Tabla 2.7.- Valores límites para los parámetros más importantes de los pellets [4]

Parámetro	Unid.s	ENplus-A1	ENplus-A2	EN-B	Norma de ensayo
Diámetro	mm	6 or 8			EN-16127
Longitud	mm	3.15 ≤ L ≤ 40 ³⁾			EN-16127
Humedad	p-% ¹⁾	≤ 10			EN-14774-1
Cenizas	p-% ²⁾	≤ 0.7	≤ 1.5	≤ 3.0	EN-14775 (550 °C)
Durabilidad mecánica	p-% ¹⁾	≥ 97,5 ⁴⁾		≥ 96.5 ⁴⁾	EN-15210-1
Finos (< 3.15 mm)	p-% ¹⁾	<1			EN-15210-1
Poder Calorífico Inferior	MJ/kg ¹⁾	16,5 ≤ Q ≤ 19	16,3 ≤ Q ≤ 19	16,0 ≤ Q ≤ 19	EN-14918
Densidad aparente	kg/m ³	≥ 600			EN-15103
Nitrogeno	p-% ²⁾	≤ 0.3	≤ 0.5	≤ 1.0	EN-15104
Sulfur content	p-% ²⁾	≤ 0.03		≤ 0.04	EN-15289
Cloro	p-% ²⁾	≤ 0.02		≤ 0.03	EN-15289
Fusibilidad cenizas ⁴⁾	°C	≥ 1200	≥ 1100		EN-15370

1) Base húmeda 2) Base seca

3) Un máximo de 1 p-% de los pellets pueden ser más largos de 40 mm, no se permiten pellets > 45 mm

4) Temperatura de Deformación, preparación de la muestra a 815 °C

En caso de no estar certificado, los pellets de madera pueden producir problemas derivados de la baja calidad de éste, ya que en la caldera, una baja densidad del pellet o un tamaño incorrecto, por ejemplo, ocasionan una pérdida de eficiencia y potencia.

La cadena de producción y suministro que hay que seguir para obtener los pellets es la que se muestra a continuación:

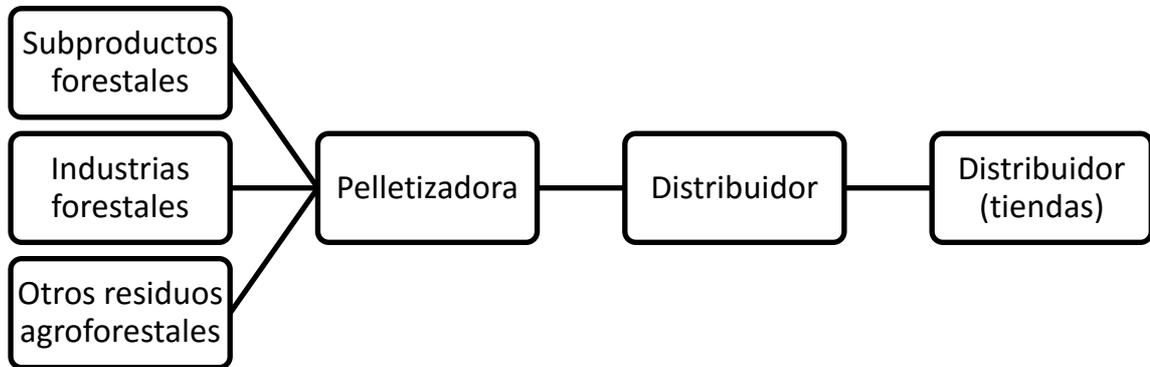


Figura 2.2.- Cadena de producción de pellets [63]

Para la producción de pellets también se siguen diferentes etapas. Tras el cortado o troceado y astillado, se realiza un proceso de molienda y secado, para reducir la humedad hasta los valores requeridos y posteriormente se procede a la compactación de las partículas a alta presión, obteniendo así pellets (igualmente se obtienen de esta manera briquetas). Los agentes que actúan como colas naturales son la hemicelulosa y la lignina.

2.3 Situación actual del mercado de pellets de madera en España

A fecha de abril de 2016 y según AVEBIOM, los precios de los biocombustibles han caído con respecto a las mismas fechas otros años, debido al aumento en nuestro país del número de fabricantes, y también al suave invierno que se ha dado.

Para el cálculo de estos precios se ha tomado un poder calorífico de 4.100 kcal/kg (4,76 kWh/kg).

Tabla 2.8.- Evolución del precio del pellet [5]

PELLET	Índice Precio Biomasa	2014	2015				2016	
			1T	2T	3T	4T	Anual	1T
Saco 15 Kg	Precio medio (€/saco)	4.35	4.43	4.20	4.16	4.04	4.21	3.98
	c€/kWh		6.20	5.86	5.82	5.66		5,57
	IPB trimestral	2.6%	1.2%	-5.3%	-0.9%	-2.9%	-3.3%	-1,5%
Palet	Precio medio (€/ton)	280.98	280.63	269.25	267.06	262.56	269.88	262,43
	c€/kWh		5.89	5.65	5.60	5.51		5,51
	IPB trimestral	2.6%	0.0%	-4.1%	-0.8%	-1.7%	-4.0%	-0,1%
Granel (volquete)	Precio medio (€/ton)	247.18	237.19	232.1	227.42	237.04	233.44	229,87
	c€/kWh		4.98	4.87	4.78	4.97		4,82
	IPB trimestral	1.6%	0.1%	-2.1%	-2.0%	4.2%	-5.6%	-3,1%
Granel (cisterna)	Precio medio (€/ton)	253.50	252.49	241.17	238.36	248.13	245.04	238,81
	c€/kWh		5.30	5.06	5.00	5.21		5,01
	IPB trimestral	3.6%	0.2%	-4.5%	-1.2%	4.1%	-3.3%	-3,8%

2.4 Legislación aplicable al ámbito de la biomasa

- Directiva 2009/28/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 27 de septiembre de 2001 [1] que tiene como objetivo fomentar un aumento de la contribución de las fuentes de energía renovables a la generación eléctrica en el mercado.
- Real Decreto 661/2007, por el que se regula la actividad de producción de energía eléctrica en régimen especial.
- Real Decreto-Ley 6/2009, que crea el Registro de pre asignación de retribución para las instalaciones del régimen especial.
- Ley 54/1997, de 27 noviembre, del sector eléctrico que regula las actividades destinadas a los suministros de energía eléctrica.
- Código Técnico de la Edificación (CTE), aprobado por Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo contiene un Documento Básico de Ahorro de Energía donde se establecen las exigencias básicas en eficiencia energética y energías renovables que deben cumplir los nuevos edificios y los que se reformen o rehabiliten.
- Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios (RITE), establece la Utilización de energías renovables disponibles, en especial la energía solar y la biomasa.
- La ley 45/2007, de 13 de diciembre, para el desarrollo sostenible del medio rural, establece medidas en su artículo 24, respecto a la potenciación de las energías renovables y en particular para la biomasa.
- Real Decreto 235/2013, de 5 de abril, por el que se aprueba el procedimiento básico para la certificación de la eficiencia energética de los edificios, contribuirá de forma importante en el aumento de instalaciones de biomasa para mejorar la calificación energética de los edificios.

2.5 Futuro de la biomasa en España

Con toda la información recogida hasta ahora se puede determinar que en nuestro país existe un gran potencial de biomasa para continuar usando y desarrollando este recurso, con el que se pueden aprovechar distintos tipos de materiales y deshechos.

Además de generar energía procedente de una fuente renovable y respetuosa con el medio ambiente, a su vez lleva asociadas otras ventajas, como la generación de empleo y evita la dependencia a los combustibles fósiles.

Es por ello que, mediante leyes, se debería fomentar y potenciar el uso de este recurso.

3 Antecedentes

La torrefacción de la biomasa es un proceso relativamente nuevo y aún se están desarrollando nuevas tecnologías para que se lleve a cabo de manera más eficiente cada vez.

Durante la torrefacción, se calienta la biomasa a una temperatura que puede variar entre doscientos y trescientos grados centígrados en ausencia de oxígeno, de manera que se liberan compuestos volátiles y aumenta el contenido en carbono fijo.

Mediante este proceso se mejoran las características de la biomasa, que pueden suponer grandes ahorros en los costes de transporte, almacenamiento y molienda, ya que tras el proceso se aumenta su contenido energético. Otras ventajas de este tratamiento termoquímico son, por una parte, la disminución de la sensibilidad a la humedad debido a su baja higroscopicidad, y por otra parte, el aumento de su friabilidad, o capacidad para desmenuzarse. Esto se traduce en una mayor facilidad de manejo y reduce los costes de molienda, y mayor facilidad de almacenamiento *'outdoor'*.

Tras la compresión de este material ya torrefactado en pellets o briquetas, se ha calculado que su energía es de tres a cinco veces mayor que el material en estado original.

Desde 2012 y hasta 2015, la Unión Europea financió un programa de desarrollo de la tecnología de la torrefacción denominado *"Production of Solid Sustainable Energy Carriers from Biomass by Means of TORrefaction (SECTOR)"*, cuyo objetivo es investigar en los procesos de torrefacción de la biomasa, así como trabajar por su implantación en el mercado.

En él colaboraron 21 participantes de 9 países de Europa, que con un presupuesto de 10,29 millones de euros determinaron que mediante ese proceso era posible obtener un producto con una mayor densidad de energía a un coste competitivo y con impacto ambiental menor que otras fuentes de energía derivadas de la biomasa.



Figura 3.1.-Pellets de biomasa torrefactada

Dentro de los participantes del proyecto se encontraba el *Centro Nacional de Energías Renovables (CENER)*, en el que actualmente se cuenta con el Centro de Biocombustibles

de Segunda Generación (CB2G), donde se encuentran distintas instalaciones de ensayos, como la Unidad de Pretratamiento físico de la biomasa, que posee la etapa de torrefactado, entre otras como astillado, secado, molienda o pelletizado.

Por tanto, existen diferentes plantas de investigación en torrefacción de la biomasa en Europa, siendo en España el CENER el encargado de desarrollar las técnicas de torrefacción y pelletizado, las condiciones de operación y testar los resultados obtenidos con diferentes biomasa.

La planta piloto de torrefacción del CENER se caracteriza como un reactor rotativo horizontal con calentamiento indirecto con fluido térmico a una temperatura entre 250°C y 300°C, y una capacidad de producción de 150-300 kg/h.

Esta planta admite materiales de granulometría comprendida entre 0,25 y 0,40 milímetros. Igualmente, admite materias primas de diferentes densidades, entre 50 y 500 kg/m³.



Figura 3.2.-Planta Piloto de Torrefacción del CENER

El producto que se obtiene es homogéneo debido a la agitación y mezcla del material y al control de temperatura.

Debido a que este procedimiento aún se encuentra a nivel de desarrollo, el mercado de pellets de biomasa torrefactada se encuentra en su fase inicial y los comercializadores están trabajando en definir el lugar de este producto en el mercado a gran escala.

Es por ello que los principales productores de este material son universidades y centros de investigación, si bien ya se han comenzado a comercializar en algunos países de Europa y Estados Unidos, aunque siendo su principal aplicación la co-combustión en centrales térmicas de carbón, como los pellets producidos por la planta de *Solvay*, situada en Quitman, Mississippi. Esta planta está especializada en la producción de pellets de biomasa torrefactada enfocados al reemplazamiento del carbón.

Por tanto, los puntos importantes a desarrollar en el proceso de torrefacción son:

- ❖ Definición de las utilidades en las que se supone una ventaja, como la co-combustión en centrales térmicas de carbón, generación de biocarburantes o producción de pellets para su exportación a larga distancia.

- ❖ Desarrollo e investigación en la torrefacción de nuevos materiales para alcanzar productos de muy alta calidad a partir de materias primas baratas de malas calidades y alto contenido en cloro.

- ❖ Aprovechamiento de la tecnología de la torrefacción para actividades no energéticas.

En definitiva, supone un gran paso para superar las barreras económicas de la logística de la biomasa, que representa un amplio porcentaje del coste total del uso de este recurso, y así estar cada vez más cerca de un futuro sostenible.

4 Objetivos

El presente estudio busca analizar el comportamiento de los pellets formados por biomasa torrefactada y biomasa convencional, procedentes del residuo de poda de vid, bajo el proceso de combustión en calderas.

Los principales objetivos son los siguientes:

✓ **Consecución de pellets de mayor densidad energética que los pellets convencionales**

Tras el análisis de los pellets procedentes de la mezcla y la obtención de las propiedades físicas y químicas, se busca un pellet de mayor densidad energética y cuya fabricación mediante los procesos de torrefacción y pelletizado sea económicamente viable, de manera que su uso reduzca los costes en el proceso de logística, frente a los pellets de madera convencional.

✓ **Definición de las modificaciones a realizar en calderas existentes de pellets convencionales**

Se determinará la necesidad de realizar cambios en las calderas convencionales, de manera que el uso de los nuevos pellets no implique el reemplazamiento de calderas por otras nuevas.

✓ **Comparativa entre los pellets definidos con biomasa torrefactada y pellets de madera convencionales**

Se realizará la comparativa entre ambos tipo de pellets en cuanto a las propiedades físicas y químicas, tratamientos necesarios, almacenamiento, manejo, logística y uso en calderas, así como todos los costes implicados en el proceso, de manera que se pueda determinar si el nuevo tipo de pellets es viable tanto técnica como económicamente y la rentabilidad del proceso.

5 Caracterización del residuo

Como se ha explicado anteriormente biomasa residual es aquella generada en un entorno en el cual no posee valor económico, pero que puede suponer una solución mediante su aprovechamiento energético.

Esto incluye los residuos forestales y agrícolas, así como los procedentes de las industrias derivadas de este sector, los residuos sólidos urbanos y los biodegradables.

Dentro de los residuos agrícolas se puede hablar de dos tipos, herbáceos y leñosos, en los que se encuentran las podas de olivos, árboles frutales y viñedos, todos ellos recursos sujetos a la estacionalidad de los cultivos, por lo que es necesario realizar centros logísticos de biomasa desde los que centralizar su distribución.

En el presente estudio se ha elegido como recurso la poda de vid.

El aprovechamiento del sarmiento supone una doble ventaja ambiental, ya que cuando este residuo no es utilizado, generalmente se apila para su incineración, con la consiguiente emisión de CO₂ a la atmósfera.

5.1 El recurso en Castilla y León

En Castilla y León existen aproximadamente 91.018 ha dedicadas a cultivos leñosos, de las cuales el 81,5% son viñedos, por lo que se hallan 74.106 ha de viñedos en Castilla y León [7].

Dado que se producen alrededor de 230.759 t/año de restos agrícolas leñosos en esta comunidad autónoma, alrededor de 155.000 t/año de residuos de poda de vid son producidas en nuestra comunidad, teniendo en cuenta una variabilidad de la producción anual del 20% [6].

Además, el sarmiento es un recurso que se produce en la misma cantidad y en el mismo lugar todos los años, por lo que se puede realizar una planificación muy acertada.

Tabla 5.1.- Recurso de biomasa disponible en España por CCAA [4]

Biomasa potencial disponible según procedencia (t/año)										
Comunidad Autónoma	Masas forestales existentes			Masas leñosas susceptibles de implantac. en terreno forestal	Restos agrícolas			Masas herbáceas susceptibles de implantac. en terreno agrícola	Masas leñosas susceptibles de implantac. en terreno agrícola	Total (t/año)
	Restos de aprovech. madereros	Árbol completo	Total masas existentes		Herbáceos	Leñosos	Total			
Andalucía	209.375	1.649.219	1.858.594	1.231.669	2.518.996	4.957.623	7.476.619	2.961.107	1.127.133	14.655.121
Aragón	56.161	740.121	796.282	85.865	1.257.356	1.419.104	2.676.460	1.881.502	814.641	6.254.749
Asturias	280.944	829.081	1.110.025	1.384.360	0	378.173	378.173	0	0	2.872.558
Cantabria	181.728	505.452	687.180	472.133	41.213	6.518	47.731	4.891	6.194	1.218.129
Castilla-La Mancha	74.165	1.313.048	1.387.213	203.519	2.060.321	1.073.376	3.133.697	3.831.473	1.233.273	9.789.177
Castilla y León	123.428	2.300.723	2.424.151	1.496.793	4.167.623	230.759	4.398.382	5.614.995	1.327.990	15.262.310
Cataluña	171.078	1.220.223	1.391.301	143.838	1.045.020	2.210.580	3.255.599	758.939	532.713	6.082.389
Comunidad Valenciana	38.809	234.648	273.457	104.654	52.487	2.223.407	2.275.894	77.440	71.104	2.802.549
Extremadura	91.283	1.451.860	1.543.143	1.433.327	898.837	982.766	1.881.602	1.075.765	880.174	6.814.012
Galicia	1.307.072	3.427.870	4.734.942	7.931.615	992.906	550.870	1.543.777	8.169	149.132	14.367.634
Islas Baleares	9.126	51.551	60.677	8.025	113.942	405.250	519.191	294.303	47.555	929.751
Islas Canarias	1.182	24.498	25.680	8.863	310	179.767	180.076	485	397	215.500
La Rioja	7.516	112.853	120.369	17.315	229.865	217.358	447.223	146.657	48.874	780.438
Madrid	7.205	167.611	174.816	81.644	137.583	62.472	200.055	233.813	91.735	782.064
Murcia	14.137	63.819	77.955	4.407	56.376	1.028.553	1.084.929	142.168	52.882	1.362.342
Navarra	41.565	804.471	846.036	189.129	641.182	126.822	768.005	570.252	186.539	2.559.961
País Vasco	369.469	834.068	1.203.537	275.165	220.548	64.823	285.372	135.909	28.524	1.928.508
Total	2.984.243	15.731.116	18.715.358	15.072.320	14.434.566	16.118.220	30.552.785	17.737.868	6.598.861	88.677.193

5.2 Poda de vid

La poda de la vid es un proceso muy importante para garantizar no solo una buena calidad de los vinos, sino también el perfecto estado y cosecha de la vid.

Mediante la retirada de las ramas de la vid, se decelera el envejecimiento de la planta y se renuevan cada año los brotes de los que nacerá el fruto.

Llevar a cabo la poda de vid es un proceso que varía en función de la variedad de uva, vino que se produzca, sistema de conducción (forma de la cepa), así como de la climatología de cada zona y del viticultor. También se tienen en cuenta otros factores, como plagas o enfermedades.

En la Ribera del Duero, la poda se suele realizar entre los meses de diciembre y marzo, durante el invierno, ya que se produce una parada vegetativa de la planta.

Se estima que por cada hectárea podada se obtiene cerca de una tonelada de sarmiento, por lo que es un radio de 40 km se produce más de la cantidad de recurso necesaria, dada la capacidad de la planta que se explica más adelante.

5.3 Caracterización de la madera del sarmiento de vid

Las características químicas de la poda de vid o el sarmiento se presentan en la tabla a continuación:

Tabla 5.2.- Caracterización química de la madera de poda de vid [7]

	Madera de poda de vid	Madera de viña
	Valor \pm DE	
Humedad (%)	9 \pm 0,5	
Volátiles^a (%)	70,8 \pm 1,20	66,8
Cenizas^a (%)	3,2 \pm 1,66	8,61
Carbono fijo^{a c} (%)	15,86 \pm 0,45	24,07
Carbono^b (%)	48,38 \pm 1,09	50,31
Nitrógeno^b (%)	0,4 \pm 0,10	1,17
Hidrógeno^b (%)	5,44 \pm 0,43	5,56
Azufre^b (%)	0,1 \pm 0,06	0,09
Oxígeno^{b c} (%)	45,68 \pm 1,30	42,87
PCS (MJ/kg)	16,51 \pm 0,32	Nd
PCI (MJ/kg)	15,09 \pm 0,01	18,29

^a Base seca

^b Base seca libre de cenizas

^c Calculado por diferencia

DE: desviación estándar

Las cenizas obtenidas en bases de datos diferentes mostraban un contenido en cenizas superior [8], sin embargo, en ellas el residuo no había sido limpiado y por ello, el contenido en material inorgánico es mayor. En el presente estudio se seleccionan sarmientos con ese porcentaje en ceniza, ya que, de manera general, este valor es muy

bajo en biomásas lignocelulósicas. Por el contrario, el resto de los parámetros se acercan a los valores típicos de otras biomásas del mismo tipo.

El contenido en humedad es bajo (9%) por lo que será determinante tener en cuenta que para el pelletizado hace falta un porcentaje del 8%.



Figura 5.1.-Sarmiento de vid

5.4 Coste de la poda de vid a utilizar

De manera general y según expertos del sector, la poda de vid se recoge a coste de 0€ la materia prima, debido al excedente del residuo generado que no va a aportar ningún valor a la actividad vitícola, dado que tampoco se destina a otros usos, como podría ser el de la cocina.

Por tanto, a la hora de realizar el estudio económico para determinar la viabilidad del proyecto, se tomará como precio de la materia prima 0€.

6 Transporte de la materia prima

La logística de la biomasa implica desde la cosecha hasta el procesamiento, pasando por el transporte y almacenamiento, y supone un alto porcentaje en el coste total del proceso productivo. El objeto de la logística es el suministro de grandes cantidades de biomasa con propiedades similares para su transformación en combustibles.

Debido a que el residuo de poda de vid se encuentra reunido en el mismo lugar, el coste de transporte se calculará en base a la distancia desde la recogida hasta la planta de procesamiento de la materia prima. Dichas distancias se supondrán en un radio de 30-40 km.

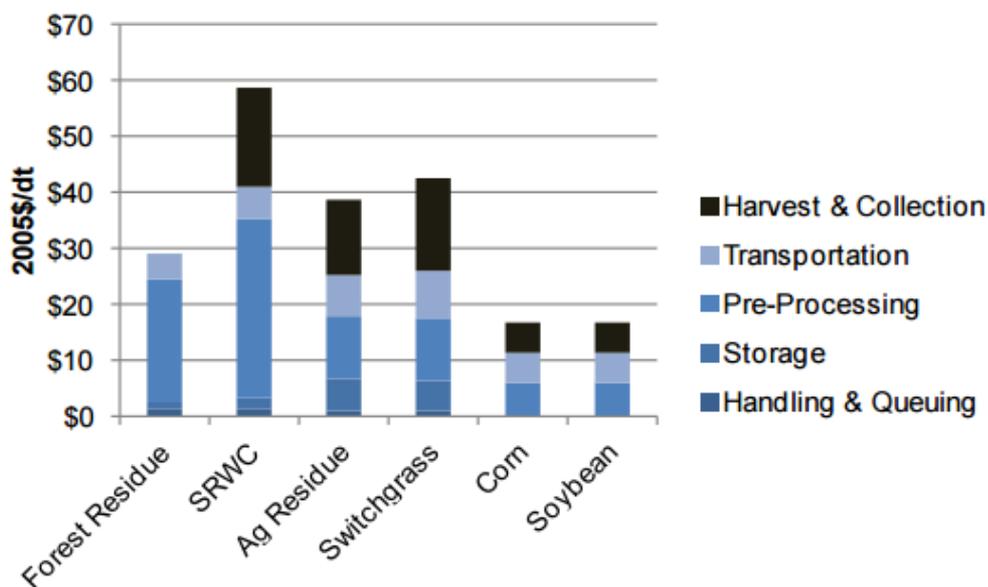


Figure 3.3. Feedstock logistic and transport costs

[Sources: Benson and Bullen (2007), Reinbolt (2012), Idaho National Laboratory (INL 2011)]

Figura 6.1.- Costes de la logística de diferentes tipos de biomasa [9]

6.1 Transporte

Puesto que la época de poda es, típicamente, entre diciembre y marzo, y algunas en mayo, el transporte de la materia prima, hasta el almacén de la planta de producción en la que se producirán los pellets, abastecerá la fábrica en un período máximo de cinco meses, con intervalos sin recibir material. Por tanto, para el transporte se realizará una contratación a empresas transportistas con capacidad de transportar biomasa.

6.2 Recepción

Los sarmientos serán apilados en un mismo montón por los agricultores. Allí serán recogidos por la empresa transportista contratada para la época de poda o abastecimiento de la materia prima, reduciendo así costes anuales. Se realizará el

transporte de esta materia prima en camiones basculantes hasta las naves diseñadas para el almacenamiento (apartado 8.5), donde serán descargadas.

6.3 Almacenaje

Tras la descarga de los camiones en el almacén, los sarmientos serán secados en el él.

El sistema de almacenamiento de la materia prima ha sido descrito en el apartado 36.

6.4 Transporte interno

A la salida de la planta de pretratamiento, la poda de vid con tamaño reducido será almacenada en los silos explicados en el apartado 8.6, y desde éstos será transportada a las siguientes fases mediante cinta transportadora.

Los sarmientos que van a ser usados sin torrefactar se transportarán con este medio hasta la máquina mezcladora, y los sarmientos que van a ser torrefactados se trasladarán al reactor de torrefacción, planta de reducción de tamaño y mezclador, siempre mediante cinta transportadora.

Se contará también en la planta con un sistema de transporte adicional (maquinaria pesada) que agilice el proceso de almacenamiento.

6.4.1 Cinta transportadora

El sistema de la cinta transportadora llevará instalados separadores magnéticos, cuya función es la de separar sólidos de mayor tamaño.

6.5 Costes del proceso de logística

Es necesario restar a la energía primaria contenida en la biomasa la cantidad de energía consumida durante el proceso de transporte. Se suele producir una disminución del 2 al 4% para pellets.

En la siguiente tabla se puede observar el coste del transporte y preparación de la biomasa:

Tabla 6.1.- Energía primaria consumida en el transporte y preparación de biomasa [10]

Actividad	Forma de Energía	Energía primaria utilizada
Empacado (Andersson and Nordén, 2000)	Diésel	12 l/h
Recargado (Byhlin, 2005, pers comm.)	Diésel	9.5 l/h
Astillado en campo	Diésel	9.5 l/h
Transporte		
Camión (Natural resources Canada, 2007)	Diésel	0.4 l/vehículo km
Tren (Carlsson-Kanyama and Faist, 2000)	Electricidad	0.075 kWh/t km
Barco (Carlsson-Kanyama and Faist, 2000)	Combustible	0.056 kWh/t km
Carga/descarga (Natural Resources Canada, 2007)	Diésel	0.024 l/h
Astillado en terminal (Andersson and Nordén, 2000)	Diésel	50 l/G ₁₅ -hora
Astillado en planta (Andersson and Nordén, 2000)	Diésel	50 l/G ₁₅ -hora
Pelletizado (Forsberg, 1999)	Electricidad	29 kWh/MWh
	Diésel	72 kWh/MWh

Tabla 6.2.- Parámetros característicos de los camiones de transporte [11]

Características de los camiones de transporte	
Distancia máxima recogida (km)	100
Capacidad masa (kg)	25,000
Capacidad volumen (m ³)	100
Velocidad media vacío (km/h)	75
Velocidad media cargado (km/h)	55
Velocidad media vacío-cargado (km/h)	65
Consumo medio (l/km)	0.45
Coste de compra (€)	120,000
Seguros/ mantenimiento (€/año)	10,000
Vida útil (año)	7
Duración turno conductor (h)	8
Coste horario conductor (€/h)	20

Sabemos que la planta va a procesar, en total, 3440 t/año de sarmiento, cuya densidad es 198 kg/m³:

$$100\text{m}^3\text{camión} * \frac{198\text{ kg}}{\text{m}^3} * \frac{1\text{ t}}{1.000\text{ kg}} = 19,8\text{ t transporta un camión}$$

$$3.440 \frac{\text{t}}{\text{año}} * \frac{1\text{ viaje}}{19,8\text{ t}} \approx 174 \frac{\text{viajes}}{\text{año}}$$

Teniendo en cuenta un consumo del camión de 0.45 l/km y que el coste de un litro de gasóleo es de 1.09 €:

$$174 \frac{\text{viajes}}{\text{año}} * \frac{40\text{ km}}{1\text{ viaje}} * \frac{0.45\text{ l}}{1\text{ km}} * \frac{1.09\text{€}}{1\text{ l}} = 3.413,88 \frac{\text{€}}{\text{año}} \text{ en combustible}$$

$$174 \frac{\text{viajes}}{\text{año}} * \frac{40\text{ km}}{1\text{ viaje}} = 6.960 \frac{\text{km}}{\text{año}}$$

$$\frac{20\text{€}}{1\text{ h}} * \frac{8\text{h}}{\text{día}} * 20 \frac{\text{días}}{\text{mes}} * 6 \frac{\text{meses}}{\text{año}} = 19.200 \frac{\text{€}}{\text{año}} \text{ empresa transportista}$$

Por tanto, el coste total sería:

$$3.413,88 \frac{\text{€}}{\text{año}} \text{ combustible} + 19.200 \frac{\text{€}}{\text{año}} \text{ empresa transportista} = 22.613,88 \frac{\text{€}}{\text{año}}$$

6.6 Emisiones de CO₂

Las emisiones de CO₂ por cada litro de diésel consumido se consideran de 3 kg/l, por lo tanto las emisiones de dióxido de carbono son:

$$\text{Emisiones de CO}_2 = 3 \frac{\text{kg}}{\text{l}} * 174 \frac{\text{viajes}}{\text{año}} * \frac{40 \text{ km}}{1 \text{ viaje}} * \frac{0.45 \text{ l}}{1 \text{ km}} = 10.440 \frac{\text{l}}{\text{año}} \text{ de CO}_2 \text{ emitidos}$$



Figura 6.1.-Camión transportando sarmiento

7 Localización de la central de producción de pellets de sarmiento torrefactado

Se ha elegido como emplazamiento para la central de torrefacción de biomasa de residuo de poda de vid, la localidad de Aranda de Duero, en la provincia de Burgos, debido a la alta densidad de superficie de viñedos existente en la zona, lo que facilitará el acopio de materia prima y abaratará los costes de transporte.

Existe además, una gran red de carreteras, que hace que el emplazamiento sea ideal.

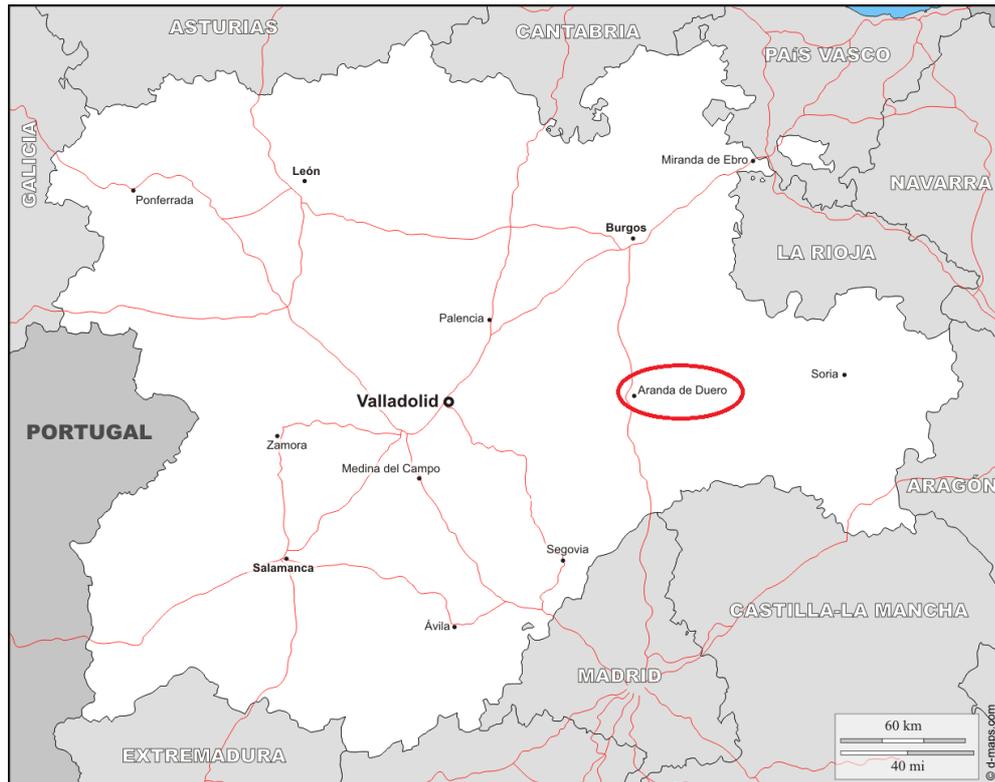


Figura 7.1 Situación de Aranda de Duero, en la provincia de Burgos (Castilla y León) [12]

Aranda de Duero (Burgos) es la capital de la comarca de la Ribera del Duero, en la que destaca el cultivo de la vid y la producción de vinos con Denominación de Origen Ribera de Duero.

Ha sido elegido como lugar de establecimiento de la central por dos razones principales:

- El municipio se encuentra en un enclave de gran actividad vitícola con alta densidad de superficie de viñedos y bodegas productoras, por lo cual, la disponibilidad de los residuos de poda están garantizados, teniendo en cuenta la estacionalidad del proceso de poda y la variación de éste entre los distintos productores.

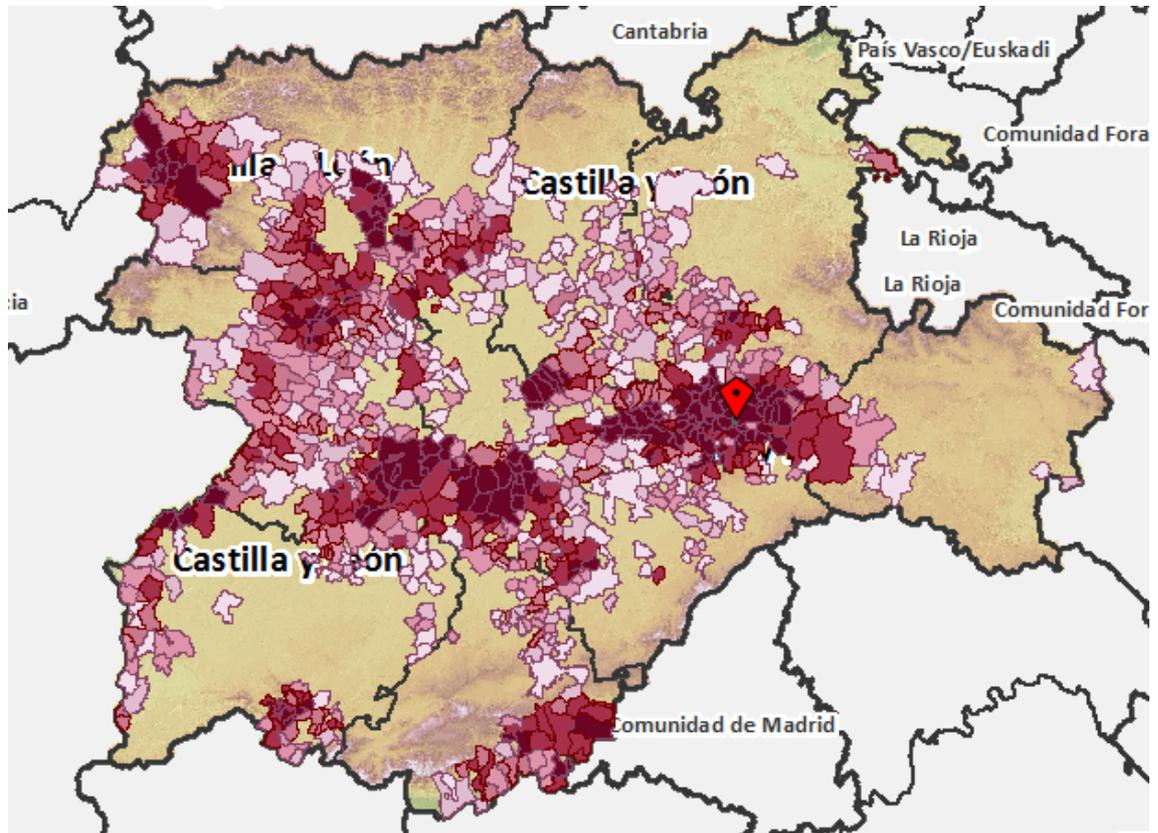


Figura 7.2.- Localización de Aranda de Duero (señalizado con el marcador rojo) y superficie de viñedos de Castilla y León. Las zonas más oscuras poseen mayor densidad de viñedos [13]

Existen 38.000 ha de viñedos en las provincias de Burgos y Valladolid, concentrándose, una gran parte en un radio de 40 km de distancia de Aranda de Duero.

- Buena red de comunicaciones y situación geográfica, que hacen de Aranda de Duero un enclave estratégico, por el que discurren la autovía A-1, la carretera nacional N-122, y diversas carreteras secundarias, que conectan la ciudad con capitales de provincia como Burgos, Valladolid o Palencia y otros municipios.



Figura 7.3.- Accesos a Aranda de Duero por carretera [14]

Además en la localidad existe una amplia zona industrial con parcelas vacías, aptas para su aprovechamiento para la construcción de la planta, que cuentan con servicios como:

- Acceso a Carreteras.
- Acceso a Redes Ferroviarias.
- Acceso a Agua Potable.
- Alumbrado Público.
- Electricidad.
- Existencia de Depuradoras en el Polígono.
- Red de Alcantarillado.
- Teléfono.
- Red de fibra óptica
- Acceso a redes de incendio

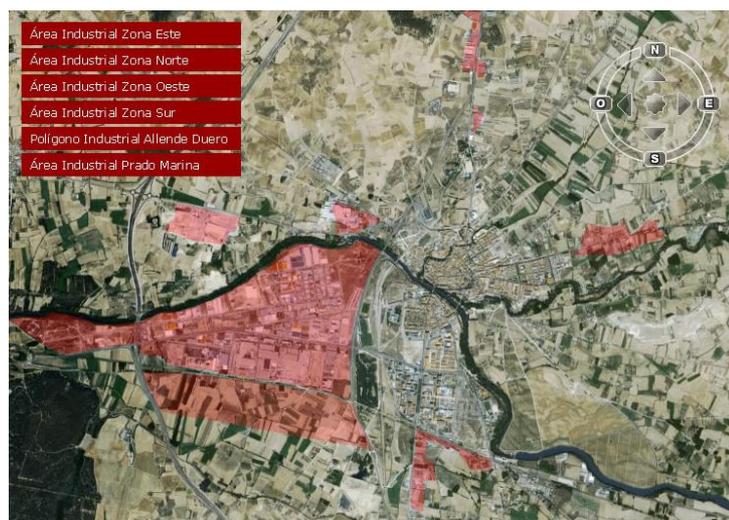
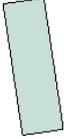


Figura 7.4.- Señalizadas en color rojo las áreas industriales de Aranda de Duero [15]

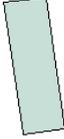
7.1 Datos de la parcela

La planta de torrefacción de la biomasa se va a situar en el polígono industrial Allende el Duero, en tres parcelas contiguas (06, 07 y 08) situadas en el sector 88310 y cuyas referencias catastrales son, respectivamente:

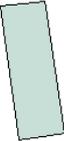
Datos del Bien Inmueble	
Referencia catastral	8831007VM3183S0001UJ  
Localización	AV PORTUGAL 112 Suelo P.6 09400 ARANDA DE DUERO (Aranda de Duero) (BURGOS)
Clase	Urbano
Coefficiente de participación	100,000000 %
Uso	Suelo sin edif.

Datos de la Finca en la que se integra el Bien Inmueble	
	Localización AV PORTUGAL 112 ARANDA DE DUERO (Aranda de Duero) (BURGOS)
	Superficie construida 0 m ²
	Superficie gráfica parcela 8.077 m ²
	Tipo Finca Suelo sin edificar

Datos del Bien Inmueble	
Referencia catastral	8831008VM3183S0001HJ  
Localización	AV PORTUGAL 110 Suelo P.7 09400 ARANDA DE DUERO (Aranda de Duero) (BURGOS)
Clase	Urbano
Coefficiente de participación	100,000000 %
Uso	Suelo sin edif.

Datos de la Finca en la que se integra el Bien Inmueble	
	Localización AV PORTUGAL 110 ARANDA DE DUERO (Aranda de Duero) (BURGOS)
	Superficie construida 0 m ²
	Superficie gráfica parcela 8.123 m ²
	Tipo Finca Suelo sin edificar

Datos del Bien Inmueble	
Referencia catastral	8831009VM3183S0001WJ  
Localización	AV PORTUGAL 108 Suelo P.8 09400 ARANDA DE DUERO (Aranda de Duero) (BURGOS)
Clase	Urbano
Coefficiente de participación	100,000000 %
Uso	Suelo sin edif.

Datos de la Finca en la que se integra el Bien Inmueble	
	Localización AV PORTUGAL 108 ARANDA DE DUERO (Aranda de Duero) (BURGOS)
	Superficie construida 0 m ²
	Superficie gráfica parcela 8.455 m ²
	Tipo Finca Suelo sin edificar

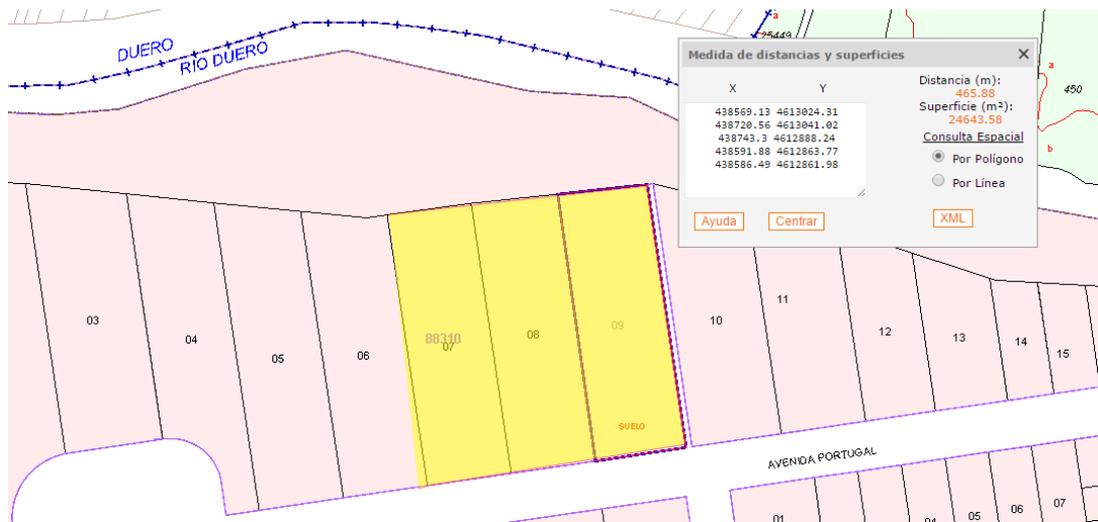


Figura 7.5.- Datos catastrales [14]



Figura 7.6.- Vista aerea de las parcelas [14]

Las tres parcelas unidas tienen una superficie disponible de 24.643,58 m².

8 Descripción de la planta de obtención de pellets de mezcla de sarmiento torrefactado y sarmiento crudo

8.1 Características de operación de la planta

La planta tendrá una capacidad de 2.880 toneladas al año de pellets de mezcla de sarmiento torrefactado y sarmiento sin torrefactar.

Siendo el pellet de mezcla el producto final, y dentro del proceso industrial se situará la planta de torrefacción de la biomasa, cuya capacidad será de 2.000 toneladas de biomasa al año.

Para cubrir esta producción se realizarán tres turnos de 8 horas, lo que supone un funcionamiento de la central de 8.000 horas al año.

Para cubrir la central las 24 horas del día se contratarán a 5 empleados con puesto fijo.

Tabla 8.1.- Características de operación de la planta de producción de pellets de mezcla

Operación (h/año)	8000
t/hora procesadas	0.36
t/año	2880
Producción anual	2880
Producción para venta (t/h)	2880
Total ventas (€/año)	1.020.895,28
Inversiones totales (€)	6.540.986,70

8.2 Descripción de la planta y proceso

La planta va a constar de los procesos en el orden en que se encuentran en el anexo 7.

El diseño de la planta se constituye por las siguientes instalaciones:

- ❖ Recepción, preparación de la materia prima y almacén
- ❖ Pretratamiento de la biomasa
- ❖ Planta para el torrefactado, mezcla de los materiales y pelletizado
- ❖ Silos dispuestos en distintas partes del proceso para el almacén del material torrefactado, pelletización, almacenamiento de pellets y expedición

8.3 Superficie necesaria e infraestructuras

De acuerdo a la instalación de todas las plantas y sistemas y equipos necesarios, y teniendo en cuenta las normas de seguridad y prevención de incendios, la superficie total de la planta será de 17.000 m².

Se necesitará la construcción de dos naves y camino de acceso a ellas, con lo que se deberá tener en cuenta la parte de la inversión destinada a obra civil e infraestructuras.

8.4 Recepción

La materia prima es recibida y hecha pasar por maquinaria para la separación y eliminación de las piedras que puedan haber sido transportadas con el sarmiento. En la misma máquina se lleva a cabo una trituración y desde ésta es transportada a una máquina para su cribado.

La limpieza del sarmiento se hace necesaria ya que durante la recogida de la poda de vid, se recogen, junto con el recurso, piedras, hierro, plástico... y por tanto se debe limpiar y obtener así un producto limpio y apto para su uso.

Posteriormente, es conducido al sistema de almacenaje al que sea destinado.

Puesto que parte del recurso va a ser usado para la torrefacción, se transportará hasta un almacén cerrado y así reducir su humedad antes de su introducción en un secadero y aumentar la eficiencia, tanto del secadero como del proceso de torrefacción.

El sarmiento que va a ser utilizado para la pelletización en crudo se almacenará en un patio de almacén al descubierto.

8.5 Almacenamiento de la materia prima

8.5.1 Localización del almacén

El parque de almacenamiento de la biomasa se situará junto a la planta de torrefacción y en las puertas de acceso principal de manera que la materia prima sea recibida en el punto de acceso de la red de carretera y avance en el interior de la planta a la vez que avanza el proceso productivo, para no entorpecer así la actividad industrial.

8.5.2 Sistema de almacenamiento

Teniendo en cuenta las características físicas del producto y la cantidad necesaria a almacenar, el sistema de almacenaje será almacenamiento en bloques. Esto no supone gastos a mayores para infraestructuras específicas.

Se requiere un especial cuidado a la hora mantener la seguridad en la estabilidad de los apilamientos.

8.5.2.1 Seguridad en el almacenamiento

Se tendrán en cuenta en los sistemas de apilamiento la disposición y altura máxima para garantizar la seguridad y estabilidad del mismo, sin riesgo de daños producidos por derrumbe, y la separación adecuada entre pasillos.

Se llevarán a cabo mantenimientos periódicos de las instalaciones y equipos utilizados.

Asimismo, se dispondrán las instalaciones de seguridad contra incendios necesarias, siendo estas la instalación de rociadores en el techo.

8.5.3 Tipo de establecimiento

Según su configuración y entorno, y de acuerdo al *Reglamento de Seguridad contra incendios en los Establecimientos Industriales*, el establecimiento destinado a la actividad se clasifica como Tipo C:

“El establecimiento industrial ocupa totalmente un edificio, o varios, en su caso, que está a una distancia mayor de tres metros del edificio más próximo de otros establecimientos.

Dicha distancia deberá estar libre de mercancías combustibles o elementos susceptibles de propagar el incendio.” [15]

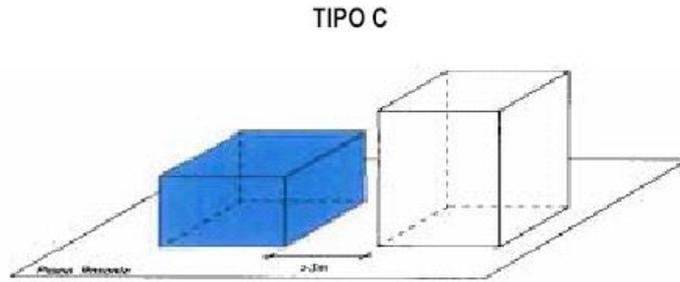


Figura 8.1.- Esquema de establecimiento industrial tipo C [17]

8.5.4 Superficie del almacén

De acuerdo con el *Reglamento de Seguridad contra incendios en los Establecimientos Industriales* (RD 2264/2004 del 3 de diciembre), y teniendo en cuenta que el material a almacenar es madera, el grado de peligrosidad se considera medio ($C_i=1,3$), ya que la temperatura de autoignición de este material se sitúa en torno a los 100-200°C [16]

Tabla 8.2.- Grado de peligrosidad de los combustibles⁴ [15]

GRADO DE PELIGROSIDAD DE LOS COMBUSTIBLES		
VALORES DEL COEFICIENTE DE PELIGROSIDAD POR COMBUSTIBILIDAD, C_i		
ALTA	MEDIA	BAJA
<ul style="list-style-type: none"> - Líquidos clasificados como clase A en la ITC MIE-APQ1 - Líquidos clasificados como subclase B₁, en la ITC MIE-APQ1. - Sólidos capaces de iniciar su combustión a una temperatura inferior a 100 °C. - Productos que pueden formar mezclas explosivas con el aire a temperatura ambiente. - Productos que pueden iniciar combustión espontánea en el aire a temperatura ambiente. 	<ul style="list-style-type: none"> - Líquidos clasificados como subclase B₂ en la ITC MIE-APQ1. - Líquidos clasificados como clase C en la ITC MIE-APQ1. - Sólidos que comienzan su ignición a una temperatura comprendida entre 100 °C y 200 °C. - Sólidos que emiten gases inflamables. 	<ul style="list-style-type: none"> - Líquidos clasificados como clase D en la ITC MIE-APQ1. - Sólidos que comienzan su ignición a una temperatura superior a 200 °C.
$C_i = 1,60$	$C_i = 1,30$	$C_i = 1,00$

⁴ El C_i es el coeficiente adimensional que pondera el grado de peligrosidad (por la combustibilidad) de cada combustible que existe en cada determinado sector de incendio. [15]

El *Reglamento de Seguridad contra incendios en los Establecimientos Industriales* establece que la densidad de fuego de carga media de los restos de madera es (q_v) es de 601 Mcal/m^3 , con un riesgo de activación, R_a , igual a 2.

Tabla 8.3.- Máxima superficie construida admisible de cada sector de incendio [15]

MÁXIMA SUPERFICIE CONSTRUIDA ADMISIBLE DE CADA SECTOR DE INCENDIO

Riesgo intrínseco del sector de incendio	Configuración del establecimiento		
	TIPO A (m ²)	TIPO B (m ²)	TIPO C (m ²)
BAJO	(1)-(2)-(3)	(2) (3) (5)	(3) (4)
1	2000	6000	SIN LÍMITE
2	1000	4000	6000
MEDIO	(2)-(3)	(2) (3)	(3) (4)
3	500	3500	5000
4	400	3000	4000
5	300	2500	3500
ALTO	NO ADMITIDO	(3)	(3)(4)
6		2000	3000
7		1500	2500
8		NO ADMITIDO	2000

Teniendo en cuenta que el establecimiento será tipo C, se han tomado valores de superficie máxima construida entre 3500 y 2000 m^2 (ya que el grado de peligrosidad del material a almacenar es medio, se han seleccionado valores para niveles de riesgo intrínseco del sector de incendio *Medio 5* y *Alto*), de acuerdo a la 8.3 y mediante la siguiente fórmula:

$$Q_s = \frac{\sum_1^i q_{vi} c_i h_i s_i}{A} R_a \left(\frac{\text{MJ}}{\text{m}^2} \right) \text{ o } \left(\frac{\text{Mcal}}{\text{m}^2} \right)$$

Donde:

Q_s es la densidad de carga de fuego, ponderada y corregida, del sector o área de incendio, en MJ/m^2 o Mcal/m^2 .

q_{vi} es la carga de fuego, aportada por cada m^3 de cada zona con diferente tipo de almacenamiento existente en el sector de incendio, en MJ/m^3 o Mcal/m^3

c_i es el coeficiente adimensional que pondera el grado de peligrosidad (por la combustibilidad) de cada uno de los combustibles que existen en el sector de incendio.

h_i es la altura de almacenamiento de casa un ode los combustibles en m.

s_i es la superficie ocupada en planta por cada zona con diferente tipo de almacenamiento existente en el sector de incendio en m^2 .

R_a es el coeficiente adimensional que corrige el grado de peligrosidad (por la activación) inherente a la actividad industrial que se desarrolla en el sector de incendio, producción, montaje, transformación, almacenamiento, reparación, etc.

A es la superficie construida del sector de incendio o superficie ocupada del área de incendio en m^2 .

Se determina, con todo ello y a partir de la siguiente tabla, que el nivel de riesgo intrínseco es alto.

Tabla 8.4.- Nivel de riesgo intrínseco según la densidad de carga de fuego ponderada [17]

Nivel de riesgo intrínseco	Densidad de carga de fuego ponderada y corregida	
	Mcal/m ²	MJ/m ²
BAJO	1 $Q_s \leq 100$	$Q_s \leq 425$
	2 $100 < Q_s \leq 200$	$425 < Q_s \leq 850$
MEDIO	3 $200 < Q_s \leq 300$	$850 < Q_s \leq 1275$
	4 $300 < Q_s \leq 400$	$1275 < Q_s \leq 1700$
	5 $400 < Q_s \leq 800$	$1700 < Q_s \leq 3400$
ALTO	6 $800 < Q_s \leq 1600$	$3400 < Q_s \leq 6800$
	7 $1600 < Q_s \leq 3200$	$6800 < Q_s \leq 13600$
	8 $3200 < Q_s$	$13600 < Q_s$

8.5.4.1 Apilamientos

Los restos de poda de vid se almacenarán apilados sobre la superficie del almacén, aprovechando así en mayor medida el espacio disponible.

Por ello el suelo deberá estar perfectamente acondicionado para que no existan pendientes o irregularidades.

Atendiendo a las características del material a almacenar y sus dimensiones, se realizarán apilamientos en bloque.

No existe una normativa específica sobre la altura máxima de los apilamientos, disponiéndose únicamente de la norma UNE 12845 de *Sistemas fijos de lucha contra incendios, Sistemas de rociadores automáticos, Diseño, instalación y mantenimiento*, según el que se establece que con una configuración de almacenamiento libre, los bloques deben limitarse a una superficie en planta no mayor a 150 m², y que en aquellos almacenes donde existan materiales de combustibilidad media (categoría III) deben diseñarse sin que la altura de los apilamientos supere los 5,2 metros de altura.

Se tomará como altura de los apilamientos 5 m.

Tabla 8.5.- Altura máxima de almacenamiento [17]

Tabla 4
 Criterios de diseño para instalaciones REA con protección sólo en el techo

Configuración de almacenamiento	Altura máxima permitida de almacenamiento (véase la nota 1) m				Densidad de diseño mm/min	Área de operación [sistema mojado o de acción previa (véase la nota 2)] m ²	
	Categoría I	Categoría II	Categoría III	Categoría IV			
ST1 Libre o en bloques	5,3	4,1	2,9	1,6	7,5	260	
	6,5	5,0	3,5	2,0	10,0		
	7,6		5,9	4,1	2,3		12,5
			6,7	4,7	2,7		15,0
			7,5	5,2	3,0		17,5
			5,7	3,3	20,0		300
	6,3	3,6	22,5				
	6,7	3,8	25,0				
	7,2	4,1	27,5				
				4,4	30,0		

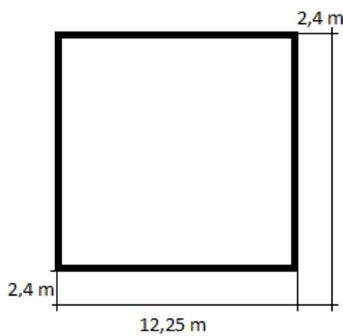
Según la misma norma se deben instalar rociadores en el techo como protección contra incendios y cumplirse que los pasillos que separan los bloques de almacenamiento tengan, al menos, 2,4 metros de ancho.



Figura 8.6.- Sarmientos apilados. Fuente: Pellet Combustible de la Mancha

8.5.5 Determinación de la superficie

Teniendo en cuenta todos los datos y referencias mencionados en los apartados anteriores, se realizan los siguientes cálculos para determinar, aproximadamente, la superficie del almacén:



❖ Almacén de biomasa a torrefactar.

La capacidad de la planta de la sección de torrefacción situada en la misma planta de producción de los pellets de mezcla será de 2000 t/año, con lo que tomando una densidad aproximada del sarmiento de 198 kg/m^3 , obtenemos un volumen necesario de 10.101 m^3 .

El volumen de los apilamientos se calculan de acuerdo a una forma piramidal, con una superficie máxima de 150 m^2 , por lo que el volumen máximo de apilamiento

será de :

$$V_{\text{apilamiento}} = \frac{150 \text{ m}^2 * 5 \text{ m}}{3} = 250 \text{ m}^3$$

El número de bloques apilados necesarios es, por tanto:

$$\text{Número de apilamientos} = \frac{10.101 \text{ m}^3}{250 \text{ m}^3} = 40,1 \approx 41 \text{ bloques}$$

Con ello obtenemos la siguiente superficie necesaria:

$$\text{Superficie de almacenamiento necesaria} = 41 \text{ bloques} * 150 \frac{\text{m}^2}{\text{bloque}} = 6.150 \text{ m}^2$$

Las dimensiones de una superficie en planta de 150 m^2 pueden configurarse como un cuadrado de $12,25 \times 12,25$, y teniendo en cuenta que el pasillo debe ser, al menos, de $2,4 \text{ m}$ de ancho, un módulo tendría la siguiente disposición y superficie:

La superficie de un módulo es de aproximadamente 215 m^2 , con lo que se obtiene una superficie total de :

$$\text{Superficie total} = 215 \frac{\text{m}^2}{\text{bloque}} * 41 \text{ bloques} = 8.815 \text{ m}^2$$

El cálculo de esta superficie se ha calculado teniendo en cuenta una capacidad de almacenaje de 2.000 t, que es la capacidad de alimentación al torrefactor al año; pero dado que nunca se va a almacenar esta cantidad a la vez, ya que la época de poda y obtención del residuo varía de unos productores a otros, y teniendo en cuenta además que según el *Reglamento de Seguridad contra incendios en los Establecimientos Industriales* la superficie máxima del sector de incendio es de

2.500 m², se escoge como opción más viable, la realización de un almacén de 7.500 m² dividido en tres sectores de 2.500 m² cada uno,

La capacidad de almacenaje de biomasa total es de 1.700 toneladas aproximadamente, distribuidas en 34 bloques de sarmiento apilado en una altura de 5 m.

❖ **Almacén de biomasa a mezclar para el pelletizado.**

Puesto que el producto que se desea obtener es un pellet compuesto por 50% de biomasa torrefacta y 50% material crudo, será necesario un almacenaje del sarmiento de vid de 1.440 t.

Procediendo de la misma manera que anteriormente, se estima una superficie de 7.250 m² de suelo y 29 bloques de apilamiento de vid, para el almacenamiento de sarmiento de vid en un patio de almacenaje al descubierto.

❖ **Resumen de los datos del almacén.**

Los datos del parque de almacenamiento de la materia prima, tanto a torrefactar como para su uso en crudo, son los siguientes:

Tabla 8.6.- Tabla resumen de los datos del almacén

Superficie del almacén de la biomasa a torrefactar	7500 m ²
Superficie del almacén de la biomasa cruda	7250 m ²
Superficie total	14750 m ²
Sistema de almacenamiento	Libre o en bloques
Superficie máxima de los apilamientos	150 m ²
Numero de apilamientos total	63
Altura de apilamientos	5 m
Capacidad total del almacén	3140 t

8.6 Planta de preparación de la biomasa

Junto a ambos sistemas de almacenamiento se dispondrá la planta de preparación de biomasa, para su triturado hasta el tamaño preciso, tanto para la alimentación al reactor como para la molienda de la biomasa húmeda que va a ser llevada al proceso de pelletizado.

Dado que el sarmiento crudo tiene un porcentaje de humedad del 9%, se utilizará un secadero de tipo tambor rotatorio, ya que al ser almacenado al aire libre puede quedar susceptible de absorber humedad.

Se debe tener en cuenta que es necesario un porcentaje mínimo de humedad para facilitar el pelletizado. Puesto que el del sarmiento ya es bajo, a pesar de estar almacenado al aire

libre, el secadero consumirá poca energía debido a que este sarmiento debe proporcionar la humedad necesaria mezclado con la biomasa torrefactada, cuya humedad es 0%.

Sabiendo que el porcentaje de humedad en el pelletizado debe estar entre 10 y 12%, el sarmiento crudo deberá ser introducido en la pelletizadora con un porcentaje de entorno a 18-20%.

Puesto que el consumo del secadero será pequeño, se podrá abastecer de los gases de combustión del quemador instalado en la sección de torrefacción.

Posteriormente, será triturado hasta el tamaño de pelletización y almacenado en un silo con capacidad de 3335 litros, altura de 3.83 m y radio de 0.52 m (autonomía de 4 horas).

Desde el silo y mediante cintas transportadoras, el material será transportado a la siguiente etapa productiva, el pelletizado.

Para la biomasa destinada a la alimentación al reactor de torrefacción, se instalará un secadero de tipo tambor rotatorio. El sarmiento completamente seco será almacenado en un silo de 1665 litros, altura de 2.85 m y radio de 0.43 m, con autonomía de 60 minutos, desde el que se alimentará al reactor de torrefacción.

La superficie de la planta de preparación de la biomasa será de 150 m² y necesitará suministro de energía eléctrica.

8.7 Planta de torrefacción, mezclado, pelletización y almacenamiento

La planta para el torrefactado tendrá unas dimensiones de 500 m² y en ella se instalará el equipo de torrefacción y el sistema de fluido térmico para su funcionamiento.

El diseño del reactor de torrefacción se describe en el apartado 10.4.

El material torrefactado se enfriará en un tornillo sinfín refrigerado por agua, con vapor sobresaturado, hasta una temperatura de 40°C, llevándose posteriormente al equipo de reducción de tamaño, un molino de martillos para ajustar su tamaño al de la pelletizadora. Finalmente, pasará al silo de almacenamiento de la biomasa torrefactada, con capacidad para 16700 litros, altura de 6.9 m y radio de 0.87 m (autonomía de 12 horas).

Como última etapa, el sarmiento crudo y el sarmiento torrefactado serán mezclados en una mezcladora

El mezclador para la producción de pellets consistirá en un mezclador/dosificador para pellets de tipo gravimétrico, en el que los materiales se cargan en la medida exacta para producir una mezcla al 50% de sarmiento de vid con sarmiento de vid torrefactado. La capacidad será de 360 kg/h, el doble que la corriente de salida del sistema de enfriado.

El espacio destinado al equipo de pelletizado tendrá una superficie de 132 m², y constará de una pelletizadora industrial con capacidad entre 200 y 400 kg/h, produciendo pellets de entre 6 y 8 mm de longitud y accionado con motor eléctrico trifásico de 22kW/400V.

La corriente de salida de la pelletizadora es de 360 kg/h, por lo que teniendo en cuenta la densidad del producto obtenido (783 kg/m³, apartado 87), el volumen que se producirá en un año es de:

$$\text{Volumen anual de pellets obtenido} = 360 \frac{\text{kg}}{\text{h}} * \frac{1 \text{ m}^3}{783 \text{ kg}} * 8000 \text{ h} = 3600 \text{ m}^3$$

Los pellets serán almacenados en 6 silos con capacidad de 167 m^3 cada uno, ocupando una superficie de 142.5 m^2 .

Tras el proceso se obtienen 2880 t/año de pellets.

8.8 Oficinas

Se destinarán 100 m^2 a oficinas.

9 Proceso de torrefacción

La torrefacción es un proceso termoquímico que tiene lugar en un ambiente inerte o con oxígeno limitado en el que la biomasa es calentada en un rango de temperatura específica, y durante un tiempo determinado, produciéndose la casi completa degradación de la hemicelulosa contenida en la biomasa.

Como consecuencia se obtiene un producto con mejores características como combustible sólido, con mayor poder calorífico, mejores propiedades hidrófobas, menor resistencia a la molienda y sin crecimiento de la actividad bacteriana que pueda degradar el biocombustible.

La temperatura para llevar a cabo este proceso se sitúa entre 200 y 300°C. A temperaturas mayores se obtendrían resultados indeseados, ya que la lignina se perdería en un alto porcentaje y ello resultaría en una enorme dificultad a la hora de realizar pellets con el material. Además, existen otras desventajas a temperaturas mayores de 300°C, como la volatilización o carbonización de los polímeros [18].

Tabla 9.1.- Procesos ocurridos durante la torrefacción [1]

TABLE 4.2 Changes Taking Place in Biomass as It Is Heated in Inert Atmosphere (based on www.FAO.org/documents/x.5) and the Thermochemical Process Taking Place in It

Temperature Range of Heating (°C)	Process That Occurs	Heating Rate	Process	Solid Product
20–110	The wood is preheated and it approaches 100°C, moisture starts evaporating	Low/fast	Drying	Bone dry wood
110–200	Further preheating removes traces of moisture and slight decomposition starts	Low/fast	Postdrying preheating	Preheated dry wood
200–270	Wood decomposes releasing volatile (e.g., acetic acid, methanol, CO, and CO ₂) that escape	Low	Torrefaction	Mildly torrefied wood
270–300	Exothermic decomposition starts releasing condensable and noncondensable vapors	Low	Torrefaction	Severely torrefied wood
300–400	Wood structure continues to break down. Tar release starts to predominate	Low	Low temperature carbonization	Low fixed carbon charcoal
		High	Pyrolysis	Liquid
400–500	Residual tar from charcoal is released	Low	Carbonization	High fixed carbon charcoal
		High	Pyrolysis	Liquid
>500	Carbonization is complete		High temperature carbonization	Tar-free charcoal
			Pyrolysis	Liquid, higher gas yield

www.fao.org/docrep/x5555e/x5555e03.htm; FAO document repository. Industrial charcoal making. Wood carbonization and the product it makes (Chapter 2).

En distintos rangos de temperatura a los que la biomasa se ve sometida se va produciendo la descomposición térmica del material; la hemicelulosa es químicamente más activa entre los 100-260°C, pero su mayor degradación se produce por encima de los 200°C; la celulosa se degrada a temperaturas superiores a 275°C; la lignina se degrada gradualmente entre los 250 y los 500°C (Cielkosz [19]).

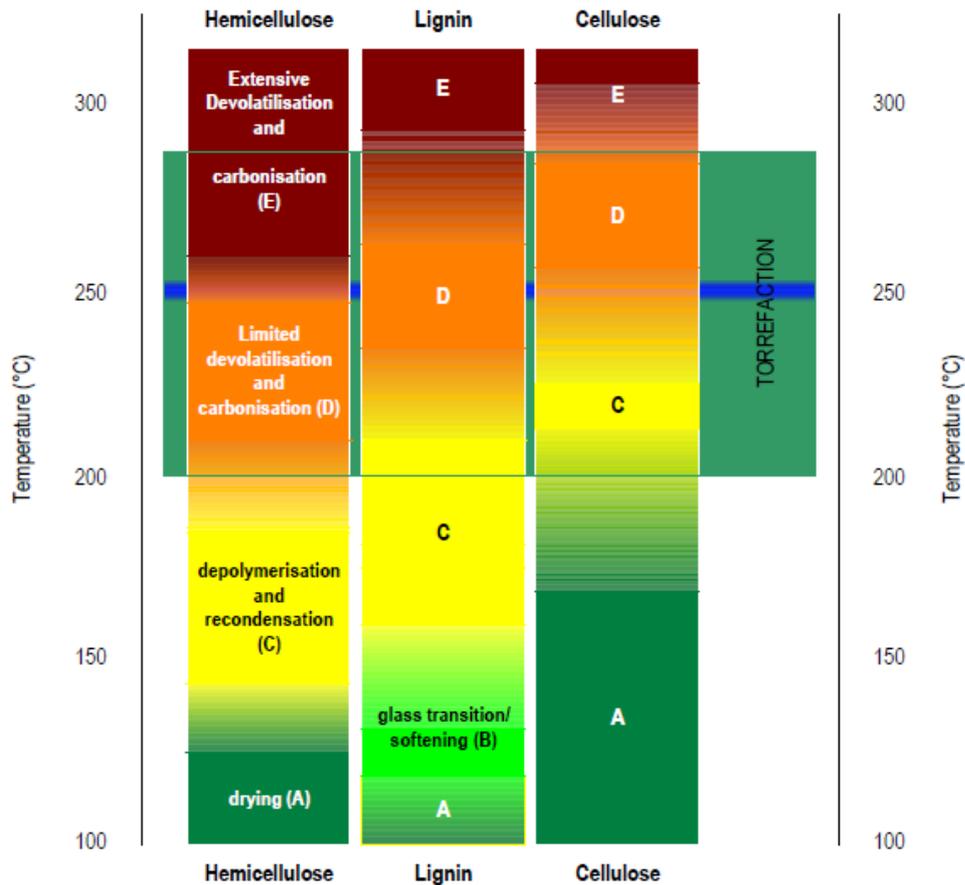


Figura 9.1 Fenómenos producidos en materiales lignocelulósicos durante la torrefacción [20]

Con el aumento de temperatura en el proceso, aumenta la pérdida de masa en los volátiles, a favor de la formación de ácido acético y otros productos orgánicos; por ejemplo, para un proceso de torrefacción a 250°C de temperatura durante 30 minutos se obtuvo un 85,9% de material orgánico, mientras que solo se obtuvo un 65,5% al aumentar la temperatura a 300°C y durante un tiempo de 20 minutos.

Temperaturas más altas producen menores rendimientos de masa y energía, pero una mayor densidad energética. Al aumentar la temperatura, aumenta el porcentaje de carbono fijo y disminuye la concentración de oxígeno e hidrógeno.

Es de suma importancia también, la temperatura que se alcanza en el interior de la partícula, hacia donde el calor es transferido por conducción y convección a través de los poros. La temperatura alcanzada en el núcleo depende de la transferencia de calor y masa, condicionada por la forma, el tamaño y la temperatura. Es por esto que dos

partículas de diferentes características y bajo las mismas condiciones de torrefacción pueden generar distintos rendimientos.

Además de la temperatura, existen otros factores a tener en cuenta:

- ❖ Concentración de oxígeno: debe ser casi inexistente, aunque según algunos estudios una pequeña concentración tiene produce efector positivos en el material torrefactado.
- ❖ Ratio de calentamiento: el calentamiento de la biomasa se produce de manera lenta para aumentar el rendimiento del proceso (menos de 50°C/minuto) (P.C.A. Bergman [21]).
- ❖ Tiempo de residencia: teniendo en cuenta el calentamiento lento de la biomasa dentro del reactor ((20-50°C/minuto), el tiempo de residencia debe ser mayor de 10 minutos. Cuanto mayor es el tiempo de residencia, menor es el rendimiento másico y mayor es la densidad de energía. Asimismo, la pérdida de masa provocada por el período de residencia termina después de una hora en términos generales.

El balance de materia y energía del proceso de torrefacción demuestra que el producto puede contener la mayor parte de la energía inicial pero en menos cantidad de masa, con lo que la densidad energética es mayor. Tras la torrefacción, el 30% de la masa inicial pasa a ser gas, con el 10% de la energía inicial, por lo que el 70% de la masa inicial retiene el 90% de la energía. Esto queda reflejado en el siguiente esquema, en el que M es la unidad de masa, y E la unidad de energía.

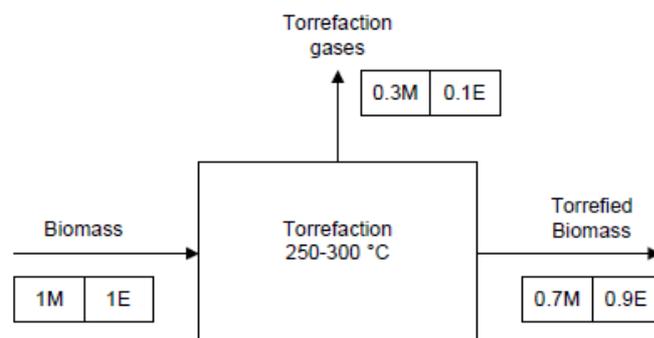


Figura 9.2 Balance de materia y energía del proceso de torrefacción [21]

Todos los cambios generados originan que aumente el contenido en carbono fijo y disminuya el hidrógeno y oxígeno, por lo que aumenta a su vez el poder calorífico del material.

Según datos del Centro Nacional de Energía Renovables (CENER), tras la torrefacción de la materia prima se obtiene un producto 85-90% torrefactado (en base seca) con contenidos energéticos entre 4 y 5 MWh/m³, lo que supone un 90-95% de la energía contenida en material inicial, al 10% de humedad.

9.1 Productos

Tanto las condiciones en las que se lleve a cabo el proceso de torrefacción como las características iniciales de la biomasa van a condicionar las propiedades de los productos formados. Dichos productos pueden ser sólidos, líquidos o gaseosos, siendo el producto deseado el sólido, debido a la mejora de las cualidades de éste.

A su vez, el producto gaseoso es susceptible de ser utilizado, principalmente mediante su aprovechamiento para proporcionar energía al mismo proceso de torrefacción, por lo que éste puede ser un proceso automantenido.

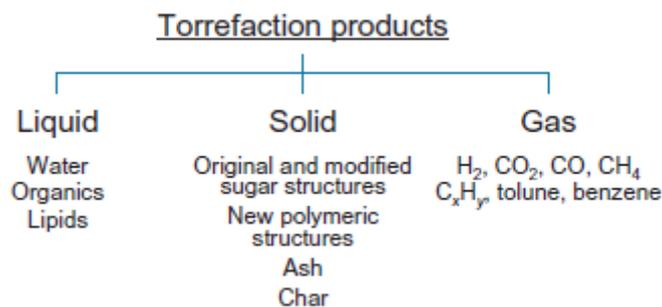


Figura 9.3.- Productos obtenidos de la torrefacción de biomasa [1]

La fase sólida formada se compone de estructuras de celulosa, originales y modificadas, nuevas estructuras de polímeros con anillos aromáticos, char y cenizas (P.C.A. Bergman [22]).

La fase gaseosa se compone principalmente de gases con punto de ebullición por debajo de los -33°C y por compuestos aromáticos como benceno y tolueno.

En cuanto a los productos líquidos obtenidos, además de agua procedente de la evaporación, se forman productos orgánicos, principalmente durante el proceso de desvolatilización y carbonización.

A su vez, se obtienen también lípidos como productos de la fase líquida. Éstos son componentes que estaban presentes en la biomasa original y que pueden evaporarse durante la torrefacción.

En las figuras a continuación se pueden apreciar los rendimientos y la composición de los productos y se evidencia la preservación de la masa y energía del producto sólido. Se puede apreciar también que tras el producto sólido, es el agua el producto que más se obtiene, y que la energía procedente de los volátiles se encuentra, sobre todo, en los lípidos.

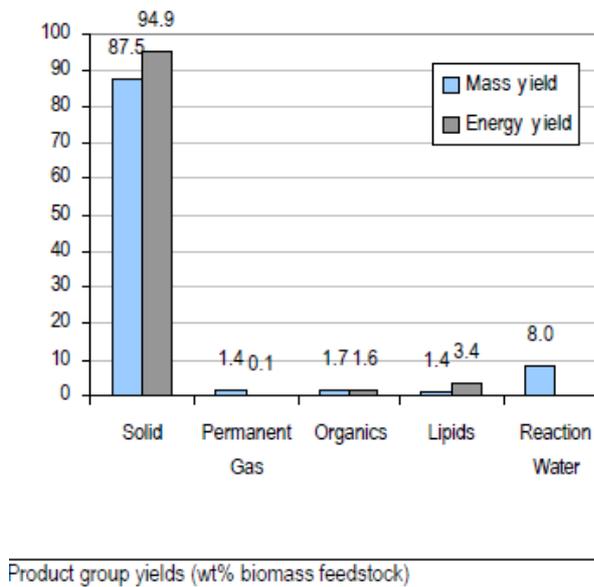


Figura 9.4.- Rendimiento del grupo de productos (concentración en peso) [21]

Los productos de la fase gaseosa están formados principalmente por agua, CO y CO₂, y los productos orgánicos que se obtienen son, en su mayoría, ácido acético y metanol, y otros como ácido acético, acetona, formaldehído, etc.

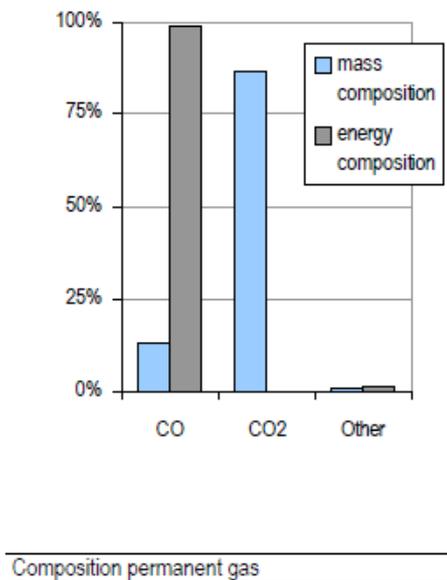


Figura 9.5.- Composición de los productos gaseosos [21]

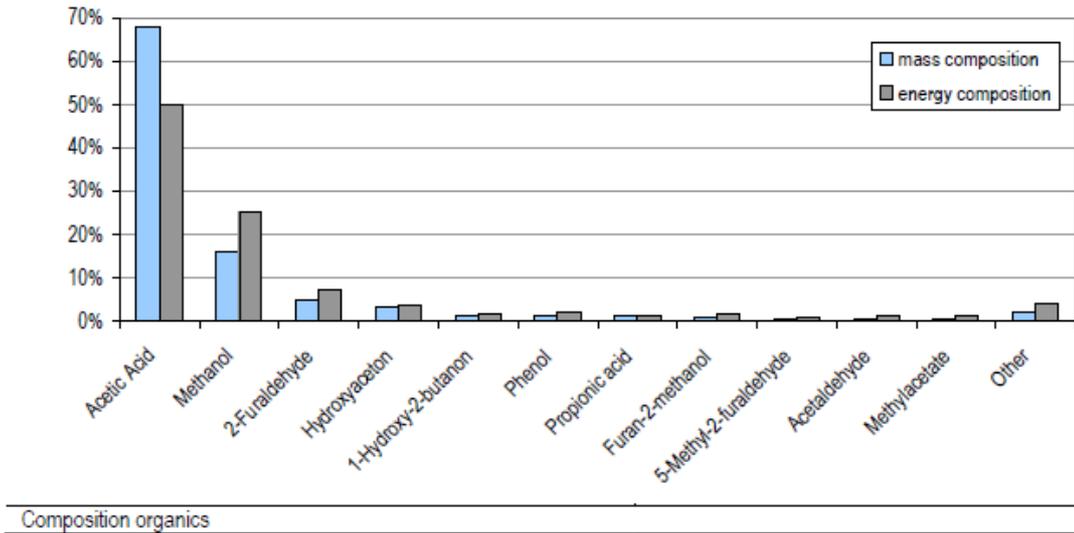


Figura 9.6.- Composición del producto orgánico líquido [21]

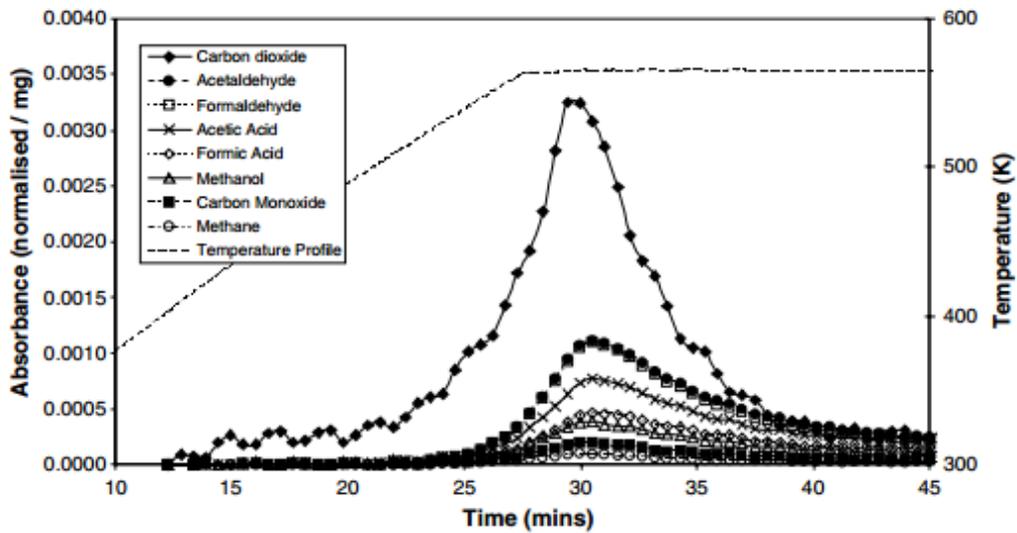


Figura 9.7.- Evolución de los volátiles durante la torrefacción [23]

La formación de agua durante la torrefacción se produce mediante dos, mecanismos, la evaporación, y la deshidratación y despolimerización de los polímeros.

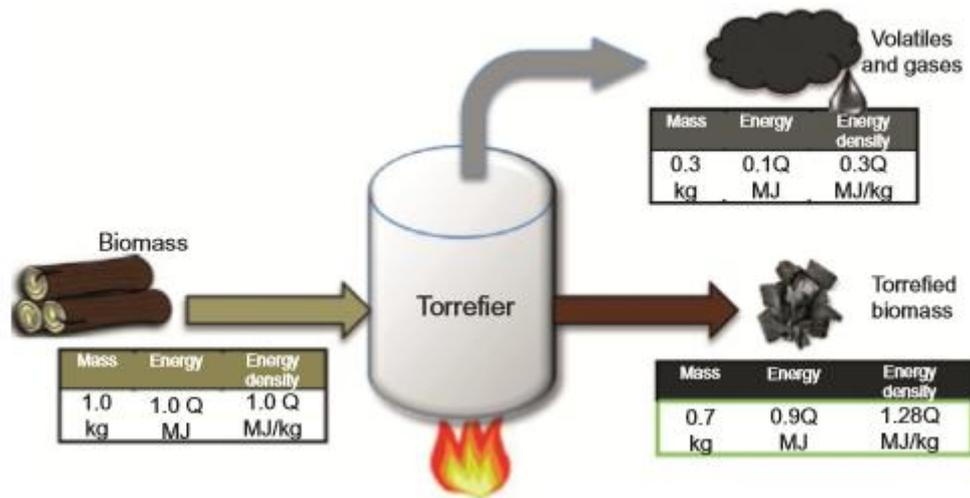


Figura 9.8.- Balance de materia y energía durante en proceso de torrefacción [1]

En la figura 9.1.6., en la que se muestra un esquema del balance de materia y energía, se aprecia que el gas puede ser aprovechado como combustible debido al contenido en energía.

Es necesario tener en cuenta que, en general, el rendimiento de las reacciones aumenta al aumentar la temperatura y tiempo de reacción, con lo que disminuye la concentración de agua y aumenta la obtención de productos combustibles. Consecuentemente, el poder calorífico del gas de torrefacción crece al aumentar la temperatura y tiempo de reacción.

A pesar del alto contenido en agua del gas de torrefacción, el contenido energético es relativamente alto, y su poder calorífico puede encontrarse en rangos de 5,3 a 16,2 MJ/Nm³. El *syngas*, o gas de síntesis, que se obtiene de procesos de gasificación⁵ tiene un poder calorífico de entre 15 y 20 MJ/Nm³, por lo que el gas obtenido del proceso de torrefacción puede ser utilizado como combustible [21].

9.2 Ventajas de la torrefacción

Tras el proceso de torrefacción de la biomasa se pueden apreciar las siguientes ventajas del producto torrefactado (producto sólido) frente al material original:

- ❖ Aumento del ratio O/C y de la densidad energética, con 4-5 MWhm³/h, frente a 0,7-1,7 MWh/m³.
- ❖ Mayor facilidad de manejo y alimentación.
- ❖ Bajo contenido en humedad, y baja higroscopicidad
- ❖ Puede ser automantenido, debido a la corriente de gas residual

⁵ La gasificación es un proceso termoquímico con el que se obtiene un gas combustible apto para ser utilizado en calderas, turbinas o motores, a partir de un sólido, y llevado a cabo en un ambiente pobre de oxígeno y en presencia de una agente gasificante.

9.3 Etapas del proceso

9.3.1 Presecado y secado

A menor contenido en humedad, menor gasto energético conllevará el proceso de torrefacción, lo que supondrá una mayor eficiencia.

Tras la poda de la vid, el sarmiento contiene un bajo contenido en humedad. Sin embargo, es necesario que sea lo más baja posible.

El tiempo estimado de período de secado será de 30 días en el almacén. Posteriormente, será necesario introducir en el proceso un secadero rotatorio, considerando que el contenido en humedad será bajo y que solo se va a torrefactar una parte de la biomasa que entrará al proceso de pelletizado.

De esta manera se consigue ahorrar una gran cantidad de energía, puesto que el proceso de secado es el que más gasto energético supone de todas las etapas que suponen el proceso de torrefacción.

La energía requerida en esta etapa es la siguiente:

$$Q_d = \frac{L * M_f * M}{h_{ud}}$$

Donde:

Q_d : Energía requerida para el secado

M_f : Masa de la materia prima

M : Fracción de humedad de la biomasa en base húmeda

L : Calor latente de vaporización del agua

h_{ud} : Rendimiento del secadero

9.3.2 Postsecado

Una vez que la biomasa está seca, necesita ser calentada hasta la temperatura de torrefacción, generalmente del orden de 200°C, ya que a esta temperatura todavía no se produce la degradación de la biomasa y permite la salida de volátiles y agua que aún pueda contener el material.

Durante esta etapa se consume muy poca energía ya que únicamente se transfiere calor sensible a la biomasa. La energía requerida es la siguiente:

$$Q_{pdh} = \frac{M_f (1 - M) C_{pd} (T_t - 100)}{h_{u,pdh}}$$

Donde:

Q_{pdh} : Energía requerida para el postsecado

M_f : Masa de la materia prima

M : Fracción de humedad de la biomasa en base húmeda

C_{pd} : Calor específico de la biomasa seca

T_t : Temperatura de diseño del torrefactor

$h_{u,pdh}$: Rendimiento de la sección en la que se lleva a cabo el proceso

9.3.3 Torrefacción

Durante el proceso de torrefacción tiene lugar la depolimerización, cuyo grado depende de la temperatura de reacción y del tiempo de residencia.

Se trata de un proceso moderadamente exotérmico [18] y consume muy poca energía, requiriéndose la energía necesaria para suplir la pérdida de calor producida en el reactor. En este caso, la energía requerida es la siguiente:

$$Q_{tor} = H_{loss} + M_f(1 - M)X_t$$

Donde:

Q_{tor} : Energía requerida para la torrefacción

H_{loss} : Calor perdido en la sección de torrefacción del reactor (depende del diseño del reactor)

M_f : Masa de la materia prima

M : Fracción de humedad de la biomasa en base húmeda

X_t : Parámetro que determina la cantidad de calor absorbido durante la torrefacción, siendo positivo para reacciones endotérmicas y negativo para reacciones exotérmicas. Sus unidades son kJ/kg

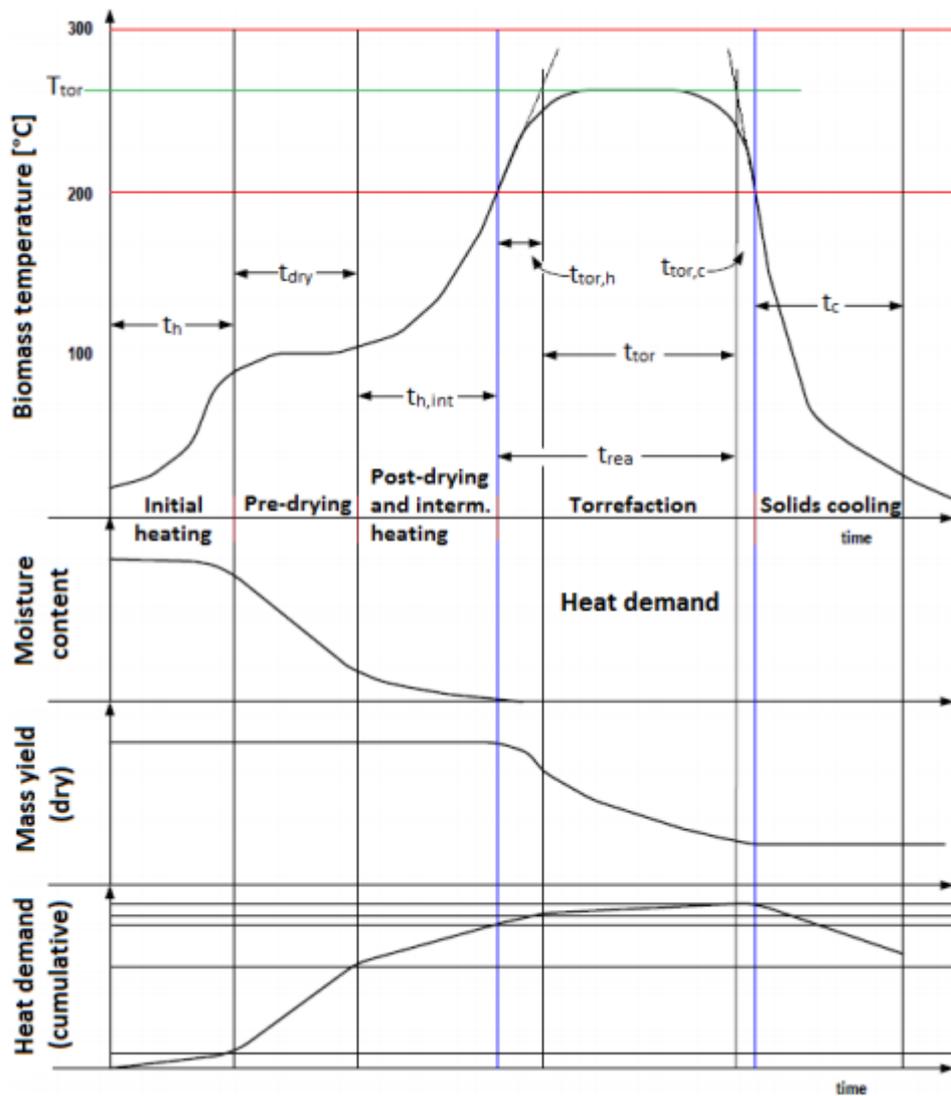


Figura 9.9.-Fases de torrefacción [21]

9.3.4 Enfriado

A la salida del torrefactor, la biomasa se encuentra a una temperatura que es generalmente mayor a la temperatura de ignición de la biomasa torrefactada, por lo que si no es enfriada, podría arder en contacto con el aire. La energía requerida para el enfriado es la siguiente:

$$Q_{cool} = M_f(1 - M)MY_{db}C_{pt}(T_t - T_p)$$

Donde:

Q_{cool} : Energía requerida para el enfriado

M_f : Masa de la materia prima

M : Fracción de humedad de la biomasa en base húmeda

MY_{db} : Rendimiento másico

C_{pt} : Calor específico de la biomasa torrefactada

T_t : Temperatura de diseño del torrefactor

T_p : Temperatura final requerida tras el enfriamiento

El calor procedente del material ya torrefactado puede recuperarse para precalentar el aceite y por tanto, aumentar la eficiencia del proceso y disminuir el consumo de combustible necesario.

El calor susceptible de ser recuperado, sería:

$$Q_c = W_t * C_d * (T_t - T_c)$$

Donde:

Q_c : Energía extraída del producto torrefactado

W_t : Corriente de salida del torrefactor

C_d : Calor específico de la biomasa torrefactada

T_t : Temperatura de diseño del torrefactor

T_c : Temperatura final requerida tras el enfriamiento

9.4 Propiedades de la biomasa torrefactada

9.4.1 Densidad y volumen

Como ya se ha explicado, durante el proceso de torrefacción disminuye la masa, con la consecuente reducción de volumen.

Sin embargo, la densidad muestra distintas variaciones según el tipo de densidad del que se hable:

- ❖ Densidad Verdadera: sufre una ligera reducción
- ❖ Densidad aparente: reducción considerable
- ❖ Densidad de pila: también se reduce

Tabla 9.2.- Cambios en la densidad durante la torrefacción [1]

TABLE 4.6 Change of Densities with Torrefaction Temperature for Several Types and Sizes of Wood

Temperature (°C)	25	200	220	225	240	250	260	275	280	300
Bulk density ^a (kg/m ³)	381			342		332		376		400 ^b
Apparent density ^c (kg/m ³)	500	489	445		444		395		340	297
True density ^a (kg/m ³)	1400			1410		1400		1370		1340

^aPine wood chips 20.94–70.59 mm long, 1.88–4.94 mm thick, and 15.08–39.70 mm wide (Phanphanich and Mani, 2011).
^bThis reduced density could be a result of an experimental error.
^cPoplar wood 25.4 mm diameter × 32 mm (Basu et al., 2012).

9.4.2 Capacidad de molienda

Mediante la torrefacción se consigue romper las estructuras celulares que forman la biomasa, de manera que sus partículas se hacen más quebradizas, lo que reduce la fricción entre las fibras y facilita la molienda, abaratando así costes del proceso.

Por tanto, la torrefacción supone un óptimo proceso para el pelletizado, puesto que le molienda del material torrefactado resulta más barata, y la densificación del material incrementa su densidad energética.

Según Bergman [24], la energía consumida en el proceso de molienda es considerablemente menor en la biomasa torrefactada que en la biomasa sin torrefactar, por lo que la capacidad de molienda de biomasa tratada puede incrementarse hasta 10 veces, por encima de la capacidad de molienda de la biomasa sin tratar.

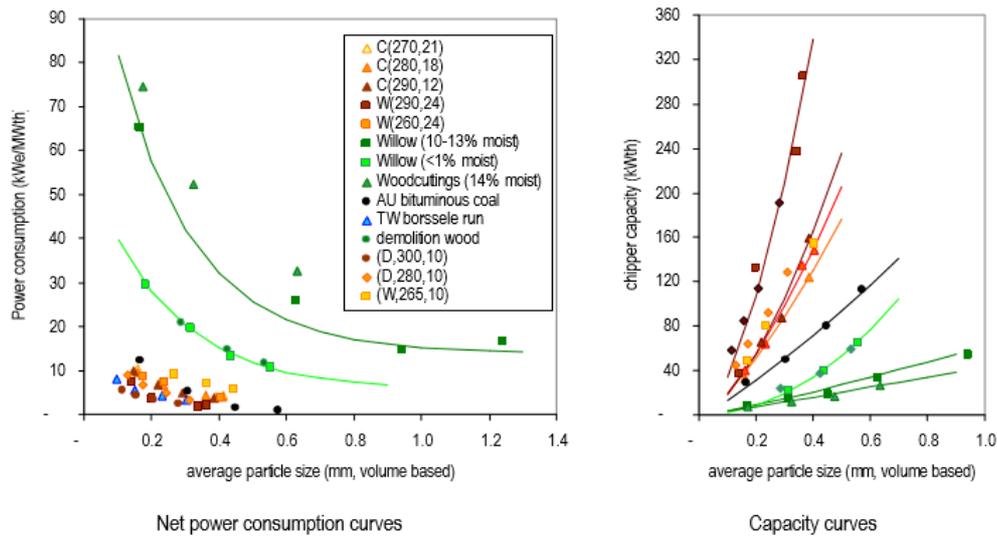


Figure 4.9 Size reduction results of coal, biomass feedstock, and various torrefied biomass samples

Figura 9.10.-Capacidad de molienda de distintos tipos de biomasa [24]

9.4.3 Capacidad hidrófoba

La biomasa contiene grupos hidroxilos (-OH) que absorben agua. Durante la torrefacción se destruyen estos grupos, con lo que disminuye la capacidad de absorción de agua.

Además, se forman estructuras no polares insaturadas tras el proceso de torrefacción, como el tar, cuya condensación en los poros intercepta el paso del agua a través del sólido.

9.4.4 Resistencia a la formación de polvo

El proceso de torrefacción aumenta la resistencia a la humedad y al agua, y su densidad energética. Sin embargo, también provoca que el material sea más quebradizo. Esto es lo que mejora su capacidad de molienda, pero a su vez, disminuye la fuerza mecánica e incrementa la formación de polvo.

Pero, estos problemas pueden quedar suplidos por la pelletización o densificación del material torrefactado, por lo que considerando las ventajas y las desventajas, los procesos de torrefacción y pelletización unidos suplen todos los *contras*.

9.5 Tecnologías de torrefacción

De todos los equipos que conforman una planta de torrefacción, el más importante es el reactor. Se citan a continuación los diferentes tipos de reactores, de acuerdo a la información proporcionada por [22].

9.5.1 Clasificación según el modo de calentamiento

9.5.1.1 Reactores de calentamiento directo

La biomasa es calentada directamente por un medio caloportador, produciéndose el intercambio de calor por contacto directo. El fluido caloportador puede ser un gas sin oxígeno o pobre en oxígeno, un sólido no reactivo o un fluido presurizado como vapor de agua.

❖ Reactor convectivo (lecho fijo, *entrained bed*, *moving bed*)

Un gas inerte o con un pobre contenido en oxígeno transfiere el calor al sólido, que puede permanecer fijo (lecho fijo) o en movimiento con respecto a la pared del reactor (*moving bed*). El movimiento (sin mezcla) de las partículas puede ser originado por gravedad, fuerza o sistemas mecánicos.

El tamaño de la biomasa deber ser pequeño para garantizar un alto coeficiente de transferencia de calor, que se alcanza rápidamente. Debido a esto, el tiempo de residencia en el reactor es pequeño, lo que incrementa el rendimiento del producto líquido.

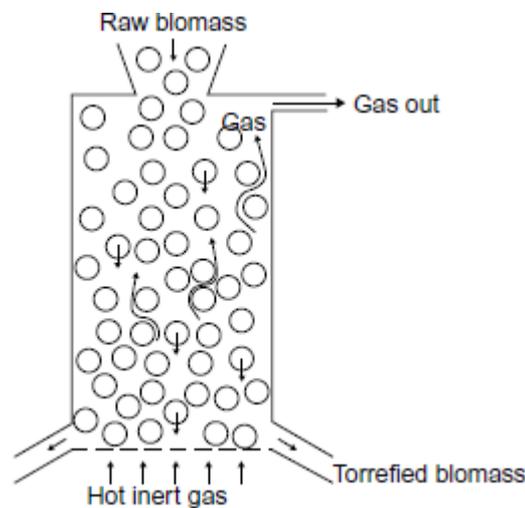


Figura 9.11.-Reactor de tipo *Moving Bed*

❖ Lecho fluidizado

Se introduce un gas inerte en el reactor que fluye a través de un lecho de partículas de un tamaño determinado. Los sólidos se comportan como un fluido, lo que facilita la mezcla y la obtención de un producto mucho más homogéneo. Sin embargo, resulta necesaria la separación de partículas inertes del material torrefactado y un tamaño de partícula muy pequeño.

El sistema más utilizado es la tecnología *torbed*, en la que las partículas de biomasa se fluidizan sobre un hogar formado por ranuras inclinadas, mientras se inyecta una corriente de gas cruzada.

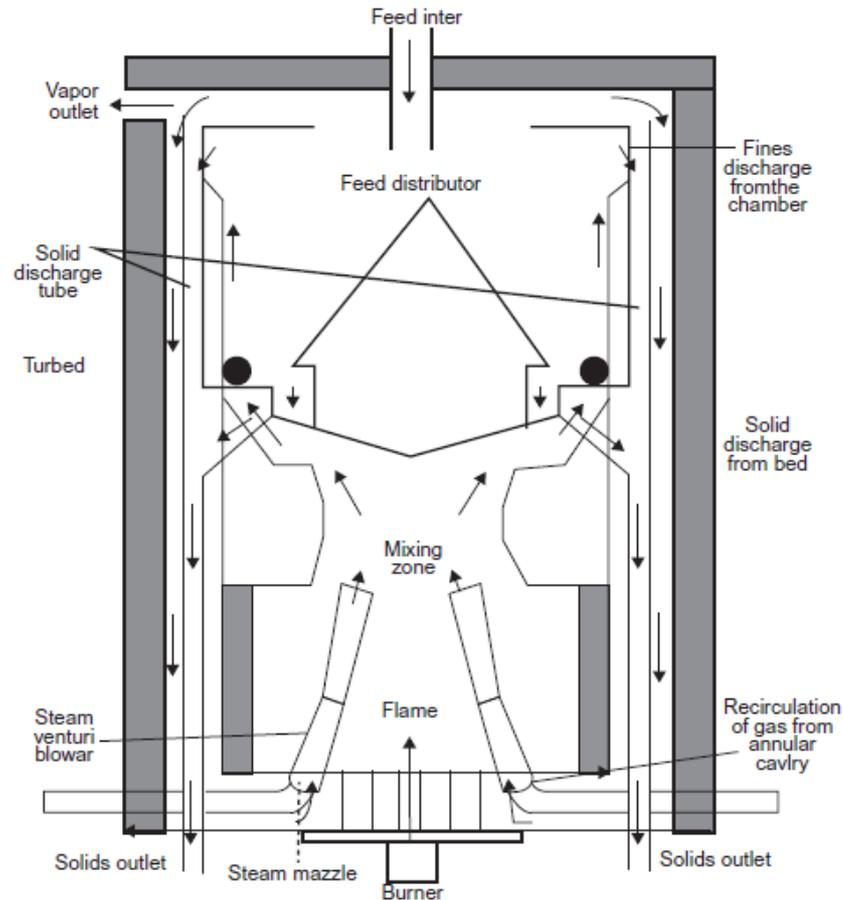


Figura 9.12.- Reactor torbed

❖ Reactores hidrotermales

Se realiza un calentamiento presurizado de la biomasa en agua, lo que conlleva una necesidad de secado, por lo que se utiliza para biomásas con alto contenido en humedad. Por tanto, la transferencia de calor se realiza entre agua caliente (vapor) y la biomasa.

9.5.1.2 Reactores de calentamiento indirecto

En estos reactores el medio caloportador no se pone nunca en contacto con la biomasa, sino que el calor es transportado a través de una pared o radiación electromagnética, con lo que la introducción de oxígeno es casi nula.

Esto supone mayor flexibilidad a la hora de establecer el fluido caloportador, y además, los volátiles liberados no se diluyen con el gas inerte, con lo que su aprovechamiento resulta mucho más sencillo.

❖ Tambor rotatorio

La biomasa, en un ambiente de gas inerte, es calentada por las paredes del tambor, por lo que es importante controlar la transferencia de calor de la pared a las partículas de biomasa. Generalmente, se realiza un secado previo de la biomasa.

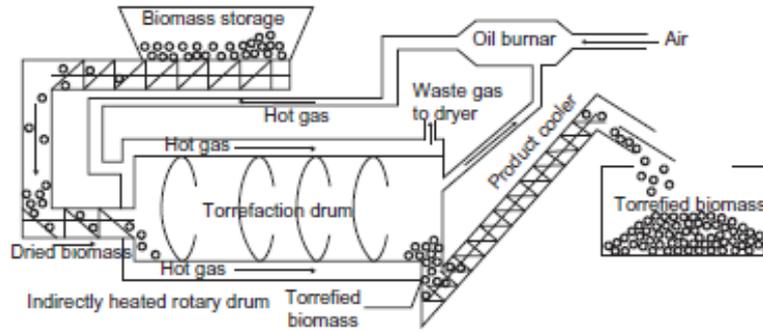


Figura 9.13.-Reactor de tambor rotativo

También existen reactores de calentamiento directo que usan tambores rotatorios, en los que la biomasa es introducida en el reactor, y por él se hace pasar un gas caliente.

❖ **Eje estacionario**

El reactor es calentado desde fuera, para evitar el contacto con los gases calientes. La transferencia de calor se realiza por conducción a través de la pared del reactor. Un tornillo sinfín mueve la biomasa dentro del reactor para aumentar la transferencia de calor y mover la biomasa a lo largo del mismo.

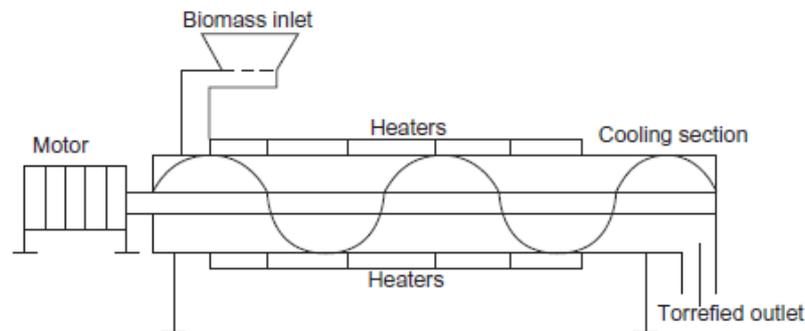


Figura 9.14.-Reactor de eje estacionario

❖ **Microondas**

La radiación de microondas se basa en las ondas electromagnéticas, en un rango de 300 MHz a 300 GHz. El proceso es eficiente aunque depende de la capacidad del material de absorber las microondas y convertirlas en calor.

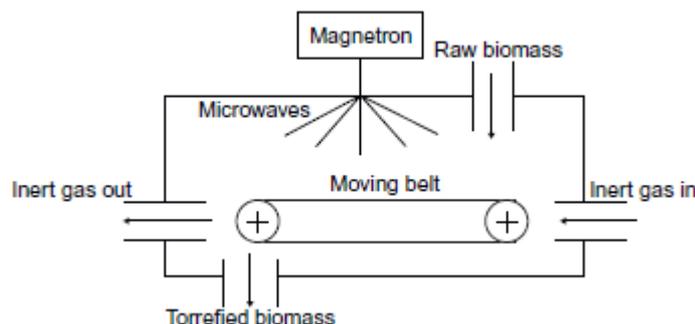


Figura 9.15.- Reactor Microondas

9.5.2 Clasificación según el modo de la mezcla gas-sólido

Existen cuatro tipos según esta clasificación:

1. *Plug flow*: gas se mueve a través de los sólidos estáticos.
2. *Partial back-mixed*: el gas es unidireccional, pero los sólidos se mezclan (lecho fluidizado).
3. *Tumbling*: el sólido está en movimiento en el reactor.
4. *Entrained*: los sólidos son neumáticamente transportados por el gas.

Tabla 9.3.- Clasificación de los reactores por modo de transferencia de calor y contacto fluido-sólido [1]

No.		Mode of Heat Transfer	Gas–Solid Motion
1	Convective bed reactor (fixed, moving, entrained)	Gas–particle convection	Plug flow, entrained flow
2	Rotating drum reactor	Wall–particle conduction	Solids tumbling or moving around drum
3	Fluidized-bed reactor	Particle–particle convection	Back-mixed solids, plug-flow gas
4	Microwave reactor	Electromagnetic heating of water molecules in biomass	Plug-flow solids
5	Hydrothermal reactor	Water–particle heat transfer	Fixed bed for batch reactor

10 Diseño del proceso de torrefacción

10.1 Capacidad de la planta de torrefacción

Dado que en Castilla y León se estima una producción anual de residuo de poda de vid de en torno a los 155.000 t /año, de las cuales la mayor parte se producen en la zona de mayor concentración de viñedos de la comunidad, en la que se situará la central, el suministro de la materia prima necesaria se garantiza.

La estacionalidad del residuo queda suplida mediante la creación del almacén descrito en la sección 8.5.

Teniendo en cuenta además, los factores logísticos y costes derivados de ellos, la planta de torrefacción se diseñará de acuerdo a una capacidad de 2000 t /año.

La producción de la planta será de aproximadamente 1440 toneladas de biomasa torrefactada al año.

Tabla 10.1.- Características de operación de la planta

Operación (h/año)	8000
t/hora procesadas	0.180
t/año	1440
Producción anual	1440

10.2 Planta de pretratamiento de la biomasa a torrefactar

Se puede conseguir aumentar el rendimiento del proceso de torrefacción al reducir el tamaño de partícula de la biomasa de alimentación al reactor.

10.2.1 Reducción de tamaño de partícula

A pesar del aumento del rendimiento de la torrefacción, se produce un importante gasto energético durante la molienda del material crudo, que crece a medida que decrece el tamaño de partícula.

Se instalará un equipo de trituración formado por un molino de cuchillas, con capacidad de carga de distintos materiales y tamaños, por lo que admite los sarmientos de vid, y con el que se obtiene un tamaño de partícula de entre 15 y 20 mm, y no más de 10 mm de ancho.

La planta trituradora consumirá una potencia de entre 37 y 75 kW.

10.3 Secado

El sarmiento destinado al proceso de torrefacción será almacenado durante un mes para reducir su humedad, previamente a su introducción en un secadero de tipo tambor rotatorio, de 34 kW de potencia.

Para aumentar aún más la eficiencia, se utilizará como combustible el gas de torrefacción de salida del reactor.

El sarmiento completamente secado será almacenado en un silo con autonomía de 60 minutos antes de su entrada al reactor de torrefacción.

10.4 Elección del tipo de reactor y características

Por sus características y simplicidad en el mantenimiento se elige un reactor de tipo tambor rotatorio. Como se ha explicado anteriormente, el calor se trasfiere de forma indirecta a través de la pared del reactor y mediante un fluido calefactor, que en este caso se tratará de aceite térmico (250°C).

La biomasa se alimenta por un extremo del reactor, discurre a lo largo, mientras es calentada a la temperatura de torrefacción y se van realizando las diferentes fases del proceso.

A la salida del reactor, la biomasa torrefactada se enfría en un tornillo sinfín refrigerado por agua.

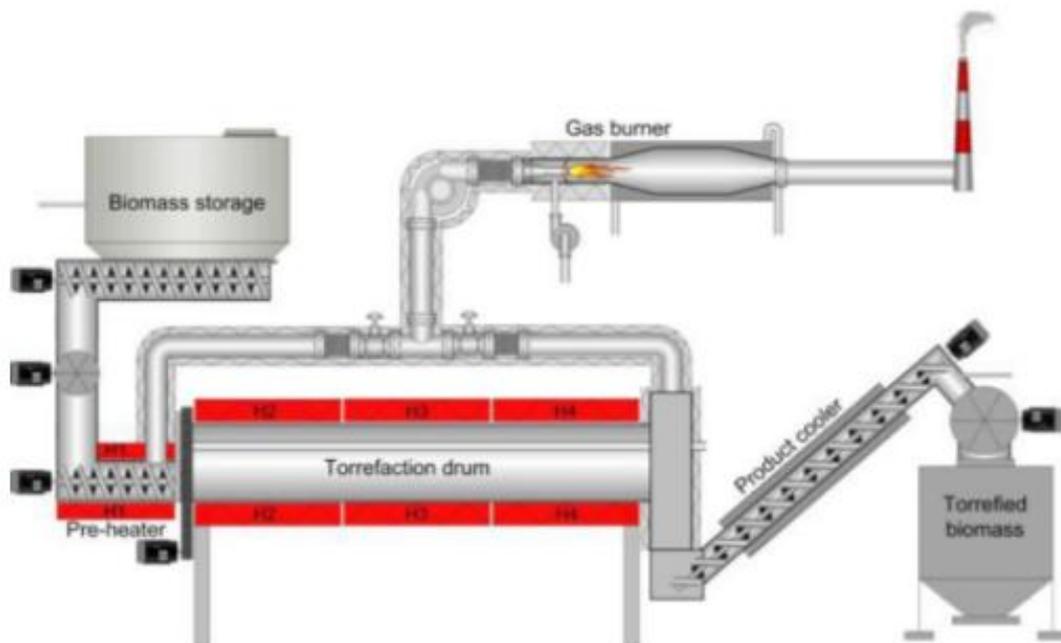


Figura 10.1.- Esquema de reactor de tambor rotatorio de la empresa BioEndev (Suecia) [60]

Este tipo de reactores ofrecen una gran versatilidad en cuanto al tamaño de partícula de alimentación. Se supone, en este caso y tal y como los tamaños obtenidos por la trituradora, de entre 15 y 20 mm.

Este tipo de reactor permite utilizar combustibles que contengan oxígeno. Además, los volátiles generados no se diluyen con gas (como pasaría en un reactor de calentamiento directo), por lo que pueden ser aprovechados para su uso como combustible para secar la biomasa destinada al proceso de torrefacción en un secador de tipo tambor rotatorio.

Se deberá tener en cuenta que exista una óptima transferencia de calor desde las paredes del reactor a las partículas de biomasa.

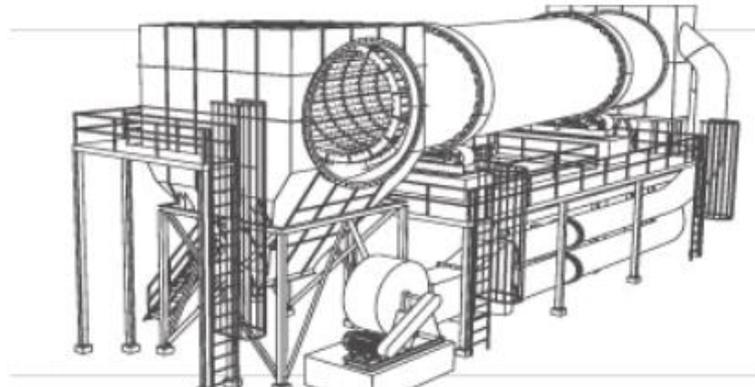


Figura 10.2.- Reactor de tambor rotatorio [59]

En el reactor es introducido nitrógeno (N_2), creando así un ambiente inerte. Además existirá una ligera presión en el interior, para evitar que entre el aire, tanto en el reactor, como en el quemador.

El quemador, calentará el fluido caloportador, encargado de transferir el calor a las paredes del reactor. Éste mantendrá su movimiento rotativo, lento (aproximadamente 2.9 rpm), de manera que en su interior, la biomasa entrará en contacto con la superficie caliente [25].

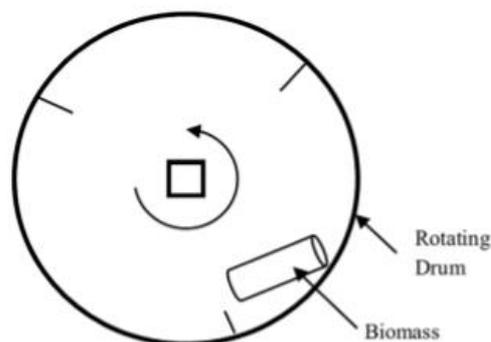


Figura 10.3.-Sección esquematizada del tambor rotativo [25]

El reactor debe suministrar el calor requerido, teniendo en cuenta el tamaño de partícula de la biomasa, que en este caso es pequeño, y por lo tanto el tiempo de residencia en el reactor será relativamente pequeño.

La elección de este reactor se ha basado también en la tecnología realmente disponible y en los desarrolladores de ésta, ya que supone el tipo que cuenta con más organismos implicados en su progreso:

Tabla 10.2.- Organismos desarrolladores de tecnologías de torrefacción [59]

Tipos de reactores	Empresas y organismos de investigación involucrados en su desarrollo
Rotativo	CDS (UK), Torr-Coal (NL), BIO3D (FR), EBES AG (AT), 4Energy Invest (BE), BioEndev/ ETPC (SWE), Atmosclear S.A. (CH), Andritz, EarthCare Products (USA)
Tipo tornillo	BTG (NL), Biolake (NL), FoxCoal (NL), Agri-tech Producers (US)
Horizontal de eje rotativo	LIST (CH)/CENER(ES)
Reactor de platos múltiples	CMI-NESA (BE), Wyssmont (USA)
Reactor torbed	Topell (NL)
Reactor microondas	Rotawave (UK)
Lecho móvil	Andritz/ECN (NL), AREVA(FR), Buhler (D), NewEarth Eco Technology (USA)
Reactor de banda	Stramproy (NL), Agri-tech producers (USA)

10.4.1 Superficie de contacto

Como se ha mencionado, se debe dar una óptima transferencia de calor entre las paredes del reactor y las partículas de biomasa, ya que principalmente, la transferencia de calor se produce de esta forma.

Se hace necesario tener en cuenta el régimen de circulación del gas que produce una atmósfera inerte (nitrógeno), puesto que puede restar eficacia al proceso de transferencia de calor en el interior del reactor.

Por tanto, el diseño del reactor debe garantizar una transferencia de calor exacta teniendo en cuenta la introducción de la corriente de nitrógeno.

10.4.2 Sistema de fluido térmico

Como se ha mencionado anteriormente, el recipiente del reactor se calentará de manera indirecta mediante aceite térmico como fluido caloportador. Esto es lo que se denomina sistema de calentamiento por fluido térmico.

Éste consta de:

- Quemador: en el que se puede usar cualquier tipo de combustible
- Bomba de recirculación del aceite térmico
- Tanque de expansión del aceite térmico
- Controlador lógico programable y sistema del control del quemador



Figura 10.4.- Sistema de fluido térmico [26]

Las características del aceite térmico son las siguientes:

- Alta estabilidad
- Resistencia a la oxidación
- Intervalo de viscosidad pequeño
- Viscosidad adecuada
- Presión de vapor adecuado
- Elevado poder anti-espumante y de separación del aire

La potencia suministrada por este sistema varía entre 146,5 kW y 21 MW, con rendimientos de entre el 88 y el 93%.

10.5 Parámetros de diseño del reactor

10.5.1 Temperatura de torrefacción

Tabla 10.3.- Rangos de temperatura sugeridos por diferentes investigadores [1]

Researchers	Temperature Range (°C)
Arias et al. (2008)	220–300
Chen and Kuo (2010), Prins (2005), Zwart et al. (2006)	225–300
Pimchuai et al. (2010), Prins et al. (2006)	230–300
Bergman et al. (2005), Tumuluru et al. (2011a), Rousset et al. (2011), Sadaka and Negi (2009)	200–300

Tal y como se aprecia en la tabla, la temperatura tiene un efecto directo en dos de los parámetros más importantes del proceso: rendimiento másico y rendimiento energético.

Se puede observar que ambos valores son más elevados en temperaturas comprendidas entre 200 y 300°C.

Basándose en plantas piloto e investigaciones publicadas se establecerá una temperatura de torrefacción a la cual se desarrollará el proceso, de 250°C.

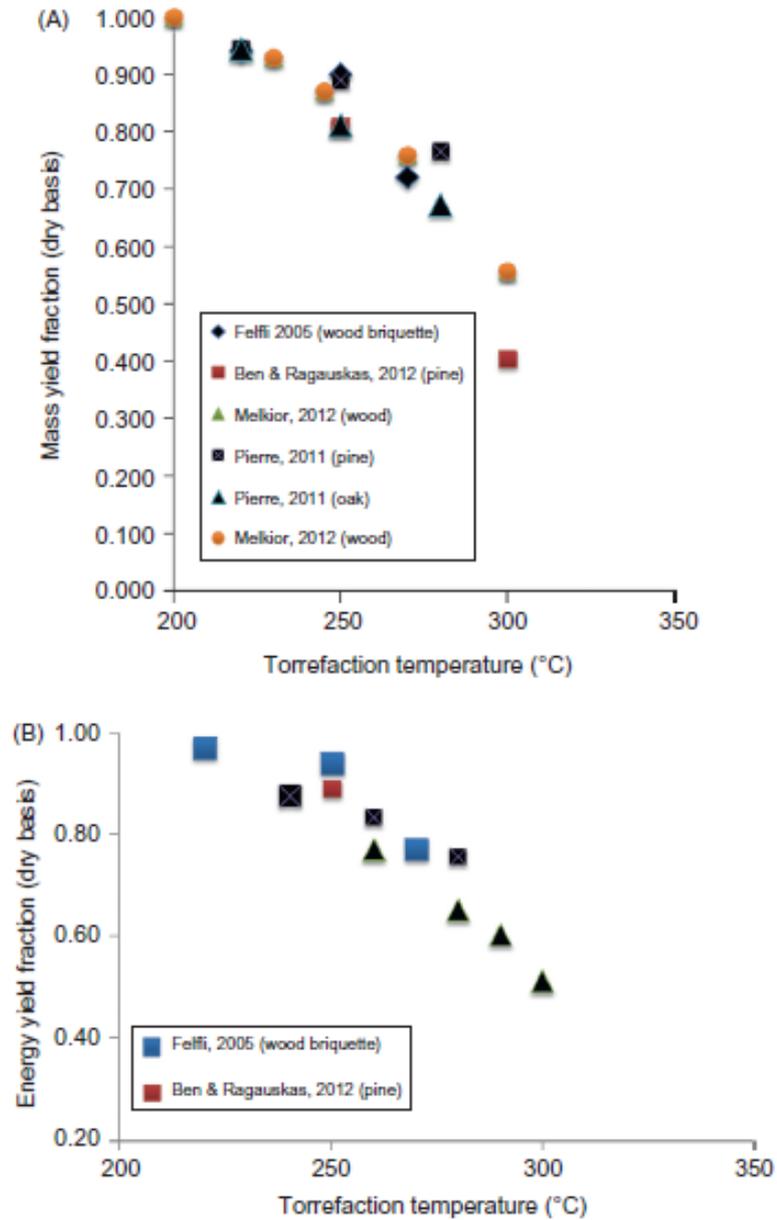


Figura 10.4.- (A) rendimiento másico de la torrefacción disminuye con la temperatura. (B) Rendimiento energético de la torrefacción disminuye con la temperatura [27]

10.5.2 Tiempo de residencia

Se ha explicado con anterioridad la importancia del tiempo en que la biomasa se encuentra dentro del reactor.

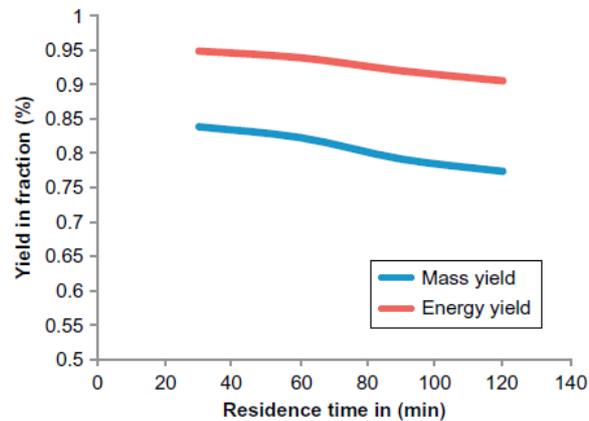


Figura 10.5.- Efecto del tiempo de residencia en la biomasa (madera de 25 mm de diámetro y 76 mm de largo) durante la torrefacción [1]

Para este caso se realizará una torrefacción del material de 40 minutos dentro del reactor.

10.5.3 Tamaño de partícula

La transferencia de calor varía en función del tamaño de la partícula, y por tanto varían también las reacciones que se van a producir en ella.

El rendimiento másico aumenta a medida que aumenta la longitud, manteniéndose el diámetro constante.

Todo ello es afectado por la convección del calor del reactor a la superficie de la biomasa, la conducción del calor al interior de la partícula y las reacciones que se den dentro de ella.

Las características de la transferencia de calor interno y externo, así como la cinética de las reacciones se basan en tres números adimensionales:

- ❖ Número de pirolisis interna, P_i : establece una relación entre el tiempo de reacción y el tiempo de conducción.

$$P_i = \frac{k}{\rho c \tau^2 r}$$

k : Conductividad térmica (W/m·K)

ρ : densidad (kg/m³)

c: calor específico (J/kg·K)

τ^2 : mitad del espesor de la partícula (m)

r: ratio de reacción (s⁻¹)

- ❖ Número de Biot, B_i : indica el ratio de la convección de calor en la superficie externa y la conducción en el interior.

$$B_i = \frac{hV}{\lambda S} \sim \frac{hr_p}{\lambda}$$

V: Volumen de la partícula (W/m·k)

S: superficie externa de la partícula

H: coeficiente de convectividad de la partícula

r_p : radio de la partícula

λ : coeficiente de conductividad térmica de la partícula

- ❖ Número de pirolisis externa, P_e : indica la relación entre la transferencia de calor externa con respecto a la cinética química de la reacción.

$$P_e = P_i * B_i$$

El control cinético más favorable se obtiene para un valor del número de Biot inferior a 1. [28]

Además, para tamaños de partícula mayores el tiempo de reacción debe ser mayor [29] Para partículas de alrededor de 15 mm, el número de Biot es inferior a la unidad, y dado que el reactor escogido de tipo tambor rotatorio ofrece una gran versatilidad en cuanto al tamaño de partícula aceptado, teniendo en cuenta también la capacidad de la trituradora, las partículas tendrán un tamaño de entre 15 y 20 mm.

Se instalará un molino de cuchillas, tal y como se especifica en el apartado 8.6.

10.5.4 Design Input

En la tabla a continuación se muestran los parámetros de diseño del reactor de torrefacción:

Tabla 10.4.-Parámetros de entrada al reactor

Parámetros de entrada del reactor	
Capacidad (kg/h)	228
Rendimiento másico (%)	80
Humedad de la biomasa (%)	0
Cenizas (%)	3,2

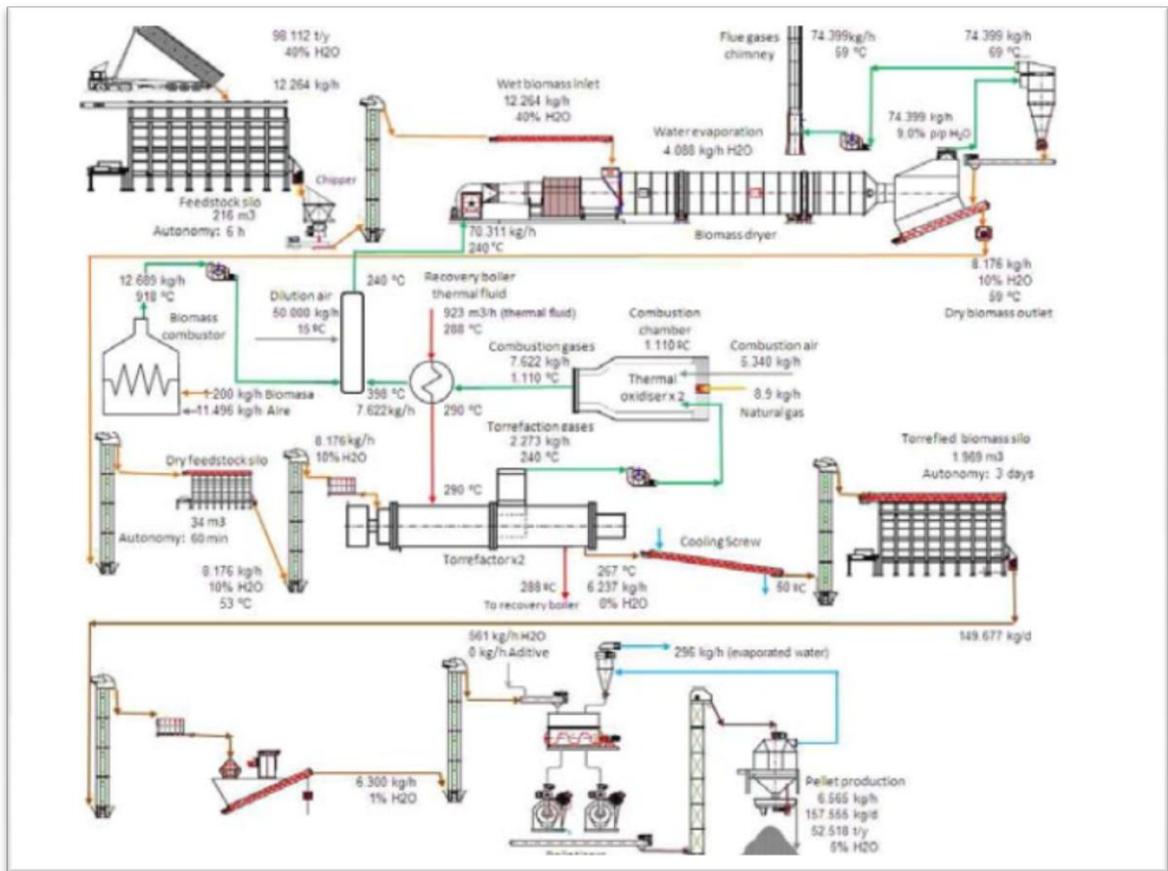


Figura 10.6.-Esquema de proceso de planta de torrefacción (CENER)

10.5.5 Rendimiento energético (Energy yield)

El rendimiento energético indica qué cantidad de la energía contenida en el material original permanece tras el proceso de torrefacción. Parte del contenido de esta energía es perdido. Sin embargo, aumenta la densidad energética, lo que supone un importante ahorro en el uso de este material como combustible.

Rendimiento energético (energy yield), $EY = \frac{\text{energía contenida en el producto torrefactado}}{\text{energía contenida en el material inicial}}$

Atendiendo a las dos características anteriormente explicadas de temperatura y tiempo de torrefacción, se observa mediante las figuras 10.5.1.1 y 10.5.2.1 que se obtendrá un rendimiento energético del 90%.

10.5.6 Rendimiento másico (Mass yield)

El rendimiento másico establece qué cantidad de char sólido se obtiene del componente orgánico de la biomasa a torrefactar.

Es por eso que la forma más precisa de expresarlo sería en base seca y libre de cenizas, aunque de esta manera solo obtendríamos el residuo orgánico y no el producto sólido obtenido, por lo que se puede expresar también en base seca:

Rendimiento másico (mass yield), $MY_{db} = \frac{\text{masa de biomasa obtenida tras la torrefacción en base seca}}{\text{masa de la biomasa original en base seca}}$

Atendiendo a las figuras para una temperatura de 250°C y un tiempo de residencia de 40 minutos, el rendimiento másico que se obtiene es del 80%.

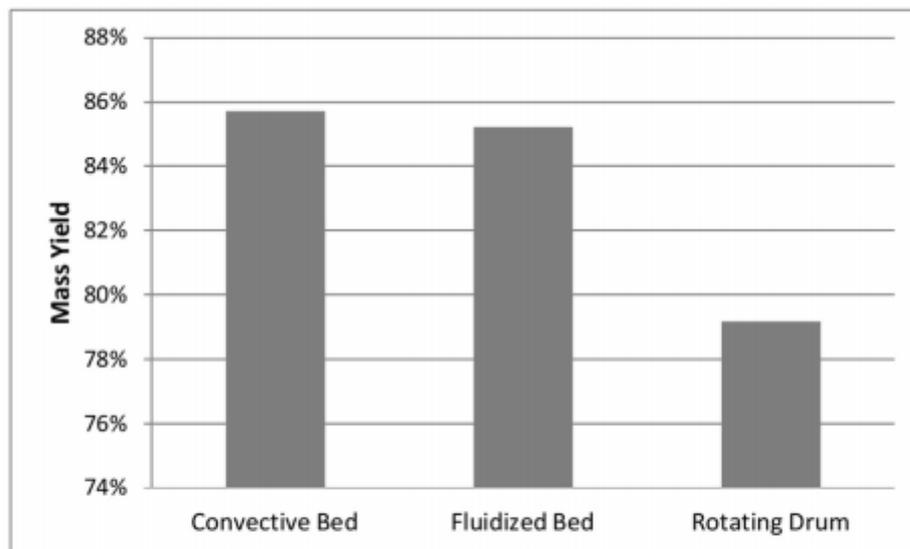


Fig. 6 Mass yield of 25.4 mm diameter poplar cylinder torrefied at 250°C for 60 min

Figura 10.7.- Rendimiento másico para partículas de 25.4 mm torrefactadas a 250°C [25]

Por tanto, el 20% del material introducido en el reactor supone el origen de los gases de torrefacción que serán utilizados en el secadero de tambor rotatorio.

10.5.7 Balances de materia y energía

10.5.7.1 Balance de materia del reactor

La alimentación al reactor (W_f) será de 228 kg/h (0,06333 kg/s), con lo que se obtiene la siguiente corriente de salida (W_t)

$$W_f = \frac{W_t * (1 - M' - ASH')}{MY_{daf} * (1 - M - ASH)}$$

Donde:

W_f : corriente de entrada al reactor (0.06333 kg/s)

W_t : corriente de salida

M' : contenido en humedad tras la torrefacción (0%)

ASH' : contenido en cenizas tras la torrefacción⁶ (3.6 %)

MY_{daf} : Rendimiento másico en base seca y libre de cenizas

M : contenido en humedad previa a la torrefacción (0%)

ASH : contenido en cenizas previo a la torrefacción (3.2%)

El rendimiento másico en base seca es de:

$$MY_{daf} = \frac{MY_{db} - ASH}{1 - ASH} = \frac{0.80 - 0,032}{1 - 0,032} = 0,7933 \rightarrow 79,33\%$$

Por tanto, la corriente de salida de producto sólido torrefactado será:

$$0,06333 \frac{kg}{s} = \frac{W_t * (1 - 0,036)}{0,7933 * (1 - 0,032)}$$

$$W_t = 0,05 \frac{kg}{s}$$

$$W_t = 0,05 \frac{kg}{s} * 3600 \frac{s}{h} = 180 \frac{kg}{h}$$

⁶ Se explica en el apartado 11.1.1.

Ya que el rendimiento másico es del 80%, el restante 20% del sarmiento introducido origina gases de torrefacción:

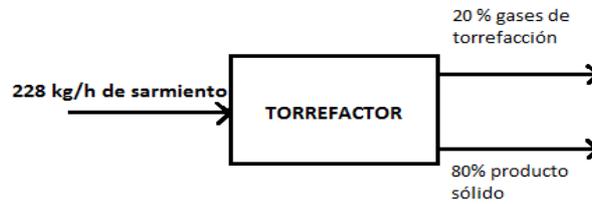


Figura 10.8.- Balance de materia del reactor de torrefacción

$$\text{Producción de gases de torrefacción} = 228 \frac{\text{kg}}{\text{h}} * 0.2 = 45,6 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \text{ de gases de torrefacción}$$

De los 45,6 kg de gases que se producen a la hora, el 19.3% es CO (apartado 11.3), cuya densidad es de $1,14 \text{ kg/m}^3$, por tanto:

$$0,193 * 45,6 \frac{\text{kg}}{\text{h}} * \frac{1 \text{ m}^3}{1,14 \text{ kg}} = 7,72 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \text{ de CO}$$

En el apartado 11.3 también se deduce que el poder calorífico del gas de torrefacción obtenido es de $2,38 \text{ MJ/m}^3$, por lo que podemos obtener:

$$7,72 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \text{ de CO} * 2,38 \frac{\text{MJ}}{\text{h}} = 18,37 \frac{\text{MJ}}{\text{h}} = 18.370 \frac{\text{kJ}}{\text{h}}$$

$$\text{Energía susceptible de aprovechamiento del gas de torrefacción} = 18.370 \frac{\text{kJ}}{\text{h}} * \frac{1 \text{ kcal}}{4,18 \text{ kJ}} = 4394 \frac{\text{kcal}}{\text{h}}$$

10.5.7.2 Balance de energía

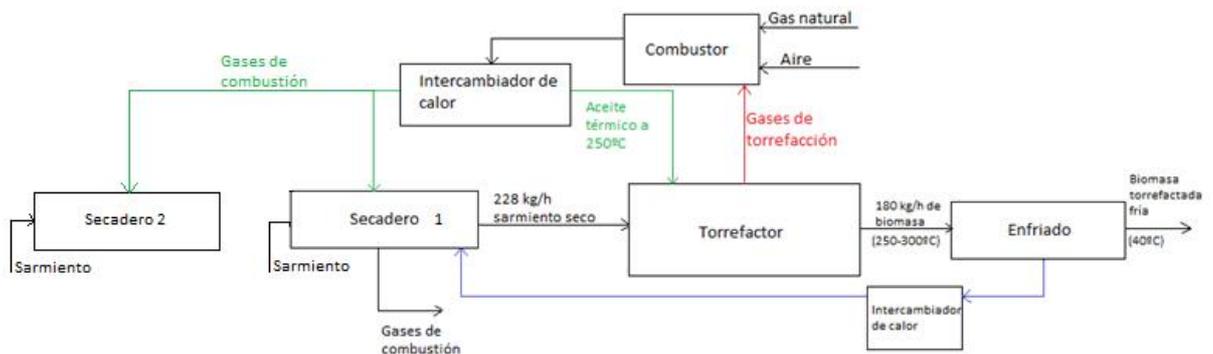


Figura 10.9.- Balance de energía del proceso

Para proporcionar la temperatura necesaria al reactor, se necesitarán 25 m³/h de aceite térmico (aproximadamente 17.500 kg/h de acuerdo a su densidad), que se calentará desde una temperatura de 20°C hasta los 250°C requeridos.

El calor que hay que aplicarle al aceite (Q requerido) para conseguir esa temperatura es la siguiente:

$$Q \text{ requerido} = c_p * m_{\text{aceite}} * (T_{\text{final}} - T_{\text{inicial}})$$

Donde: c_p : calor específico del aceite (0,45 kcal/kg°C, a 20°C)

m_{aceite} : Masa de aceite (17.500 kg/h)

T_{final} : Temperatura final del aceite (250°C)

T_{inicial} : Temperatura inicial del aceite (20°C)

Por tanto, el calor que se debe aportar es el siguiente:

$$Q \text{ requerido} = 0,45 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}^\circ\text{C}} * 17.500 \frac{\text{kg}}{\text{h}} * (250 - 20)^\circ\text{C} = 1.811.250 \frac{\text{kcal}}{\text{h}} = 433 \frac{\text{MJ}}{\text{h}}$$

Puesto que el gas de torrefacción proporciona 18,37 MJ/h, será necesario un abastecimiento de gas natural (PCI de 40.47 MJ/m³) de 414,63 MJ/h, es decir, 10,2 m³/h de gas natural, o 7,17 kg/h.

Para garantizar un óptimo funcionamiento del intercambiador de calor, se instalará un filtro de partículas en el conducto de salida de los gases del combustor.

Tabla 10.5.- Balance de materia y energía para diferentes parámetros del proceso de torrefacción [56]

Torr temp.	Time	Mass yield ¹	Energy yield	torrefied biomass	gas power ²	Torr heat use ³	Total Heat use ⁴	energy to steam ⁵	torrefied biomass ⁶	Total balance ⁷
°C	min	%	%	MJ/kg	MW	MW	MW	MW	MW	MW
230	20	0.87	0.92	19.08	0.892	-0.281	-1.846	-0.954	0.084	-0.870
	40	0.80	0.87	19.61	1.414	-0.281	-1.846	-0.432	0.078	-0.354
	60	0.75	0.83	20.05	1.838	-0.281	-1.846	-0.008	0.073	0.065
250	20	0.77	0.85	19.93	1.644	-0.298	-1.864	-0.220	0.083	-0.137
	40	0.65	0.76	21.07	2.612	-0.298	-1.864	0.748	0.071	0.819
	60	0.56	0.69	22.18	3.395	-0.298	-1.864	1.531	0.061	1.592
270	20	0.65	0.76	21.23	2.646	-0.316	-1.881	0.765	0.077	0.842
	40	0.47	0.62	23.94	4.206	-0.316	-1.881	2.325	0.056	2.381
	60	0.33	0.5	27.84	5.465	-0.316	-1.881	3.584	0.039	3.623
290	20	0.50	0.65	23.49	3.907	-0.334	-1.899	2.008	0.065	2.073
	40	0.24	0.44	32.77	6.202	-0.334	-1.899	4.303	0.032	4.335
	60	0.04	0.27	114.54	7.881	-0.334	-1.899	5.982	0.006	5.988

1) Based on bone dry biomass

2) Torrefaction gas power = produced gas mass \times ($h_g + \text{LHV}_g$)

3) The amount of required heat for torrefaction section (after drying)

4) Drying section requires 1.57 MW heat for 1 kg/s feedstock at efficiency of 60%

5) Net useful energy gained from torrefaction = useful heat of produced gas to steam cycle – heat demand of torrefaction reactor

6) Recovered heat from torrefied biomass for air preheating in steam boiler

7) The sum of 5 and 6

Calor necesario para el enfriado

El calor específico de la biomasa ya torrefactada se calcula de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$C_{pt} = -0,0038 * 10^{-3} * T^2 + 0,00598 * T - 0,795$$

Tabla 10.6.-Calor específico de la madera y el char procedente de madera [27]

TABLE 3.7 Specific Heat of Wood and Wood Char			
Reference	Fuel	Specific Heat in kJ/kg K	Validity (°C)
Ragland et al. (1991)	Dry wood	$C_{p,dry} = 0.1031 + 0.003867T$	
	Wet wood	$[(C_{p,dry} + 4.19M_{dry})/(1 + M_{dry})] + A$, where M_{dry} is moisture fraction on dry basis, T in K, and $A = (0.02355T - 1.32M - 6.191)M_{dry}$	
Ragland et al. (1991) ^a	Wood char	$1.39 + 0.00036T$	420–1720
Gupta, et al (2003) ^b	Softwood	$0.00546T - 0.524$	40–140
	Char from softwood	$-0.0038 \times 10^{-3}T^2 + 0.00598T - 0.795$	40–413
Simpson and Tenwolde (1999) ^c	Wood	$C_{p,dry} = 0.1031 + 0.003867T$	7–147°C
		$C_p = (C_{p,dry} + 4.19M)/(1 + 0.01M) + Ac$, where $Ac = M(-0.06191 + 2.36 \times 10^{-4}T - 1.33 \times 10^{-4}M)$	7–147
Jenkins (1989), p. 876	Various wood	$C_{p,dry} = 0.266 + 0.00116(T - 273)$	0–106°C
		$C_p = C_{p,dry}(1 - M_{wet}) + 4.19M_{wet}$, where M_{wet} is moisture fraction on wet basis	0–106

^aRagland, K.W., Aerts, D.J., Baker, A.J. (1991). *Properties of wood for combustion analysis Bioresource Technol.* 37, 161–168.
^bGupta, M., Yang, J., Roy, C. (2003). *Specific heat and thermal conductivity of softwood bark and softwood char particles. Fuel* 82, 919–927.
^cSimpson, W., Tenwolde, A. (1999). *Physical Properties and Moisture Relations of Wood (Chapter 3)* 3–17.

$$C_{pt} = -0,0038 * 10^{-3} * 523^2 + 0,00598 * 523 - 0,795 = 1,29 \frac{kJ}{kgK}$$

La temperatura del material torrefactado una vez enfriado será de 40°C (313 K).

Siguiendo la ecuación propuesta en el apartado 9.3.4 obtenemos:

$$Q_{cool} = 0,063 \frac{kg}{s} * (1 - 0) * 0,8 * 1,29 \frac{kJ}{kg * K} * (523 - 313)K = 13,65 \frac{kJ}{s} = 49,14 \frac{MJ}{h}$$

Este calor es recuperado para su aporte en el proceso de secado.

10.5.7.3 Dimensionamiento de la zona de torrefacción

El volumen de la zona de torrefacción será la siguiente:

$$V_{torr} = \frac{\tau * W_t}{\rho_{aparente}}$$

Donde:

τ : Tiempo de residencia (s)

V_{torr} : Volumen de la zona de torrefacción (m³)

W_t : Producción (capacidad) kg/s

$\rho_{aparente}$: Densidad aparente (kg/m³)

$$V_{torr} = \frac{40 \text{ min} * 60 \frac{\text{s}}{1 \text{ min}} * 0,05 \frac{\text{kg}}{\text{s}}}{198 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 0,6 \text{ m}^3$$

11 Características del producto de torrefacción obtenido⁷

11.1 Producto sólido

11.1.1 Poder calorífico de la biomasa tras el proceso de torrefacción

Partiendo de los siguientes datos de la materia prima utilizada del sarmiento de vid:

Tabla 11.1.- Características del sarmiento de vid crudo.

Características del sarmiento de vid	
Humedad, H (%)	9
Cenizas, ASH_{db} (%)	3.2
Hidrógeno	5.44
Poder calorífico, PCS (MJ/kg)	16.51

Tabla 11.2.- Parámetros del proceso a tener en cuenta a la hora de calcular las características del producto sólido obtenido tras la torrefacción.

Parámetros del proceso	
Rendimiento energético (%)	90
Rendimiento másico (%)	80

El poder calorífico superior (PCS) en base seca (*daf*) y sin cenizas se calcularía de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$PCS_{daf} = PCS_{db} * \frac{1}{(1 - ASH)}$$

De acuerdo a esto obtenemos:

$$PCS_{daf} = 16,51 \frac{MJ}{kg} * \frac{1}{(1 - 0,032)} = 24,27 \frac{MJ}{kg}$$

El rendimiento másico (MY), en esta misma base es:

$$MY_{daf} = \frac{MY_{db} - ASH_{db}}{1 - ASH_{db}} = \frac{0,8 - 0,032}{1 - 0,032} = 0,79 \rightarrow 79\%$$

⁷ El proceso seguido para obtener toda la información sobre la biomasa torrefactada se ha realizado siguiendo el procedimiento contenido en [1]

El rendimiento energético, EY, no depende de la base en la que se exprese, por lo que:

$$EY_{db} = EY_{daf} = 90\%$$

Con los datos de PCS_{daf} , MY_{daf} y EY_{daf} , podemos obtener el poder calorífico del sarmiento de vid torrefactado, $PCS_{torrefact}$, de acuerdo a la siguiente relación:

$$EY_{daf} = MY_{daf} * \frac{PCS_{torrefact}}{PCS_{daf}}$$

Reorganizando esta ecuación podemos conocer el valor del poder calorífico superior del sarmiento torrefactado:

$$PCS_{torrefact,daf} = PCS_{daf} * \frac{EY_{daf}}{MY_{daf}} = 24.27 \frac{MJ}{kg} * \frac{0,9}{0,79} = 27,64 \frac{MJ}{kg}$$

➤ Contenido de cenizas en el sarmiento torrefactado

Tras el proceso no cambia el contenido en cenizas, pero disminuye la masa de la biomasa original, por lo que se modifica del porcentaje de las cenizas en el material ya torrefactado.

El contenido en ceniza en base húmeda es de 2,91%, como se indica a continuación:

$$ASH_{wt} = ASH_{db} * (1 - H) = 3,2 * (1 - 0,09) = 2,91 \%$$

El rendimiento másico en base húmeda se calcula de acuerdo a la siguiente expresión:

$$MY_{wt} = MY_{db} * (1 - H) = 80 * (1 - 0,09) = 72,8\%$$

Con estos datos podemos obtener el contenido en cenizas tras la torrefacción, $ASH_{torrefact}$:

$$ASH_{torrefact} = \frac{ASH_{wt}}{MY_{wt}} = \frac{0,0291}{0,79} = 0,0368 \rightarrow 3,68\%$$

De esta manera podemos obtener el poder calorífico de la biomasa torrefactada en base seca:

$$PCS_{torrefact,db} = PCS_{daf} * \frac{(1 - H - ASH)}{(1 - M)} = 27,64 \frac{MJ}{kg} * \frac{0, (1 - 0 - 0,0368)}{(1 - 0)} = 26,62 \frac{MJ}{kg}$$

➤ **Poder calorífico inferior del sarmiento torrefactado**

Conociendo el poder calorífico en base seca, podemos conocerlo también base húmeda (wt) según:

$$PCS_{torrefact,wt} = PCS_{torrefact,db} * (1 - H)$$

Como la humedad (H) de la biomasa torrefactada es 0%, el poder calorífico en base seca y en base húmeda tiene el mismo valor:

$$PCS_{torrefact,wt} = 26,62 \frac{MJ}{kg}$$

La relación entre el poder calorífico superior e inferior viene dado de la siguiente manera:

$$PCI = PCS * h_g * \left(\frac{9H}{100} - \frac{M}{100} \right)$$

Donde PCI es el poder calorífico inferior, PCS es el poder calorífico superior, H es el porcentaje hidrógeno en este caso, y M es el porcentaje de humedad.

h_g es el calor latente del vapor, del que se toma el valor de $2260 \frac{kJ}{kg}$.

En base a investigaciones en plantas piloto, se conoce que para biomasa lignocelulósica con composición similar a la del sarmiento de vid, el contenido en hidrógeno se reducía [30], por lo que se tomará 4% como valor de referencia para calcular el PCI del producto obtenido tras la torrefacción:

$$PCI = 26620 \frac{kJ}{kg} - 2260 \frac{kJ}{kg} * \left(\frac{4 * 9}{100} - \frac{0}{100} \right) = 25.806,4 \frac{kJ}{kg} \rightarrow 25,80 \frac{MJ}{kg}$$

Tabla 11.3.- Propiedades de pino torrefactado [30]

biomass ^a	T	time	C	N	H	O	CV	$\frac{CV_g}{CV_b}$ ^c	Energy recovery	H/C atomic Ratio ^f	O/C atomic Ratio ^g
	°C	hour	wt% maf ^d	wt% maf ^d	wt% maf ^d	wt% maf ^d					
Pine, raw	raw	raw	47.9	6.5	0.07	45.53	18.10			1.63	0.71
Pine	230	1	48.7	6.3	0.08	44.92	18.19	1.00	0.96	1.55	0.69
	230	2	48.9	6.3	0.08	44.72	18.29	1.01	0.95	1.55	0.69
	250	1	50.0	6.0	0.09	43.91	18.37	1.02	0.95	1.44	0.66
	250	2	50.3	5.9	0.09	43.71	18.37	1.01	0.94	1.41	0.65
	280	1	52.5	5.6	0.09	41.81	19.00	1.05	0.92	1.28	0.60
	280	2	52.7	5.5	0.14	41.66	18.95	1.05	0.89	1.25	0.59

11.1.2 Densidad de la biomasa torrefactada

Como se explicó anteriormente, la densidad aparente de la biomasa torrefactada se reduce en un alto porcentaje.

Teniendo en cuenta las reducciones de densidad aparente experimentadas en otros tipos de biomasa (Tabla 9.2.- Cambios en la densidad durante la torrefacción), de entre el 20 y 40%, se estimará una reducción de la densidad aparente inicial, cuyo valor es de 198 kg/m³, del 30%:

$$\rho_{\text{biomasa torrefactada}} = 198 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * (1 - 0,3) = 138,6 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Tabla 11.4.- Propiedades de madera torrefactada, pellets de madera y pellets de madera torrefactada o TOP pellets [22]

Table 2.1 *Properties of wood, torrefied biomass, wood pellets and TOP pellets*

Properties	unit	Wood Torrefied biomass		Wood pellets		TOP pellets	
				low	high	low	high
Moisture content	% wt.	35%	3%	10%	7%	5%	1%
Calorific value (LHV)							
as received	MJ/kg	10,5	19,9	15,6	16,2	19,9	21,6
dry	MJ/kg	17,7	20,4	17,7	17,7	20,4	22,7
Mass density (bulk)	kg/m ³	550	230	500	650	750	850
Energy density (bulk)	GJ/m ³	5,8	4,6	7,8	10,5	14,9	18,4
Pellet strength		-	-		good		very good
Dust formation		moderate	high		limited		limited
Hygroscopic nature		water uptake	hydrofobic		swelling / water uptake		poor swelling / hydrofobic
Biological degradation		possible	impossible		possible		impossible
Seasonal influences (noticeable for end-user)		high	poor		moderate		poor
Handling properties		normal	normal		good		good

11.1.3 Propiedades químicas de la biomasa torrefactada

Ensayos en plantas piloto e investigaciones publicadas sobre el análisis elemental de la biomasa torrefactada determinan algunos de los parámetros a tener en cuenta a la hora de la producción de pellets, puesto que contenidos elevados en azufre o nitrógeno (aunque en este caso son muy bajas) son perjudiciales a la hora de la combustión en la caldera. La composición del sarmiento de vid, basándose en resultados de muestras con características similares a la del material de este estudio, es la siguiente:

Tabla 11.5.- Análisis elemental del sarmiento torrefactado

Características del sarmiento tras el proceso de torrefacción ⁸	
Carbono	50,2
Nitrógeno	3,8
Hidrógeno	4
Oxígeno	42
Azufre	0

11.1.4 Fusibilidad de las cenizas del material torrefactado

Debido al bajo contenido en componentes inorgánicos, la fusibilidad de las cenizas del sarmiento torrefactado no supondrá un problema durante su uso en calderas, ya que se estima una temperatura de fusibilidad de las cenizas de 1300 °C [31].

11.2 Densificación de la biomasa torrefactada: pelletización

11.2.1 Producción de pellets a partir de biomasa torrefactada

La producción de pellets torrefactados resulta idónea, ya que el coste de la capacidad de molienda se abarata considerablemente.

Sin embargo, hay que sumar el coste añadido del proceso de torrefacción de la biomasa. Generalmente, este proceso queda suplido en gran medida por el consumo de energía interno.

Esto hace que el proceso de reducción de tamaño para su posterior introducción a la pelletizadora resulte mucho más económico que el proceso de molienda y fabricación de pellets de biomasa sin torrefactar.

11.2.2 Densidad energética

El contenido energético no cambia durante el pelletizado, por lo que el poder calorífico superior seguirá siendo $26,62 \frac{MJ}{kg}$.

➤ Densidad energética del sarmiento de vid torrefactado

La densidad energética será calculada como:

$$EV = PCS * \rho$$

Por lo que la densidad energética de la biomasa torrefactada es:

⁸ Información obtenida basándose en las modificaciones en la composición de madera de pino tras el proceso de torrefacción.

$$EV_t = 26,62 \frac{MJ}{kg} * 138,6 \frac{kg}{m^3} = 3.689,53 MJ/m^3$$

➤ **Densidad energética del sarmiento de vid torrefactado pelletizado**

Teniendo en cuenta estudios publicados e investigaciones en plantas piloto, se estimará una densidad de pellet de biomasa torrefactada de 850 kg/m^3 , por lo que la densidad energética por unidad de volumen de los pellets de biomasa de poda de vid torrefactada es la siguiente:

$$EV_{t,pellet} = 26,62 \frac{MJ}{kg} * 850 \frac{kg}{m^3} = 22,62 GJ/m^3$$

11.2.3 Incremento del aumento de la densidad energética

➤ **Densidad energética del sarmiento de vid crudo**

Para hallar la densidad energética de la biomasa de poda de vid inicial, se tiene en cuenta la humedad existente en ella, con lo que el PCS_{wt} (base húmeda o *wet basis*) es el siguiente:

$$PCS_{wt} = PCS_{db} * (1 - H) = 16,51 \frac{MJ}{kg} * (1 - 0,09) = 15,02 \frac{MJ}{kg}$$

Se procede a calcular la densidad energética del sarmiento de vid de la misma manera que anteriormente, para la densidad del residuo de poda de vid (198 kg/m^3):

$$EV_{biomasa\ cruda} = 15,02 \frac{MJ}{kg} * 198 \frac{kg}{m^3} = 3.136,32 MJ/m^3$$

➤ **Densidad energética del sarmiento de vid crudo pelletizado**

La densidad de pellet de sarmiento ha sido obtenida a partir del [32] y los datos técnicos proporcionados por la empresa [33], para las cuales la densidad obtenida era de 716 kg/m^3 y 639.58 kg/m^3 respectivamente.

Puesto que el sarmiento objeto de este trabajo y el de la muestra de *Isabel González-Barragán* [32] proceden de la misma zona geográfica, se escogerá el valor de 716 kg/m^3 . Para este valor, el PCS del pellet es de 17.22 MJ/kg .

Su densidad energética es la siguiente:

$$EV_{biomasa\ cruda\ pelletizada} = 17,22 \frac{MJ}{kg} * 716 \frac{kg}{m^3} = 12,32 GJ/m^3$$

➤ Incremento de la densidad energética

Tabla 11.6.- Densidad energética por unidad de volumen y Densidad energética por unidad de masa del sarmiento crudo y del sarmiento torrefactado.

Parámetro	Sarmiento crudo	Sarmiento torrefactado	Pellet de sarmiento crudo	Pellet de sarmiento torrefactado
Densidad (kg/m ³)	198	138,6	716	850
Densidad energética por unidad de volumen, MJ/m ³	3.136,32	3.689,53	12.320	22.620
Densidad energética por unidad de masa, MJ/kg	15,02	26,62	17,22	26,62

El incremento de la densidad energética es:

$$\text{Incremento de la densidad energética en base al material original} = \frac{22.620 - 3136,32}{3136,32} = 6,21$$

$$6,21 * 100 = 621\%$$

Se ha producido un incremento de la densidad energética del 621% en base al material original.

11.3 Producto gaseoso

Incluso habiendo llevado a cabo el proceso con biomasa seca, se obtiene un contenido de agua del 50% en el producto gaseoso. Contando además con que el contenido de CO₂ siempre resulta elevado, el gas de torrefacción contiene en torno al 60% (en base húmeda) de productos incombustibles.

Basándose en experimentos de torrefacción llevados a cabo con biomásas de características similares a la de la poda de vid, podemos estimar la siguiente composición del gas, teniendo en cuenta las variables del proceso (Temperatura = 250°C, tiempo de residencia = 40 minutos):

Tabla 11.7.-Composición del producto gaseoso (libre de nitrógeno y agua) [30], Universidad Politécnica de Catalunya

Producto gaseoso	% en volumen
CH ₄	0
C ₂	0,05
CO ₂	80,7
CO	19,3

En los experimentos llevados a cabo, el gas de torrefacción era enfriado y filtrado a la salida del reactor, y posteriormente, sometido a un estudio de cromatografía de gas para CO₂, CO, N₂, CH₄, etano, etileno y acetileno.

Tabla 11.8.- Composición de los productos gaseosos de diferentes tipos de biomasa en base libre de nitrógeno y agua [30]

Biomass	T °C	Time hour	CH ₄ vol %	C ₂ vol %	CO ₂ vol %	CO vol %
Pine	230	1	bdl	bdl	83.8	16.2
	230	2	bdl	bdl	82.6	17.4
	250	1	bdl	0.05	80.7	19.3
	250	2	0.05	0.07	79.8	20.1
	280	1	0.19	0.12	78.9	20.8
	280	2	0.19	0.16	77.9	21.7
Lucern	230	1	0.02	0.07	87.1	12.8
	230	2	0.04	0.07	86.9	13.0
	250	1	0.05	0.07	83.1	16.8
	250	2	0.06	0.07	80.8	19.0
	280	1	0.14	0.12	78.0	21.8
	280	2	0.21	0.16	75.5	24.1
Bagasse	230	1	bdl	0.05	84.4	15.5
	230	2	bdl	0.06	83.0	16.9
	230	3	0.2	0.08	81.1	18.6
	250	1	bdl	0.10	78.1	21.8
	250	2	bdl	0.10	77.1	22.8
	250	3	0.4	0.10	73.5	26.0
	280	1	0.1	0.06	78.1	21.7
	280	2	0.3	0.13	75.5	24.0
	280	3	0.8	0.17	71.0	28.0
Straw pellets	230	1	bdl	0.04	77.0	23.0
	230	2	bdl	0.05	76.2	23.8
	230	3	bdl	0.06	75.9	24.0
	250	1	0.08	0.07	73.2	26.7
	250	2	0.11	0.08	73.0	26.9
	250	3	0.12	0.15	72.7	27.0
	280	1	0.13	0.13	71.6	28.1
	280	2	0.15	0.35	71.0	28.5
	280	3	0.23	0.43	68.5	30.8
Wood pellets	230	1	bdl	0.05	78.7	21.25
	230	2	bdl	0.06	78.4	21.59
	230	3	0.22	0.07	75.4	24.29
	250	1	0.23	0.07	74.3	25.4
	250	2	0.28	0.08	72.3	27.3
	250	3	0.29	0.09	70.8	28.8
	280	1	0.34	0.09	70.2	29.4
	280	2	0.37	0.12	66.2	33.3
	280	3	0.52	0.15	64.5	34.9

El poder calorífico de los diferentes productos gaseosos se muestra a continuación:

Tabla 11.9.- Poder calorífico de productos gaseosos [29]

Gases	H ₂	CO	CO ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂	C ₃ H ₈	N ₂
HHV (MJ/Nm ³) ^a	12.74	12.63		39.82	70.29	63.41	58.06	101.24	
LHV (MJ/Nm ³) ^a	10.78	12.63		35.88	64.34	59.45	56.07	99.09	
Viscosity ^b (μP)	90	182	150	112	94	103	104	82	180
Thermal conductivity ^b (W/m K)	0.1820	0.0251	0.0166	0.0343	0.0218	0.0214	0.0213	0.0183	0.026
Specific heat ^b (kJ/kg K)	3.467	1.05	0.85	2.226	1.926	1.691	1.775	1.708	1.05
	C ₃ H ₆	i-C ₄ H ₈	i-C ₄ H ₁₀	n-C ₄ H ₁₀	C ₆ H ₆	NH ₃	H ₂ S		
HHV (MJ/Nm ³) ^a	93.57	125.08	133.12	134.06	142.89	13.07	25.10		
LHV (MJ/Nm ³) ^a	87.57	116.93	122.91	123.81	141.41	10.13	23.14		

^aData compiled from Waldheim and Nilsson (2001).
^bData compiled from Jenkins (1989, p. 887).

Considerando estos datos, se estima un PCI y un PCS de 2.38 MJ/Nm³, como se muestra:

$$LHV = HHV = 0.193 * 12.36 \frac{MJ}{Nm^3} = 2.38 \frac{MJ}{Nm^3}$$

11.3.1 Aprovechamiento del gas de torrefacción

El gas de torrefacción originado es aprovechado como combustible en el quemador para aportar al proceso la energía necesaria para calentar el aceite térmico. Asimismo, el gas de combustión también es recuperado y aprovechado tanto para el proceso de secado como el de torrefacción (apartado 10.5.7).

11.3.2 Gestión medioambiental de los gases de torrefacción

Los gases de torrefacción se componen principalmente de compuestos orgánicos volátiles (COV), que se caracterizan por su larga persistencia en el ambiente y por sus efectos tóxicos (pueden ser cancerígenos, dañan cultivos, etc.).

Estos compuestos no pueden ser emitidos a la atmósfera y, por tanto, es necesario realizar un tratamiento adecuado y adaptado a la normativa actual para cumplir con una correcta gestión medioambiental.

De acuerdo con el RD 1073/2002 sobre evaluación y gestión de la calidad del aire ambiente en relación con el dióxido de azufre, dióxido de nitrógeno, óxidos de nitrógeno, partículas, plomo, benceno y monóxido de carbono [30], quedan establecidos unos valores límite de estas sustancias en la atmósfera.

Existen tecnologías de tratamiento de COV, como la adsorción o los tratamientos biológicos (actualmente poco desarrollados), y otros, como la combustión, catalítica o térmica.

Dado que en este caso se va a realizar la combustión de los gases de torrefacción, se realiza una adecuada gestión medioambiental, cumpliendo con la normativa sobre emisiones.

12 Producto final: Pellet de mezcla de sarmiento torrefactado y sarmiento crudo

El producto final deseado que ha originado este estudio es un pellet producido a partir de la mezcla al 50% del sarmiento tras el proceso de torrefacción y de la materia prima cruda.

Tabla 12.1 Parámetros característicos de los pellets de sarmiento crudo y de sarmiento torrefactado

Parámetro	Pellet de sarmiento crudo ⁹	Pellet de sarmiento torrefactado
Densidad (kg/m ³)	716	850
Poder calorífico Superior (MJ/kg)	17,22	26,62
Poder calorífico inferior (MJ/kg)	15,96	25,8

A partir de estos datos conocemos las características del producto deseado:

$$\text{Densidad, } \rho_{\text{pelletz mezcla}} = 0,5 * 716 + 0,5 * 850 = 783 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Poder calorífico superior}_{\text{pellet mezcla}} = 0,5 * 17,22 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}} + 0,5 * 26,62 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}} = 21,92 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}}$$

$$\text{Poder calorífico inferior}_{\text{pellet mezcla}} = 0,5 * 15,96 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}} + 0,5 * 25,80 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}} = 20,88 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}}$$

Por tanto la densidad energética por volumen de masa es la siguiente:

$$EV_{\text{pellet mezcla}} = 21,92 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}} * 783 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 17,16 \frac{\text{GJ}}{\text{m}^3}$$

12.1 Análisis elemental

Teniendo en cuenta el % de los distintos componentes de ambas biomásas con las que se han formado los pellets (sarmiento sin torrefactar y sarmiento torrefactado), se estima la siguiente composición:

⁹ Según *Aprovechamiento energético de sarmiento en calderas de biomasa mediante pelletizado* [32].

Tabla 12.2.- Análisis elemental de los pellets de mezcla (producto final)

Análisis elemental de los pellets (producto final)	
Carbono (%)	49,3
Nitrógeno (%)	2,1
Hidrógeno (%)	4,73
Oxígeno (%)	43,87
Azufre (%)	0

12.2 Fusibilidad de cenizas

Como se explicó en apartado 0, la temperatura de fusibilidad de las cenizas de los pellets de mezcla de biomasa torrefacta y biomasa cruda será de 1300°C, lo que no supone un problema en cuanto a su uso ya que la temperatura de combustión se sitúa entre los 800 y 1000°C.

12.3 Propiedades de los pellets de mezcla

Tabla 12.3.-Propiedades de los pellets obtenidos como resultado de la mezcla de sarmiento tras el proceso de torrefacción y sarmiento crudo.

Parámetro	Pellet de mezcla de sarmiento con sarmiento torrefactado
Densidad (kg/m ³)	783
Poder calorífico superior (MJ/kg)	21,92
Poder calorífico inferior (MJ/kg)	20,88
Densidad energética (GJ/m ³)	17,16
Humedad (%)	4
Cenizas (%)	3
Fusibilidad de las cenizas (°C)	1300
Longitud (mm)	3,15-40
Diámetro (mm)	6-8
Fusibilidad de las cenizas (°C)	1300

Teniendo en cuenta que es necesario un porcentaje de humedad para facilitar el proceso de producción de pellets y dado que la biomasa de sarmiento crudo posee un porcentaje de humedad del 9%, la humedad de los pellets será del 4%, ya que la mezcla se realiza con un porcentaje del 50% de biomasa cruda.

Según establece la *Norma UNE-EN 14961-1* [34] y *UNE-EN14961-2* [35], la longitud de los pellets debe ser de entre 3.15 y 40 mm y un diámetro de entre 6 y 8 mm.

13 Logística del producto final

Tal y como se aclara en el apartado 8.7, tras la producción de pellets estos serán almacenados en silos hasta su posterior salida para distribuir a comercializadoras. Siguiendo los mismos pasos que los seguidos en el apartado Costes del proceso de logística, se procede a calcular el precio del transporte de pellet de sarmiento de vid crudo y pellet de mezcla.

13.1 Gestión de la calidad

Los controles de calidad llevados a cabo para garantizar el sello de certificación de pellets incluyen no solo las características del pellet, sino que cubren todo del proceso de obtención del producto, incluido el transporte.

Por ello los equipos de cargado, así como los silos, deben ser revisados y garantizar que no existe suciedad, ni que los pellets puedan quedar expuestos a humedad.

Los vehículos de transporte también deberán ser revisados y adecuados a los parámetros de calidad [36].

13.2 Costes de transporte de pellets de sarmiento

Dichos pellets tienen una densidad de 716 kg/m³, y se tomará una producción de 2880 t/año, con lo que obtenemos, según los datos de la tabla 8.1:

$$100 \text{ m}^3 \text{ camión} * \frac{716 \text{ kg}}{\text{m}^3} * \frac{1 \text{ t}}{1000 \text{ kg}} = 71,6 \text{ t transporta un camión}$$

$$3440 \frac{\text{t}}{\text{año}} * \frac{1 \text{ viaje}}{71,6 \text{ t}} \approx 43 \frac{\text{viajes}}{\text{año}}$$

Teniendo en cuenta un consumo del camión de 0,45 l/km y que el coste de un litro de gasóleo es de 1,09 €:

$$43 \frac{\text{viajes}}{\text{año}} * \frac{40 \text{ km}}{1 \text{ viaje}} * \frac{0,45 \text{ l}}{1 \text{ km}} * \frac{1,09 \text{ €}}{1 \text{ l}} = 843,66 \frac{\text{€}}{\text{año}} \text{ en combustible}$$

$$43 \frac{\text{viajes}}{\text{año}} * \frac{40 \text{ km}}{1 \text{ viaje}} = 1.720 \frac{\text{km}}{\text{año}}$$

$$\frac{20 \text{ €}}{1 \text{ h}} * \frac{8 \text{ h}}{\text{día}} * 20 \frac{\text{días}}{\text{mes}} * 6 \frac{\text{meses}}{\text{año}} = 19.200 \frac{\text{€}}{\text{año}} \text{ empresa transportista}$$

Por tanto, el coste total sería:

$$843,66 \frac{\text{€}}{\text{año}} \text{ combustible} + 19.200 \frac{\text{€}}{\text{año}} = 20.043,66 \frac{\text{€}}{\text{año}}$$

13.2.1 Emisiones de CO₂

En base al mismo criterio empleado en el se calculan las siguientes emisiones de CO₂:

$$\text{Emisiones de CO}_2 = 3 \frac{\text{kg}}{\text{l}} * 43 \frac{\text{viajes}}{\text{año}} * \frac{40 \text{ km}}{1 \text{ viaje}} * \frac{0,45 \text{ l}}{1 \text{ km}} = 2.322 \frac{\text{l}}{\text{año}} \text{ de CO}_2 \text{ emitidos}$$

13.3 Costes de transporte de pellets de mezcla de sarmiento crudo y sarmiento torrefactado al 50%

La densidad de los pellets de mezcla es de 850 kg/m³ y se produce un total de 2880 t/año:

$$100 \text{ m}^3 \text{ camión} * \frac{783 \text{ kg}}{\text{m}^3} * \frac{1 \text{ t}}{1.000 \text{ kg}} = 78.3 \text{ toneladas transporta un camión}$$

$$2.880 \frac{\text{t}}{\text{año}} * \frac{1 \text{ viaje}}{78,3 \text{ t}} \approx 37 \frac{\text{viajes}}{\text{año}}$$

Teniendo en cuenta un consumo del camión de 0.45 l/km y que el coste de un litro de gasóleo es de 1.09 €:

$$37 \frac{\text{viajes}}{\text{año}} * \frac{40 \text{ km}}{1 \text{ viaje}} * \frac{0,45 \text{ l}}{1 \text{ km}} * \frac{1,09 \text{ €}}{1 \text{ l}} = 725,94 \frac{\text{€}}{\text{año}} \text{ en combustible}$$

$$37 \frac{\text{viajes}}{\text{año}} * \frac{40 \text{ km}}{1 \text{ viaje}} = 1.480 \frac{\text{km}}{\text{año}}$$

$$\frac{20 \text{ €}}{1 \text{ h}} * \frac{8 \text{ h}}{\text{día}} * 20 \frac{\text{días}}{\text{mes}} * 6 \frac{\text{meses}}{\text{año}} = 19.200 \frac{\text{€}}{\text{año}} \text{ empresa transportista}$$

Por tanto, el coste total sería:

$$725.94 \frac{\text{€}}{\text{año}} \text{ combustible} + 19200 \frac{\text{€}}{\text{año}} \text{ empresa transportista} = 19.925,9 \frac{\text{€}}{\text{año}}$$

13.3.1 Emisiones de CO₂

Al igual que anteriormente:

$$\text{Emisiones de CO}_2 = 3 \frac{\text{kg}}{\text{l}} * 37 \frac{\text{viajes}}{\text{año}} * \frac{40 \text{ km}}{1 \text{ viaje}} * \frac{0,45 \text{ l}}{1 \text{ km}} = 1.998 \frac{\text{l}}{\text{año}} \text{ de CO}_2 \text{ emitidos}$$

14 Uso de pellets de mezcla de sarmiento torrefactado y sin torrefactar en calderas

14.1 Introducción

Actualmente, el estado del desarrollo de la tecnología para calefacción con biomasa ha aumentado, tanto técnica como ambientalmente, ya que en un década se han pasado de rendimientos de en torno al 60% al 90%, y se han disminuido las emisiones de CO₂ en gran medida.

Este tipo de instalaciones cuentan con apoyo desde las Administraciones Públicas, y suponen una medida a implantar de cara al objetivo 2020¹⁰. Asimismo, es de igual importancia el apoyo político a nivel regional o local, ya que fomentando el uso de biocombustibles se producen numerosas ventajas en el medio, no solo ambientales, sino socioeconómicas, ya que se activa la economía de la zona, se revaloriza el suelo y se crean numerosos puestos de trabajo.

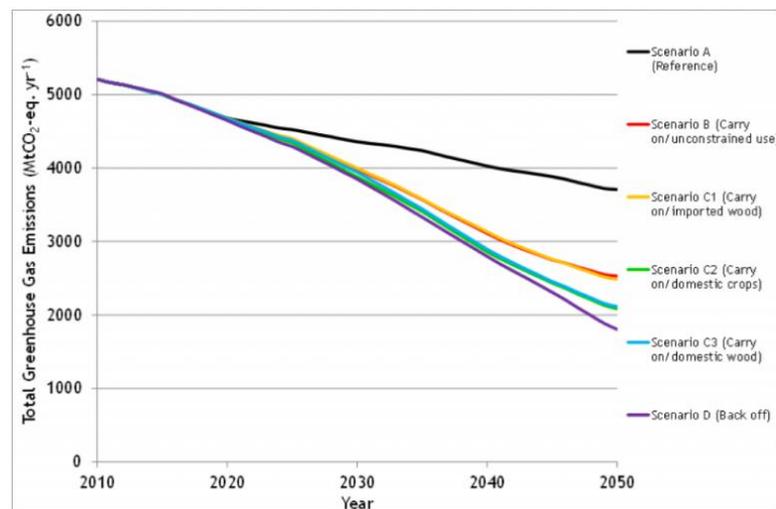


Figura 14.1.- Reducción de gases de efecto invernadero en distintos escenarios planteados para 6 escenarios de suministro y consumo de biomasa en la UE en el período 2010-2050 [37]

Una de las ventajas más importantes de la instalación de un sistema alimentado con biomasa es que este combustible no está sujeto a las fluctuaciones de precio como las producidas con los combustibles fósiles, además de que su precio es inferior.

¹⁰ Plan de Energías Renovables 2011-2020 por el que el Consejo Europeo estipula una cuota del 20% de generación de energía eléctrica mediante fuentes renovables

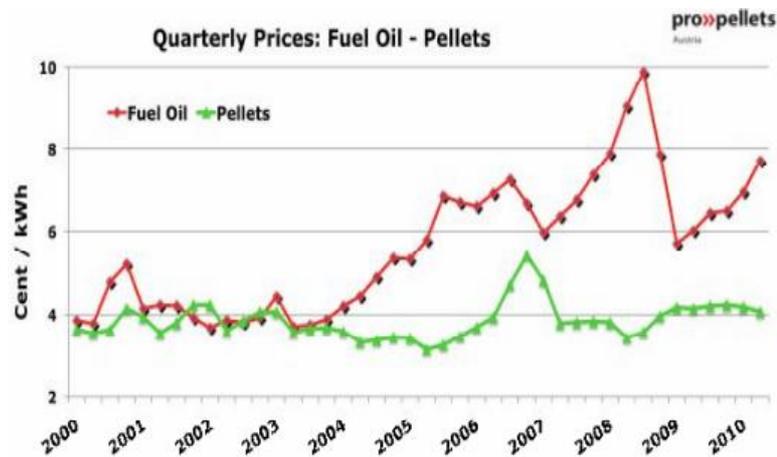


Figura 14.2.- Fluctuaciones de precios para Fueloil y para pellets [38]

Sin embargo, el precio de las calderas es más alto que el de una caldera convencional, y generalmente, precisan de otros factores, como mayor espacio de instalación, ya que se necesita almacenar un volumen mayor de combustible. Por otra parte, la inversión inicial superior al de otro tipo de instalación se recupera fácilmente gracias al ahorro generado por el uso de biomasa.

En cuanto a las emisiones producidas por las calderas alimentadas con biomasa, análisis llevados a cabo han demostrado que la diferencia de la producción de CO y NO_x emitida a la atmósfera es muy leve [39].

Es necesario considerar también los contaminantes emitidos en el proceso de logística de la biomasa, que en algunos casos supera los 300 km de distancia recorrida para su transporte.

Debido a sus ventajas, la instalación de calderas de biomasa en edificios públicos o privados se está extendiendo y cada vez es mayor el número de estos sistemas en el territorio nacional.

Según el *Observatorio Nacional de Calderas de Biomasa (ONCB)* [40], cada año se registran aproximadamente 30000 equipos, principalmente domésticos, de los cuales, entre el 60 y 70% utilizan pellet como combustible.

COMERCIO PELLET EN ESPAÑA

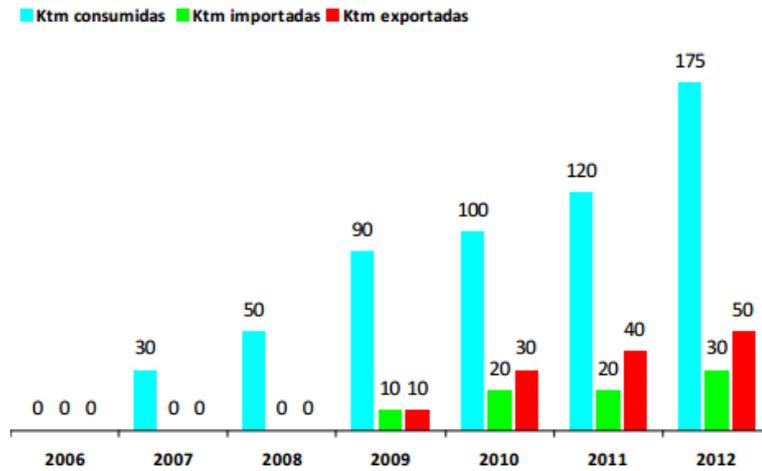


Figura 14.3.-Evolución del comercio del pellet en España [40]

14.1.1 Comparativa entre el uso de distintos tipos de combustibles

Se propone un ejemplo para analizar la diferencia de una casa aislada en una zona rural con una demanda energética de 102.079 kWh/año.

Teniendo en cuenta las características de cada combustible, el consumo de cada uno de ellos se muestra en la tabla a continuación:

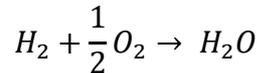
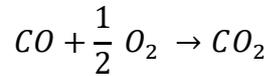
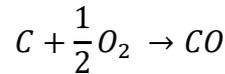
Tabla 14.1.- Comparativa de distintos tipos combustibles

Combustible	PCI (kWh/kg)	Consumo (kg/año)	Precio medio de combustible (€/kWh)	Coste anual (€/año)
Pellet	4.9	20832	0.055	5614
Gas natural	12.772	7992	0.066	6737
Propano	12.784	7985	0.119	12147
gasóleo	9.994	10214	0.096	9800

En la tabla 14.1.1.1 se aprecia el importante ahorro económico generado debido al uso de pellets como combustible.

14.2 Combustión de pellets

La combustión de combustibles sólidos se produce de acuerdo a las siguientes reacciones:



Las temperaturas que se emplean en la combustión de la pellets varían de 800 a 1000°C, por lo que la temperatura de fusibilidad de las cenizas y se produce en presencia de una cantidad de aire superior a la estequiométrica.

El aire de entrada es un parámetro muy importante ya que una cantidad insuficiente provoca la formación de monóxido de carbono y un elevado exceso de aire puede causar una temperatura muy baja del flujo de gas, con lo que no se quema todo el combustible.

- ❖ Aire primario y secundario: ya que es necesaria una correcta proporción de aire y combustible, se inyecta una parte del aire en la zona de combustión, aire primario, y otra parte en la zona de confluencia con los gases de combustión. El control de la entrada de aire se realiza principalmente mediante una sonda lambda (ver apartado 14.4.2).

Como productos, se obtienen energía en forma de calor y monóxido de carbono, dióxido de carbono, vapor de agua y óxidos de nitrógeno y azufre (aunque éste es mínimo, ya que el contenido en azufre es muy bajo), junto con otros inquemados en proporciones muy pequeñas [41].

Además de las emisiones gaseosas, se obtienen cenizas como residuo sólido.

Las cenizas generadas contienen un gran porcentaje de óxidos o hidróxidos metálicos, lo que hace que durante la combustión se produzcan aglomerados en el hogar o en los intercambiadores, reduciendo en gran medida el rendimiento de éstos, y aumentando, por tanto, el consumo de combustible.

14.3 Emisiones calderas

Es de obligado cumplimiento que las emisiones procedentes de la combustión cumplan la normativa o la legislación aplicable a cada región y los valores máximo permitidos en cada una de ellas.

Según el RD 430/2004 por el que se establecen nuevas normas sobre limitación de emisiones a la atmósfera de determinados agentes contaminantes procedentes de grandes instalaciones de combustión, y se fijan ciertas condiciones para el control de las emisiones a la atmósfera de las refineras de petróleo [42], los valores límites son:

- ❖ Valores límites de NO_x en mg/Nm^3 para combustibles sólidos:

Tabla 14.2.- Valores límites de NOx para combustibles sólidos [44]

Tipo de combustible	50 a 100 MW térmicos	100 a 300 MW térmicos	> 300 MW térmicos
Biomasa	400	300	200
Caso general	400	200 (1)	200

❖ Valores límites de SO₂ en mg/Nm³ para combustibles sólidos:

Tabla 14.3.- Valores límites de SO₂ para combustibles sólidos [44]

Tipo de combustible	50 a 100 MW térmicos	100 a 300 MW térmicos	> 300 MW térmicos
Biomasa	200	200	200
Caso general	850	200 (1)	200

❖ Valores límites de emisión de partículas en mg/Nm³ para combustibles sólidos:

Tabla 14.4.- Valores límites de emisión de partículas para combustibles sólidos [44]

Tipo de combustible	Potencia térmica nominal – (MW)	Valores límite de emisión – (mg/Nm ³)
Sólido	≥ 500 < 500	50 ⁽²⁾ 100
Líquido ⁽¹⁾	Todas las instalaciones.	50
Gaseoso	Todas las instalaciones.	5 como norma general, pero 10 para gas de altos hornos 50 para gases producidos por la industria siderúrgica que pueden tener otros usos.

Además, el Reglamento de Instalaciones Térmicas en Edificios (RITE) establece que el rendimiento de las calderas de biomasa debe ser superior al 75%.

Los valores de la temperatura de los gases de combustión a la salida de la chimenea deben ser de:

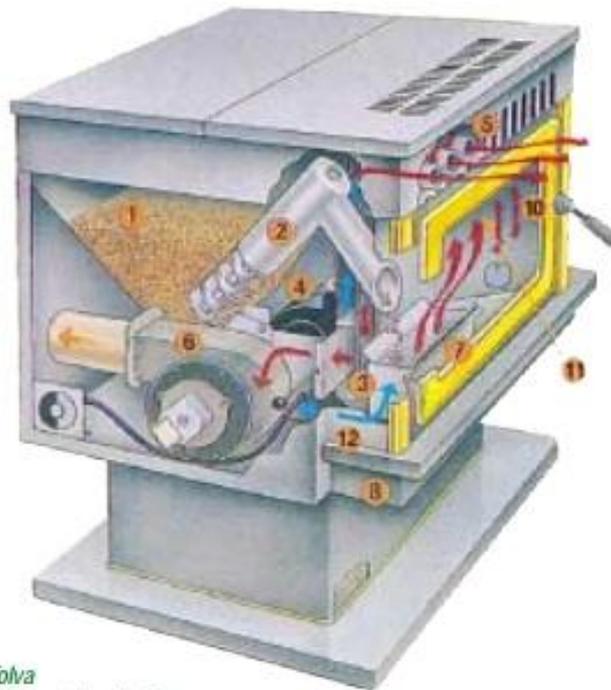
Tabla 14.5.- Temperatura de gases de la caldera [44]

Potencia la caldera	Temperatura de gases de combustión
10 kW	240°C
100 kW	230°C
1.000 kW	210°C

14.4 Caldera de biomasa

14.4.1 Tipos de calderas de biomasa

De manera general, las calderas de biomasa están diseñadas de manera compacta, para cualquiera de sus aplicaciones (viviendas, edificios públicos o privados e industrias).



1. Tolva
2. Alimentador sin fin
3. Aire de combustión
4. Ventilador convector
5. Intercambiadores de calor
6. Extractor de gases
7. Hogar de combustión
8. Recoge-cenizas
10. Recuperador de agua
11. Cortafuegos
12. Resistencia encendido automático

Figura 14.4.- Esquema típico de caldera de biomasa [43]

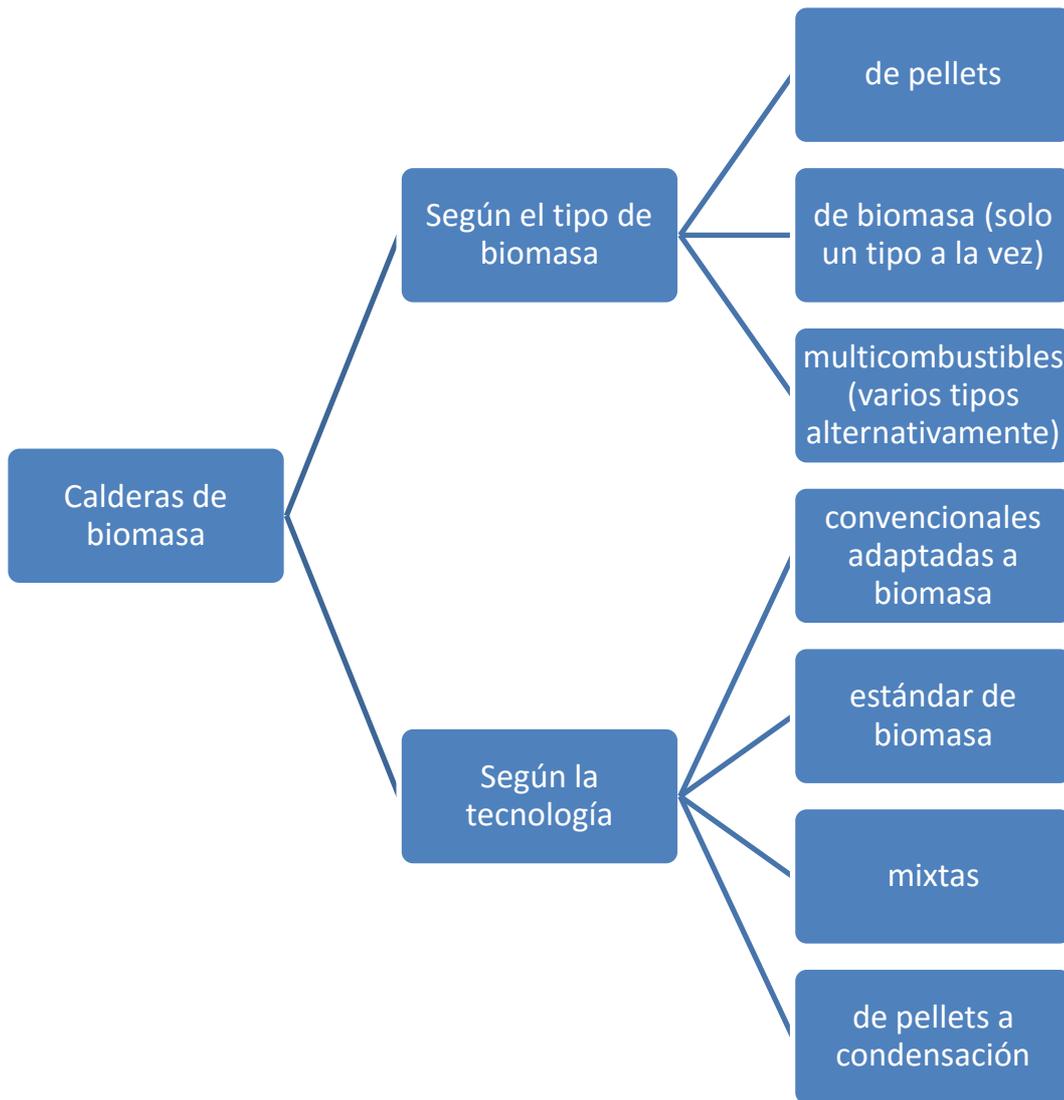


Figura 14.5.-Esquema de los tipos de calderas de biomasa [43]

Las calderas a condensación recuperan el calor latente de la condensación contenido en los pellets disminuyendo la temperatura de los gases de combustión hasta que el vapor de agua se condensa en el intercambiador, consiguiendo un ahorro de pellets del 15%.

Tecnología	Propiedades	Tipo de caldera	Comentarios
Calderas convencionales adaptadas para biomasa	Menor rendimiento (hasta 85%). Semi-automáticas	Calderas de gasóleo con quemador de biomasa	La potencia se reduce por la adaptación al uso de biomasa. La limpieza de la caldera no es totalmente automática
		Calderas adaptadas con quemador fijo o en cascada	La potencia se reduce por la adaptación al uso de biomasa. La limpieza de la caldera no es totalmente automática
Calderas estándar de biomasa	Alto rendimiento (hasta 92%). Automáticas	Calderas de biomasa con alimentador inferior	Calderas domésticas que únicamente pueden consumir pélets estándar. Equipos compactos. Aptas para combustibles con bajo contenido en cenizas (pélets, astillas, algunos biocombustibles agroindustriales)
		Calderas de biomasa con parrilla móvil	Aptas para biocombustibles con altos contenidos de humedad y cenizas. Se utiliza para potencias superiores a los 100 kW
Calderas mixtas	Alto rendimiento (hasta 92%). Automáticas	Todos	Permiten el uso alternativo de dos combustibles en función de las necesidades de cada situación. Precisan un almacenamiento y un sistema de alimentación de la caldera para cada combustible
Calderas a condensación	Máximo rendimiento (hasta 103% respecto al PCI). Automáticas	Calderas de biomasa con alimentador inferior	Aptas sólo para el uso de pélets. Baja potencia (< 70 kW)

Figura 14.6.- Clasificación de las calderas de biomasa [45]

14.4.2 Componentes de las calderas de biomasa

- ❖ Quemador: es el elemento en el que se quema el combustible y donde se produce calor. La biomasa es llevada con sistemas de transporte y gracias a un sistema de encendido automático se quema. El diseño típico de las calderas de biomasa es compacto, es decir, el quemador está integrado.

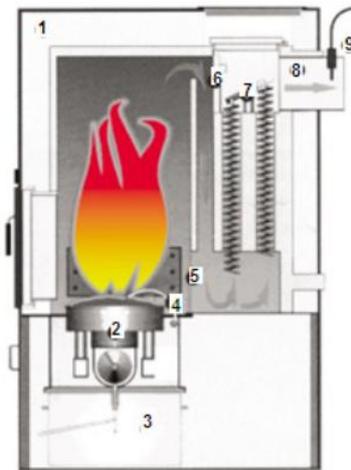


Figura 14.7.- Caldera de biomasa compacta. 1: caldera; 2: alimentador; 3: Cenicero; 4: protección contra desbordamiento; 5: limpiador de partículas; 6: intercambiador de calor; 7: rascadores; 8: Chimenea; 9: sonda [66]

El combustible puede permanecer sin quemar o *a medio* quemar en el quemador, lo que supone un problema al desperdiciar el combustible y restar eficiencia al proceso. Para evitarlo hay que garantizar la correcta eliminación de las cenizas,

que la entrada de aire no esté bloqueada por suciedad y que no existan fallos mecánicos o desperfectos en la caldera.

- ❖ Sistema de alimentación: en las calderas compactas el sistema de alimentación se denomina sistema de alimentación inferior, en el que un tornillo sinfín transporta la biomasa hasta el quemador y el plato de combustión

Cuando el diseño no es compacto, se distinguen tres tipos más de alimentación, además del de sistema inferior:

- Sistema de alimentación superior: los pellets son introducidos desde la parte de arriba, cayendo al hogar. La explosión es inestable y genera mayor cantidad de polvos e inquemados.
- Sistema de alimentación horizontal: parejo al de alimentación inferior, se puede establecer la dirección de llama hacia arriba o en horizontal.
- De parrillas fijas: se disponen varias parrillas escalonadas, de manera que los pellets caen de una a otra por gravedad. El rendimiento es elevado.

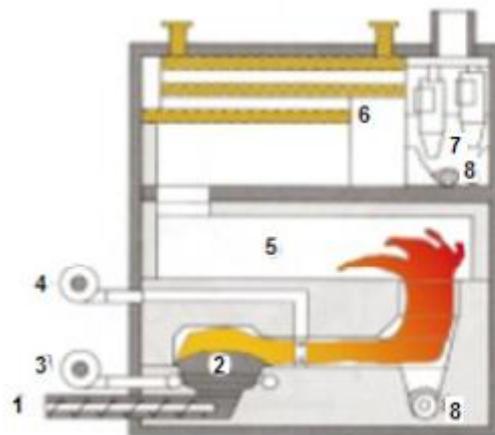


Figura 14.8.- Sistema de alimentación inferior. . 1: tornillo de alimentación; 2: biomasa; 3: aire primario; 4: aire secundario; 5: hogar; 6: intercambiador de calor; 7: ciclón; 8: cenicero [66]

Estractor sinfín con sistema rotativo

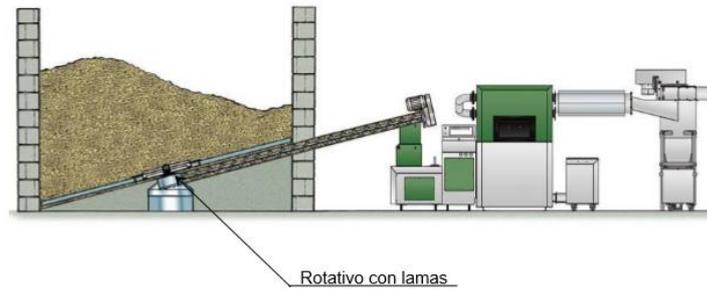


Figura 14.9.-Extractor de transporte de tornillo sinfín rotativo [43]

- ❖ Intercambiador de calor: la energía calorífica generada en la combustión es transferida a un circuito de agua mediante un conjunto de tubos y serpentines, generalmente en posición vertical, y de su diseño (área de intercambio) depende en gran medida el rendimiento y la transferencia de calor lograda. Es también de vital importancia la correcta limpieza de este dispositivo, que suele ser automática.



Figura 14.10.-Vista superior de un intercambiador vertical de calor con sistema de limpieza integrado en una caldera de biomasa [44]

- ❖ Sistema de evacuación de humos: los humos generados durante la combustión, tras pasar por un filtro de limpieza de partículas, son evacuados por la chimenea. Algunas calderas disponen de una sonda lambda que analiza las características de

los gases generados y en base a ellas, controla la entrada de aire primario, con el objetivo de maximizar el rendimiento de la combustión.

- ❖ Sistema de eliminación de cenizas: la evacuación de las cenizas puede realizarse de manera manual (en equipos pequeños principalmente), o de manera automática, mediante un tornillo sinfín, que transporta las cenizas desde la cámara de combustión donde han sido generadas hasta un depósito de cenizas, que se vacía manualmente.

En el depósito de cenizas existen, de manera habitual, sistemas de compactación, que facilitan el manejo y retirada de éstas.

De igual modo, se fabrican calderas de biomasa con sensores que indican el porcentaje de llenado del depósito de cenizas, de manera que si éste está completamente lleno, proceden al apagado de la caldera (una depósito de cenizas lleno puede producir daños o problemas en el tornillo sinfín de la retirada de cenizas o problemas mecánicos).



Figura 14.11.-Sistema de depósito de cenizas [45]

- ❖ Sistemas de seguridad
 - Interruptor de flujo: interrumpe el paso del fluido en el interior de la caldera
 - Dispositivo de interrupción de funcionamiento del sistema de combustión: detiene la combustión si se alcanzan temperaturas superiores a las de diseño.
 - Dispositivo contra el retroceso de llama: impide el retroceso de la llama desde la caldera hacia el silo de almacenamiento. Pueden ser compuertas de cierre estancas o rociadores de extinción de emergencia.

- Sistema de eliminación del calor residual: ya que, a diferencia del gas o gasóleo, la biomasa continúa su combustión, se sigue produciendo calor por inercia, y esto puede provocar la interrupción del suministro eléctrico o daños en la bomba de circulación de la caldera. Para solucionar este problema se pueden instalar depósitos de acumulación de inercia, intercambiadores de calor de seguridad o recipientes de expansión abiertos capaces de liberar vapor.
- ❖ Sistemas de regulación: además de las sondas capaces de controlar una correcta combustión, existen módulos que regulan diferentes parámetros del sistema, y permiten el telecontrol mediante diferente *software*.

BioMatic en sección

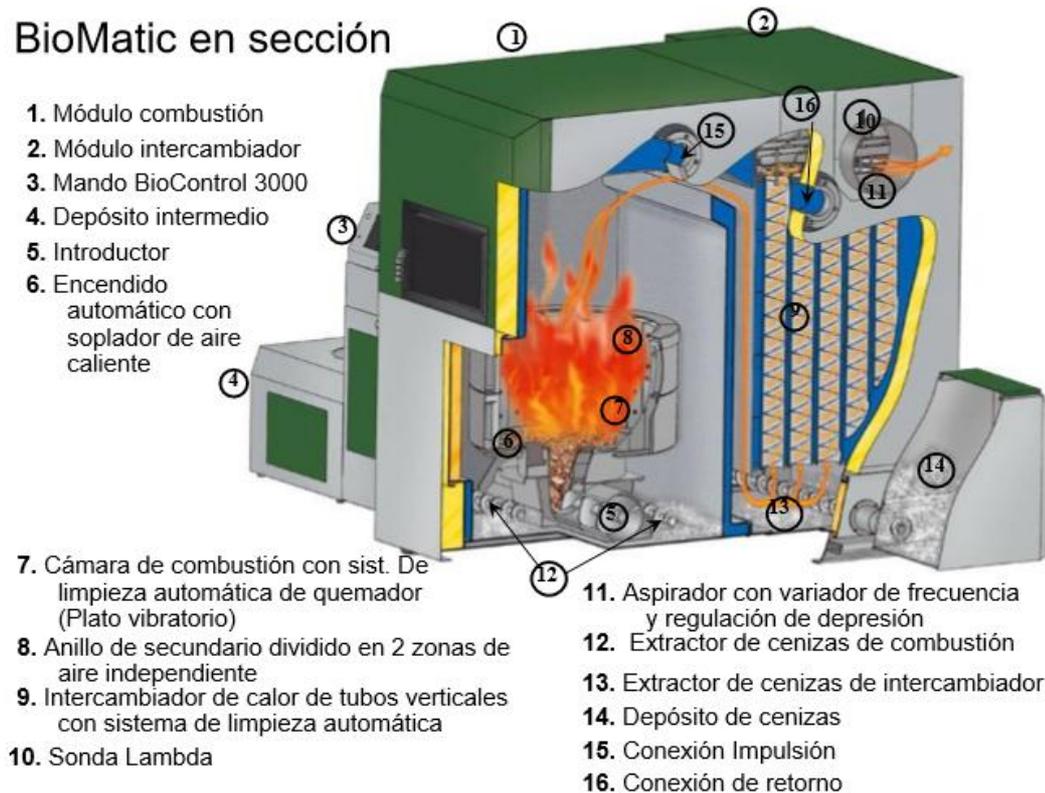


Figura 14.12.-Caldera de biomasa [43]

14.5 Principales factores del cambio de las características de los pellets a tener en cuenta

Las características del pellet obtenido tras el proceso de torrefacción y mezclado llevado a cabo, aunque guardan similitudes, son distintas a las de los pellets convencionales, como podemos observar en las tablas inferiores:

Tabla 14.6.- Características del pellet de mezcla de sarmiento de vid torrefactado y sin torrefactar

Parámetro	Pellet de mezcla de sarmiento con sarmiento torrefactado
Densidad (kg/m ³)	783
Poder calorífico superior (MJ/kg)	21,92
Poder calorífico inferior (MJ/kg)	20,88
Densidad energética (GJ/m ³)	17,16
Humedad (%)	4
Cenizas (%)	3
Fusibilidad de las cenizas (°C)	1300
Longitud (mm)	3.15-40
Diámetro (mm)	6-8
Fusibilidad de las cenizas (°C)	1300

Para el producto obtenido, objeto de este estudio, la densidad aparente es de 783kg/m³, el contenido en humedad es 4 y el poder calorífico inferior es de 20,88 MJ/kg

El sistema de certificación de pellets seguido en nuestro país, *ENplus*, establece los siguientes parámetros para garantizar la calidad del producto:

Tabla 14.7.- Valores límites para los parámetros más importantes de los pellets.

Parámetro	Unid.s	ENplus-A1	ENplus-A2	EN-B	Norma de ensayo
Diámetro	mm	6 or 8			EN-16127
Longitud	mm	$3.15 \leq L \leq 40$ ³⁾			EN-16127
Humedad	p-% ¹⁾	≤ 10			EN-14774-1
Cenizas	p-% ²⁾	≤ 0.7	≤ 1.5	≤ 3.0	EN-14775 (550 °C)
Durabilidad mecánica	p-% ¹⁾	$\geq 97,5$ ⁴⁾		≥ 96.5 ⁴⁾	EN-15210-1
Finos (< 3.15 mm)	p-% ¹⁾	< 1			EN-15210-1
Poder Calorífico Inferior	MJ/kg ¹⁾	$16,5 \leq Q \leq 19$	$16,3 \leq Q \leq 19$	$16,0 \leq Q \leq 19$	EN-14918
Densidad aparente	kg/m ³	≥ 600			EN-15103
Nitrogeno	p-% ²⁾	≤ 0.3	≤ 0.5	≤ 1.0	EN-15104
Sulfur content	p-% ²⁾	≤ 0.03		≤ 0.04	EN-15289
Cloro	p-% ²⁾	≤ 0.02		≤ 0.03	EN-15289
Fusibilidad cenizas ⁴⁾	°C	≥ 1200	≥ 1100		EN-15370

1) Base húmeda 2) Base seca

3) Un máximo de 1 p-% de los pellets pueden ser más largos de 40 mm, no se permiten pellets > 45 mm

4) Temperatura de Deformación, preparación de la muestra a 815 °C

Se aprecia que el poder calorífico se encuentra entre 16, y 19 MJ/kg, estando la media entre 16.45 y 18.04 MJ/kg ([46]), y la densidad aparente del pellet se encuentra en torno a 600 kg/m³, lo que supone una notable diferencia con el pellet de mezcla.

Las características químicas obtenidas del pellet de mezcla se encuentran dentro de los parámetros establecidos por el organismo certificador:

Tabla 14.8.- Características químicas del pellet de mezcla

Análisis elemental de los pellets (producto final)	
Carbono (%)	49,3
Nitrógeno (%)	2,1
Hidrógeno (%)	4,73
Oxígeno (%)	43,87
Azufre (%)	0

Todo ello hace que algunas modificaciones sean necesarias en las calderas de pellets convencionales.

14.6 Modificaciones

14.6.1 Consumo de combustible

Para establecer de qué manera influye el uso de pellets de mezcla en calderas convencionales y la diferencia que existe en el consumo con respecto al uso de pellets de madera convencionales, se exponen los siguientes ejemplos:

- ❖ Consumo de combustible en una vivienda unifamiliar de 4 personas que cuenta con una caldera de 30 kW de potencia y su rendimiento es del 90%:

- La demanda de calefacción, suponiendo que la vivienda se encuentra situada en un clima frío, en el que la calefacción se usa 1.909 h/año. La demanda de calefacción es la siguiente:

Demanda calefacción

$$= \text{Potencia caldera} * \frac{h}{\text{día}} \text{ uso caldera} * \frac{\text{días}}{\text{año}} * \text{coeficiente de intermitencia}$$

$$\text{Demanda calefacción} = 30 \text{ kW} * 1.909 \frac{h}{\text{año}} * 0,85 = 48.700 \frac{\text{kWh}}{\text{año}}$$

- Demanda de ACS, para un consumo de 30 l/día por persona para una temperatura de referencia, según establece el Documento Básico de Ahorro de Energía en la sección HE4 (DB-HE4 [47]):

$$\text{Demanda ACS} = n^{\circ} \text{ personas} * \frac{l}{\text{día}} * \text{días} * C_p * \Delta T$$

Donde C_p es el calor específico del agua y ΔT es el salto térmico del fluido.

$$\begin{aligned} \text{Demanda ACS} &= 4 \text{ personas} * 30 \frac{l}{\text{día}} * 365 \frac{\text{días}}{\text{año}} * 1 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}^{\circ}\text{C}} * 60^{\circ}\text{C} \\ &= 2.628.000 \frac{\text{kcal}}{\text{año}} \end{aligned}$$

$$\text{Demanda ACS} = 2.628.000 \frac{\text{kcal}}{\text{año}} * \frac{1 \text{ kWh}}{860 \text{ kcal}} = 3.055,81 \frac{\text{kWh}}{\text{año}}$$

- Demanda total:

$$\text{Demanda total} = 48.700 \frac{\text{kWh}}{\text{año}} + 3.055,81 \frac{\text{kWh}}{\text{año}} = 51.755,81 \frac{\text{kWh}}{\text{año}}$$

- El consumo energético, por tanto, será de :

$$\text{Consumo energético} = \frac{51.755,81 \frac{\text{kWh}}{\text{año}}}{0,9} = 57.506,45 \frac{\text{kWh}}{\text{año}}$$

- El caudal de combustible necesario se calcula de acuerdo al PCI del combustible empleado, por lo que será calculado para el pellet de mezcla, con un PCI de 19280 kJ/kg, y para pellets de madera convencional, con un PCI en general de 16000 kJ/kg.

$$\rightarrow \text{Caudal combustible pellet mezcla} = \frac{57.506,45 \frac{\text{kWh}}{\text{año}}}{20.880 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} * \frac{1 \text{ kWh}}{3.600 \text{ kJ}}} = 9.914,90 \frac{\text{kg}}{\text{año}}$$

$$\rightarrow \text{Caudal combustible pellet madera} = \frac{57.506,45 \frac{\text{kWh}}{\text{año}}}{16.000 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} * \frac{1 \text{ kWh}}{3.600 \text{ kJ}}} = 13.700,64 \frac{\text{kg}}{\text{año}}$$

El ahorro obtenido es de 3.785,73 kg/año.

14.6.2 Capacidad de almacenamiento

El sistema de almacenamiento de pellets a granel se constituye principalmente por silos, deben garantizar una alta resistencia a la humedad y pueden ser de tres tipos:

1. Silos de obra: éstos a su vez pueden ser de pared inclinada, de pared sin inclinar ballesta o suelo inclinado, o silo de suelo móvil. Son construidos en salas cercanas a la sala de calderas y la alimentación es neumática o a granel.
2. Silos enterrados: el material del que se constituyen es de plástico sintético no corrosivo; su instalación debe ser a una distancia determinada de la caldera y del sistema de descarga, y su mantenimiento resulta costoso.
3. Silo flexible: son silos de poliéster antiestático de alta resistencia, reforzado con hilos metálicos y resiste la humedad. El sistema de alimentación es por gravedad. Resulta más económico y flexible que los tipos anteriores.

El uso de pellets de mezcla estudiados afecta al sistema de almacenamiento, ya que al aportar una mayor energía y requerir un menor consumo de combustible, el tamaño del silo necesitado puede resultar menor.

Esto supone una disminución de los costes de obra, o la opción de la instalación de un silo flexible.

Asimismo, al tratarse de un material menos higroscópico que los pellets convencionales, también puede abarataarse el coste del almacenamiento al no necesitar materiales de una alta calidad que garanticen un elevado aislamiento contra la humedad.

En base al menor consumo de pellets de mezcla de biomasa torrefactada, se halla el consumo diario de pellets de la siguiente manera:

$$\rightarrow \text{Consumo diario de pellets de mezcla} = \frac{9.914,90 \frac{\text{kg}}{\text{año}}}{1.909 \frac{\text{h}}{\text{año}} * 1 \frac{\text{día}}{24\text{h}}} = 124,60 \text{ kg/día}$$

$$\rightarrow \text{Consumo diario de pellets de mezcla} = \frac{13.070,64 \frac{\text{kg}}{\text{año}}}{1.909 \frac{\text{h}}{\text{año}} * 1 \frac{\text{día}}{24\text{h}}} = 164,32 \text{ kg/día}$$

El volumen consumido a diario, conociendo que la densidad del pellet de mezcla es 783 kg/m³ y que la densidad de los pellets de manera general se sitúa alrededor de 600 kg/m³:

$$\text{Volumen consumo diario pellet mezcla} = \frac{124,60 \text{ kg/día}}{783 \text{ kg/m}^3} = 0,159 \text{ m}^3/\text{día}$$

$$\text{Volumen consumo diario pellet madera} = \frac{164,32 \text{ kg/día}}{600 \text{ kg/m}^3} = 0,274 \text{ m}^3/\text{día}$$

Tomando como autonomía la temporada entera de funcionamiento de la caldera (80 días), se obtiene un volumen del silo de:

$$\rightarrow \text{Volumen silo pellet mezcla} = 0,159 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} * 80 \text{ días} = 12,73 \text{ m}^3$$

$$\rightarrow \text{Volumen silo pellet madera} = 0,274 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} * 80 \text{ días} = 21,92 \text{ m}^3$$

Se consigue una reducción del volumen del silo de aproximadamente el 45%.

14.6.3 Software de regulación

Las calderas de biomasa cuentan con sistemas de control desde los que se puede regular la calefacción y el abastecimiento de agua caliente, a través de una pantalla gráfica generalmente, en el que se puede navegar en un menú de forma análoga al manejo de cualquier dispositivo electrónico.

A través de las sondas y sensores colocados en el caldera (sonda lambda, sensor en cámara de combustión) se recogen una serie de datos que son procesados por el *software* de regulación instalado, y que en función de los valores obtenidos, es capaz de modificar el sistema para adecuarlos a las necesidades requeridas en cada momento, y hacer así un uso más eficiente de la caldera.

Es necesario introducir en el sistema las características (temperatura requerida, potencia de salida, programación, tipo y características de combustible, etc).

Es posible controlar el sistema mediante mandos a distancia y actualmente, se han desarrollado *software* que permiten el control desde *smartphone*, *tablet* o PC.

Con todo en cuenta, al ser el valor del poder calorífico de nuestros pellets mayor que el del pellet convencional, sería necesario introducir sus características en el sistema de control.

14.6.4 Sistema de retirada de cenizas

El porcentaje en cenizas del pellet obtenido es elevado en comparación con otros pellets de madera, por lo que supone la creación de mayor cantidad en escorias y en cenizas en la parrilla de la caldera.

Es por ello, que una de las posibles modificaciones a realizar consiste en la inserción de un depósito de cenizas de tamaño levemente superior al de los actuales, para asegurar la perfecta retirada de éstas y evitar problemas de suciedad o parones durante el funcionamiento de la caldera.

Que se originen más cenizas en las calderas puede suponer una ventaja, ya que éstas pueden aprovecharse en usos como los siguientes [48]:

- Fertilizante para plantas o tierras de cultivo, ya que con su aplicación se restablecen elemento minerales como P, K, Ca y Mg.
- Aplicación en suelos ácidos para evitar daños en plantas.
- Utilización como componente de elementos constructivos.

Resulta evidente que para el uso de las cenizas en la fabricación de morteros para edificación existe un complicado y costoso problema de logística de recogida de las cenizas.

Sin embargo, su uso como abono en plantas es más factible.

14.6.5 Sistema de limpieza en el intercambiador

Durante la torrefacción se liberan hidrocarburos C_2 (etano principalmente) [30] de manera que la combustión en la caldera origina una cantidad inferior de estos compuestos, evitando así su incrustación y la suciedad que provocan.

Es por ello que los gases de combustión son más limpios y por tanto, se puede dar una reducción en el número de veces que se realiza la limpieza en el intercambiador de calor (ya sea automática o manual) al año, suponiendo una ventaja tanto económica como de confort.

15 Estudio de viabilidad económica

Con las características de la planta y del producto final definidas, se realiza un estudio económico con objeto de esclarecer la viabilidad, determinando, en el orden preciso las cifras y valores necesarios.

Se resalta la idea del importante papel que juega la capacidad de la planta de producción, que es, en este caso, de 2.880 t/año, y operativa durante 8.000 horas al año.

En lo referente al análisis de mercado, como ya se ha hablado, el mercado de la biomasa, y de los pellets en particular, ha crecido en los últimos años, y su tendencia sigue a la alza, a pesar del entorpecimiento que se ha impuesto ante las energías renovables.

15.1 Inversión inicial

15.1.1 Proyecto, licencia y permisos

El diseño de la planta y de los procesos que se llevarán a cabo en ella (trabajo de ingeniería), y la asesoría jurídica, tendrán repercusión a la hora de realizar la inversión inicial.

Asimismo, se debe tener en cuenta la normativa y las condiciones administrativas, como impuestos, registro de la actividad y licencias.

Se estima un costo del trabajo de asesoría del proyecto de 2800€.

El Impuesto de Trasmisión Patrimonial¹¹ será el 6% de la transmisión del inmueble (parcela en la que se colocará la planta de producción).

El trabajo de ingeniería y dirección del proyecto se ha calculado de acuerdo a los costos de contratación y administrativos y al salario base de profesionales de la ingeniería.

Las licencias han sido obtenidas a partir de las ordenanzas fiscales vigentes de la localidad en la que se va a situar la planta de producción de pellets de mezcla de biomasa torrefactada y sin torrefactar, Aranda de Duero.

Tabla 15.1.-Costes y bonificaciones de asesorías, trabajo de ingeniería y licencias.

Asesoría, proyecto y licencias	
Asesoría	2800
Impuesto de transmisión patrimonial	6%
Trabajo de ingeniería y dirección de proyecto	10623,6
Licencias	
de Obra	3,16%
Ambiental y de apertura	1.990,34 €
Bonificación por creación de empleo	20%

¹¹ Según *Impuesto sobre Transmisiones Patrimoniales y Actos Jurídicos Documentados*, publicado en el BOE el 3 de noviembre de 2015 [61].

15.1.2 Adquisición del terreno

Tras el rastreo de los precios de venta de solares industriales en Aranda de Duero, se estima un precio medio¹² de 61 €/m².

Puesto que se van a comprar 24.643,58 m², el coste de adquisición del terreno es el siguiente:

$$\text{Coste de adquisición del terreno} = 61 \frac{\text{€}}{\text{m}^2} * 24.643,58 \text{ m}^2 = 1.503.258,38 \text{ €}$$

Tabla 15.2.- Coste del terreno

Coste del terreno	
metros cuadrados	24.643,58
€/m ²	61
Total coste	1503258,38

15.1.3 Obra civil e infraestructuras

Los costes de la obra necesaria para la preparación del suelo y la construcción de las naves e infraestructuras necesarias se han calculado con el *software Presto8.8* y se han obtenido los siguientes valores:

¹² Precio estimado estimado a partir de consultas de páginas web (miparcela.com, fotocasa) a mes de junio de 2016.

Tabla 15.3.- Costes de obra civil

Coste de obra civil		
	unidades	Coste (€)
Preparación del terreno	1,00	25.874,94
Red horizontal de saneamiento	1,00	12.077,12
Cimentaciones	1,00	202.381,11
Estructuras	1,00	1.629.822,71
Cerramiento	1,00	141.177,60
Particiones interiores	1,00	31.232,04
Cubiertas	1,00	203.256,30
Aislamientos	1,00	1.980,44
Impermeabilizaciones	1,00	5.882,52
Revestimientos	1,00	18.911,52
Alicatados y chapados	1,00	105.249,60
Pavimentos	1,00	15.161,41
Carpintería interior	1,00	18.418,69
Carpintería exterior	1,00	58.351,67
Cerrajería	1,00	3.798,98
Falsos techos	1,00	2.798,82
Pinturas	1,00	6.591,84
Electricidad	1,00	47.717,13
Fontanería	1,00	11.350,21
Calefacción	1,00	1.136,16
Climatización	1,00	106,66
Gas	1,00	3.062,30
Protección contra incendios	1,00	121.870,19
Instalaciones especiales	1,00	2.702,91
Urbanización	1,00	312.506,54
Total		2.983.419,41

15.1.4 Maquinaria

El coste estimado de la maquinaria necesaria para todo el proceso productivo es el siguiente:

Tabla 15.4.- Coste de los equipos de la maquinaria

Costes de los equipos		
	Unidades	Coste (€)
PREPARACIÓN DE LA BIOMASA		
Máquina eliminación partículas	1,00	
Máquina limpieza y triturado	1,00	
Cubeta de aspiración	1,00	
Tubos flexibles de aspiración	1,00	
Molino de martillos	1,00	
Molino de cuchillas	1,00	
Silo 1 y 3	2,00	
Transportador de alimentación	1,00	
Sistema general de aspiración de polvo	1,00	
SISTEMA DE PELLETIZADO		
Equipo compacto	1,00	
Depósito mezclador	1,00	
Transportador de alimentación	1,00	
Matriz anular	1,00	
Rodillos	1,00	
Cuchillas	1,00	
Motor de 25 kW	1,00	
Equipo enfriamiento pellets	1,00	
ALMACENAMIENTO Y EXPEDICIÓN		
Cinta de transporte a silos	1,00	
Tolva	1,00	
Silos de almacenamiento	6,00	
Maquinaria pesada	1,00	
Total		229.380,00

Tabla 15.5.-Costes de los equipos

Costes de los equipos		
	Unidades	Coste (€)
TORREFACCIÓN DE LA BIOMASA		
Silo 2	1,00	80,00
Secadero tambor rotatorio	2,00	2.000,00
Reactor	1,00	3.000.000,00
Tornillo sinfín refrigerador	1,00	1.500,00
Silo 4	1,00	5.177,00
Sistema de fluido térmico	1,00	20.000,00
Sistema de intercambio de calor	1,00	800,00
Sistema de depuración de gases	1,00	10.000,00
Filtro de partículas	1,00	1.000,00
Cinta transportadora (100 m)	1,00	100.000,00
Total		3.142.557,00

Los costes del equipo han sido extraídos de presupuestos proporcionados a partir de EnerAgro [49]. El coste del reactor de torrefacción se ha calculado de acuerdo a los datos encontrados en [27].

El coste total ascendería a:

Tabla 15.6.- Coste total de los equipos

COSTE TOTAL DE LA MAQUINARIA (€)	3.371.937,00
---	---------------------

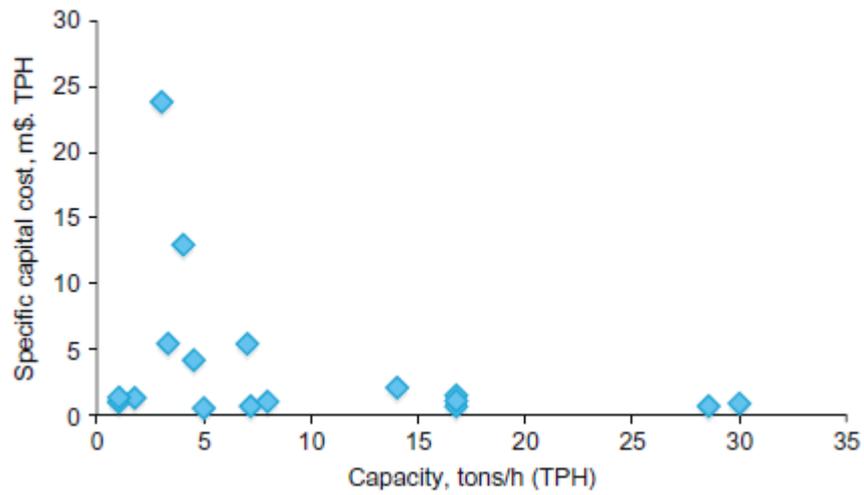


Figura 15.1.- Coste del torrefactor según la capacidad de éste [27]

15.1.4.1 Otras adquisiciones

Dadas otras necesidades de la planta se estiman los siguientes costes:

Tabla 15.7.- Coste de otras adquisiciones necesarias

Otras adquisiciones	Coste
Útiles y mobiliario	1100
Dispositivos informáticos	2500
Otros	1000
Total	4600

15.1.5 Total de la inversión inicial

Con todos los datos anteriormente expuestos, se halla la siguiente inversión inicial:

Tabla 15.8.- Inversión inicial total

Inversión inicial total		
Asesoría		2.800,00
Impuesto transmisión patrimonial		
Tasa		0,06
Coste inmueble		1.503.258,38
Total a pagar		90.195,50
Ingeniería/dirección proyecto		10.623,60
Licencias		
De obra	Tasa	0,03
	Coste obra	2.983.419,41
	Total	94.276,05
Ambiental y de apertura		1.990,34
Bonificación		
	Tasa	0,20
	Total	18.855,21
Total Licencias		77.411,18
Obra civil		2.983.419,41
Equipos		3.371.937,00
Otros		4.600,00
TOTAL		6.540.986,70

La inversión total a realizar es de 6.540.986,70€.

15.2 Costes

Los costes de explotación que se dan durante el proceso productivo han sido divididos en cuatro tipos:

- ❖ Directos, que indican el coste de la materia prima.
- ❖ Indirectos, o costes de la energía consumida.
- ❖ Costes fijos, que se refieren a la mano de obra.
- ❖ Gastos del periodo, gastos relativos a mantenimiento, limpieza, etc.

15.2.1 Costes directos

Se tomará como coste directo 0€ ya que se incluye en este apartado el coste de la materia prima a emplear, en este caso, poda de vid.

A pesar de la demanda de este recurso, para aplicaciones como cocina, se estima una cantidad de recursos suficiente para que no se dé competencia, y por tanto, no suba el precio.

15.2.2 Costes indirectos

Siendo los costes indirectos aquellos relacionados con el gasto que produce el uso de los distintos dispositivos, se estima el siguiente coste:

Tabla 15.9.- Potencia consumida

Equipo	Unidades	Consumo (kW)	Horas de trabajo al año	Rendimiento	Consumo anual (kWh/año)
Máquina eliminación partículas	1,00	20,00	8.000,00	0,85	136.000,00
Máquina limpieza y triturado	1,00	20,00	8.000,00	0,80	128.000,00
Secadero tambor rotatorio	2,00	34,40	8.000,00	0,90	495.360,00
Molino de cuchillas	1,00	45,00	8.000,00	0,75	270.000,00
Tornillo sinfín refrigerador	1,00	25,00	8.000,00	0,65	130.000,00
Molino de martillos	1,00	37,00	8.000,00	0,75	222.000,00
Mezclador de biomasa	1,00	0,15	8.000,00	0,90	1.080,00
Pelletizadora	1,00	22,00	8.000,00	0,80	140.800,00
Sistema de fluido térmico	1,00	146,50	8.000,00	0,93	1.089.960,00
Sistema de depuración de gases	1,00	40,00	8.000,00	0,90	288.000,00
Tolva de alimentación	12,00	10,00	8.000,00	0,90	864.000,00
Cinta transportadora	1,00	5,00	8.000,00	0,90	36.000,00
	Total kW	405,05		Total kWh/año	3.801.200,00

Para el cálculo del coste de la energía se toma como precio el precio medio de la electricidad para uso industrial, según el MINETUR [50]: 0,09 €/kWh

Tabla 15.10.- Coste de la energía eléctrica

Precio electricidad (E/kWh)	0,09
Total (€/año)	342.108,00

El consumo de combustible necesario para transportar la biomasa dentro de la central [51](tractor), y el consumo de gas natural se exponen a continuación:

Tabla 15.11.- Consumo de combustible

Consumo de combustible para vehículos internos				
Máquina	Potencia (CV)	Gasóleo (€/h)	Horas de trabajo al año	Coste total (€/año)
Maquinaria pesada	88-120	6,16	8.000	49.280

Tabla 15.12.- Consumo de Gas natural

Gas Natural			
Consumo de combustible interno (kWh)	Precio (€/kWh)	Horas de trabajo al año	Coste total (€/año)
115,18	0,04939	8.000	45.509,9216

Los costes indirectos totales son:

Tabla 15.13.- Costes indirectos totales

COSTES INDIRECTOS TOTALES
436.897,92

15.2.3 Costes fijos

Siendo los costes fijos los generados por el personal de la planta (5 empleados), se detallan a continuación:

Tabla 15.14.- Costes fijos: Mano de obra

Personal	Unidades	Periodo (meses)	Precio (unidad/mes)	Subtotal (€/año)	Seguros sociales	TOTAL
Responsable comercialización y administrativo	1,00	12,00	1.900,00	22.800,00	7.296,00	30.096,00
Jefe de planta y operarios	4,00	12,00	2.125,00	102.000,00	32.640,00	134.640,00
Servicios externos						
Transporte y logística	1,00	12,00	3.554,80	42.657,54		42.657,54
					Total (€/año)	207.393,54

15.2.4 Gastos del periodo

Tabla 15.15.- Gastos del periodo

Gasto	Periodo (meses)	Precio al mes (€)	Total (€)
Mantenimiento	12	10000	120000
Limpieza	12	65	780
Material oficina	12	25	300
Plan de prevención de riesgos laborales	12	25	300
Total			121380

15.2.5 Costes totales

Finalmente, para el cálculo de los costes totales, se han aplicado las variaciones de los precios según el Índice de Precios Industriales (IPRI) para el precio de la energía, que según el Instituto Nacional de Estadística, sigue una tendencia a la baja en los últimos dos años, por lo que se ha tomado un valor de -0,9%.

A pesar de la imposibilidad de conocer este valor en los próximos 20 años, se estima esta reducción en el precio de la energía, ya que a medida que se desarrolla el proceso productivo pueden implementarse nuevos sistemas de ahorro energético.

De igual forma, se ha aplicado el índice de variación de los salarios, que ha sufrido en el último año un aumento del 0,2% [52], valor que se ha tomado como referencia.

Para la estimación de la variación de los costes se ha realizado una media entre el Índice de Precios al Consumidor [53] y la variación de los salarios en el último año, aplicándose así una variación del -0,1%.

Como los índices y variaciones son estimados, y puesto que el coste del proceso de productivo se va a ir reduciendo al aplicar mejoras con los años, se toma un valor intermedio en los costes obtenidos a lo largo de 20 años para hallar el flujo de caja.

En el anexo 8 se recoge una tabla resumen con los costes totales del proceso en 20 años.

15.3 Ingresos

Los ingresos de la planta provienen de la venta del producto final que se obtiene, el pellet de mezcla de sarmiento de vid torrefactado y sarmiento de vid crudo. Puesto que se producen 2880 t al año del producto, se estimarán los ingresos en referencia a este dato.

El coste de explotación es de 765.671,46 €/año y se producen 2880 t/año, el coste de producción obtenido es de 265,86 €/t.

Por ello, para obtener un beneficio del 25%, el precio de venta sería de 354,48 €/t, es decir, 61,18 €/MWh (en base al PCI del producto obtenido de 20,88 MJ/kg).

$$\text{Coste de producción} = 765.671,46 \frac{\text{€}}{\text{año}} * \frac{1 \text{ año}}{2880 \text{ t}} = 265,86 \text{ €/t}$$

$$\text{Beneficios al 25\%} = \frac{265,86 \text{ €/t}}{(1 - 0,25)} = 354,48 \frac{\text{€}}{\text{t}}$$

$$\text{Precio de venta} = 354,48 \frac{\text{€}}{\text{t}} * \frac{1 \text{ t}}{1000 \text{ kg}} * \frac{1 \text{ kg}}{20,88 \text{ MJ}} * \frac{3600 \text{ MJ}}{\text{kWh}} = 61,18 \text{ €/MWh}$$

Esto supone un precio de venta ligeramente mayor al de los pellets de madera convencionales, sin embargo, aportan una cantidad de energía mucho mayor.

De esta manera, pueden observarse en el anexo 8 los ingresos obtenidos en 10 años, teniendo en cuenta un IPRI del 2%, de acuerdo a la media de este índice de los últimos años.

15.4 Financiación

Debido a la necesidad de mantener fondos en el tiempo activo del proyecto, se debe pagar una retribución, y por tanto, se hace indispensable la búsqueda de financiación.

En este caso, se requerirá un préstamo para financiar el 60% de la inversión. Se establecerá una cuota fija de amortización constante.

Puesto que el valor de la inversión inicial es de 6.540.986,70 de euros, el préstamo debe ser de:

$$\text{Valor del préstamo} = 6.540.986,70 * 0,6 = 3.924.592,02 \text{ €}$$

Por tanto existe un capital pendiente el primer año de 3.924.592,02 €.

La tasa de interés fijo será del 2 %, debido a que actualmente han caído los precios del mercado financiero, y es probable encontrar actualmente operaciones por debajo de este importe.

El plazo de devolución será de 20 años.

Tabla 15.16.- Amortización del préstamo

FINANCIACIÓN					
	Capital pendiente	Cuota anual	Interés	Intereses anuales	Pago total (cuota+intereses)
Año 1	3.924.592,02	196.229,60	0,02	78.491,84	274.721,44
Año 2	3.728.362,42	196.229,60	0,02	74.567,25	270.796,85
Año 3	3.532.132,82	196.229,60	0,02	70.642,66	266.872,26
Año 4	3.335.903,22	196.229,60	0,02	66.718,06	262.947,67
Año 5	3.139.673,61	196.229,60	0,02	62.793,47	259.023,07
Año 6	2.943.444,01	196.229,60	0,02	58.868,88	255.098,48
Año 7	2.747.214,41	196.229,60	0,02	54.944,29	251.173,89
Año 8	2.550.984,81	196.229,60	0,02	51.019,70	247.249,30
Año 9	2.354.755,21	196.229,60	0,02	47.095,10	243.324,71
Año 10	2.158.525,61	196.229,60	0,02	43.170,51	239.400,11
Año 11	1.962.296,01	196.229,60	0,02	39.245,92	235.475,52
Año 12	1.766.066,41	196.229,60	0,02	35.321,33	231.550,93
Año 13	1.569.836,81	196.229,60	0,02	31.396,74	227.626,34
Año 14	1.373.607,21	196.229,60	0,02	27.472,14	223.701,75
Año 15	1.177.377,61	196.229,60	0,02	23.547,55	219.777,15
Año 16	981.148,00	196.229,60	0,02	19.622,96	215.852,56
Año 17	784.918,40	196.229,60	0,02	15.698,37	211.927,97
Año 18	588.688,80	196.229,60	0,02	11.773,78	208.003,38
Año 19	392.459,20	196.229,60	0,02	7.849,18	204.078,78
Año 20	196.229,60	196.229,60	0,02	3.924,59	200.154,19
	3.924.592,02			824.164,32	4.748.756,34

15.4.1 Depreciación

Se ha utilizado el método lineal para determinar el valor del importe anual por depreciación de los activos fijos. Para todos los bienes, excepto los sistemas informáticos se estima un valor residual del 10% del valor inicial.

Para el cálculo del importe de la depreciación anual, se han estimado los valores, periodos y porcentajes de la tabla siguiente:

Tabla 15.17.- Depreciación

DEPRECIACIÓN							
	Inversión	Valor inicial - Valor residual	Vida útil	Tipo amortiz ación	Depreciación anual	Depreciación acumulada	Valor residual
Obra civil	2.983.419,41	2.685.077,47	33,00	0,03	89.413,08	2.950.631,63	32.787,78
Instalaciones	4.600,00	4.140,00	20,00	0,05	207,00	4.140,00	460,00
Maquinaria	3.371.937,00	3.034.743,30	18,00	0,06	168.428,25	3.031.708,56	340.228,44
Elementos de transporte	30.000,00	27.000,00	10,00	0,10	2.700,00	27.000,00	3.000,00
Sistemas informáticos	2.500,00	2.500,00	5,00	0,20	500,00	2.500,00	0,00
	6.392.456,41				261.248,33	6.015.980,19	376.476,22

15.5 Flujo de caja

El flujo de caja (o *cash flow*) es el resultado de restarle a las entradas de actividad, las salidas, amortizaciones e impuestos, anteriormente descritos.

Se representa el flujo de caja de 10 años en el anexo 8.

15.6 Valor actual neto (VAN) y tasa interna de rentabilidad (TIR)

Para poder establecer una relación entre los recursos necesarios y los beneficios que se obtendrán, se mide la rentabilidad del proyecto en términos del valor actual neto (VAN) y de la tasa interna de retorno (TIR), con lo que se puede determinar la renta producida.

Mediante el VAN podemos conocer el valor presente del flujo de caja futuro. Obteniendo un VAN positivo se establece que la inversión inicial queda recuperada. La fórmula a partir de la que se obtiene este valor es:

$$VAN = \sum_{t=1}^n \frac{FNC_t}{(1+k)^t} - \text{Inversión inicial}$$

Donde FNC_t es el flujo de caja neto y k es la tasa de valoración del proyecto. Se ha concluido que el valor de esta tasa de valoración es del 2% (posiblemente esté sobrevalorado sobre las rentabilidades que se pueden obtener hoy en día en productos financieros de renta fija).

De manera similar, el TIR es el tanto de interés anual que iguala los cobros actualizados a los pagos actualizados de un inversión, y que por tanto, hace el VAN igual a 0.

$$\sum_{t=1}^n \frac{FNC_t}{(1+r)^t} = \text{Inversión inicial}$$

Donde r es la tasa interna de rentabilidad.

Si el TIR es mayor que la tasa de valoración del proyecto (2%), el proyecto puede ser considerado rentable.

El cálculo de estos valores en base al flujo de caja o *cash flow* obtenido ha sido realizado mediante funciones en Excel, obteniéndose los siguientes resultados:

Tabla 15.18.-VAN y TIR obtenidos

VAN	286.774,78
Tasa de descuento	1,00
TIR	3,97%

No obstante, el plazo de retorno supuesto para hallar el VAN y el TIR ha sido elevado, por lo que el riesgo de la inversión aumenta, debido a las incertidumbres sobre la evolución de la coyuntura económica en un periodo tan largo.

15.7 Periodo de retorno o *Pay-back*

El tiempo en el que se recupera la inversión inicial (obtenido a partir de hojas de cálculo de Excel), teniendo en cuenta que ésta es de 6.540.986,70 €, y en función de los flujos de caja, es de 14 años y 7 meses.

15.8 Conclusiones del estudio económico

A pesar de los valores positivos del VAN y del TIR, éste último supone porcentaje de rentabilidad excesivamente bajo, y más aún teniendo en cuenta el periodo de retorno

establecido, lo que, como se ha dicho anteriormente, eleva el riesgo y la incertidumbre de la inversión.

El hecho de que la inversión se recupere en un periodo de tiempo amplio, junto con lo anteriormente explicado, refleja una inversión rentable a largo plazo.

En cuanto a la seguridad, la elevada inversión necesaria crea un escenario de riesgo bastante alto.

Igualmente, un periodo de retorno tan amplio supone un proyecto de muy baja liquidez.

16 Comparativa de pellets convencionales y pellet de mezcla de biomasa torrefactada y biomasa sin torrefactar

16.1 Propiedades físicas

16.1.1 Densidad

La densidad aparente del pellets obtenido de la mezcla propuesta, resulta mucho más elevada, del orden de 783 kg/m^3 , mientras que la del pellet de la misma madera sin torrefactar resulta de 716 kg/m^3 , siendo el valor típico de pellets de madera convencionales del orden de 650 kg/m^3 .

16.1.2 Higroscopicidad y formación de polvo

El pellet de mezcla absorbe en medida prácticamente nula, agua, debido a la baja higroscopicidad que le aporta la biomasa torrefactada, por lo que no se reduce el poder calorífico ni se resta rendimiento en el caldera durante el proceso de combustión.

Asimismo, esto facilita el almacenado, ya que dificulta la evolución de hongos que puedan degradar la biomasa.

Todo ello se traduce en un ahorro económico, aplicado tanto al transporte como al propio biocombustible.

Asimismo, las características mecánicas de la biomasa torrefactada aportan al pellet fuerza mecánica, con lo que no se van a producir partículas.

Por el contrario, los pellets convencionales pueden absorber una mayor cantidad de agua reduciendo el rendimiento del proceso y degradando sus características.

16.2 Propiedades químicas

16.2.1 Poder calorífico

Debido a la alta densidad que posee el pellet de mezcla, al igual que su poder calorífico, el valor de la densidad energética resulta más alto.

Esto quiere decir que existirá una reducción en el consumo del combustible, y por tanto un importante ahorro económico a la larga.

El valor de PCS obtenido del pellet de mezcla es de $21,92 \text{ MJ/kg}$, frente a un PCS de pellets de la misma materia prima de $17,22 \text{ MJ/kg}$, y una valor medio de los pellets de madera convencionales de en torno a $17\sim 18 \text{ MJ/kg}$.

Lo mismo se puede aplicar al PCI, siendo el valor de éste para pellets de mezcla de $20,88 \text{ MJ/kg}$, resultando mucho más elevado.

16.2.2 Humedad

La humedad del pellet objeto de este estudio resulta del 4%, ya que la biomasa cruda ha sido utilizada con un porcentaje de humedad con el fin de facilitar la pelletización. El pellet de sarmiento de vid concluyó tener un humedad del 8.8%, mientras que el porcentaje en general de pellets de madera es de menos de 10%.

16.2.3 Cenizas

El parámetro del contenido en cenizas, resulta, sin embargo, semejante o ligeramente superior al de pellets de biomasa convencionales, con un valor del 3%.

16.3 Coste de producción y precio de venta

Debido al más complejo proceso productivo y las fases necesarias para su realización, el coste de producción de pellets de madera de mezcla de biomasa torrefactada y sin torrefactar es superior al coste de producción de pellets convencionales, con un coste, respectivamente de 265,86 €/t (765.671,46 € de coste por 2880 toneladas producidas al año), y 150 €/t.

Tal y como se ha explicado en el apartado 15.3, el precio de venta para obtener los ingresos y beneficios necesarios es de 354,48 €/t o 66,18€/MWh, frente a un precio de pellets de madera convencionales de 237,19 €/t o 40,7 €/MWh (para pellets con PCI de 4,4 MWh/kg).

Tal y como se ha hallado previamente, utilizando el combustible de mezcla se consumen 10,7 t/año y para el uso de pellet de madera convencional, 13,7 t/año, por tanto, el coste derivado de su uso es el siguiente:

$$\rightarrow \text{Coste al año Pellet de mezcla} = 9,91 \frac{t}{\text{año}} * 354,48 \frac{\text{€}}{t} = 3.512,89 \text{ €/año}$$

$$\rightarrow \text{Coste al año Pellet de madera} = 13,7 \frac{t}{\text{año}} * 237,2 \frac{\text{€}}{t} = 3.249,64 \frac{\text{€}}{\text{año}}$$

Finalmente, se deduce que el uso de pellets de biomasa torrefactada es más caro.

Sin embargo, conlleva una diferencia únicamente de 263,2 € al año, siendo el pellet de mezcla un producto de mayor calidad y más respetuoso con el medio ambiente.

16.4 Proceso logístico

Como se detalla en el apartado 13.3, el aumento de la densidad energética conlleva un importante ahorro, tanto económico como en emisiones, que supone poder aplicar una reducción de costes y por tanto del precio de venta.

El precio del transporte del pellet crudo resultó de 20.043,66 €/año, frente a 19.935,9 €/año del pellet de mezcla, desde fábrica.

Igualmente, para el ejemplo mencionado en el apartado en el apartado 14.6.1, el coste de logística de pellets de mezcla sería de 6,7 €/t, y de 6,96 €/t para pellets de madera convencionales, por lo que sí que se obtendría un importante ahorro en el transporte del combustible, que aumentaría con consumos más elevados.

Esto supondría un coste aproximado al año de 60,97 €/año de transporte del pellet de mezcla para el ejemplo de la vivienda unifamiliar, y para el mismo caso pero con el uso de pellets convencionales de 95,35 €/año. Esto quiere decir, que el uso de pellets torrefactados conlleva un gasto a mayores de 228,8 €/año con respecto al uso de pellets convencionales.

16.5 Uso en calderas

En cuanto al uso en calderas convencionales de los pellets de mezcla, se podrían utilizar perfectamente las calderas existentes actualmente sin tener que realizar grandes modificaciones, sino que únicamente habría que introducir las características del nuevo combustible empleado en el sistema de regulación de la caldera.

Por una parte, el uso de estos pellets puede conllevar una mayor formación de cenizas, aunque muy similares a las que originan otros pellets, por tanto habría que realizar la limpieza o retirada de cenizas una vez más que con pellets de menos contenido en cenizas al año.

Por otra parte, sin embargo, al formarse menos hidrocarburos durante la combustión, el sistema de intercambiadores y de evacuación de humos permanecerá limpio más tiempo, además de la ventaja medioambiental que conlleva.

16.6 Almacenamiento

Se ha visto ya que debido a la mayor densidad energética de estos pellets, puede reducirse el tamaño del silo del almacenamiento hasta un 40%, por lo que podrían instalarse silos flexibles en lugar de de obra, abaratando en gran medida el coste de la instalación.

16.7 Tabla comparativa

Por último se muestra a continuación una tabla comparativa entre los pellets de sarmiento torrefactado y sarmiento sin torrefactar y pellets de madera convencionales:

Tabla 16.1.- Tabla comparativa entre pellets de mezcla de biomasa torrefactada y sin torrefactar y pellets convencionales

Característica	Pellet de mezcla con biomasa torrefacta	Pellet convencional
Densidad	780	650
Higroscopicidad	Muy baja	Alta
Formación de polvo	Limitado	Alto
Poder calorífico	20,88 MJ/kg	16 MJ/kg
Densidad energética	17,6 MJ/m ³	12,3 MJ/m ³
Humedad	4%	8,8%
Cenizas	3%	0,7~3%
Precio	66,18 €/MWh	40,7 €/MWh
Logística	6,8 €/t	6,96 €/t
Almacenamiento	Tamaño menor debido a mayor densidad	Más costoso

17 Conclusiones

La producción de pellets de biomasa torrefactada a partir de sarmiento mezclado con biomasa residual procedente, igualmente, de sarmiento crudo al 50% ha resultado en un proceso complejo en el que la viabilidad, tanto técnica como económica, dan muchos problemas.

Ya han sido demostrados en numerosos estudios, investigaciones y experiencias en plantas piloto a nivel global los beneficios de la torrefacción. No solo resulta ventajosa en cuanto al respeto al medio ambiente, sino que ayuda a conseguir un producto de elevado poder calorífico y con excelentes características físicas y químicas, sin olvidar el hecho de que se puede aplicar a toda clase de biomasa.

Asimismo, la torrefacción es una tecnología competente en el mercado actual para la producción de biomasa torrefactada para su uso en centrales térmicas de carbón, utilizándose en co-combustión con muy pequeñas inversiones requeridas.

Por el contrario, la necesidad de un porcentaje de humedad muy bajo para aumentar la eficiencia durante el proceso de torrefacción hace obligado el uso de secadores y el consecuente gasto energético y económico, restando agilidad al proceso.

Otra de las desventajas que resulta de su aplicación es la dificultad a la hora de determinar el tamaño de partícula y el tiempo de residencia, de manera que para cada tipo de biomasa sería conveniente realizar pruebas previas para conseguir un proceso optimizado.

Por último, juega un importante papel el tipo y diseño de reactor escogido, si bien lo más importante es el control de la temperatura.

En definitiva, la torrefacción es un proceso que ofrece numerosas ventajas energéticas, ambientales y económicas, pero en la actualidad aún está siendo desarrollada y sigue siendo desconocida.

En el presente trabajo, el diseño de la planta de torrefacción se ha basado en investigaciones publicadas, siguiendo datos y referencias de experiencias reales, y por tanto es lo más ajustado a la realidad posible.

Teniendo esto en cuenta, el coste de producción de la torrefacción ha resultado demasiado elevado. Esto puede ser explicado por la capacidad del reactor, de únicamente 2000 toneladas al año. Con capacidades más grandes, los costes de producción crecerían pero de manera menos significativa, con lo que se obtendrían una producción mayor con costes más bajos, y por ende, unos mayores beneficios.

Los pellets del material torrefactado, de igual manera, presentan ventajas frente al uso de los pellets convencionales, debido a sus características, como la hidrofobicidad, que

supone una inexistente degradación biológica, a diferencia de lo que puede ocurrir con pellets de madera cruda.

La producción de pellets enteramente constituidos por biomasa torrefactada supone un menor coste energético debido a su fácil capacidad de molienda.

En cuanto a la viabilidad económica, los resultados son muy ajustados, y la tasa de retorno proporciona información para determinar periodos de retorno muy largos.

Como se ha comentado anteriormente, una mayor capacidad de producción permitiría ahorrar costes, al aplicar la economía de escala, ya que a mayor volumen, menor coste por unidad producida.

El precio de venta para obtener beneficios es muy elevado en relación con los productos alternativos que ya existen en el mercado, siendo un gran inconveniente para introducirlo en el mercado.

Otro gran inconveniente que se suma al anterior, es que la torrefacción es una tecnología aún desconocida para el público.

Lista de referencias

- [1] D. P. Basu, Biomass gasification, pyrolysis and torrefaction..
- [2] Norma Europea EN 14588.
- [3] D. G.-G. A. R. Fernando Sebastián Nogués, Energía de la Biomasa (volumen I), 2010.
- [4] IDAE.
- [5] “Manual para la certificación de pellets de madera para usos térmicos, European Pellet Council (EPC)”.
- [6] “Bioenergy International,” [Online].
- [7] E. i. Junta de Castilla y León, «Plan Regional de Ámbito Sectorial de la Bioenergía de Castilla y León.».
- [8] C. d. A. y. g. d. C. y. León, Agricultura y ganadería de Castilla y León en cifras, 2010.
- [9] B. D. L. T. M. Á. A. M. A. Isabel González, Aprovechamiento energético de sarmiento en calderas de biomasa mediante pelletizado., 2007.
- [10] E. L.N., comparative analysis of the forest fuels in a life cycle perspective with a focus on transport systems..
- [11] R. A.A., Logistic issues of biomass.
- [12] «IDEcyl,» [En línea].
- [13] «Google Maps,» [En línea].
- [14] «Ayuntamiento de Aranda de Duero,» [En línea].
- [15] “Catastro,” [Online].
- [16] *REGLAMENTO DE SEGURIDAD CONTRA INCENDIOS EN LOS ESTABLECIMIENTOS INDUSTRIALES (RD 2267/2004).*
- [17] I. N. d. S. e. H. e. e. T. INSHT, *Carga de fuego ponderada: parámetros de cálculo.*
- [18] M. K. P. F. J. P. B. A. B. J. K. Prins, Torrefaction for entrained-flow gasification of biomass, 2005.
- [19] Z. Cielkosz.
- [20] A. B. R. Z. J. K. P.C.A. Bergman, Torrefaction for biomass co-firing in existing coal-fired power stations., 2005.
- [21] P. Bergman, “Combined torrefaction and pelletisation”.
- [22] B. e. al., 2004.
- [23] D. P. Basu, Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction, 2013.
- [24] P. B. A. D. Alok Dhungana, “ Effects of Reactor Design on the torrefaction of

- biomass,” 2012.
- [25] J. P. D. Rolando Vines Guillén, Aprovechamiento sostenible de los recursos forestales para la producción de pellets de biomasa leñosa torrefactada, 2014.
- [26] P. G. R. K. S. Anup Kumar Sadhukhan, “Modelling and experimental studies on pyrolysis of biomass particles,” ELSEVIER, 2007.
- [27] P. B. S. R. Z. Daria Tito Ferro, “TORREFACCIÓN DE BIOMASA DENSIFICADA,” 2009.
- [28] A. D. Bimal Acharya, *Torrefaction of Biomass to Enhance Fuel Properties*, 2013.
- [29] D. L. T. M. Á. A. M. A. Isabel González-Barragán, “Aprovechamiento energético de sarmiento en calderas de biomasa mediante peletizado.,” 2007.
- [30] *Pellets Combustibles de la Mancha S.L.*
- [31] *RD 1073/2002.*
- [32] *Norma UNE-EN 14961-1.*
- [33] *Norma UNE-EN 14961-2.*
- [34] E. P. Council, Manual para la certificación de pellets de madera para usos térmicos.
- [35] IDAE, Calefacción en grandes edificios con biomasa, 2002.
- [36] AVEBIOM, Observatorio Nacional de Calderas de Biomasa.
- [37] J. E. C. García, Combustión directa de la biomasa, 2007.
- [38] *RD 430/2004.*
- [39] IDAE, *Poderes caloríficos de las principales fuentes energéticas*, 2014.
- [40] *Documento Básico de Ahorro de Energía.*
- [41] D. L. T. M. Á. A. M. A. Isabel Gonzále Barragán, *Uso de cenizas de calderas pocedentes de biomasa como insumo orgánico en suelos agrícolas*, 2008.
- [42] *EnerAgro.*
- [43] MINETUR.
- [44] agrotécnica, *Los tractores en la agricultura española, parte 2*, 2007.
- [45] Adecco.
- [46] *IPC.*
- [47] “Plan de Energías Renovables,” 2005-2010.
- [48] AVEBIOM.
- [49] T. E. F. SERIES, “Projected Biomass Utilization for Fuels and Power in a Mature Market,” 2013.
- [50] *Norma UNE-EN 12845 Sistemas fijos de lucha contra incendios; sistemas de*

rociadores automáticos; Diseño, instalación y mantenimiento.

- [51] Koukios et al. (1982).
- [52] T. e. a. Bridgeman, *Torrefaction of reed canary grass, wheat straw and willow*, 2008.
- [53] S. Thermal. [Online].
- [54] J. S. E. S. E. V. Bahnam Zakri, "Integration of Torrefaction with Steam Power Plant," 2013.
- [55] D. Energy, *Carbon impacts of biomass consumed in the EU: quantitative assessment*.
- [56] IDAE, *Instalaciones térmicas de biomasa térmica en edificios*, 2009.
- [57] *Herz*.
- [58] C. d. Madrid, *Sistemas automáticos de calefacción con biomasa en edificios y viviendas*.
- [59] *Plan de Energías Renovables en España (PER)*.
- [60] J. e. al., 2006.
- [61] J. G. R. Mayoral, *Tesis doctoral Producción de biochar a partir de viñas agotadas mediante pirolisis en reactor a escala piloto y en reactor móvil energéticamente sostenible*, 2015.
- [62] «d-maps,» [En línea].
- [63] *propellets*.
- [64] CENER, *I+D en biomasa. Acondicionamiento y torrefacción*.
- [65] *BioEndev*.
- [66] BOE, *Impuesto sobre Transmisiones Patrimoniales y Actos Jurídicos Documentados*, 2015.
- [67] *Real Decreto 1777/2004, de 30 de julio, por el que se aprueba el Reglamento del Impuesto sobre Sociedades*.
- [68] A. CEDER-CIEMAT, *BIOMASUD, Biocombustibles sólidos de calidad del sur de Europa*.
- [69] A. E. d. I. *Energía, Biomasa para instaladores*.

18 ANEXOS

18.1 ANEXO 1: CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE MOLINOS DE MARTILLO Y CUCHILLAS

MOLINO DE CUCHILLAS



Molino de martillos

MODELO	MILL 500	MILL 800
Dimensiones mm.	(5500) 1450 x 950 x 1675	(5700) 1270 x 2000 x 2125
Peso Kg.	1550	1650
Numero de cuchillas	63 cuchillas + 6 contra-cuchillas	90 cuchillas + 12 contra-cuchillas
Velocidad de entrada m/min.	Criba	Criba
Rendimiento por hora m ³ /h	Dependiendo del material	Dependiendo del material
Apertura de entrada mm	500 x 200	800 x 200
Nº revoluciones del tambor de la trituradora U/min.	2500	1470
Potencia del motor Kw	45	70
Potencia del motor de la cinta transportadora	1,1 Kw	1,1 Kw
Tipo de alimentación	Cinta transportadora tipo embudo	
Longitud de residuo mm.	Regulado con criba hasta 12 mm.	

Cutting Mill PULVERISETTE 15

Order number: 15.4030.00
 Grinding reports:  Exemplary grinding reports



Description	Technical data	Accessories	Selection aid	Download
Voltage/connection values:	400 V/3~*			
Frequency:	50 Hz*			
Input Power:	1900 watt*			
Operating principle:	Cutting			
Max. feed size: (depends on material and funnel)	70 x 70 mm			
Max. throughput quantity: (depends on material and sieve size)	50 l/h			
Final fineness: (depends on sieve insert)	0.25 - 20 mm			
Feeding:	Batchwise/continuous			
Cutting tools:	Rotor with straight edges and fixed knives			
Materials of the cutting tools:	Tool steel, chromium-free tool steel, stainless steel 316L, chromium-free steel DC01			
Rotor speed: (depending on voltage and frequency)	2800 - 3400 rpm			
Rotor peripheral speed: (depending on voltage and frequency)	14.92-17.9 m/s			
Motor shaft power in accordance with VDE 0530, EN 60034:	1.5 kW for all motors, except 1.1 kW for 100-120 V/1~ motor			
Weight:	32 kg			
Dimensions: (W x D x H)	Table mounted or on support frame 42 x 48 x 69 cm			
Emissions value of workplace according to DIN EN ISO 3746:2005	Approx. 78 dB(A) - (depending on the material to be ground, rotor and sieve insert used)			
*Instrument available in the following voltages	230-240 V/1~, 50 Hz, 2100 watt (order no. 15.4020.00)			
	100-120 V/1~, 60 Hz, 1850 watt (order no. 15.4010.00)			

Molino de martillos

Características

1. El molino de martillos está diseñado de acuerdo con el principio de alto rendimiento de trabajo y bajo coste de mantenimiento. Se puede utilizar para un amplio rango de aplicaciones, tiene una gran capacidad de molienda, funcionamiento estable, etc.
2. La cámara de trituración del producto incorpora una estructura en forma de lágrima. En la parte inferior hay una cámara de trituración secundaria que mejora notablemente los efectos de trituración.
3. La estructura del tamiz de la placa soporte tiene muelles para poder tensarlo y ello hace que la placa cambie de forma más rápida y fiable. Además, este soporte es compatible con varios tamices que no están soldados y tienen diferente grosor.
4. Nuestro molino de martillos emplea una válvula ajustable para garantizar que los distintos materiales se puedan triturar y descargar.
5. Su rotor reversible garantiza que los martillos desplieguen sus máximos efectos.
6. El rodamiento principal SKF permite al molino de martillos trabajar de forma continua sin fallos.



[inquiry form](#)

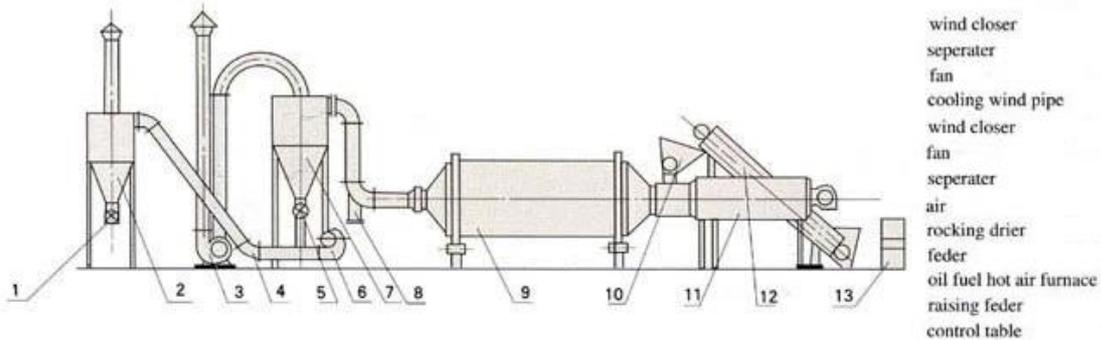
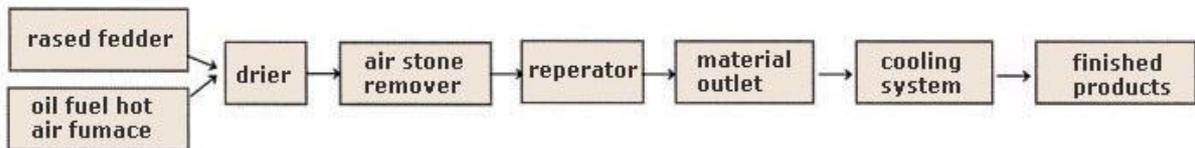
Molino de martillos



18.2 ANEXO 2: CARACTERÍSTICAS DEL SECADERO DE TAMBOR ROTATIVO

Especificaciones técnicas de Máquina secadora de tambor rotativo

Ítem/Modelo	HGB-500	HGB-1500
Capacidad de evaporación de agua (kg/h)	360	1100
Productividad (kg/h)	500	1500
Temperatura de aire de entrada (°C≤)	≤900	≤900
Velocidad de rotación (r.p.m)	0 ~ 11	0 ~ 11
Consumo de combustible (kg/h)	≤60	≤135
Potencia total (kw)	34.4	50.39
Dimensiones exteriores	Longitud (m)	11
	Ancho (m)	2
	Altura (m)	3.0
Peso (T)	20	32



18.3 ANEXO 3: CARACTERÍSTICAS DEL MEZCLADOR DE BIOMASA

Mezclador-dosificador para pellets / gravimétrico
max. 300 kg/h | FGB FLECS



FGB FLECS

- Max. Capacity:
• approximately 300 kg / h *
- Number of components:
• 2, 3 or 4
- Various control options
- Compact and robust



Technical Specification

Accuracy

The system will weigh to an accuracy of 1/100 of a gram. On the user-interface, the display will show the weight of each components in 1/10 of a gram. (See separate documentation for service options)

Implementation:

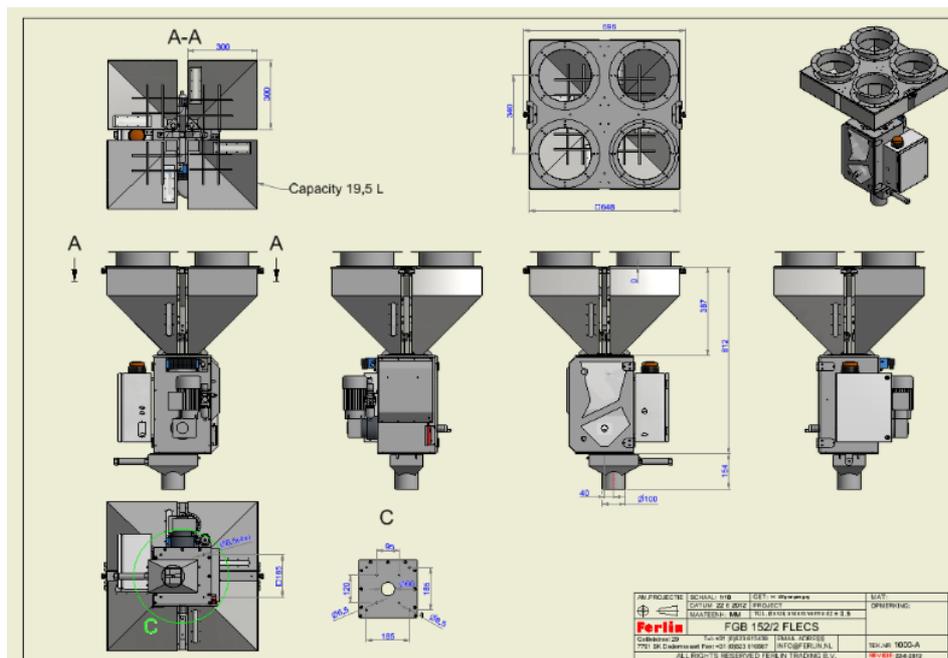
The FGB FLECS is designed as standard for dosing four components. The units are entirely in stainless steel. The removable hoppers are equipped with newly designed vertical dosing valves. The unique mixing chamber with integrated mixer and closing slide valve is fully removable. The newly designed mixing chamber is easy to clean.

Depending on the production, the FGB FLECS comes with an economical, microprocessor-based, plug-in touchscreen control or an advanced industrial PC with touch screen operation. As an additional alert of low-level, sensors can be provided (option). These units can be supplied with hopper loaders, vacuum pump with filter and control.

Technical Data

Batch Weight	kg	1.5
Number of components	max	4
Capacity for 4 components	kg / h	300 *
Content material hoppers	liter	19
Content mixing chamber	liter	7
Voltage	V / Hz	240, 50/60
Power consumption	kW	0.15
Compressed air	Bar	6
Compressed air consumption about	NI / h	60
Size L x W x H	mm	600 x 700 x 805
Weight approx	kg	60

* The capacity depends on the number of components, material characteristics, bulk density and percentages.



PROJECION	SECCION	TIPO	ESCALA	FECHA
FRONTAL	A-A	1:1	1:1	15/05/2015
Perlin FGB 152/2 FLECS				
Calle de la Industria 10, 46100 Sagunto (Valencia) España T: +34 96 351 11 11 F: +34 96 351 11 12 E: info@perlin.es				

18.4 ANEXO 4: CARACTERÍSTICAS DE LA PELLETIZADORA

Planta Peletizadora mínima PLT 400 -Smartec-







Componentes Planta peletizadora mínima

- Peletizadora PLT400
- Dispositivos lubricantes PMP400 (rodillos y rodamientos) (2*)
- Barriles de grasa 18kg. (rodillos y rodamientos) (2*)
- Cargador con sistema de vibración CRT100
- Aspirador de virutas ASP400-1500

Los elementos que el cliente incluya finalmente en la planta mínima dependerán sus preferencias y del estado en que se encuentre la materia prima.

CARACTERÍSTICAS PLT 400

- Accionamiento con **motor eléctrico trifásico 22kW 400V.**
- Producción horaria: **200 - 400kg.**
- Diámetro del pélet: **6mm.**
- Se adapta a diversos materiales y requisitos de calidad.
- Dimensiones: 130x153x70.

18.5 ANEXO 5: CÁLCULO DEL VOLUMEN DE LOS SILOS

1. Silo a la salida del triturado

A la salida del triturado y previo a la entrada de pelletizado del sarmiento crudo, el silo para una autonomía de 4 horas tiene la siguiente capacidad:

$$180 \frac{kg}{h} * 4h = 720kg * \frac{1 m^3}{198 kg} = 3,63 \frac{m^3}{h}$$

Se instalará un silo de $3,335 m^3$ (de acuerdo a las características del fabricante), obteniendo así un almacenaje suficiente para la producción que se desea.

El silo tiene un radio de 0,52 m, una altura de 3,83 m y ocupa una superficie de $0.87 m^2$.

2. Silo a la salida del secadero

A la salida del secadero y antes de la entrada al reactor de torrefacción, se instalará un silo con autonomía de 60 minutos, por lo que teniendo en cuenta una corriente de salida del reactor de $228 kg/h$ con una densidad aproximada de $198 kg/m^3$, el silo deberá tener una capacidad de $115 m^3$.

Se instalará un silo de $1.665 L$, de radio $0,43 m$ y altura de $2,85 m$, que ocupa una superficie de $0,58 m^2$.

3. Silo a la salida de torrefacción y enfriado

A la salida del proceso de enfriado del producto obtenido de torrefacción se instalará un silo con autonomía para 12 horas sabiendo que la corriente de salida es de $180 kg/h$, por lo que deberá tener capacidad para al menos $2.160 kg$, es decir, $15,58 m^3$.

Será un silo de $16,7 m^3$, altura de $6,9 m$, radio de $0,87$ y superficie de $2,42 m^2$.

4. Silo de pellets

El volumen de pellets obtenido al mes es de:

$$Volumen\ mensual\ de\ pellets\ obtenido = 360 \frac{kg}{h} * \frac{1 m^3}{783 kg} * 720 h = 330 \frac{m^3}{h}$$

La capacidad del silo es de $167 m^3$, y abarca una superficie de $23.75 m^2$.

Se instalarán 6 silos de $167 m^3$ de capacidad cada uno, obteniendo un volumen de almacenaje total de $1000 m^3$, es decir, una capacidad de almacenaje para 3 meses, puesto que el resto de la producción se destinará a la venta.

18.6 ANEXO 6: CARACTERÍSTICAS DE LOS SILOS

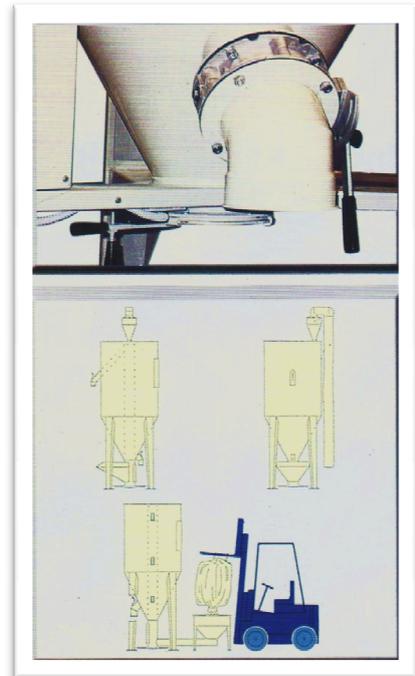
SILOS MEZCLADORES – SECADORES (Series MAMV)

Silos para el almacenaje, homogeneización y/o secado de materiales

La descarga se puede realizar por arriba para saca big-bag o por la parte inferior para el llenado de sacos u otro tipo de contenedores.

CARACTERÍSTICAS:

- Carga por tolva mecanizada con rosca sinfín.
- Doble sistema de descarga para sacos y big-bags.
- Toma superior para conexión de ciclón.
- Puerta de acceso interior al silo
- Portilla inferior para vaciado total
- Seguridad en ambas puertas
- Mirillas de control de nivel
- Pintura especial anti óxido.
- Motor en la parte inferior sobre bancada.
- Transmisión por correas trapezoidales
- Fabricado en acero al carbono
- Normativas CE con certificado

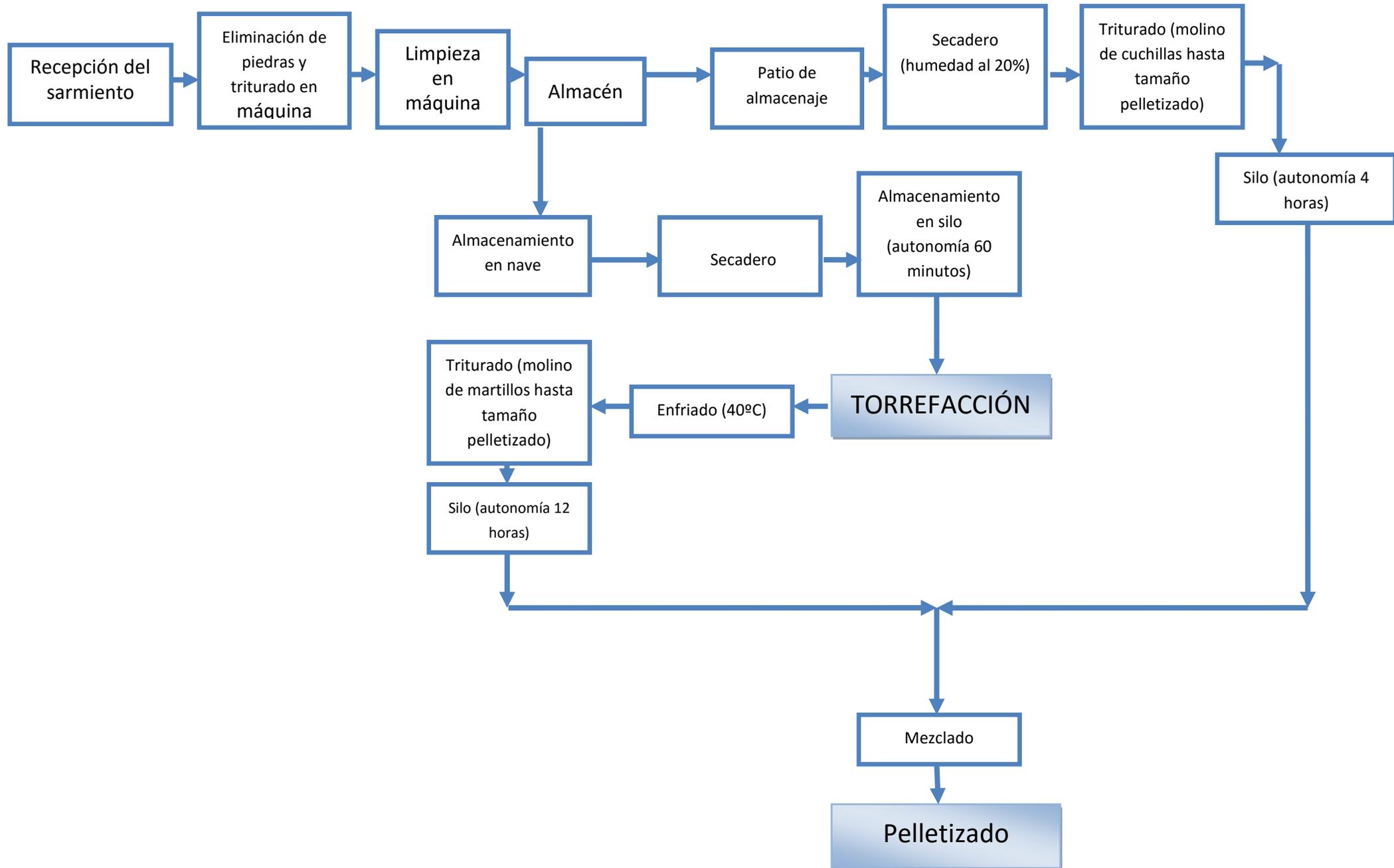


TIPO TYPE	LITROS LITRES	HP	A	B	C	D	F	G	E	H	L	M	N	O
MV 2	333	1	610	460	600	800	850	150	100	2250	150	700	610	930
MV 5	835	2	685	540	670	1150	850	200	100	2650	200	830	878	930
MV 10	1665	4	800	570	700	1600	850	250	100	2850	200	850	1120	900
MV 15	2500	5,5	800	570	700	1600	850	250	120	3250	200	1250	1120	900
MV 20	3335	7,5	800	570	750	1600	900	250	140	3830	200	1800	1120	910
MV 25	4166	7,5	800	570	750	1600	900	250	140	4230	200	2200	1120	910
MV 30	5000	10	800	570	750	1860	900	310	150	4350	200	1800	1550	960
MV 35	5833	10	800	570	750	1860	900	310	150	4700	200	2150	1550	950
MV 50	8335	15	820	615	950	2200	950	410	150	5400	200	2490	1730	1170
MV 80	13500	20	820	615	950	2400	950	410	150	5900	200	3000	1730	1170
MV 110	16700	20	820	615	950	2400	950	410	170	6900	200	4000	1730	1170

Los datos y las ilustraciones del presente catálogo son orientativos y pueden variarse en cualquier momento.
The data and figures in this catalogue may be changed at any time.

The technical drawing shows a side view of the silo with various dimensions labeled with letters. A is the diameter of the hopper, B is the width of the discharge chute, C is the height of the discharge chute, D is the diameter of the silo body, E is the height of the silo body, F is the diameter of the discharge chute at the bottom, G is the height of the discharge chute at the bottom, H is the total height of the silo, I is the height of the discharge chute at the bottom, J is the height of the discharge chute at the bottom, K is the height of the discharge chute at the bottom, L is the height of the discharge chute at the bottom, M is the height of the discharge chute at the bottom, N is the height of the discharge chute at the bottom, O is the height of the discharge chute at the bottom.

18.7 ANEXO 7: DIAGRAMA DE PROCESO DE LA PLANTA



18.8 ANEXO 8: ESTUDIO ECONÓMICO

18.8.1 COSTES DE EXPLOTACIÓN Tabla

18.8.1.- Costes de explotación (año 1-año 12)

COSTES TOTALES

Costes de explotación	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7	Año 8	Año 9	Año 10	Año 11	Año 12
Costes Indirectos												
Electricidad	342.108,00	342.108,00	342.108,00	342.108,00	342.108,00	342.108,00	342.108,00	342.108,00	342.108,00	342.108,00	342.108,00	342.108,00
Gasóleo	49.280,00	49.280,00	49.280,00	49.280,00	49.280,00	49.280,00	49.280,00	49.280,00	49.280,00	49.280,00	49.280,00	49.280,00
Gas natural	45.509,92	45.509,92	45.509,92	45.509,92	45.509,92	45.509,92	45.509,92	45.509,92	45.509,92	45.509,92	45.509,92	45.509,92
Total costes directos sin variación	436.897,92	436.897,92	436.897,92	436.897,92	436.897,92	436.897,92	436.897,92	436.897,92	436.897,92	436.897,92	436.897,92	436.897,92
Variación precio energía												
-0,09												
TOTAL	436.897,92	397.577,11	397.577,11	361.795,17	329.233,60	299.602,58	272.638,35	248.100,90	225.771,82	205.452,35	186.961,64	170.135,09
Costes fijos												
Personal	164.736,00	164.736,00	164.736,00	164.736,00	164.736,00	164.736,00	164.736,00	164.736,00	164.736,00	164.736,00	164.736,00	164.736,00
Servicios externos	42.657,54	42.657,54	42.657,54	42.657,54	42.657,54	42.657,54	42.657,54	42.657,54	42.657,54	42.657,54	42.657,54	42.657,54
Total costes fijos sin variación	207.393,54	207.393,54	207.393,54	207.393,54	207.393,54	207.393,54	207.393,54	207.393,54	207.393,54	207.393,54	207.393,54	207.393,54
Variación salario												
0,02												
TOTAL	207.393,54	211.541,41	215.772,24	220.087,68	224.489,44	228.979,23	233.558,81	238.229,99	242.994,59	247.854,48	252.811,57	257.867,80

Gastos del periodo												
Mantenimiento	120.000,00	120.000,00	120.000,00	120.000,00	120.000,00	120.000,00	120.000,00	120.000,00	120.000,00	120.000,00	120.000,00	120.000,00
Limpieza	780,00	780,00	780,00	780,00	780,00	780,00	780,00	780,00	780,00	780,00	780,00	780,00
Material oficina	300,00	300,00	300,00	300,00	300,00	300,00	300,00	300,00	300,00	300,00	300,00	300,00
Prevención Riesgos Laborales	300,00	300,00	300,00	300,00	300,00	300,00	300,00	300,00	300,00	300,00	300,00	300,00
TOTAL GASTOS PERIODO	121.380,00											
Variación anual												
-0,0100												
TOTAL	121.380,00	120.166,20	118.964,54	117.774,89	116.597,14	115.431,17	114.276,86	113.134,09	112.002,75	110.882,72	109.773,90	108.676,16
TOTAL COSTES DEL PROCESO	765.671,46	729.284,72	732.313,89	699.657,75	670.320,18	644.012,98	620.474,02	599.464,97	580.769,15	564.189,55	549.547,10	536.679,05

Tabla 18.8.2.- Costes de explotación (año 12-año 20)

Año 13	Año 14	Año 15	Año 16	Año 17	Año 18	Año 19	Año 20
342.108,00	342.108,00	342.108,00	342.108,00	342.108,00	342.108,00	342.108,00	342.108,00
49.280,00	49.280,00	49.280,00	49.280,00	49.280,00	49.280,00	49.280,00	49.280,00
45.509,92	45.509,92	45.509,92	45.509,92	45.509,92	45.509,92	45.509,92	45.509,92
436.897,92	436.897,92	436.897,92	436.897,92	436.897,92	436.897,92	436.897,92	436.897,92
154.822,93	140.888,87	128.208,87	116.670,07	106.169,77	96.614,49	87.919,18	80.006,46
164.736,00	164.736,00	164.736,00	164.736,00	164.736,00	164.736,00	164.736,00	164.736,00
42.657,54	42.657,54	42.657,54	42.657,54	42.657,54	42.657,54	42.657,54	42.657,54
207.393,54	207.393,54	207.393,54	207.393,54	207.393,54	207.393,54	207.393,54	207.393,54
263.025,16	268.285,66	273.651,37	279.124,40	284.706,89	290.401,02	296.209,05	302.133,23
120.000,00	120.000,00	120.000,00	120.000,00	120.000,00	120.000,00	120.000,00	120.000,00
780,00	780,00	780,00	780,00	780,00	780,00	780,00	780,00
300,00	300,00	300,00	300,00	300,00	300,00	300,00	300,00
300,00	300,00	300,00	300,00	300,00	300,00	300,00	300,00
107.589,40	106.513,50	105.448,37	104.393,88	103.349,94	102.316,44	101.293,28	100.280,35
525.437,49	515.688,03	507.308,61	500.188,36	494.226,60	489.331,96	485.421,51	482.420,03

18.8.2 Ingresos

INGRESOS

Ingresos (€)													
Venta de pellets		Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7	Año 8	Año 9	Año 10	Año 11	Año 12
Precio venta (€/t)	354,48	1.020.895,28	1.038.250,50	1.055.900,76	1.073.851,07	1.092.106,54	1.110.672,35	1.129.553,78	1.148.756,20	1.168.285,05	1.188.145,90	1.208.344,38	1.228.886,23
Producción anual (t)	2.880,00												
IPRI	0,02												
		Año 13	Año 14	Año 15	Año 16	Año 17	Año 18	Año 19	Año 20				
		1.249.777,30	1.271.023,51	1.292.630,91	1.314.605,64	1.336.953,93	1.359.682,15	1.382.796,75	1.406.304,29				

18.8.3 Cash-Flow

Tabla 18.8.3.1.- Cash flow o flujo de caja de año 1 a año 9

	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7	Año 8	Año 9
Inversión inicial	6.540.986,70									
Ingresos		1.020.895,28	1.038.250,50	1.055.900,76	1.073.851,07	1.092.106,54	1.110.672,35	1.129.553,78	1.148.756,20	1.168.285,05
Costes		765.671,46	729.284,72	732.313,89	699.657,75	670.320,18	644.012,98	620.474,02	599.464,97	580.769,15
Financiación		274.721,44	270.796,85	266.872,26	262.947,67	259.023,07	255.098,48	251.173,89	247.249,30	243.324,71
Depreciación de activos		261.248,33	261.248,33	261.248,33	261.248,33	261.248,33	261.248,33	261.248,33	261.248,33	261.248,33
Beneficio antes impuestos		-6.024,51	47.717,45	62.338,54	112.945,00	160.538,02	205.411,04	247.831,43	288.042,89	326.267,57
Impuestos		-1.807,35	14.315,23	18.701,56	33.883,50	48.161,41	61.623,31	74.349,43	86.412,87	97.880,27
Beneficio después impuestos		-4.217,16	33.402,21	43.636,98	79.061,50	112.376,62	143.787,73	173.482,00	201.630,02	228.387,30
Cash Flow		257.031,17	294.650,55	304.885,31	340.309,83	373.624,95	405.036,06	434.730,33	462.878,36	489.635,63

Tabla 18.8.3.2.- Cash flow o flujo de caja de año 10 a año 20

Año 10	Año 11	Año 12	Año 13	Año 14	Año 15	Año 16	Año 17	Año 18	Año 19	Año 20
1.188.145,90	1.208.344,38	1.228.886,23	1.249.777,30	1.271.023,51	1.292.630,91	1.314.605,64	1.336.953,93	1.359.682,15	1.382.796,75	1.406.304,29
564.189,55	549.547,10	536.679,05	525.437,49	515.688,03	507.308,61	500.188,36	494.226,60	489.331,96	485.421,51	482.420,03
239.400,11	235.475,52	231.550,93	227.626,34	223.701,75	219.777,15	215.852,56	211.927,97	208.003,38	204.078,78	200.154,19
261.248,33	261.248,33	261.248,33	261.248,33	261.248,33	261.248,33	261.248,33	261.248,33	261.248,33	261.248,33	261.248,33
362.708,01	397.548,94	430.958,85	463.091,48	494.087,15	524.073,97	553.168,95	581.479,00	609.101,86	636.126,91	662.635,93
108.812,40	119.264,68	129.287,66	138.927,44	148.226,14	157.222,19	165.950,68	174.443,70	182.730,56	190.838,07	198.790,78
253.895,61	278.284,26	301.671,20	324.164,04	345.861,00	366.851,78	387.218,26	407.035,30	426.371,30	445.288,83	463.845,15
515.143,94	539.532,59	562.919,53	585.412,37	607.109,34	628.100,11	648.466,60	668.283,64	687.619,64	706.537,17	725.093,48

18.9 ANEXO 9: CARACTERÍSTICAS DE LA NAVE

18.9.1 **Características de las vigas**

Ficha Características Técnicas según EHE
DE VIGA DELTA PRETENSADA

FABRICANTE

Nombre: PREFABRICADOS GILVA S.A.
Dirección: Ctra. Alcañiz, Km. 366
Población: 44570 CALANDA (Teruel)

TÉCNICO AUTOR DE LA MEMORIA

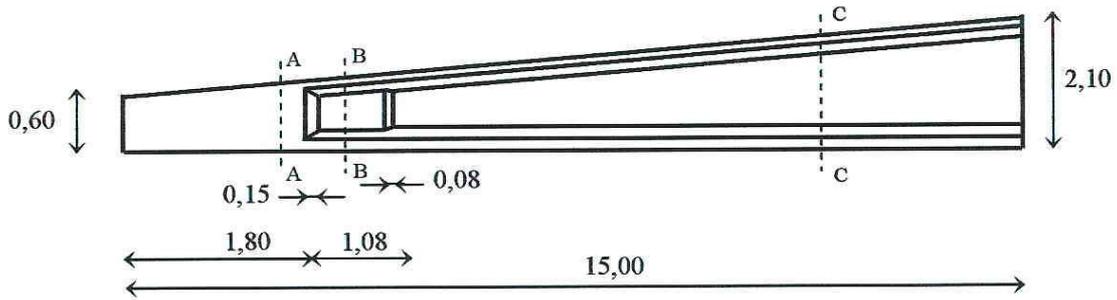
Nombre: Ricardo Ingles Lamiel
Titulación: Ingeniero Industrial

Colegio Ingenieros Industriales de Aragón, y La Rioja



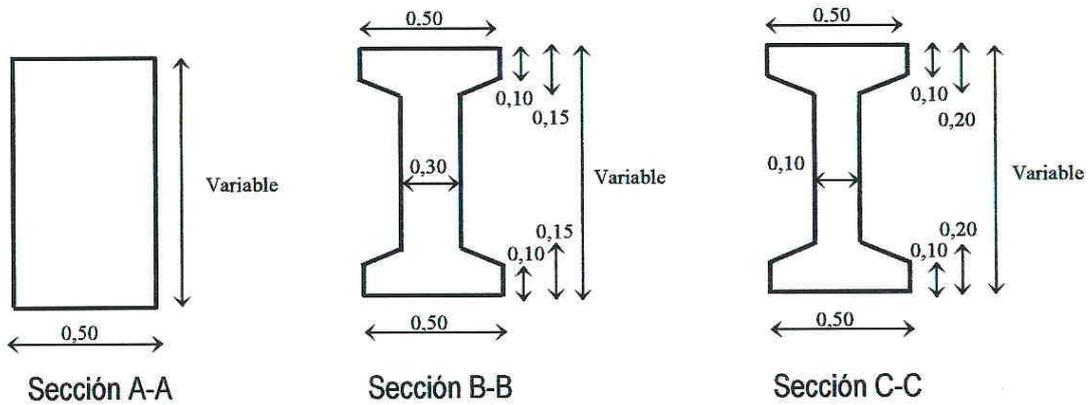
Hoja 1 de 4

1.- GEOMETRIA (Viga delta L = 30 m.)



Volumen total hormigón: 8,45 m³

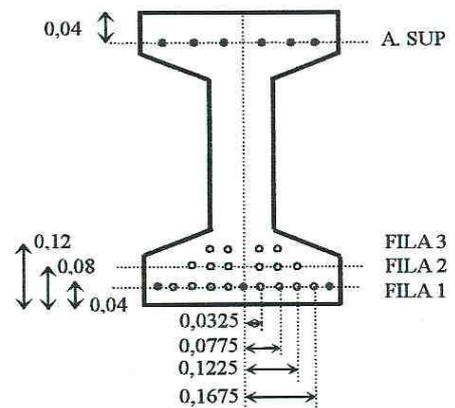
2.- DETALLES



3.- POSICIÓN DE LAS ARMADURAS

Fila	Posición (m.)
Fila 1	0,04 m. (Fibra inferior al c.d.g armaduras)
Fila 2	0,08 m. (Fibra inferior al c.d.g armaduras)
Fila 3	0,12 m. (Fibra inferior al c.d.g armaduras)
A. SUP	0,04 m. (Fibra superior al c.d.g armaduras)

- Armadura Pasiva
- Armadura Activa



Ficha Características Técnicas según EHE
DE VIGA DELTA PRETENSADA

Colegio Ingenieros Industriales de Aragón y La Rioja

FABRICANTE

Nombre: PREFABRICADOS GILVA S.A.
Dirección: Ctra. Alcañiz, Km. 366
Población: 44570 CALANDA (Teruel)

TÉCNICO AUTOR DE LA MEMORIA

Nombre: Ricardo Ingles Lamiel
Titulación: Ingeniero Industrial



Hoja 2 de 4

4.- MATERIALES (Viga delta L = 30 m.)

HORMIGÓN DE LA VIGA	HP-40	$f_{ck} = 40 \text{ N/mm}^2$	$\gamma_c = 1,50$
ACERO DE PRETENSAR CORDON Alargamiento rotura 4%	Y-1860 S7	$f_{pk} = 1.636 \text{ N/mm}^2$	$\gamma_s = 1,15$
ACERO ARMADURA PASIVA	B-500 S	$f_{yk} = 500 \text{ N/mm}^2$	$\gamma_s = 1,15$
	B-500 SD	$f_{yk} = 500 \text{ N/mm}^2$	$\gamma_s = 1,15$

Nota: El recubrimiento será acorde al ambiente de exposición del elemento en obra.

5.- ARMADO DE LA VIGA DELTA

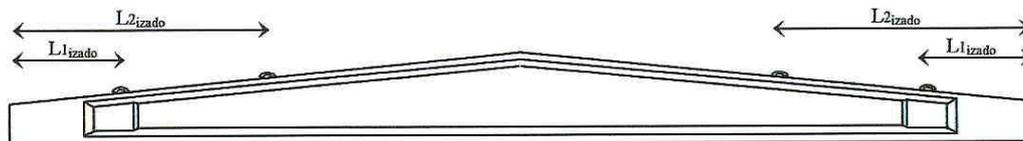
Situación de las armaduras

	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7
Fila 1 (Armadura activa)	8 \varnothing 0,5"						
Fila 2 (Armadura activa)		2 \varnothing 0,5"	4 \varnothing 0,5"	6 \varnothing 0,5"	6 \varnothing 0,5"	6 \varnothing 0,5"	6 \varnothing 0,5"
Fila 3 (Armadura activa)					2 \varnothing 0,5"	4 \varnothing 0,5"	2 \varnothing 0,5"
Fila 1 (Armadura pasiva)							3 \varnothing 16
Tensión inicial (N/mm ²)	1.395	1.395	1.395	1.395	1.395	1.395	1.395

Armadura de piel

$\varnothing 8$	Separación máxima 30 cm.
-----------------	--------------------------

Armadura operación de izado



A. Superior	6 \varnothing 16
L1izado	4,00 m. desde los extremos
L2izado	10,00 m. desde los extremos

Ficha Características Técnicas según EHE
DE VIGA DELTA PRETENSADA

FABRICANTE

Nombre: PREFABRICADOS GILVA S.A.
Dirección: Ctra. Alcañiz, Km. 366
Población: 44570 CALANDA (Teruel)

TÉCNICO AUTOR DE LA MEMORIA

Nombre: Ricardo Ingles Lamiel
Titulación: Ingeniero Industrial

Colegio Ingenieros Industriales de Aragón y La Rioja



Hoja 3 de 4

Fecha: Febrero 2008

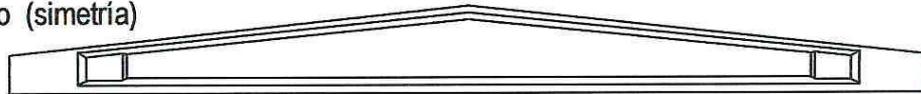
6.- CARACTERISTICAS MECANICAS DE LAS VIGAS (Viga delta L = 30 m.)

Tipo de Armado	σ Transferencia (N/mm ²)		FLEXIÓN POSITIVA			Zonas de Estribado (simetría)					
	σ _{p,inf}	σ _{p,sup}	Carga máxima (kN-m)	Carga de Servicio según Ambiente (kN-m)			Zona E1	Zona E2	Zona E3	Zona E4	Zona E5
				I II _a II _b H	III _a III _b III _c IV F Q _a Q _b Q _c						
T1	7,83	-1,99	4,85	4,85	3,20	2e ∅ 8 c/15 cm. L1 = 1,80 m.	e ∅ 8 c/15 cm. L2 = 1,70 m.	e ∅ 8 c/20 cm. L3 = 4,00 m.	e ∅ 8 c/30 cm. L4 = 7,50 m.		
T2	10,28	-1,74	7,21	7,21	5,25	2e ∅ 8 c/10 cm. L1 = 1,80 m.	e ∅ 8 c/10 cm. L2 = 2,20 m.	e ∅ 8 c/20 cm. L3 = 3,50 m.	e ∅ 8 c/30 cm. L4 = 7,50 m.		
T3	13,16	-1,67	9,47	9,47	7,18	2e ∅ 8 c/10 cm. L1 = 1,80 m.	e ∅ 8 c/10 cm. L2 = 2,20 m.	e ∅ 8 c/15 cm. L3 = 2,00 m.	e ∅ 8 c/20 cm. L4 = 1,50 m.	e ∅ 8 c/30 cm. L5 = 7,50 m.	
T4	15,98	-2,31	11,59	11,59	9,00	2e ∅ 8 c/7,5 cm. L1 = 1,80 m.	e ∅ 8 c/7,5 cm. L2 = 1,70 m.	e ∅ 8 c/10 cm. L3 = 2,50 m.	e ∅ 8 c/20 cm. L4 = 2,00 m.	e ∅ 8 c/30 cm. L5 = 7,00 m.	
T5	18,59	-1,03	14,04	14,04	10,64	2e ∅ 8 c/7,5 cm. L1 = 1,80 m.	e ∅ 8 c/7,5 cm. L2 = 1,70 m.	e ∅ 8 c/10 cm. L3 = 3,00 m.	e ∅ 8 c/20 cm. L4 = 1,50 m.	e ∅ 8 c/30 cm. L5 = 7,00 m.	
T6	21,14	-1,55	15,92	15,92	12,20	2e ∅ 8 c/5 cm. L1 = 1,80 m.	e ∅ 8 c/5 cm. L2 = 2,20 m.	e ∅ 8 c/10 cm. L3 = 3,00 m.	e ∅ 8 c/20 cm. L4 = 2,00 m.	e ∅ 8 c/30 cm. L5 = 6,00 m.	
T7	18,83	-1,07	15,93	15,93	10,70	2e ∅ 8 c/5 cm. L1 = 1,80 m.	e ∅ 8 c/5 cm. L2 = 2,20 m.	e ∅ 8 c/10 cm. L3 = 3,00 m.	e ∅ 8 c/20 cm. L4 = 2,00 m.	e ∅ 8 c/30 cm. L5 = 6,00 m.	

Zonas de Entubado (simetría)

T1: 2 No es necesario entubar
T2: 2 cordones de la fila 1 entubados 1,50 m.
T3: 4 cordones de la fila 1 entubados 1,50 m.
T4: 6 cordones de la fila 1 entubados 2,50 m
T5: 8 cordones de la fila 1 entubados 3,00 m.
T6 y T7: 8 cordones de la fila 1 entubados 2,50 m.

Zonas de Estribado (simetría)



Opción 1: ← E1 ↔ E2 ↔ E3 ↔ E4 →
Opción 2: ← E1 ↔ E2 ↔ E3 ↔ E4 ↔ E5 →

Las acciones derivadas del peso propio de la delta están incluidas en la obtención de los valores de carga reflejados.

Los valores de carga máxima corresponden con valores de servicio, donde se han utilizado como coeficientes de mayoración $\gamma_q = 1,50$ para las acciones variables y $\gamma_p = 1,35$ para las cargas permanentes.

La carga de servicio sobre la viga proveniente de las acciones debe ser menor que el valor de carga reflejado de acuerdo a la clase de exposición.

La armadura correspondiente a los estribos es la necesaria para verificar los esfuerzos existentes originados por la carga máxima.

Definición de los estribos: e ∅ - c/ - cm. = Estribo simple (2 ramas por estribo).

2 e ∅ - c/ - cm. = Estribo doble (4 ramas por estribo).

Ficha Características Técnicas según EHE
DE VIGA DELTA PRETENSADA

Colegio Ingenieros Industriales de Aragón y La Rioja

FABRICANTE

Nombre: PREFABRICADOS GILVA S.A.
Dirección: Ctra. Alcañiz, Km. 366
Población: 44570 CALANDA (Teruel)

TÉCNICO AUTOR DE LA MEMORIA

Nombre: Ricardo Ingles Lamiel
Titulación: Ingeniero Industrial



Hoja 4 de 4

Fecha: Febrero 2008

7.- CARACTERISTICAS MECANICAS Y GEOMETRICAS SECCIÓN REFERENCIA (Viga delta L = 30 m.)

Tipo de Armado	FLEXIÓN POSITIVA				
	Inercia (cm ⁴)		Módulo Resistente (cm ³)		Momento de fisuración (kN·m)
	Homogeneizada	Fisurada	Inferior	Superior	
T1	20012025	4665347	189294	191905	1754,72
T2	20089309	5226568	190454	192208	2039,00
T3	20166209	5719428	191613	192507	2309,30
T4	20242729	6160915	192772	192804	2566,29
T5	20311067	6551841	193833	193046	2803,52
T6	20379069	6882457	194893	193286	3029,66
T7	20595668	7049825	198123	194214	2819,77

8.- RESISTENCIA CARACTERISTICA MINIMA DEL HORMIGON EN LA ETAPA DE TRANSFERENCIA

Tipo de Armado	σ Transferencia (N/mm ²)	f_{ck} Transferencia(N/mm ²)
	σ_p , fibra inferior	
T1	7,83	13,05
T2	10,28	17,13
T3	13,16	21,93
T4	15,98	26,63
T5	18,59	30,98
T6	21,14	35,23
T7	18,83	31,38

En la obtención del momento de fisuración se ha utilizado el valor medio de resistencia a tracción del hormigón, de acuerdo a formulación según instrucción EHE art.º 39.

El valor correspondiente al momento de inercia homogeneizado corresponde al momento de inercia baricentrico de la sección.

Los valores correspondientes a los módulos resistentes, tanto para la fibra inferior y superior corresponden con la sección homogeneizada.

FICHA DE CARACTERISTICAS TECNICAS DE
LA VIGUETA AUTORRESISTENTE PRETENSADA

GILVA, S.A.

Ctra. de Alcañiz, km 366
44570 CALANDA (Teruel)

TECNICO AUTOR DE LA MEMORIA : Jordi Amat

Hoja nº 2 de 2



Ministerio de Vivienda

Dirección General de Arquitectura
y Política de Vivienda

Autorización de Uso adaptada a R.D. 642/2002: n°

7042-04 16 JUN 2004

Visado El Jefe de la Sección

Fdo: Angel Paz Martín

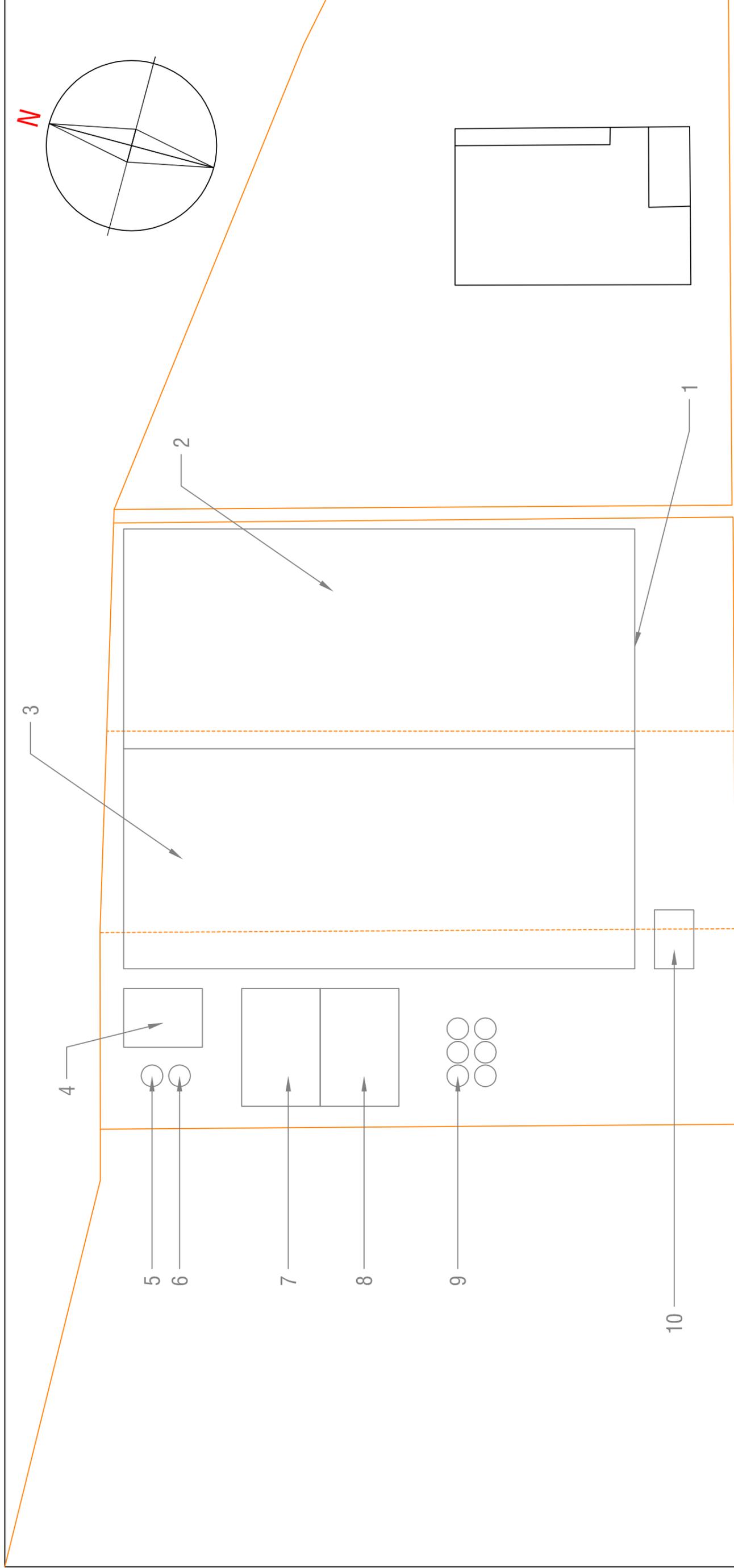
TIPO VIGUETA T-20	FLEXION POSITIVA				FLEXION NEGATIVA				RIGI- DEZ EI (4) m2·MN	CORTANTE ULTIMO Vu		
	MOMENTO ULTIMO Mu	MOMENTO LIMITE FIS. DES.Apl DESC. DE SERVICIO/CLASE			MOMENTO ULTIMO Mu	MOMENTO LIMITE FIS. D.Ap2 DESC. DE SERV. / CLASE				Anc. (2)	An/3	An/4
	m·kN(2)	III	I		m·kN(2)	III	I			kN	kN	kN
		m·kN (3)				m·kN (3)						
T-20.3	9.8	7.4	5.6	4.3	3.7	2.9	0.5	0.4	2.03	12.5	8.0	6.7
T-20.4	11.9	8.8	7.3	5.7	3.9	2.7	0.3	0.2	2.04	13.4	8.9	7.5
T-20.5	13.5	9.9	8.7	6.8	4.2	2.7	0.3	0.2	2.04	14.0	9.7	8.1
T-20.6	14.5	10.8	9.9	7.7	4.7	2.9	0.5	0.4	2.05	14.5	10.4	8.6
T-20.7	15.8	12.1	11.5	8.9	4.7	2.7	0.2	0.2	2.06	15.4	11.2	9.2
T-20.8	9.9	7.4	5.5	4.3	5.4	3.8	1.7	1.3	2.04	13.3	8.4	7.0
T-20.9	13.1	9.5	8.1	6.4	5.6	3.5	1.3	1.0	2.06	14.6	9.9	8.2
T-20.10	15.9	11.8	11.0	8.6	5.5	3.0	0.6	0.4	2.09	16.1	11.3	9.3
T-20.11	17.2	13.7	13.4	10.4	5.7	3.0	0.5	0.4	2.10	17.2	12.4	10.1
T-20.12	17.5	14.1	14.1	11.9	5.9	3.2	0.9	0.7	2.10	18.1	12.8	10.8

4.- NOTAS

- La fuerza de pretensado P_i y la excentricidad 'e' intervienen en el cálculo de la contraflecha $y_i = P_i * e * L^2 / (8 * EI)$. La Clase de exposición ambiental se deduce de la tabla de recubrimientos mínimos de 37.2.4 EHE-98; para ambientes más agresivos se completará con el revestimiento adecuado; el hormigón debe cumplir con la tabla 37.3.2.a EHE-98.
- Los momentos flectores y esfuerzos cortantes producidos por las cargas mayores con el coeficiente Γ_{mf} deben ser menores que los valores últimos.
- Los momentos de las cargas frecuentes sin mayorar ($\Gamma_{mf} = 1$), serán menores que los momentos límite de servicio. D.Ap2 se refiere al límite en que las armaduras activas están en zona comprimida, se comparará con cargas cuasipermanentes. El momento FIS. se refiere al de fisuración, menor que el de la fisura 0,2 mm.
- A 28 días. Para otra edad se multiplicará por el factor:

Edad	7 días	14 días	21 días	3 meses	6 meses	1 año	>5 años
Rigidez total	0,83	0,89	0,97	1,08	1,13	1,16	1,20
- Los valores del esfuerzo cortante Anc. An/3 y An/4 corresponden a las secciones situadas a una distancia l_{bpd} del extremo -con la armadura anclada-, a $l_{bpd}/3$ y a $l_{bpd}/4$ respectivamente. Calculados según 44.2.3 EHE-98.
- Las viguetas sin armadura transversal se aplicarán con entregas directas, no menores de 100 mm y las cargas solo incidirán en la cara superior de las viguetas. Las cargas no podrán ser importantes, como es el caso de vigas cargadero, ni tampoco las consecuencias de su fractura, como serían en edificios comerciales, por ejemplo.

18.9.2 Plano de la planta de producción



- 1- Recepción Sarmientos, Triturado y limpieza
- 2- Almacén 1
- 3- Almacén 2
- 4- Pretratamiento biomasa
- 5- Silo biomasa torrefactar
- 6- Silo biomasa no torrefactar
- 7- Planta torrefactado
- 8- Mezclado y pelletizado
- 9- Silos almacenaje
- 10- Oficinas



UNIVERSIDAD DE LEÓN
ESCUELA SUPERIOR Y TÉCNICA DE INGENIEROS DE MINAS



GRADO EN INGENIERÍA DE LA ENERGÍA

ESTUDIO DE VIABILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICO PARA EL USO DE PELLETS CON BIOMASA RESIDUAL
 TORREFACTADA EN CALDERAS

PLANO DE PLANTA

ESCALA 1:1000

FECHA JULIO 2016

PLANO Nº 1

Fdo.: LAURA LOSADA ASENSIO