



Universidad de Valladolid
Campus de Palencia

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR
DE INGENIERÍAS AGRARIAS**

Máster en Ingeniería de Montes

**ESTUDIO DEL CONSUMO ENERGÉTICO
EN LAS FASES DE PRODUCCIÓN DE
PÉLETS EN UNA INSTALACIÓN PILOTO:
APLICACIÓN A DISTINTAS BIOMASAS
LIGNOCELULÓSICAS**

Alumno: Javier Ortega Martínez

Tutor: Luis Acuña Rello
Cotutor: Luis S. Esteban Pascual

Junio de 2015

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, agradecer a mi tutor en el CEDER, Luis Esteban y a Raquel Bados, por su dedicación, compromiso, conocimientos aportados e inestimable ayuda, sin los cuales no hubiera sido posible la realización de este estudio tal y como se presenta. A Luis Acuña, tutor desde la universidad, por la continua disposición que ha mostrado durante la elaboración del presente estudio. Y al CEDER-CIEMAT por permitirme ser partícipe de sus investigaciones y utilizar sus infraestructuras.

En segundo lugar, agradecer a mi familia, y en especial a mi madre y a mi hermana por el apoyo continuo y por aguantarme durante todos los momentos, buenos y malos, de todos estos años de universidad.

A todos los compañeros del CEDER que hicieron más agradable la estancia en el Centro y en especial a los compañeros de prácticas con los que tantos buenos ratos compartimos.

Agradecer también al proyecto BIOH2: “Nuevas estrategias en el aprovechamiento integral de la biomasa vegetal para la producción sostenible de hidrogeno sin emisiones de dióxido de carbono”.

A todos ellos, GRACIAS

INDICE

1. RESUMEN.....	2
2.1 INTRODUCCIÓN	5
2.2 BIOMASA COMO ENERGÍA ALTERNATIVA.....	6
2.2.1. Propiedades de la biomasa.....	10
2.2.1.1. Contenido de humedad	11
2.2.1.2. Poder calorífico	12
2.2.1.3. Distribución del tamaño de partícula.....	12
2.2.1.4. Densidad	13
2.2.1.5. Contenido y composición de las cenizas	13
2.2.1.6. Contenido de cloruro y potasio	13
2.2.2 Compactación de la biomasa	14
2.2.3 Tendencia del mercado.....	15
2.2.4 Requisitos de la materia prima biomásica en peletización	16
2.2.5 Fases del proceso de densificación	17
2.2.5.1. Pretratamientos de la biomasa	17
2.2.5.2. Premolienda	18
2.2.5.3. Secado	18
2.2.5.4. Molienda.....	19
2.2.5.5. Peletizado	19
2.2.5.6. Enfriamiento y ensacado	21
2.3 TEORÍA DE SECADO	22
2.3.1. Fases del proceso de secado	24
2.3.2. Factores que interfieren en el proceso de secado.....	25
2.3.2.1. Temperatura del aire	25
2.3.2.2. Humedad relativa del aire.....	25
2.3.2.3. Velocidad del aire	26
2.3.3. Secado solar.....	26

2.3.4. Tipos de secaderos.....	27
2.3.4.1. Secadero de tipo rotatorio	27
2.3.4.1.1. Clasificación	27
2.3.4.1.2. Proceso de secado.....	28
2.3.4.2. Secadero solar	29
2.3.4.2.1. Clasificación	29
2.3.4.2.2. Proceso de secado.....	30
2.3.4.2.3. Parámetros de evaluación de secaderos solares	30
2.3.4.2.3.1 Características físicas del secadero	31
2.4 CENTRO DE DESARROLLO DE ENERGÍAS RENOVABLES (CEDER)	32
2.4.1. Ensayos en plantas pilotos	33
3. OBJETIVOS.....	36
4. MATERIAL Y MÉTODOS.....	38
4.1 MATERIAL	38
4.2 PROCESO PRODUCTIVO DE FABRICACIÓN DE PÉLETS	40
4.2.1 Descripción de los equipos	42
4.2.1.1 Planta piloto de trituración y molienda	42
4.2.1.2 Planta piloto de secado forzado.....	45
4.2.1.3. Planta piloto de molienda	50
4.2.1.4. Planta piloto de peletizado.....	51
4.2.2 Determinación de la humedad	54
4.2.2.1 Determinación en laboratorio.....	54
4.2.2.2 Determinación en planta de secado	55
4.2.3 Determinación de parámetros energéticos.....	57
4.2.4 Determinación del balance global de energía	57
4.2.5 Determinación de la eficiencia del secado	58
4.2.6 Determinación del sello ENplus	59
4.3. PROCESAMIENTO DE DATOS.....	60

4.3.1. Parámetros energéticos	60
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	62
5.1 BALANCE ENERGÉTICO	62
5.1.1 Energía consumida	62
5.1.1.1. Premolienda	62
5.1.1.2 Secado	63
5.1.1.3 Molienda.....	65
5.1.1.4 Peletizado	66
5.1.2. Energía contenida en los pélets obtenidos.....	67
5.1.3 Balance global del proceso productivo.....	68
5.2 EFICIENCIA TÉRMICA DEL SECADO	73
5.3 AHORRO ENERGÉTICO	75
6. CONCLUSIONES	78
7. BIBLIOGRAFÍA.....	81

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Composición química de la biomasa.....	10
Tabla 2. Contenido de energía de los componentes de la madera.	10
Tabla 3. Variantes de cada biomasa utilizada y su designación posterior.....	39
Tabla 4. Contenido de humedad al inicio del ensayo de cada biomasa	39
Tabla 5. Características de los pélets de madera en función de las calidades EN+....	60
Tabla 6. Energía consumida en el proceso de premolienda	62
Tabla 7. Energía consumida en el proceso de secado en cada secadero	63
Tabla 8. Energía consumida en el proceso de molienda	65
Tabla 9. Energía consumida en el proceso de peletizado.....	66
Tabla 10. Contenido energético de los pélets obtenidos.....	67
Tabla 11. Energía consumida total en cada fase del proceso de peletizado para el secado en secadero rotativo	69
Tabla 12. Energía consumida total* en cada fase del proceso de peletizado para el secado en secadero solar.....	69
Tabla 13. Energía consumida en cada fase del proceso de peletización respecto a la contenida en los pélets obtenidos. Secado realizado en secadero rotativo.....	71
Tabla 14. Energía consumida* en cada fase del proceso de peletización respecto a la contenida en los pélets obtenidos. Secado realizado en secadero solar.....	71
Tabla 15. Comparativa de la eficiencia térmica del proceso de secado en el secadero rotativo y en el secadero solar.	73
Tabla 16. Ahorro energético producido durante el proceso de fabricación de pélets derivado de la utilización del secadero solar respecto al trómel.....	75

INDICE DE FIGURAS

Figura 1 .Ciclo del CO ₂	7
Figura 2 . Diferentes tipos de biomasa y pélets obtenidos	14
Figura 3 . Producción global de pélets de biomasa.	16
Figura 4 . Diseño esquemático de una planta típica de péletizado de biomasa.....	20
Figura 5 . Esquema de funcionamiento prensa peletizadora de matriz plana KAHL....	21
Figura 6 . Transferencia de masa y energía en el secado térmico.	23
Figura 7 . Fases del proceso de secado.....	25
Figura 8 . Detalle del diseño de las paletas de un secadero rotativo.	28
Figura 9 . Izquierda: Vista aérea del recinto CEDER-CIEMAT (en Lubia, Soria). Derecha: Instalaciones del CEDER.	32
Figura 10 . Detalle de astillas de la muestra <i>Roble verde astillado</i> (izquierda) y de <i>Roble verde triturado</i> (derecha).	40
Figura 11 . Etapas del proceso productivo de fabricación de pélets.....	41
Figura 12 . Izquierda: Triturador de giro lento de doble eje. Derecha: Detalle del proceso de trituración en la muestra <i>Roble verde triturado</i>	43
Figura 13 . Molino de cuchillas y cinta transportadora.....	44
Figura 14 Astilladora forestal móvil Bruks 892 MT	45
Figura 15 . Vista del secadero piloto tipo trómel.....	46
Figura 16 Diagrama de flujo de secadero rotativo experimental para biomasa con indicación de equipamiento eléctrico y de control.	47
Figura 17 . (Arriba) Vista lateral secadero solar experimental. (Abajo) Esquema secadero solar experimental con indicación de equipamiento.....	48
Figura 18 . Detalle de la planta de secado solar durante el secado de la muestra <i>Astilla de olmo 2</i>	49
Figura 19 . Detalle de la planta piloto de molienda	50
Figura 20 . Diagrama de flujo de la planta piloto de molienda	51
Figura 21 . Detalle de un agujero de la matriz durante el proceso de peletización.	52
Figura 22 . Vista de la planta piloto de peletizado con indicación del equipamiento	53
Figura 23 . Diagrama de flujo de la planta piloto de peletizado.	54
Figura 24 . Medidor de humedad (NIR).....	55
Figura 25 . Detalle del NIR funcionando a la salida del material del secadero rotativo.....	56

1. RESUMEN

1. RESUMEN

La utilización de biomasa lignocelulósica para su aprovechamiento energético como combustible se ve frenada por su baja densidad y por la dificultad de automatizar los procesos de generación energética. Para solventar este hecho se recurre a su compactación en pequeños cilindros llamados pélets.

El proceso de fabricación de los pélets es un proceso costoso desde el punto de vista energético, por ello en el presente estudio se analizan, desde la perspectiva de una planta piloto, las fases que lo componen, con el objeto de determinar los parámetros que más influyen en el consumo, así como, evaluar una alternativa más eficiente a la fase del secado de la biomasa, por ser ésta, la fase más costosa del proceso de fabricación.

Para ello, se trabaja con cuatro diferentes biomosas lignocelulósicas (*Pinus pinaster* Ait, *Nicotiana glauca* Graham, *Ulmus pumila* L y *Quercus pyrenaica* Willd) las cuales se someten a las diversas fases que componen el proceso de fabricación de los pélets, introduciendo diferentes variables en su tratamiento y determinando en todo momento, el contenido de humedad y la granulometría de las muestras, para examinar su respectivo efecto y el de los tratamientos recibidos, en el consumo final.

Con el objeto de evaluar una alternativa más económica en la fase de secado de la biomasa, se realiza una comparación de dos equipos de secado: un secadero rotativo convencional y una planta piloto de secado solar. En ambos equipos se llevan a cabo los mismos ensayos, con el fin de obtener el efecto que tiene el empleo de un secadero u otro.

Tras la obtención de los pélets respectivos a cada biomasa, se lleva a cabo un balance energético del consumo necesitado en su elaboración referido al contenido energético de los mismos. Los resultados se comparan de forma manual debido al reducido número de ensayos que posibilita la escala piloto de la instalación empleada

Los ensayos realizados muestran que el proceso de peletizado consume alrededor del 15% de la energía contenida en los pélets. De toda esta energía consumida, la mayoría se destina al secado de la biomasa, siendo precisamente por esto, el contenido de humedad de las muestras, la variable que más influye en el consumo energético final.

El uso de la planta piloto de secado solar produce un ahorro energético de aproximadamente un 37 % respecto al secadero rotativo convencional, por lo que este equipo, todavía en fase de experimentación, adquiere un potencial muy importante de cara a reducir costes en la elaboración de pélets de biomasa.

2. ANTECEDENTES

2.1 INTRODUCCIÓN

La explotación de la biomasa en nuestro país ha sido una práctica habitual por parte de la población que, hasta nuestros días, ha habitado en él. La leña ha sido la fuente de energía más empleada en las viviendas, tanto rurales como en las ciudades, para la calefacción y la cocina, así como el combustible de los primeros motores a vapor que impulsaban las primeras locomotoras de ferrocarril y embarcaciones de gran eslora. Poco a poco, con el avance de las nuevas tecnologías y la competitividad de la industria, la biomasa ha sido sustituida por combustibles fósiles que, en un principio, tienen una mayor densidad energética (también un mayor coste de extracción).

Sin embargo, los efectos nocivos provocados por el uso masivo de los combustibles fósiles que incrementan la contaminación contribuyendo al efecto invernadero y al cambio climático, así como la continua volatilidad de los precios del petróleo y todos sus derivados, han motivado que durante los últimos años se dediquen cada vez más recursos a la búsqueda y el impulso de nuevas fuentes energéticas menos agresivas con el medio ambiente y que contribuyan a romper la actual dependencia de los combustibles fósiles. Según publica IDAE (2011b), España se ha comprometido a producir el 20% de la energía consumida a partir de fuentes de energía renovable en el periodo 2010-2020. En 2010 esta cifra era del 13,2%. En este contexto donde las energías renovables tienen un papel fundamental, la biomasa ocupa un lugar destacado.

El uso de la biomasa como recurso energético, en lugar de los combustibles fósiles comúnmente utilizados, supone una serie de ventajas medioambientales de primer orden, que convierten a la biomasa en una de las fuentes potenciales de energía en el futuro produciendo además una reducción en la dependencia energética de los países.

En este sentido, es crucial la existencia de un balance energético positivo y un balance de emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) negativo. Esto quiere decir, por un lado, que la energía neta contenida en el biocombustible obtenido de la biomasa resulte superior a la energía primaria gastada en todo el proceso de transformación (el aprovechamiento y los tratamientos de la biomasa); y por otro, que las emisiones de los principales GEI generadas por dichos procesos sean inferiores a las generadas por los combustibles fósiles que pretenden sustituir.

2.2 BIOMASA COMO ENERGÍA ALTERNATIVA.

La biomasa según IDAE (2011a), se define como el conjunto de la materia orgánica, de origen vegetal y los materiales que proceden de su transformación natural o artificial, utilizable como fuente de energía.

Esta definición abarca un gran grupo de materiales de diversos orígenes y con características muy diferentes (García Calvo et al, 2010). Por un lado se encuentra la biomasa natural, producida en la naturaleza sin intervención humana. Por otro, los residuos de biomasa que se clasifican en función de su procedencia: 1) residuos forestales; 2) residuos agrícolas (podas de cultivos leñosos, cultivos de cereales e incluso herbáceos); 3) residuos de industrias forestales (tratamiento de madera, corcho o papel, etc.); 4) residuos biodegradables de industrias agroalimentarias y agroalimentarias y también los procedentes de la actividad urbana; 5) cultivos energéticos y biocarburantes etc., es decir, la biomasa producida, donde se produce un tipo de especie con la única finalidad de su aprovechamiento energético. Todos estos materiales pueden considerarse dentro de la citada definición.

Conviene tener muy presente esta diversidad cuando se quiere realizar una aproximación a una energía que comienza su amplio perfil desde la definición, ya que biomasa, sin la acepción energética, es la cantidad de materia viva presente en un medio o en un organismo (IDAE, 2007a).

La energía que contiene la biomasa, es energía solar almacenada a través de la fotosíntesis, proceso por el cual algunos organismos vivos, como las plantas, utilizan la energía solar para convertir los compuestos inorgánicos que asimilan (como el CO₂) en compuestos orgánicos. Por tanto, la biomasa puede ser considerada como toda materia orgánica, en la que se almacena la energía de la luz solar en forma de enlaces químicos. (McKendry, 2002). Cuando los enlaces entre las moléculas adyacentes de carbono, hidrógeno y oxígeno se rompen por digestión, combustión o descomposición, se libera la energía química almacenada. Normalmente, la fotosíntesis convierte menos del 1% de la luz solar disponible en energía almacenada en forma de enlaces químicos. Si la biomasa se procesa de manera eficiente, ya sea química o biológicamente, el carbono almacenado se oxida liberando energía y produciendo CO₂ y agua, si las reacciones son completas (McKendry, 2002).

Otro aspecto a tener en cuenta, es que la biomasa es un combustible no fósil, neutro desde el punto de vista del ciclo del carbono (ver Figura 1). Las emisiones netas de CO_2 que se producen, al proceder de un carbono retirado de la atmósfera en el mismo ciclo biológico, no alteran el equilibrio de la concentración de carbono atmosférico, y por tanto no incrementan el efecto invernadero (IMARTEC, 2014).

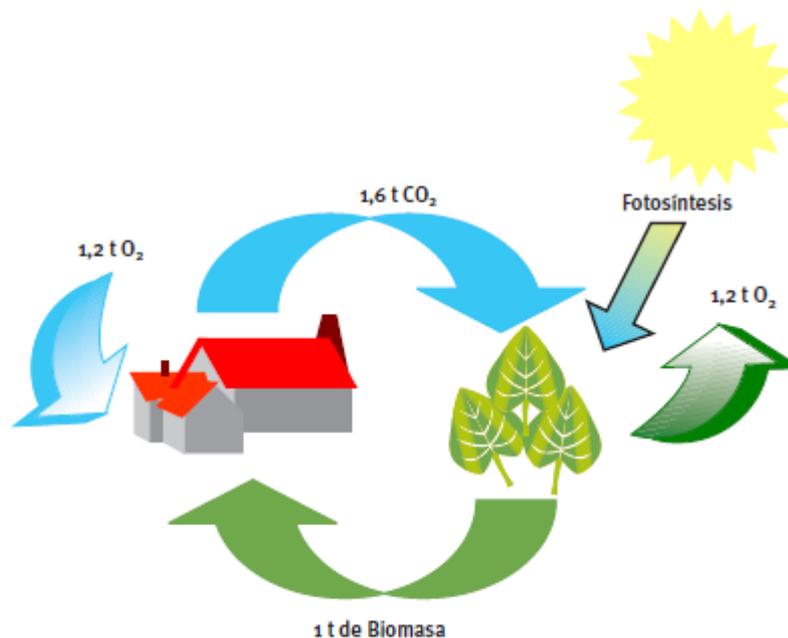


Figura 1 .Ciclo del CO_2 . Fuente: IDAE (2007a).

Sin embargo, como explica McKendry (2002), la biomasa procedente de combustibles fósiles como el carbón y el petróleo, tarda millones de años en formarse, por lo que se consideran no renovables dentro de la escala de tiempo humana. La quema de combustibles fósiles utiliza biomasa "vieja" y la convierte en "nuevas" emisiones de CO_2 ; que contribuye al " efecto invernadero" y disminuye un recurso no renovable. Por el contrario la quema de biomasa nueva, no produce ningún nuevo dióxido de carbono a la atmósfera, el proceso es cíclico, ya que el carbono que se libera está entonces disponible para producir nueva biomasa.

Su uso contribuye a reducir las emisiones de CO_2 a la atmósfera siempre que sustituya a un combustible fósil y su consumo se realice de forma sostenible (IMARTEC, 2014).

Además la biomasa es una fuente de energía autóctona, disponible en la mayoría de los países y su aplicación puede transformar el suministro de combustible en muchas situaciones, que a su vez puede conducir a un suministro energético más seguro. La

producción de biomasa puede llegar a ser fuente potencial de empleo en el futuro, siendo un elemento de gran importancia para el equilibrio territorial, en especial en las zonas rurales, y si la agricultura intensiva se sustituye por cultivos energéticos, que requieren menos manejo, es probable que se produzcan beneficios ambientales, como la reducción del uso de fertilizantes y de pesticidas. Por otra parte, seleccionando cultivos apropiados, se pueden restaurar tierras degradadas. Dependiendo de los cultivos utilizados y la forma en que se cultive la biomasa, se puede incrementar la biodiversidad, en comparación con las prácticas agrícolas actuales (McKendry, 2002).

Los usos de los diferentes tipos de biomasa se pueden clasificar principalmente en dos: térmicos y eléctricos. Se distingue claramente la producción de electricidad mediante cogeneración, de la sola producción eléctrica con biomasa (IDAE, 2007b) y es que este tipo de combustible puede sustituir a los combustibles fósiles de forma eficiente en procesos industriales que necesitan aporte térmico, como son el secado, la producción de agua caliente, vapor, aceite térmico, etc. La producción de electricidad precisa de sistemas complejos dado el bajo poder calorífico de la biomasa, su alto porcentaje de humedad y su gran contenido en volátiles.

En Europa, según IDAE (2007a), el 54% de la energía primaria de origen renovable procede de esta fuente, sin embargo sólo supone el 4% sobre el total energético. La mayoría es destinada a la generación de calor en viviendas unifamiliares, comunidades de vecinos y en redes de calefacción centralizada. En general, en torno al 83% se destina a usos térmicos y el 17% a la producción de electricidad.

En España, en la actualidad, la biomasa alcanza el 45% de la producción con energías renovables, lo que equivale al 2,9% respecto del total de consumo de energía primaria incluidas las convencionales (IDAE, 2007a).

Las aplicaciones térmicas, vinculadas al sector doméstico: sistemas de calefacción y a la generación de agua caliente sanitaria, son las que dominan frente a las eléctricas. En el cómputo global del consumo, además del sector doméstico, destacan las industrias de pasta y papel; las de madera, muebles y corcho; y las de alimentación, bebidas y tabaco, que suman el 90% del total (IDAE, 2007a). Igualmente, tanto en aplicaciones eléctricas como térmicas, los recursos más utilizados son los residuos procedentes de industrias forestales y agrícolas (IDAE, 2008).

El coste económico de la biomasa generalmente es inferior al de otros combustibles (como son el gas natural y el gasóleo). Varía según la cantidad demandada, la

distancia de transporte y los posibles tratamientos para mejorar su calidad, como el secado, el astillado o la peletización. Incluso puede llegar a tener un coste cero, dependiendo de los mercados, si la biomasa es un residuo del propio proceso industrial de la fábrica. Otra de las ventajas de la biomasa, es la diversificación y la posibilidad de hibridación de combustibles biomásicos, incluso de mezclas de éstos con otros de origen fósil.

La posible reforestación, como se ha mencionado con anterioridad, de tierras agrícolas o desforestadas con cultivos energéticos, herbáceos o leñosos con destino a la producción de biomasa, es otro aspecto a tener en cuenta, ya que se aumentaría la retención de agua y la disminución de la degradación y erosión del suelo. Los usos energéticos de la biomasa pueden también contribuir al mantenimiento de las actividades agrícolas (cultivos energéticos), y a la revalorización de algunos residuos agrícolas y ganaderos (Meza et al, 2009).

Respecto a las aplicaciones energéticas, las calderas modernas de biomasa no producen humos como las antiguas chimeneas de leña, y sus emisiones son comparables a los sistemas modernos de gasóleo C y gas. La composición de estas emisiones es básicamente parte del CO₂ captado por la planta origen de la biomasa y agua, con una baja presencia de compuestos de nitrógeno y con bajas o nulas cantidades de azufre, uno de los grandes problemas de otros combustibles. La mayor ventaja es el balance neutro de las emisiones de CO₂, al cerrar el ciclo del carbono que comenzaron las plantas al absorberlo durante su crecimiento, como ya se ha comentado en párrafos anteriores.

2.2.1. Propiedades de la biomasa

La biomasa, independiente de su origen, tiene una composición elemental muy similar (ver Tabla 1). En esta categoría se encuentra la biomasa de lento crecimiento, tal como aquella de maderas duras, blandas y sus correspondientes cortezas, y la biomasa de rápido crecimiento como los desechos fibrosos provenientes de la agricultura.

Tabla 1. Composición química de la biomasa. Fuente: Jara (2009)

BIOMASA	C % peso	H % peso	O % peso	S % peso	N % peso	Cenizas % peso	Cl mg/kg seco	K mg/kg seco
Maderas Coníferas	50	6	40	0,09	0,7	3,3	310	1570
Maderas Tropicales	52,4	5,7	39,8	0,01	0,3	1,8	50	3380
Olivo	49,8	6	40,4	0,06	0,7	3	350	8710
Paja de Trigo	45,6	5,7	40	0,09	0,7	7,9	2210	16200
Paja de Cebada	45,6	5,6	42,5	0,09	0,5	5,7	4720	16700
Tabaco	49,2	5,7	42,1	0,04	0,6	2,4	150	2830

Las reacciones exotérmicas del carbono e hidrógeno permiten liberar una gran cantidad de energía por unidad de masa, independiente del origen de la biomasa. Este punto es muy relevante cuando se buscan fuentes de biomasa y se tiende a asociar una mayor densidad con una mejor calidad de combustible; sin embargo la diferencia fundamental radica en la cantidad de energía por unidad de volumen.

La biomasa está compuesta por lignina, celulosas, hemicelulosas y resinas (ver Tabla 2). El mayor contenido de carbono e hidrógeno de la lignina y las resinas incide fuertemente en el contenido final de energía.

Tabla 2. Contenido de energía de los componentes de la madera. Fuente: Jara (2009)

COMPONENTES	ENERGÍA DISPONIBLE mj/kg seco
Lignina	30
Celulosa	17,5
Hemicelulosa	17
Resinas y Aceites	38

Normalmente el contenido de energía se especifica a través de su poder calorífico superior (PCS) o inferior (PCI). La diferencia entre el poder calorífico superior e inferior de la biomasa seca, radica en la energía requerida para evaporar el agua formada en

la reacción de combustión. Ya que la gran mayoría de los sistemas de generación de calor por combustión no aprovechan la energía generada por la evaporación del agua, debido a la alta corrosión que se produce al intentar condensarla. Se denomina también “energía neta disponible” al poder calorífico inferior de la biomasa.

En esencia, todas las biomásas vegetales tienen la misma energía neta disponible, independiente si provienen de plantas de lento crecimiento o plantas anuales. La utilización de una u otro tipo de biomasa como combustible depende de la tecnología de combustión disponible y de los costos de manejo y procesamiento de la biomasa desde su lugar de origen hasta la planta térmica.

A la hora de definir la calidad de un combustible las siguientes características de la biomasa se consideran como las más relevantes (Jara, 2009):

- 1.- Contenido de humedad
- 2.- Poder calorífico
- 3.- Distribución del tamaño de partícula
- 4.- Densidad
- 5.- Contenido y composición de las cenizas
- 6.- Contenido de cloruro y potasio

2.2.1.1. Contenido de humedad

El contenido de humedad se expresa como el porcentaje de agua presente sobre el peso total. La cantidad de humedad presente en un material puede ser expresada en base húmeda (bh) o en base seca (bs), e indicada como decimal o porcentaje (Ekechukwu, 1999; Corvalan et al, 1995).

El contenido de humedad en base húmeda, definido como el peso del agua presente en el producto por unidad de peso del material sin secar, viene dado por la ecuación 1. De igual manera, el contenido de humedad en base seca, definido como el peso del agua presente en el producto por unidad de peso del material seco, se indica en la expresión 2.

$$H(bh) = \frac{P_{agua}}{P_{inicial}} = \frac{P_{inicial} - P_{final}}{P_{inicial}} \quad (1)$$

$$H(bs) = \frac{P_{agua}}{P_{final}} = \frac{P_{inicial} - P_{final}}{P_{final}} \quad (2)$$

Donde $H(bh)$ es la humedad en base húmeda (kg agua/ kg materia húmeda), $H(bs)$ es la humedad en base seca (kg agua/ kg materia seca), $P_{inicial}$ es el peso inicial de material sin secar (kg), P_{agua} es la cantidad de agua en el producto húmedo (kg) y P_{final} es el peso de la materia seca en el producto (kg)

Evidentemente el contenido de energía por masa húmeda desciende con el aumento de la humedad.

2.2.1.2. Poder calorífico

El poder calorífico de un combustible es una expresión del contenido de energía o del calor liberado cuando se quema por completo este combustible, en un proceso de flujo estacionario y los productos vuelven al estado de los reactivos dependiendo de la fase del H_2O en los productos (McKendry, 2002). El poder calorífico se mide en términos del contenido energético por unidad de masa o volumen; por lo tanto, MJ/kg para sólidos, MJ/l para los líquidos.

El poder calorífico de un combustible puede expresarse de dos formas: el poder calorífico superior (PCS) y el poder calorífico inferior (PCI).

- El PCS se corresponde con la cantidad de calor desprendido en la combustión completa del combustible cuando el vapor de agua originado en la combustión está condensado. Así pues, se contabiliza el calor desprendido en este cambio de fase.
- El PCI se define como la cantidad de calor desprendido en la combustión completa de combustible sin contar la parte correspondiente al calor latente de vapor de agua de la combustión, ya que no se produce cambio de fase, sino que se expulsa en forma de vapor.

2.2.1.3. Distribución del tamaño de partícula

La mayor parte de la biomasa disponible está en un tamaño inadecuado para su procesamiento en calderas y debe ser molida o astillada. La tecnología a utilizar en el procesamiento de la biomasa permitirá un mayor o menor control de la granulometría, pero puede tener un impacto relevante en los costes de procesamiento. El tipo de materia prima utilizada puede influir en la homogeneidad de las partículas generadas.

2.2.1.4. Densidad

La densidad de la biomasa combustible es un parámetro esencial, ya que la gran mayoría de la biomasa se tasa en el mercado por volumen y evidentemente interesa que en un metro cúbico contenga la mayor cantidad de biomasa. Habitualmente se utiliza la densidad estéreo (bulk density) como parámetro de medición, para medir el contenido de biomasa seca astillada o triturada por unidad de volumen. La densidad estéreo es un parámetro fundamental, ya que indirectamente mide el contenido neto de energía de la biomasa. Además., la densidad de la biomasa, en las diferentes formas que se encuentra, impacta enormemente en los costos de transporte.

2.2.1.5. Contenido y composición de las cenizas

Dependiendo de la cantidad de cenizas producidas por la biomasa, la energía disponible del combustible se reduce proporcionalmente (McKendry, 2002)

En general, el contenido de cenizas de la mayoría de las biomásas no supera el 5% en peso (Jara, 2009), sin embargo, durante el procesamiento y manejo se puede contaminar con arena o tierra, elevando considerablemente esta cifra y reduciendo la energía neta disponible.

La ceniza de caldera de biomasa es un producto heterogéneo cuya composición depende, entre otros factores, no sólo de la materia prima utilizada, sino que también del proceso de combustión. Las cenizas están formadas por compuestos sólidos estables a alta temperatura y otros que pueden no serlo en dichas condiciones, pero condensan al bajar la temperatura de humos antes de la emisión.

La composición de la ceniza y el punto de fusión (interesa que sea elevado) pueden generar problemas de depósitos en las calderas y reducir la disponibilidad del equipo por fallas en sus sistemas de limpieza

2.2.1.6. Contenido de cloruro y potasio

El cloruro y el potasio acompañan normalmente a la biomasa en pequeñas concentraciones. La biomasa proveniente de plantas estacionales tiene normalmente un mayor contenido de sales que las plantas de lento crecimiento (Jara, 2009). Tras la combustión estas sales se concentran en los depósitos reduciendo el punto de fusión

de las cenizas bajas, generando cambios que pueden acarrear problemas serios de taponamiento o corrosión en la caldera.

2.2.2 Compactación de la biomasa

Una de las mayores limitaciones que presenta el aprovechamiento energético de la biomasa en general es su baja densidad. Esto hace necesarios grandes volúmenes de almacén y encarece notablemente el transporte y el manejo por lo que, para evitar este inconveniente, se procede a compactarla obteniéndose productos elaborados como las briquetas y los pélets, que presentan ventajas adicionales como la limpieza, homogeneidad y facilidad de manejo, a la vez que se reducen considerablemente las pérdidas por degradación durante períodos de almacenaje prolongados (Ortíz, 2008).

El presente estudio se va a centrar únicamente en el proceso de producción de pélets.



Figura 2. Diferentes tipos de biomasa y pélets obtenidos. Fuente: <http://blog.simbolocalidad.com/>

Los pélets de madera se definen según la norma UNE EN 14961-2:2012 como un 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 40mm, con extremos rotos (ver Figura 2).

En las líneas posteriores se usará la palabra pélet para referirse a los pélets de madera para uso energético.

La fabricación de pélets se realiza mediante un proceso denominado peletizado cuyo fundamento operativo se basa en la presión ejercida por una serie de rodillos (de 1 a 5) sobre madera seca (virutas o serrín) situada sobre una matriz metálica dotada de orificios de calibre variable (5 a 25 mm). Los pélets de biomasa se fabrican a partir de un producto base con una humedad comprendida entre el 8 y 15% bh y un tamaño de partícula del orden de 5 mm. La densidad aparente a granel es del orden de 800 kg/m³ (Ortíz, 2008), teniendo el resultado final un muy bajo contenido de agua.

Los pélets de biomasa son un combustible renovable y limpio, son naturales y no llevan ningún químico aglomerante, ya que la lignina contenida en la madera actúa como adhesivo natural, por lo que no son nada contaminantes (Apropellets, 2013).

Son generalmente un combustible superior en comparación con su materia prima en “crudo”, ya que presenta una mayor densidad energética. Asimismo, permite el aprovisionamiento con independencia de la época de recolección de cultivos energéticos o de aprovechamiento o limpieza forestal, quedando garantizado el suministro durante todo el año. Reduce el espacio de almacenamiento y transporte y por lo tanto, sus respectivos costes, y además hace que la materia prima sea más homogénea, en tamaño, en forma y en contenido de humedad. La estandarización de estos últimos parámetros permite la alimentación automática en calderas domésticas e industriales y la mejora de la combustión (Stelte, 2011). En cuanto al empleo como combustible del pélet, cabe señalar que es posible obtener rendimientos energéticos del orden del 80%-95% (Ortíz, 2008).

Por todo ello, este combustible se ha considerado como uno de los sustitutos de los combustibles fósiles como el carbón y el petróleo para calefacción y cogeneración (Wang y Yan, 2005). Para producir la misma cantidad de calor, 2 kg de pélets equivalen aproximadamente a 1 litro de gasoil (IDAE, 2012).

2.2.3 Tendencia del mercado

El mercado mundial de pellets marca una tendencia claramente al alza (ver Figura 3), mostrando índices de crecimiento en los últimos años, al pasar de una producción de siete millones de toneladas a finales de 2006, a más de 25 millones en 2014 (WPAC, 2014), siendo el continente europeo uno de los mayores consumidores de este insumo, registrando volúmenes de producción que sobrepasan los 10 millones de

toneladas por año tan solo en la Unión Europea, en donde se resaltan a Lituania, Alemania, Estonia, Letonia, Portugal, Finlandia y Suecia, como los mayores proveedores de este insumo; mientras que Bélgica, Países Bajos, Reino Unido, Suecia y Dinamarca son los países que más lo consumen (Ordóñez, 2014).

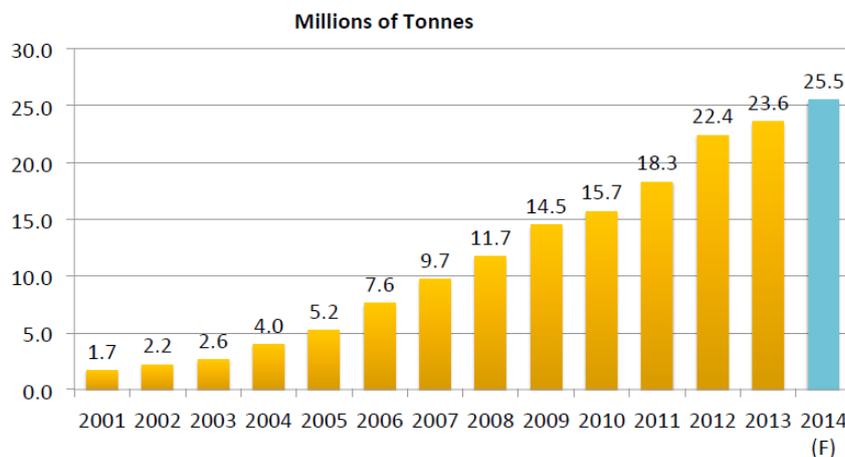


Figura 3. Producción global de pélets de biomasa. Fuente:(WPAC, 2014)

2.2.4 Requisitos de la materia prima biomásica en peletización

Según BioPlat (2013), la materia prima debe estar absolutamente desprovista de piezas metálicas y minerales y reducida a una granulometría fina (menor que el diámetro de los orificios de la matriz). Si las partículas son demasiado grandes, se produciría la rotura de los pélets. En el caso de utilizar biomasa de origen agroforestal, es recomendable la utilización de una trituradora móvil a fin de reducir *in situ* el tamaño de las partículas, facilitando de esta manera el transporte, almacenamiento y secado natural.

Contrariamente, el polvo de madera, también llamado “finos”, es inadecuado porque no garantiza una buena cohesión, por lo que se elimina.

Por último, respecto a la humedad del combustible, BioPlat (2013) destaca que a la entrada de la granuladora esta debe estar alrededor de un 10% aproximadamente (dependerá del tipo de materia prima). El control de la humedad es fundamental para conseguir un buen proceso de peletizado.

2.2.5 Fases del proceso de densificación

Un pélet de alta calidad tiene que ser seco, duro, duradero, y producir bajas cantidades de ceniza tras la combustión (Ciolkosz, 2009). Para alcanzar este objetivo se llevan a cabo los siguientes subprocesos secuenciales:

- Pretratamientos de la biomasa
 - Premolienda
 - Secado
 - Molienda
- Peletizado
- Enfriamiento y ensacado

2.2.5.1. Pretratamientos de la biomasa

Los parámetros clave bajo este punto son la mejora del balance económico y energético global mediante un acondicionamiento previo de la materia prima empleada.

Esta fase de pretratamiento del material biomásico consiste en la alteración de las propiedades físicas del material. No ocasiona, de forma general, cambios en la composición química de la biomasa y está destinada fundamentalmente a lograr preparar el material en cuestión para su mejor utilización en los procesos posteriores a los que será sometido.

En la literatura (Mani et al, 2006; Wolf et al, 2006) realizan un detallado análisis de cada uno de los procesos aunque en el presente estudio sólo se realizará una breve descripción de cada uno de ellos.

Como ya se ha mencionado anteriormente, la materia prima para la fabricación de pélets debe estar libre de cualquier tipo de material contaminante como piedras, vidrio, metales y suciedad en general. Si la remoción de este tipo de contaminantes no se lleva a cabo de manera adecuada, puede provocar fallas y averías en los equipos. Además al estar el producto contaminado, las cenizas en el momento de la combustión aumentan considerablemente (Smith, 2002).

Dentro de los pretratamientos se incluyen la premolienda, el secado y la molienda.

2.2.5.2. Premolienda

El proceso de premolienda consiste en una primera reducción granulométrica de los materiales procedentes de campo. Se puede llevar a cabo mediante astillado o mediante triturado. Puede realizarse en el lugar de producción mediante maquinaria móvil, o bien ser transportada, la madera en rollo, a la planta industrial donde se realizan dicho proceso con máquinas fijas. Normalmente, se somete a la materia prima a astillado en campo, donde se trocea a tamaños de 25- 50 mm (IDAE, 2009). El astillado está encaminado a convertir en astillas unas maderas o materiales biomásicos cuyo transporte en bruto no sería económico o técnicamente factible. Generalmente se lleva a cabo de forma mecánica, existiendo ya equipos con una altísima eficiencia y alcance en la operación (IDAE, 2007c).

2.2.5.3. Secado

El secado es una operación básica que consiste en reducir la humedad de un producto cualquiera, de forma que el producto final presenta unas características muy diferentes a las del inicial (Montero, 2005). El secado de biomasa para su utilización posterior, aunque es una técnica altamente desarrollada, origina consumos de energía considerables (Caputo et al, 2003) que habrá que tratar de minimizar.

Es un proceso que es prácticamente de obligatoria aplicación para la mayoría de los casos en los que la biomasa tenga un contenido de humedad medianamente elevado (más de un 30% bh). Para llevar a cabo un peletizado exitoso, la materia prima debe presentar contenidos de humedad en un rango no superior a un 8 o un 12% bh (Alakangas & Paju, 2002).

El secado puede ser natural, aprovechando la energía del Sol, artificial o forzado empleando algún otro elemento como agente calefactor, o como en el caso de la planta piloto de secado del CEDER, una combinación de ambas; secado solar más aporte de calor procedente de una caldera de biomasa.

Es un proceso significativo, ya que evita perder energía en la aplicación de los procesos termoquímicos en la primera etapa dirigida al desprendimiento de la humedad contenida en la biomasa, de manera que la mayor parte de la energía generada sea energía útil.

En particular, en lo que se refiere a la utilización de biomasa con fines energéticos, el secado es el pretratamiento más importante. Cabe destacar que es el proceso que requiere mayor consumo energético en la producción de pélets, que supone del orden del 67,00% de la energía total requerida para el proceso (Junta de Andalucía, 2009). Por lo que se estudiará con mayor profundidad en puntos sucesivos de este estudio.

Existen diversas razones (Amos, 1998) por las que es necesario realizar un pretratamiento de secado antes de la utilización energética (combustión) de la biomasa, destacándose:

- El aumento de la eficiencia del proceso y disminución de tamaño de los equipos.
- La disminución de requerimiento de energías auxiliares.
- El descenso en consumo de combustible.
- El incremento de la producción de fluido caliente.
- La mejora del funcionamiento del generador de vapor o de agua caliente.
- Y la reducción de las emisiones a la atmósfera.

2.2.5.4. Molienda

La biomasa seca, para su adecuado peletizado, ha de presentarse lo más homogénea posible y con unas características granulométricas determinadas. Para ello, se hace pasar por un molino de martillos, el cual consta de unas mallas donde los elementos que no cumplen la medida, se procesan en el molino para su refinado.

La biomasa se muele para estar en congruencia con el sistema de alimentación que se vaya a emplear y con las condiciones de diseño del sistema de aprovechamiento energético a utilizar.

2.2.5.5. Peletizado

Una vez que la materia prima ha sido redimensionada y llevada a un contenido de humedad aceptable (8-12% bh), (Alakangas & Paju, 2002), por medio de un sistema de alimentación automático es transportada a la siguiente etapa del proceso que corresponde al peletizado.

La Figura 4 muestra un diseño esquemático de una línea de producción de pélets.

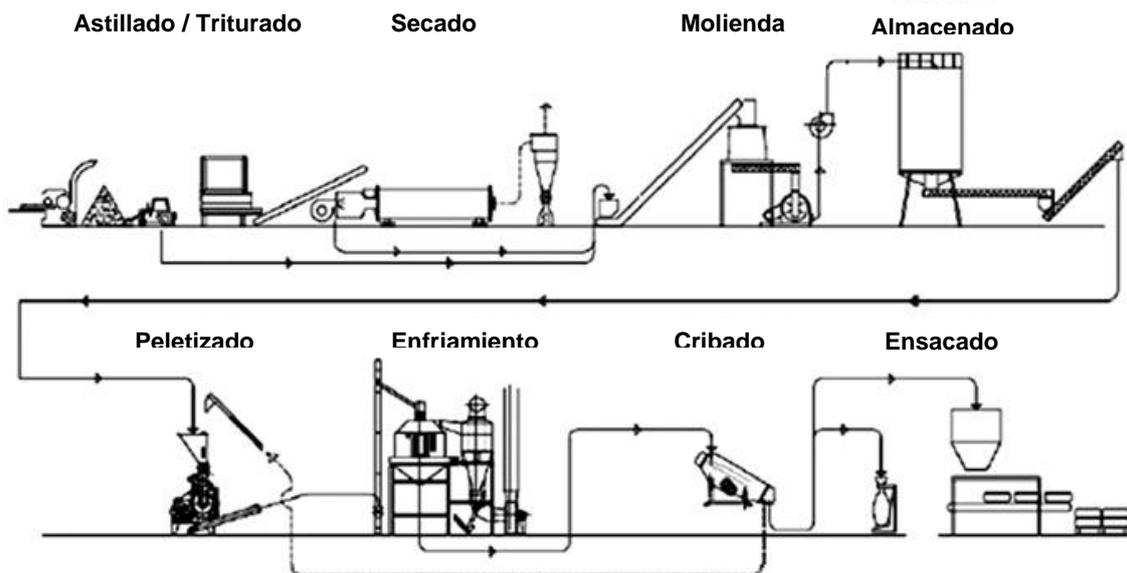


Figura 4. Diseño esquemático de una planta típica de péletizado de biomasa. Fuente: Monteiro et al (2012)

El principio de fabricación de los pellets (ver Figura 5) consiste en la compactación de la biomasa de madera natural mediante la aplicación de presión, por encima de 100 bar (IDAE, 2009). Normalmente, el peletizado es un proceso de granulación mediante extrusión. En los tipos de fabricación más comunes el principio operativo se basa en la presión ejercida por una serie de rodillos sobre el material, situados sobre una matriz metálica dotada de orificios de calibre variable. La materia prima atraviesa la matriz al mismo tiempo que se comprime, obteniéndose a la salida un diámetro característico a la matriz empleada. A la salida de la matriz, un dispositivo compuesto de cuchillas, corta los cilindros, aún blandos, a la medida de la longitud deseada.

Durante el proceso de extrusión, las fuerzas de fricción que actúan por unidad de superficie son suficientes para provocar un incremento de la temperatura, el cual provoca la plastificación parcial de la lignina que actúa como aglomerante. En ocasiones se puede añadir agua o vapor para mejorar las condiciones del proceso. Asimismo a veces es necesario agregar durante el proceso productivo aglutinantes adicionales, para lograr un mejor aglutinamiento y aumentar la resistencia del pellet para su posterior transporte. Estos aglutinantes deben ser de origen natural, no contaminantes durante la combustión. Generalmente se emplean distintos tipos de almidones, cuyo porcentaje debe ser inferior al 2%, según normativa europea (BioPlat, 2013). En cualquier caso la materia prima debe tener determinadas condiciones de granulometría y humedad reducida. Para una misma máquina peletizadora y el mismo

tipo de materia prima, el rendimiento varía en función, principalmente del diámetro del producto final y de la utilización o no de aditivos.

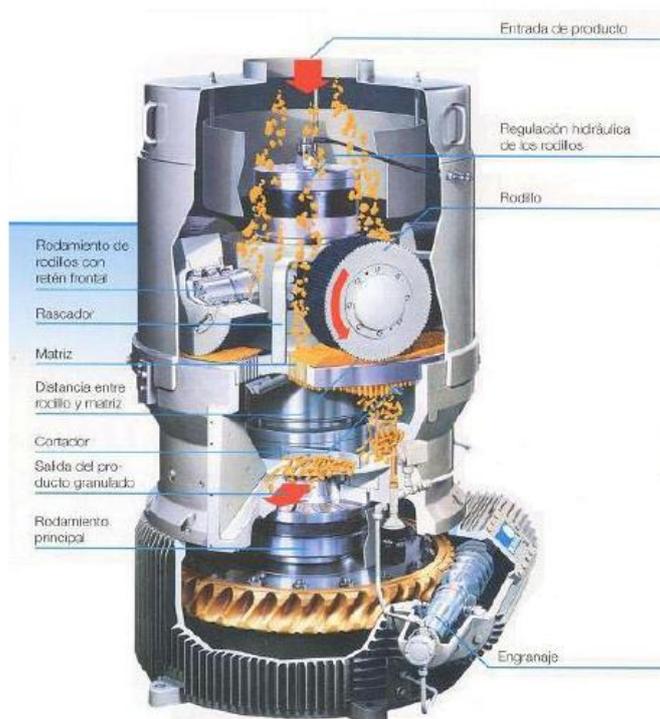


Figura 5. Esquema de funcionamiento prensa peletizadora de matriz plana KAHL. Fuente: (Rojas, 2004)

2.2.5.6. Enfriamiento y ensacado

Por enfriamiento de la lignina, ésta se endurece y los pélets adoptan la forma cilíndrica típica sólida. El equipo enfriador se basa en una cámara vertical con ventiladores, donde los pélets caen por la aplicación de un flujo transversal de aire suave para evitar que se produzcan fisuras. En esta etapa se consigue aumentar la dureza y resistencia del pélet, lo que permite evitar problemas en la manipulación de las etapas posteriores.

Previo al ensacado y almacenamiento se realiza un tamizado con sistema de vibrado para separar el polvo o “finos” que pudieran haber escapado del proceso de peletizado. Finalmente, los pélets son transportados a un silo para almacenamiento o pueden ser embolsados en bolsas de 15 a 20 kg o en big bags (sacos grandes, desde 500 a 1.000 kg)

2.3 TEORÍA DE SECADO

El secado, es uno de los pasos más importantes y exigentes dentro de los procesos de pretratamiento de la biomasa para la producción de pélets. El mantenimiento de un nivel de humedad adecuado en la materia prima es vital para la calidad global del producto final.

Mediante el sistema de secado natural o al aire libre, se consigue disminuir el contenido de humedad del recurso hasta que éste, alcanza la humedad de equilibrio con el ambiente. Este valor límite, puede ser insuficiente para satisfacer los requerimientos del siguiente proceso (molienda, peletizado...) o puede requerir de demasiado tiempo para que sea alcanzado. Por ello, se utiliza el secado forzado, con el que se puede disminuir el contenido de humedad de un recurso hasta cualquier valor deseado y en un período de tiempo considerablemente más corto. Además, Sebastian et al, (2010) afirman que, a diferencia del secado natural, si la temperatura de trabajo no es demasiado elevada (y por tanto no se produce la pérdida de material volátil), no se producen pérdidas de materia seca, pues el tiempo de residencia del sólido en el equipo está optimizado para que solamente provoque la liberación del contenido de agua hasta la humedad requerida.

El proceso de secado forzado, consiste en la utilización de un equipo de secado específico, en el que mediante el empleo de una fuente de energía (combustible fósil, renovable, o un sistema híbrido de ambos), se genera un agente secante que, por sus características, permite reducir el contenido de humedad del recurso por debajo de la humedad de equilibrio con el ambiente y disminuir el tiempo de secado respecto al secado natural.

Es un proceso costoso desde el punto de vista energético, que disminuye notablemente el rendimiento de la producción, por lo que uno de los principales objetivos del presente estudio, consiste en evaluar un secadero piloto calentado con energías renovables (solar y biomasa), con el fin de obtener una disminución en el consumo de esta fase del proceso de fabricación de pélets con respecto al método convencional (secadero rotativo).

La biomasa en cuestión por lo general tiene un contenido de humedad a su llegada a la planta piloto de pretratamiento entre el 15 y el 60% bh, dependiendo del tipo, localización, momento de la cosecha y el período de almacenamiento después de la

cosecha (Fagernäs et al, 2010). El problema que esto presenta, es que reduce considerablemente su poder calorífico y por consiguiente su capacidad energética (Gonzalez, 2012). Por lo que, y según Ortiz (2008), para obtener productos compactados de calidad es preciso que el contenido en humedad sea homogéneo y no supere valores del orden del 15% bh y que esté por encima de valores del 8%, puesto que por debajo de este nivel no se obtiene una adecuada aglomeración, ya que el agua, en determinadas proporciones actúa como sustancia termoplástica favoreciendo la autoaglomeración y, por tanto, si no alcanzan esos porcentajes mínimos la compactación es defectuosa. Para ello, la mejor solución es el secado forzado de la biomasa, consiguiendo la estabilización del producto para posteriores tratamientos, como el caso de la peletización o también para su almacenado (Gonzalez, 2012).

La operación de secado puede llevarse a cabo mediante (Kneule 1982):

- Evaporación o/y vaporización con *ayuda de calor* (secado térmico mediante aire caliente, radiación solar, etc).
- Otros procesos *físico-químicos* (liofilización, ósmosis, adsorción, congelación, etc).
- Extracción de agua a través de *medios mecánicos* (presión, vibración, filtrado, centrifugación, etc).

En el presente estudio únicamente se utilizará la primera opción: el secado térmico (ver Figura 6). Es el sistema más habitual de secado de biomasa. Se caracteriza por ser un proceso simultáneo de transferencia de masa y energía (Brammer, 1999):



Figura 6. Transferencia de masa y energía en el secado térmico. Fuente: (Montero, 2005)

- Transferencia de calor, desde el agente desecante al producto húmedo con el fin de evaporar el agua.
- Transferencia de masa, encargada de llevar la humedad del interior del producto hacia la superficie y de la superficie al aire de los alrededores.

La transferencia de calor se produce predominantemente por convección, conducción o una combinación de las dos; la radiación es una parte insignificante. El principal mecanismo de transmisión de calor determina los diferentes tipos de secaderos existentes. En todo caso, es claramente importante maximizar el contacto entre el medio de secado y el material que se está secando.

La transferencia de masa se lleva a cabo mediante dos mecanismos generales; movimiento interno de líquido o vapor a través del sólido húmedo mediante procesos tales como el flujo capilar y la difusión, y movimiento externo de vapor de la superficie del material. El primero depende de la estructura y propiedades del material, así como del contenido de humedad; el último depende de la temperatura y presión, del área de superficie del material, del número de Reynolds, y de la humedad si el aire o algún otro gas inerte se utilizan como medio de transporte. Ambos mecanismos pueden limitar la velocidad de secado en general, dependiendo de la etapa de secado.

2.3.1. Fases del proceso de secado

Si una muestra del material a secar se expone al medio de secado en condiciones constantes controladas, y la tasa de pérdida de humedad de la muestra se representa en función del tiempo, la curva resultante toma la forma general mostrada en la Figura 7. Hay un período inicial AB durante el cual el material se calienta y la velocidad de secado aumenta. Esto va seguido por un período de velocidad de secado constante BC, durante el cual, el movimiento del agua a través del sólido es suficientemente rápido para mantener las condiciones de saturación en la superficie. Finalmente, el movimiento interno del agua, ya no puede mantener las condiciones de saturación en la superficie y se produce un período de caída CD de la velocidad de secado. Este período se divide a menudo en dos, un periodo en el que la superficie del material está parcialmente húmeda y ningún mecanismo domina completamente, seguido por un período en el que la superficie del material está completamente seca y el movimiento de agua a través del sólido es la tasa limitante. Claramente, el secado a bajos niveles de humedad, implica progresivamente más largos plazos de tiempo de secado (y por

lo tanto mayor coste) cuanto menor es el nivel de humedad final, por ello es importante evitar, en estas situaciones, el secado más allá de los requisitos del proceso o uso posterior (Brammer, 1999).

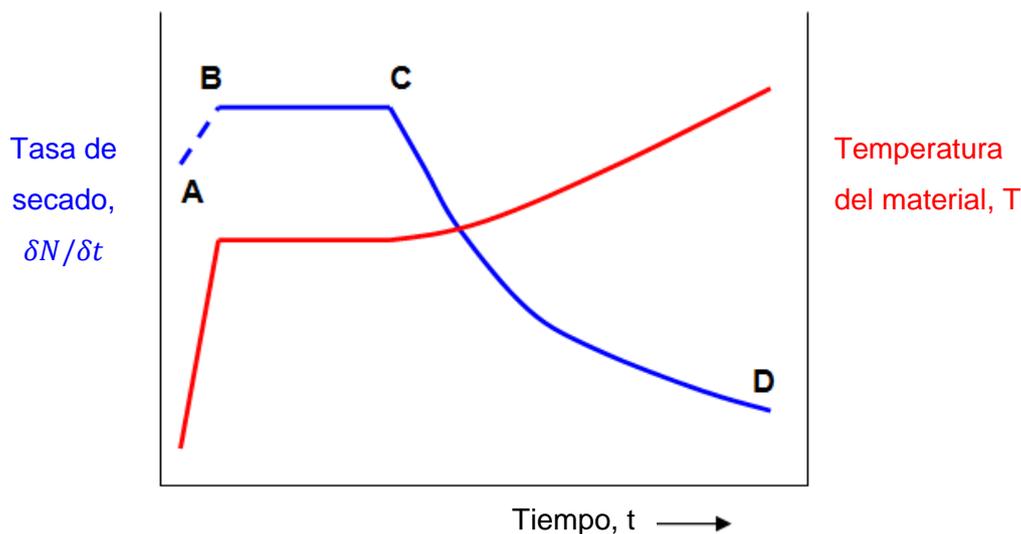


Figura 7. Fases del proceso de secado. Fuente: Williams-Gardner (1971)

2.3.2. Factores que interfieren en el proceso de secado

Los principales factores que interfieren en el proceso de secado son la temperatura, la humedad y la velocidad del aire.

2.3.2.1. Temperatura del aire

La temperatura desempeña un papel importante en los proceso de secado. En forma general, conforme se incrementa su valor se acelera la eliminación de humedad dentro de los límites posibles. Durante el proceso de secado, se origina un gradiente de temperatura con respecto al espesor del material mismo, que tiende a disminuir conforme se reduce el contenido de humedad.

2.3.2.2. Humedad relativa del aire

La humedad relativa del aire se define como la razón de la presión de vapor de agua presente en ese momento, con respecto a la presión de saturación de vapor de agua a la misma temperatura. Generalmente, se expresa en porcentaje (%), a medida que

se incrementa la temperatura del aire aumenta su capacidad de absorción de humedad y viceversa.

Cuando el aire contiene su máxima capacidad, se dice que se trata de un aire completamente saturado y por lo tanto incapaz de absorber más humedad. Por el contrario, un aire no saturado tiene la posibilidad de absorber una cantidad determinada de humedad hasta lograr su saturación.

2.3.2.3. Velocidad del aire

La velocidad del aire dentro del secador tiene como funciones principales, en primer lugar, transmitir la energía requerida para calentar el agua contenida en el material facilitando su evaporación, y en segundo lugar, transportar la humedad saliente del material. A mayor velocidad, mayor será la tasa de evaporación y menor el tiempo de secado y viceversa, si la velocidad del aire disminuye la tasa de evaporación disminuye y el tiempo de secado aumenta. Por esta razón, para asegurar un secado rápido y uniforme es indispensable una circulación de aire fuerte y regular.

2.3.3. Secado solar

El secado solar ha sido utilizado desde tiempos inmemorables para secar una gran variedad de productos. Sin embargo, para la producción a escala industrial este sistema presenta ciertas limitaciones y todavía se encuentra en fase de desarrollo. Con objeto de aprovechar los beneficios de la fuente solar se han realizado numerosos intentos en los últimos años para el desarrollo de secaderos solares en productos agrícolas y forestales (Corvalan et al, 1995; Grupp et al, 1995; Hollick, 1999).

Este sistema tiene una serie de ventajas e inconvenientes que se detallan a continuación (Montero, 2005):

Entre las ventajas que presenta el secado solar, la más destacada se basan en la energía que utiliza, es decir, una fuente no contaminante, renovable y que puede utilizarse a escala local. Además su uso como fuente parcial de calentamiento, resulta deseable con objeto de reducir los costes de secado.

No obstante, el secado solar entraña un gran inconveniente: el carácter periódico de la radiación solar y la variación de la intensidad de la radiación incidente en función del

tiempo, siendo ésta una circunstancia que requiere una estrategia de diseño y control adecuada para posibilitar el secado efectivo. Aún así, esta dificultad puede solucionarse por ejemplo con la utilización de alguna fuente de calor auxiliar. Otro problema destacable del secado solar está en la baja densidad energética de la radiación solar, que dará lugar a la necesidad de superficies colectoras de gran tamaño. Por otro lado, además de las ventajas conseguidas medioambientalmente, será necesario tener en cuenta el coste y la rentabilidad de la instalación, condicionadas, en gran medida, por las circunstancias geográficas que determinan la intensidad de la radiación incidente y el número de horas de Sol.

En lo que respecta al secado solar, la caracterización de la radiación disponible en el lugar, resulta fundamental para el diseño y control óptimo del funcionamiento de los dispositivos de secado. En el presente estudio no se entrará a detallar los conceptos específicos sobre radiación solar, siendo un tema ampliamente difundido por otras publicaciones, como en Montero (2005) donde se analiza en profundidad este tema.

2.3.4. Tipos de secaderos

En el presente estudio se realiza la comparación de dos tipos de secaderos: Un secadero convencional de tambor o trómel de tipo rotatorio calentado con gasoil, y un secadero piloto, calentado con fuentes de energía renovables (energía solar y apoyado por una caldera de biomasa), llamado a partir de ahora secadero solar.

2.3.4.1. Secadero de tipo rotatorio

2.3.4.1.1. Clasificación

El secadero presente en la planta piloto del CEDER se corresponde con un secadero rotatorio tipo trómel. Según (Trigueros, 2009) se clasifica como secadero directo o de convección, ya que la transferencia de calor para el secado se logra por contacto directo entre los sólidos húmedos y los gases calientes. A su vez, según su funcionamiento, se clasifica como continuo, debido a que la operación se realiza sin interrupciones, en tanto se suministre la alimentación húmeda.

Según esta clasificación, el secadero rotatorio sobre el que se desarrolla el estudio es directo, continuo y rotatorio.

2.3.4.1.2. Proceso de secado

Este tipo de secadero consta de una carcasa cilíndrica, inclinada en un grado pequeño a la horizontal y rotativo con velocidades de entre 1 y 10 rpm, según el tamaño. La relación longitud-diámetro del tubo se encuentra generalmente entre 4 y 10, con diámetro real desde menos de 1 metro a más de 6 metros según el rendimiento. Los tambores pueden constar de uno o varios tubos concéntricos llamados pasos, normalmente hasta un máximo de 3. Los pasos permiten un mayor tiempo de residencia usando velocidades más elevadas del aire secante, por lo que a estos secaderos se les llama también semineumáticos. Son adecuados para el secado de biomasa de granulometría fina y/o de muy baja densidad como serrines y virutas de madera.

El material se introduce en el extremo superior, pasa a lo largo del tubo y sale en el extremo inferior. La introducción del agente secante puede hacerse por el extremo superior (corrientes paralelas) o en el extremo inferior (contracorriente). En el interior del tubo hay un número de paletas, elevadores o deflectores longitudinales (ver Figura 8) que pueden ser continuos o alternos, y que están diseñados para levantar el material dentro del tubo y producir una cascada o cortina continua atravesada por los gases calientes. El material así desciende por el secadero por una combinación de gravedad y, en el caso de secaderos de flujo paralelo por arrastre con el medio de secado.

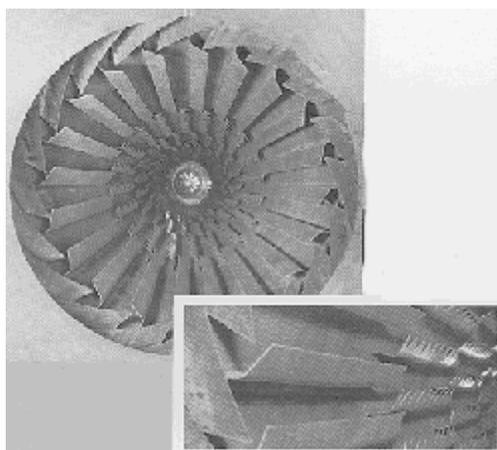


Figura 8. Detalle del diseño de las paletas de un secadero rotativo. Fuente: Esteban (2014)

El tiempo de residencia en el secadero es controlado por un número de factores como el diseño de las paletas (cantidad elevada y tiempo de retención), número de paletas, la velocidad de rotación, velocidad de los gases, longitud e inclinación del tubo

secador. El volumen de material secándose varía entre el 3 y el 12% del volumen del tubo, siendo 7-8% el valor más usado (Esteban, 2014). El secado tiene lugar casi totalmente durante el período en que el material está cayendo a través de la corriente de gas, mientras que es mínimo cuando es levantado por las paletas.

Se utilizan temperaturas de entrada de hasta unos 250°C, por motivos de seguridad al usar astillas de madera y serrín. El secadero es operado normalmente bajo succión ligera con un ventilador de tiro inducido a la salida.

En general, la eficiencia térmica de los secaderos rotativos directos se encuentra en el rango 50-75% (Esteban, 2014).

2.3.4.2. Secadero solar

Actualmente no existen en el mercado instalaciones industriales para el secado de biomasa usando el concepto solar asistido. Solo se pueden encontrar instalaciones comerciales de gran tamaño para el secado de lodos de depuradora que se componen de grandes superficies de invernaderos y en las que se realiza el secado básicamente mediante el aporte de la radiación solar, por lo que la producción de material seco no es constante en el tiempo.

El carácter innovador de la planta piloto de secado del CEDER se basa, por tanto, en la integración de sistemas de aporte de calor renovable solar-biomasa mediante un diseño que permita la producción estable y constante en términos de humedad diaria y estacional maximizando el aporte de energía solar frente a la utilización de biomasa.

2.3.4.2.1. Clasificación

Según la clasificación de Montero (2005), la planta piloto de secado solar del CEDER se trata de un secadero activo o de convección forzada, ya que incorpora elementos externos, como ventiladores, para mover el aire caliente utilizado en la extracción de humedad del producto. Se trata de un sistema “híbrido”, en el que además de la radiación solar se utiliza una fuente energética auxiliar (biomasa). Atendiendo a la disposición de los componentes del conjunto y al modo de utilización de la energía solar se puede incluir en la “subclase de tipo mixto” ya que la radiación solar se transmite conjuntamente a un colector solar y directamente a la cámara de secado.

Dentro del grupo de secaderos activos, se engloba dentro de los de tipo distribuido, ya que el colector solar de aire y la cámara de secado constituyen unidades separadas.

Los cuatro componentes básicos del sistema distribuido son: la cámara de secado, el colector de aire, el ventilador y el conducto de unión entre el colector y la cámara.

2.3.4.2.2. *Proceso de secado*

El proceso de secado propuesto consiste en una combinación de energía solar y energía suplementaria proveniente del calor de una caldera de biomasa.

Mediante esta combinación, el requerimiento energético exterior es reducido, lo que conduce igualmente a una reducción significativa de los costes de explotación.

La planta de secado ha sido diseñada como un sistema en continuo para evaporar, a plena potencia, 180 kg/h de agua evaporada, partiendo de una humedad media inicial del 45% bh.

2.3.4.2.3. *Parámetros de evaluación de secaderos solares*

En lo que se refiere al secado de productos biomásicos para una utilización energética posterior, los parámetros que tienen mayor importancia en la evaluación de los secaderos solares se pueden resumir en los siguientes (Montero, 2005):

- Características físicas del secadero:
 - Tipo, forma, tamaño, dimensiones, etc.
 - Capacidad de secado y densidad de carga.
 - Área de transferencia de secado
 - Sistema de carga y descarga de producto.
- Variables sobre el funcionamiento térmico:
 - Tiempo y ratio de secado.
 - Temperatura y humedad relativa del aire desecante.
 - Flujo másico de aire.
 - Eficiencia del secadero.
- Parámetros económicos:
 - Coste de inversión y operación.
 - Período de retorno (payback).

2.3.4.2.3.1 *Características físicas del secadero:*

El tipo de secadero, sus posibilidades de operación, los materiales de cada componente, etc, son aspectos importantes a considerar en el diseño de los dispositivos de secado. El tamaño físico de un secadero es habitualmente un índice directo de su capacidad de secado y se refiere a la cantidad de producto que es posible secar en cada operación de carga, para unos requerimientos específicos de reducción de humedad, expresado habitualmente como *kg de producto húmedo /día*. Por otro lado, la densidad de carga determina la capacidad de un secadero para un producto específico. Es importante no sobrecargar un secadero, ya que disminuirá la eficiencia del secado. Así, la densidad de carga depende del tipo de producto, de su contenido de humedad y de las características del flujo de aire desecante utilizado. El sistema de carga y descarga de los materiales es otra consideración básica para los secaderos comerciales, debido fundamentalmente al coste que supone. Este problema se soluciona mediante la utilización de un sistema continuo en el que el producto húmedo es cargado por un extremo y descargado por otro.

2.3.4.2.3.2. *Variables sobre el funcionamiento térmico:*

La duración del proceso de secado es el parámetro más importante en la evaluación de un secadero, interesando, evidentemente, el menor valor posible. Se estima como el tiempo que transcurre desde que el secadero es cargado con el producto húmedo hasta que el producto alcanza el contenido de humedad deseado. Las variaciones del contenido en humedad del producto frente al tiempo marcan el ratio de secado. Incrementos de la temperatura del aire dan lugar a aumentos del ratio de secado en dos sentidos. Por un lado, el aire presenta más capacidad para extraer humedad del producto y, por otro lado, el mayor calentamiento del producto incrementará su presión del vapor. Sin embargo, existe una limitación en el aumento de la temperatura correspondiente a la elevación de las pérdidas de calor en el sistema.

En lo que respecta a la humedad relativa, la capacidad desecante del aire puede aumentarse bien mediante la deshumidificación o bien mediante el calentamiento (disminución de la humedad relativa), siendo este último el sistema más utilizado.

Con el aumento del flujo de aire disminuye la temperatura de proceso y se reducen las pérdidas. Sin embargo, la eficiencia del secado puede verse afectada negativamente debido a la posibilidad de que al aire no esté el tiempo suficiente en contacto con el

producto para provocar su desecación. Por otro lado, un flujo de aire insuficiente generalmente produce un aumento de la temperatura del mismo, pero da lugar a una extracción de humedad más lenta. La eficiencia de un sistema de secado habitualmente se expresa a través de diferentes parámetros tales como: eficiencia del secadero, eficiencia del captador solar, ratio de extracción de humedad específico, capacidad evaporativa, etc

2.3.4.2.3.3. *Parámetros económicos:*

La viabilidad económica es clave para que un secadero solar sea competitivo frente a otro tipo de secaderos. Sin embargo, en el caso que nos ocupa para la utilización en el secado de materia prima biomásica, donde además se busca una valorización medioambiental, esta viabilidad económica debería contener otras externalidades no contempladas en un análisis económico habitual. Un estudio económico general incluiría: costes del equipo, costes de funcionamiento y periodo de retorno. Así, la utilización de un secadero solar está condicionada por una combinación adecuada entre coste, eficiencia energética y precio del producto final.

2.4 CENTRO DE DESARROLLO DE ENERGÍAS RENOVABLES

El Centro de Desarrollo de Energías Renovables (CEDER), ubicado en los Altos de Lubia (Soria) (ver Figura 9), nace en la década de los ochenta como centro nacional para la investigación, desarrollo y fomento de las energías renovables. Dependiente del Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT) y adscrito al Departamento de Energía de este Organismo Público de Investigación, está considerado como centro pionero en España en el campo del aprovechamiento energético de la biomasa.



Figura 9. Izquierda: Vista aérea del recinto CEDER-CIEMAT (en Lubia, Soria). Derecha: Instalaciones del CEDER. Fuente: <http://www.energias-renovables.com/>

La unidad de biomasa realiza en el CEDER actividades de investigación aplicada en cultivos energéticos, evaluación de recursos, logística de suministro y almacenamiento, así como en la preparación y acondicionamiento de la biomasa. En las instalaciones del Centro hay distintas áreas destinadas a campos de cultivo, una planta piloto de trituración y molienda, una instalación piloto de secado de biomasa por convección forzada y otra para la producción de pélets, así como un laboratorio dotado del equipamiento necesario para la caracterización físico-química y energética de la biomasa, considerado en la actualidad como Laboratorio de referencia nacional en la materia.

2.4.1. Ensayos en plantas pilotos

El término “Planta piloto” abarca un amplio rango de escalas, desde plantas a escala laboratorio hasta plantas a escala semi-industrial. El caso de la planta piloto de reducción granulométrica del CEDER-CIEMAT por su tamaño y capacidad productiva se corresponde con una escala semi-industrial.

Las plantas piloto son instalaciones intermedias entre la escala laboratorio y la planta industrial a gran escala. El fin que se persigue al diseñar, construir y operar una planta piloto es obtener información sobre un determinado proceso físico o químico, que permita determinar si el proceso es técnica y económicamente viable, así como establecer los parámetros de operación óptimos de dicho proceso para el posterior diseño y construcción de la planta a escala industrial.

Una planta piloto debe ser mucho más flexible que una planta a escala industrial en cuanto al rango permisible de sus parámetros de operación o variables de proceso, ya que una planta industrial opera siempre en las mismas condiciones, mientras que una planta piloto, por el hecho de estar destinada a la investigación, formulación de nuevos materiales o mejora de los distintos procesos existentes, debe permitir trabajar en un amplio rango de valores de temperatura, presión, tipo de materiales etc, de manera que puedan realizarse experimentos o ensayos con valores diferentes de las variables de proceso y poder determinar así, los valores más adecuados.

El principal objetivo de este tipo de instalaciones es el de realizar la optimización de las etapas de un proceso de investigación en laboratorio, en este caso el proceso de productivo de fabricación de pélets, y elaborar correcciones y mejoras de los procesos y productos. De esta forma se puede establecer la viabilidad de un proyecto o

producto desarrollado con el objetivo de poder transferirlo al sector productivo, reduciendo además, el riesgo asociado a la construcción de una planta a gran escala, ya que la planta piloto supone una menor inversión.

Aunque, en los últimos años se han desarrollado diversas herramientas para simulación de procesos por ordenador, muchas veces no es posible predecir el efecto de un aumento tan significativo en la escala de trabajo, por tanto, estos sistemas no pueden sustituir a las plantas piloto, ya que no son capaces de predecir el comportamiento de nuevos procesos de los que no existen datos disponibles, ni de procesos complejos.

3. OBJETIVOS

3. OBJETIVOS

A continuación se exponen los objetivos que se pretenden alcanzar en el presente estudio:

- Evaluar los consumos energéticos de las fases del proceso de peletizado de biomasas lignocelulósicas.
- Evaluar el efecto de los diferentes tratamientos en el proceso de trazabilidad de la formación de los pélets.
- Obtener los parámetros que presentan una mayor influencia en el consumo en cada fase del proceso de peletizado.
- Comparar y evaluar el proceso de secado considerando dos tipos de secadero: un secadero rotativo convencional y una planta piloto de secado solar.
- Evaluar las prestaciones energéticas de cada equipo de secado estudiado.
- Calcular el ahorro energético medio de energía convencional proporcionado al usar la planta piloto de secado solar con respecto al secadero rotativo, en el conjunto del proceso de producción de pélets.

4. MATERIAL Y MÉTODOS

4. MATERIAL Y MÉTODOS

4.1 MATERIAL

La selección de material para el estudio y preparación previa de los experimentos se compone en su totalidad de biomasa lignocelulósica procedente de diferentes especies. En la elección de las mismas, se han considerado especies con diferentes características con el objetivo de hacer más significativos los resultados en cada proceso de tratamiento. A continuación se presentan las cuatro especies utilizadas en el estudio:

- Pino (*Pinus pinaster* Ait). Troquillos de pino negral procedentes de un clareo. La corta se realizó dentro del recinto del CEDER-CIEMAT. Se procesaron 43.860 kg.
- Nicotiana (*Nicotiana glauca* Graham). Biomasa procedente de cultivo energético de Hellín (Albacete). Se procesaron 5.100 kg.
- Olmo (*Ulmus pumila* L). Biomasa procedente de cultivo energético de la localidad de Almazán (Soria). Se procesaron 8.996 kg.
- Roble (*Quercus pyrenaica* Willd). Biomasa procedente de claras desarrolladas en el recinto del CEDER-CIEMAT. Se realizaron dos lotes. Uno que se cortó durante la parada vegetativa invernal, obteniendo 8.635 kg. Y otro cuya corta se realizó en verano, con lo que se incluyeron hojas y tallos verdes, que en total conformaron 11.889 kg.

Dentro de estas cuatro especies citadas, se realizaron variantes en su tratamiento para analizar los posibles efectos que estos cambios puedan tener en los diferentes procesos de transformación. A efectos de identificar cada ensayo dentro de cada biomasa, se nombrarán a partir de este momento, tal y como se refleja en la Tabla 3. Para hacerlo, se hace referencia al primer tratamiento de reducción granulométrica, o ante la coincidencia de ambos, al tamaño de partícula, y/o a la biomasa a la que pertenece. También se recoge en dicha tabla, el tamaño de partículas obtenido tras la premolienda y los peso de material utilizados en cada prueba.

Tabla 3. Variantes de cada biomasa utilizada y su designación posterior.

ESPECIE	PREMOLIENDA	GRANULOMETRÍA (mm)	PESO (kg)	NOMBRE EN EL ESTUDIO
<i>Pinus pinaster</i>	Astillado	25	43860	ASTILLA DE PINO
<i>Nicotiana glauca</i>	Astillado	25	5100	NICOTIANA
<i>Ulmus pumila</i>	Astillado	25	2646	ASTILLA DE OLMO 1
<i>Ulmus pumila</i>	Astillado	25	5918	ASTILLA DE OLMO 2
<i>Quercus pyrenaica</i>	Astillado	25	3120	ROBLE 25 mm
<i>Quercus pyrenaica</i>	Astillado	50	5515	ROBLE 50 mm
<i>Quercus pyrenaica</i> *	Triturado	25	5943	ROBLE VERDE TRITURADO
<i>Quercus pyrenaica</i> *	Astillado	25	5946	ROBLE VERDE ASTILLADO

(*) Material cortado en verde durante el verano y procesado con hojas y ramas.

El contenido de humedad en base húmeda al inicio de cada ensayo, se corresponde con el contenido de agua que posee cada biomasa tras el primer proceso de premolienda y se muestra en la Tabla 4. El valor de la humedad contenida en cada biomasa se ve afectado por las diferentes características y procedencias tan heterogéneas de cada una, el efecto que el tratamiento de premolienda en cada caso ha tenido en ellas, la fecha de la corta y el periodo de tiempo transcurrido desde entonces hasta su procesado.

Tabla 4. Contenido de humedad al inicio del ensayo de cada biomasa

BIOMASA	HUMEDAD (% bh)
Astilla de pino	27,3
Nicotiana	39,1
Astilla de olmo	26,6
Roble 25 mm	23,1
Roble 50 mm	23,5
Roble verde triturado	39,2
Roble verde astillado	40,6

El material del presente estudio fue recolectado y astillado en invierno, a excepción de los dos lotes de Roble verde, en los que esta recolección se realizó en verano. El material procesado en invierno se dejó amontonado durante unos 7 meses en el exterior. Los dos lotes del verano se procesaron directamente en verde (ver Figura 10). La humedad de las astillas tras el periodo de amontonado en el exterior fue alrededor de un 30 % en base húmeda (bh) para las especies cortadas en invierno. El Roble verde obtuvo valores entorno al 40 % bh.



Figura 10. Detalle de astillas de la muestra *Roble verde astillado* (izquierda) y de *Roble verde triturado* (derecha). Fuente: Elaboración propia

A efectos de cálculo, los materiales se considerarán desde el proceso de premolienda (en campo o en planta) hasta su proceso de peletizado, ambos incluidos. No se tendrá en cuenta el coste energético producido por el desplazamiento en ningún caso, ya que las competencias del presente estudio, se centran en los consumos energéticos derivados de los procesos de transformación llevados a cabo en la planta de tratamiento para la obtención de pélets de biomasa.

4.2 PROCESO PRODUCTIVO DE FABRICACIÓN DE PÉLETS

Los experimentos que se han realizado con los diferentes materiales se han llevado a cabo íntegramente en la planta piloto de reducción granulométrica del CEDER-CIEMAT, situado en Lubia en el término municipal de Cubo de la Solana (Soria). Dicha planta está compuesta de una planta piloto de trituración y molienda, una planta piloto de secado forzado, una planta piloto de molienda y una planta piloto de peletización.

El proceso productivo de fabricación de pélets es un proceso secuencial (ver Figura 11), en el que el material ha de ir pasando por cada planta según la fase en la que se encuentre. El peletizado, en esencia consiste en alimentar una gran prensa de extrusión que empuja la biomasa contra una matriz en la que hay unos orificios, produciendo la compactación. La biomasa llega al Centro en forma de troncos completos o de astilla. En el primer caso, este material es sometido a una primera reducción granulométrica en la planta piloto de trituración y molienda. En ella, se astilla o tritura el material, según se estipule en una astilladora móvil o un triturador de giro

lento, respectivamente. También se puede recibir material en forma de astilla, proceso realizado *in situ* en el lugar del aprovechamiento. En ambos casos, tras el primer tratamiento, se somete al material a un molido, en un molino de cuchillas, donde alcanzará la granulometría definitiva, haciéndose ésta más homogénea y facilitando el posterior proceso de secado.

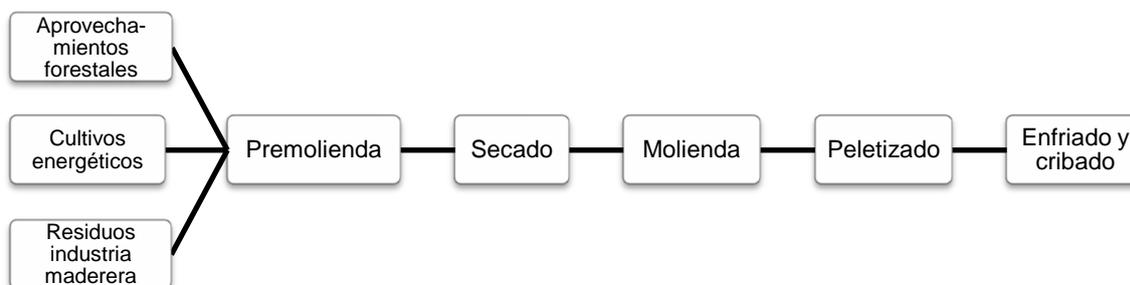


Figura 11. Etapas del proceso productivo de fabricación de pélets. Fuente: Elaboración propia

Tras este primer procesado de la biomasa, ésta se traslada a un secadero donde se alcanzan los niveles de humedad deseados. Como ya se ha comentado, el secado es el paso que más energía consume de todo el proceso. Debe realizarse a bajas temperaturas, respetando las propiedades naturales de la madera, evitando el tostado o quemado. En este caso, el proceso se realiza de forma paralela en un secadero rotativo o trómel, y en un secadero piloto de tipo solar, con el fin de poder caracterizar el proceso de secado en cada equipo. El siguiente paso es la molienda, consiste en una reducción granulométrica con el objetivo de hacer más uniforme la distribución de partículas y facilita el siguiente proceso, el peletizado. Esta reducción granulométrica se hace en un molino de martillos primario y un molino de refino secundario. A continuación, tiene lugar la formación del pélet propiamente dicha. El sistema que se utiliza en el presente estudio se corresponde con el de prensa de matriz plana. Una vez fabricados los pélets, se enfrían y se someten a una última criba para retirar los posibles finos sobrante. Finalmente, el pélet se ensaca.

Tras el proceso de fabricación de los pélets de biomasa lignocelulósica, se realizó un exhaustivo análisis en laboratorio de los mismos. Para el presente estudio se tomarán únicamente de este análisis, los datos del poder calorífico de los pélets obtenidos, necesarios para poder obtener el balance final de energía.

4.2.1 Descripción de los equipos

La descripción de los equipos que forman parte del proceso de elaboración de pélets de biomasa a partir de madera lignocelulósica, se estructurará en base a la planta en la que se lleve a cabo cada uno de los procesos.

4.2.1.1 Planta piloto de trituración y molienda

En esta planta se lleva a cabo la premolienda. Consta de equipamiento para la reducción de tamaño de biomasa hasta 10 mm. Los equipos que forman esta instalación son un triturador de giro lento y un molino de cuchillas

- **Triturador de giro lento**

Triturador marca Sant' Andrea Novara G-30, modelo 1000 (ver Figura 12). Se trata de una máquina con funcionamiento a baja velocidad, constituida por un reductor planetario, dos ejes hexagonales que tiran uno al contrario del otro y a velocidad distinta, y dos juegos de cuchillas entrecavadas unas con respecto a las otras. Dispone de un dispositivo automático de inversión de marcha en caso de que se produzca una sobrecarga y una protección térmica del motor.

El material se introduce en la tolva, situada en la parte superior del triturador donde se dirige por gravedad hacia los dos juegos de cuchillas como se puede ver en la Figura 12. En el caso de la planta piloto del CEDER el alzado del material hasta la tolva se lleva a cabo mediante un toro mecánico. El material resultante una vez procesado por el triturador es dirigido mediante una cinta transportadora hacia el molino de cuchillas o al lugar de acopio o almacenaje.

Su función principal es la de picado y destrozado de voluminosos como troncos, pacas, ramas, etc.

Características técnicas:

- Capacidad de la tolva: 1,3 m³
- Superficie de trabajo: 1000x690 mm
- Velocidad de ejes: 9,4/17,7 g/l
- Potencia HP: 30 (22) kw
- Tensión de alimentación: 380 V
- Corriente nominal: 41 A
- Peso: 3200 kg



Figura 12. Izquierda: Tritrador de giro lento de doble eje. Derecha: Detalle del proceso de trituración en la muestra *Roble verde triturado*. Fuente: Elaboración propia

- **Molino de cuchillas**

El material procedente del triturador, el cual tiene tamaños muy variables, se hace pasar por este molino de cuchillas (ver Figura 13) para hacer más uniforme la distribución granulométrica.

Este molino es de la marca Mateu&Solé modelo 53/71 CB M40. La potencia para la trituración se obtiene de la energía acumulada por el giro del rotor porta cuchillas y el volante de inercia, los cuales desarrollan la velocidad angular que comunica el motor mediante correas trapezoidales. Dispone de mecanismos de accionamiento manual con alta seguridad que permiten un acceso rápido y cómodo a la cámara de molienda para limpieza, extracción de un atasco, cambio de cuchillas o sustitución del tamiz (malla).

Características técnicas:

- Boca de admisión: 530x710 mm
- Diámetro de corte: 500 mm
- Nº cuchillas fijas: 3x2
- Nº cuchillas rotor: 3x3
- Área del tamiz: 1000x690 cm²
- Diámetro taladros tamiz: 8-50 mm
- Potencia HP: 40 (30) kw
- Tensión de alimentación: 380 V
- Corriente nominal: 60 A
- Producción: 400-600 kg/h
- Peso: 2250 kg

El material se introduce por la parte superior del molino mediante una cinta transportadora. Éste cae por gravedad sobre las cuchillas que cortan las astillas hasta un diámetro suficiente como para atravesar el tamiz utilizado en cada caso. Una vez el

material dispone de una granulometría uniforme y del tamaño deseado, estará preparado para pasar a la siguiente etapa, el secado.



Figura 13. Molino de cuchillas y cinta transportadora. Fuente: Elaboración propia

En el Centro también se dispone de dos astilladoras forestal de tipo móvil para llevar a cabo el astillado de trozas enteras de biomasa (troncos, ramas etc). Esta reducción granulométrica se puede realizar o bien en campo o bien en la planta; en ambos casos, tras el astillado se someterá al material a un molido en el molino de cuchillas anterior para hacer más homogéneo el tamaño de las astillas obtenidas. El astillado a pie de monte se dio en aquellas especies que fueron obtenidas fuera del recinto del CEDER.

- **Astilladora forestal**

Las dos astilladoras forestales de tipo móvil propiedad del CEDER (ver Figura 14) se corresponden a la marca BRUKS modelo 892 MT. El equipo de astillado va conectado a la toma de fuerza de un tractor agrícola y se sitúa en la parte posterior. La alimentación se lleva a cabo de forma manual por un lateral por el que se introducen las trozas enteras. Mediante un

Características técnicas

- Fabricante: Bruks
- Peso 1,5 t
- Diámetro máx arboles: 25 cm
- Disco: 4 cuchillas
- Necesidades de energía: 75 - 100 cv
- Producción t/día: 15-40

sistema de rodillos dentados la biomasa es empujada contra las cuchillas que cortan el material. Las astillas resultantes son impulsadas por un conducto dirigible hacia donde se requiera (zona de acopio o a un remolque).



Figura 14 Astilladora forestal móvil Bruks 892 MT

4.2.1.2 Planta piloto de secado forzado

En la planta piloto de secado del CEDER-CIEMAT se dispone de dos tipos de secaderos. Uno de ellos, convencional tipo rotativo o trómel y otro diferente a los que se pueden encontrar en el mercado, un prototipo de tipo solar. Para la realización del presente estudio, se va a comparar el consumo energético invertido, en secar una muestra del mismo material con contenidos similares de humedad en cada secadero, con fin de obtener las demandas energéticas y la eficacia de cada instalación durante este proceso crítico.

- **Secadero rotativo**

Se dispone de una instalación para secado forzado de biomasa lignocelulósica por convección mediante un secadero rotatorio directo tipo trómel (ver Figura 15), en corrientes paralelas en el que se utiliza aire caliente como agente secante. La capacidad nominal de la planta piloto es de 200-400 kg/h de producto seco, para una humedad inicial aproximada del 50%.



Figura 15. Vista del secadero piloto tipo trómel. Fuente: Elaboración propia

La biomasa es alzada mediante una cinta de transportadora a la tolva de alimentación que regula la cantidad de material que se introduce en el secadero (ver Figura 16). El avance de los sólidos se consigue mediante una pequeña inclinación del cilindro y mediante el giro del mismo. La biomasa húmeda es elevada por la rotación del tambor y cae a través de un caudal de aire caliente que circula a lo largo del secadero. El cilindro tiene una serie de aspas que impulsan la biomasa durante el giro. El calentamiento del aire se produce mediante un motor de combustión de gasoil.

Equipos que comprende la instalación:

- Secadero rotativo tipo trómel.
- Transporte de material: cinta transportadora y tolva de alimentación.
- Dosificación de entrada al secadero.
- Quemador de gasóleo y cámara de combustión:
 - Potencia térmica mínima: 184000 kcal/h (214 kW)
 - Potencia térmica máxima: 362000 kcal/h (421 kW)
 - Motor eléctrico: 550 w y 2800 rpm
 - Tensión: 220/380 V
- Ventilador aspirador por chimenea para salida de gases húmedos.
- Cinta transportadora para descarga de material.
- Sistema de control mediante cuadro eléctrico de control y maniobra.

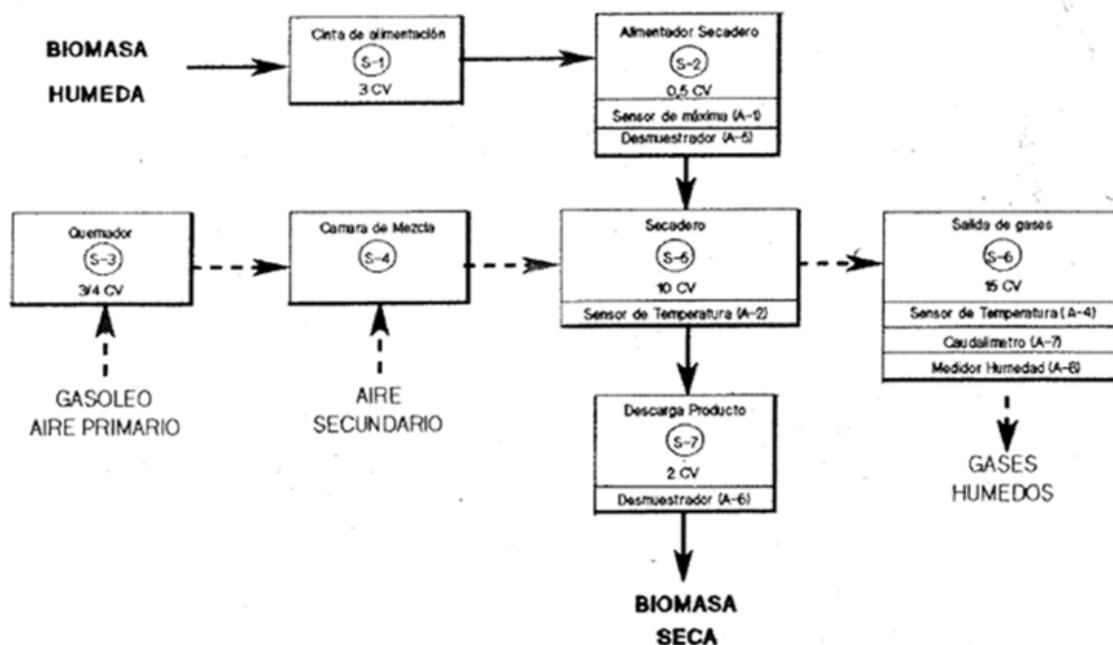


Figura 16 Diagrama de flujo de secadero rotativo experimental para biomasa con indicación de equipamiento eléctrico y de control.

Para el cálculo de consumos eléctricos y de combustible se tendrá en cuenta el tiempo que dura el proceso de secado, en base al software de adquisición de datos PROASIS.

- **Secadero solar**

La planta piloto de secado solar híbrido para biomasa del CEDER (ver Figura 17), se trata de un proyecto novedoso, promovido por el anhelo de buscar alternativas que contribuyan a minimizar el gasto energético que supone el acondicionamiento de la humedad de la biomasa previo al proceso de peletizado, y para dar respuesta a inquietudes del sector privado industrial relacionadas con la fabricación de pélets. Al tratarse de un proyecto piloto, se ha dimensionado a pequeña escala, y todos los ensayos que en él se lleven a cabo son experimentales, y los resultados sólo podrán ser valorados con seguridad tras numerosas ensayos con diferentes variables. El presente estudio por tanto, forma parte de las innumerables pruebas a las que se verá sometida la planta piloto de secado.

La planta piloto de secado solar, se puede aplicar al secado de cualquier tipo de material, pero está especialmente concebido para el secado de biomasa

lignocelulósica astillada o molida hasta valores del 10-15% en base húmeda, que son los habitualmente requeridos por la industria de la peletización de biomasa.

Se trata de una instalación formada por una estructura de invernadero de madera y paredes acristaladas con orientación del eje mayor Este-Oeste como se muestra en la Figura 16. El secadero solar para el secado de biomasa, está basado en el aporte mixto de energía solar directa e indirecta. Directa, a través de un recinto acristalado o invernadero (1) e indirecta, a través de paneles colectores solares (9 y 10). El aporte de biomasa al invernadero (1) se realiza por el extremo Este mediante un silo (2) con alimentador de suelo móvil (5) de forma continua a través de una trampilla regulable (3). Una vez dentro del invernadero (1), un volteador (4) realiza la remoción y desplazamiento del material formando una capa de altura homogénea regulable sobre el suelo. El volteador (4) está provisto de un equipo (NIR) (18) para la medición de temperatura y humedad en diferentes puntos del canal de secado. Asimismo, el invernadero (1) comprende un suelo radiante (8) alimentado con agua caliente procedente de una caldera de biomasa o intercambiador de calor residual (13). La recolección de la biomasa seca se realiza por el lado Oeste de forma continua mediante un transportador de cadena (7) que lo deposita en un almacén cubierto (6).

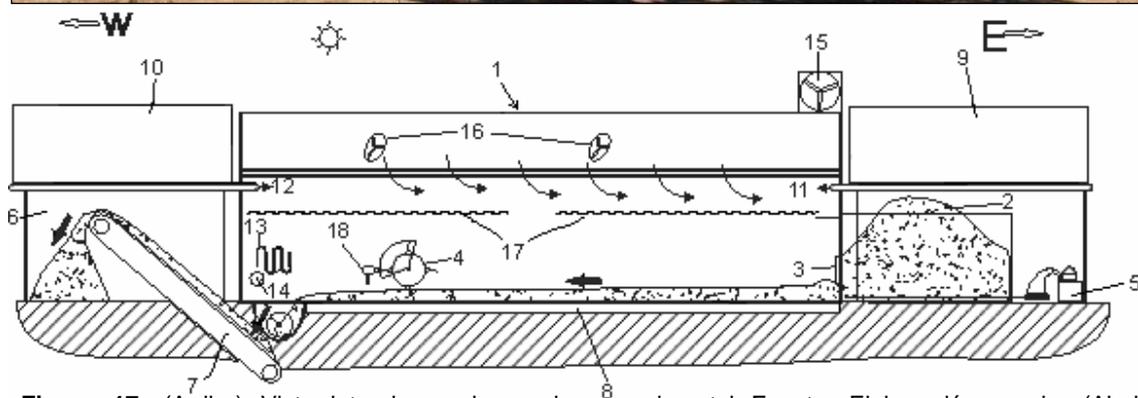


Figura 17. (Arriba) Vista lateral secadero solar experimental Fuente: Elaboración propia. (Abajo) Esquema secadero solar experimental con indicación de equipamiento. Fuente : (Esteban, 2013)

El uso de energía solar tiene como objetivo el ahorro de combustible, así como minimizar el riesgo de incendio frente a otros sistemas tradicionales de secado de biomasa (ver Figura 18).

Para el cálculo de consumos eléctricos y de combustible se tendrá en cuenta el tiempo que dura el proceso de secado, en base al software de adquisición de datos PROASIS. En él se recogerá también la medida de la radiación solar registrada mediante un piranómetro. Su principio de funcionamiento se basa en la fuerza electromotriz generada por una termopila rodeada por dos semiesferas de vidrio, y cuyo valor será proporcional al flujo de radiación energético recibido (Montero, 2005).



Figura 18. Detalle de la planta de secado solar durante el secado de la muestra *Astilla de olmo 2*. Fuente: elaboración propia

La planta de secado ha sido diseñada como un sistema en continuo para evaporar, a plena potencia, 180 kg/h de agua evaporada, partiendo de una humedad media inicial del 45% (bh).

4.2.1.3. Planta piloto de molienda

Una vez la biomasa ha alcanzado el nivel óptimo de humedad para la formación de los pélets, ésta se somete a una molienda previa a la peletización propiamente dicha. La planta de molienda (ver Figura 19) consta de un molino de martillos primario marca Hersimesa, con una potencia de 11 kW, y un molino de refino secundario marca MG-9, con una potencia de 15 kW.



Figura 19. Detalle de la planta piloto de molienda (Fuente: Elaboración propia)

Estos molinos permiten reducir el material a tamaños comprendidos entre 1,5 y 20 mm en el molino de martillos primario, y entre 1 y 6 mm en el molino de refino secundario.

El transporte del material como se indica en la Figura 20, se realiza mediante un sistema de transporte mecánico (cintas transportadoras, tornillos sinfines, tolvas, silos, carros para soportar big-bags, etc), y un sistema de transporte neumático (ventiladores, impulsores, clasificador dinámico, etc).

Por otro lado, la planta piloto dispone de una criba rotex con mallas de alambre o nylon para separar los finos de distintos tamaños comprendidos entre 0,25 y 1 mm.

Esta instalación permite estudiar la reducción de tamaño de una gran variedad de materiales biomásicos con el objeto de obtener productos adecuados para su utilización posterior en diferentes procesos de transformación física como la peletización o energética como combustión, gasificación, pirolisis, hidrólisis ácida etc.

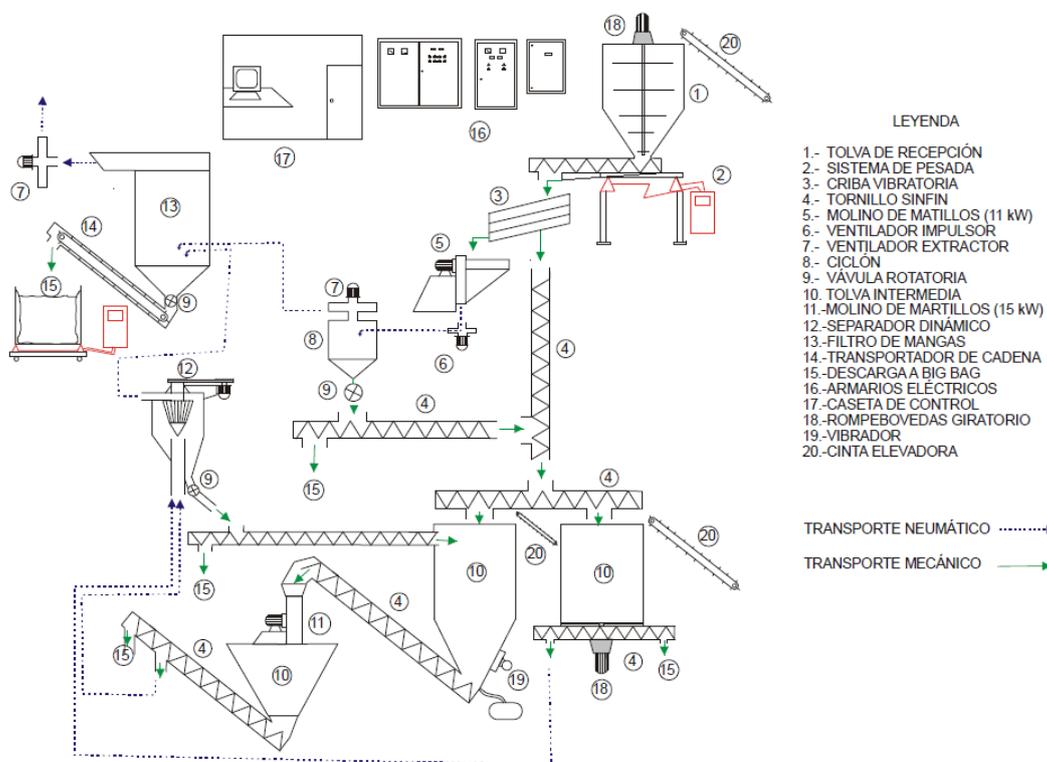


Figura 20. Diagrama de flujo de la planta piloto de molienda

4.2.1.4. Planta piloto de peletizado

La planta piloto de peletizado (ver Figura 22) dispone de un sistema de alimentación y acondicionamiento de la materia prima a tratar, una prensa de matriz plana marca Amandus Kahl 33-500, con matriz de 500 mm de diámetro, rodillos con anchura de 41, 60 y 75 mm, motor de 30 kW y un sistema de tuerca hidráulica que puede generar una presión de hasta 110 bar. La densificación de biomasa se realiza mediante el proceso de matriz plana, con una capacidad de producción de la planta piloto de 100 a 300 kg/h, en función de la materia prima a peletizar. Durante este proceso la materia prima yace como una capa frente a un rodillo de compresión, el cual la presiona dentro del agujero de la matriz para preformarlo. Cuando el rodillo pasa otra vez por el agujero este presiona nuevo material dentro del mismo, generando la preforma del pellet como se observa en la Figura 21.

Para la determinar del tipo de matriz utilizada en la peletización de la biomasa del presente estudio, se nombrará según el siguiente orden: diámetro de los agujeros de paso de la matriz (d) / profundidad del cono de entrada (l) / longitud del agujero de paso de la matriz (L) / profundidad del alivio o cono de descarga libre del pélet (a).

A la distancia $L + l$ se le denomina longitud de compresión e influirá notablemente en la calidad de los pélets obtenidos. El material en el que están fabricadas las matrices utilizadas durante los ensayos es el acero inoxidable.

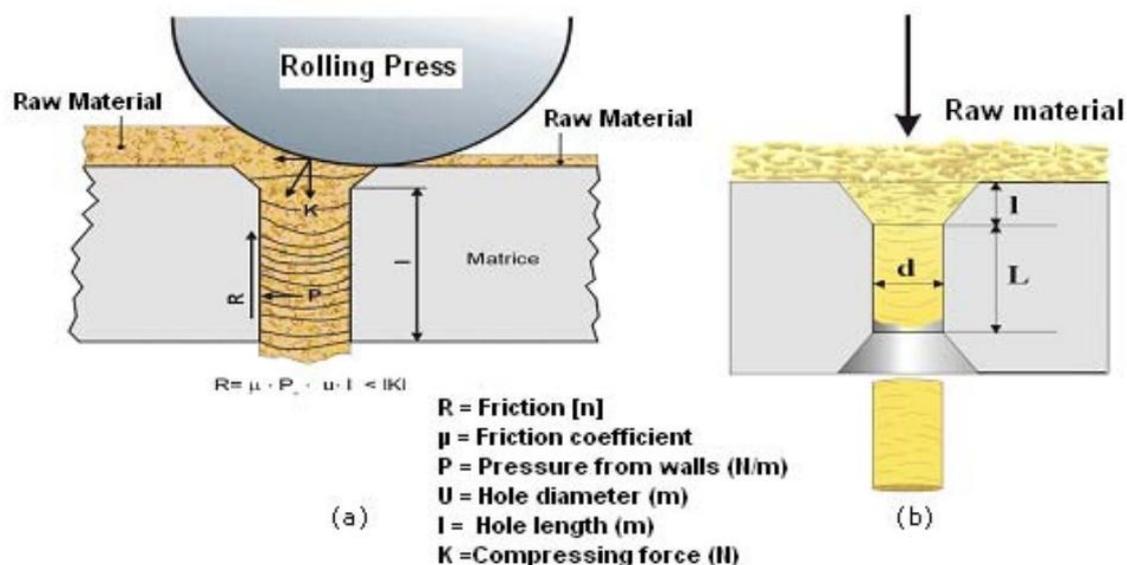


Figura 21. Detalle de un agujero de la matriz durante el proceso de peletización. Fuente: English Handbook for Pellet, 2009

El enfriado de los pélets con el objeto de conseguir pélets más duros y sin grietas, se lleva a cabo en un silo enfriador, tras el cual pasan a una criba donde se eliminan aquellos elementos finos que pudieran acompañar a los pélets resultantes. Finalmente estos son ensacados en big-bags para su posterior manejo o almacenaje.

Equipos que comprende la instalación:

- Puente grúa para transporte de sacas.
- Sistemas de transporte desde tolvas de alimentación a silos de almacenamiento (elevadores de cangilones, tornillos sinfines y cintas transportadoras).
- 3 silos de almacenamiento de biomasa con células de pesaje para dosificar mezclas de biomasa.
- Mezcladora para homogeneizar la biomasa a peletizar.
- Silo de alimentación de la prensa.
- Caldera de vapor para aportar vapor a la mezcla de biomasa antes de peletizar.
- Conducción de agua para regular la humedad de la biomasa antes de peletizar.
- Prensa de matriz plana.
- Equipo enfriador para reducir la temperatura de los pélets.
- Criba para eliminar finos, que son impulsados por un ventilador a un ciclón.
- Línea de ensacado de pélets.



Figura 22. Vista de la planta piloto de peletizado con indicación del equipamiento

En la Figura 23 se muestra el diagrama de flujo de la planta piloto de peletizado correspondiente a un “pantallazo” del programa de control de la peletizadora

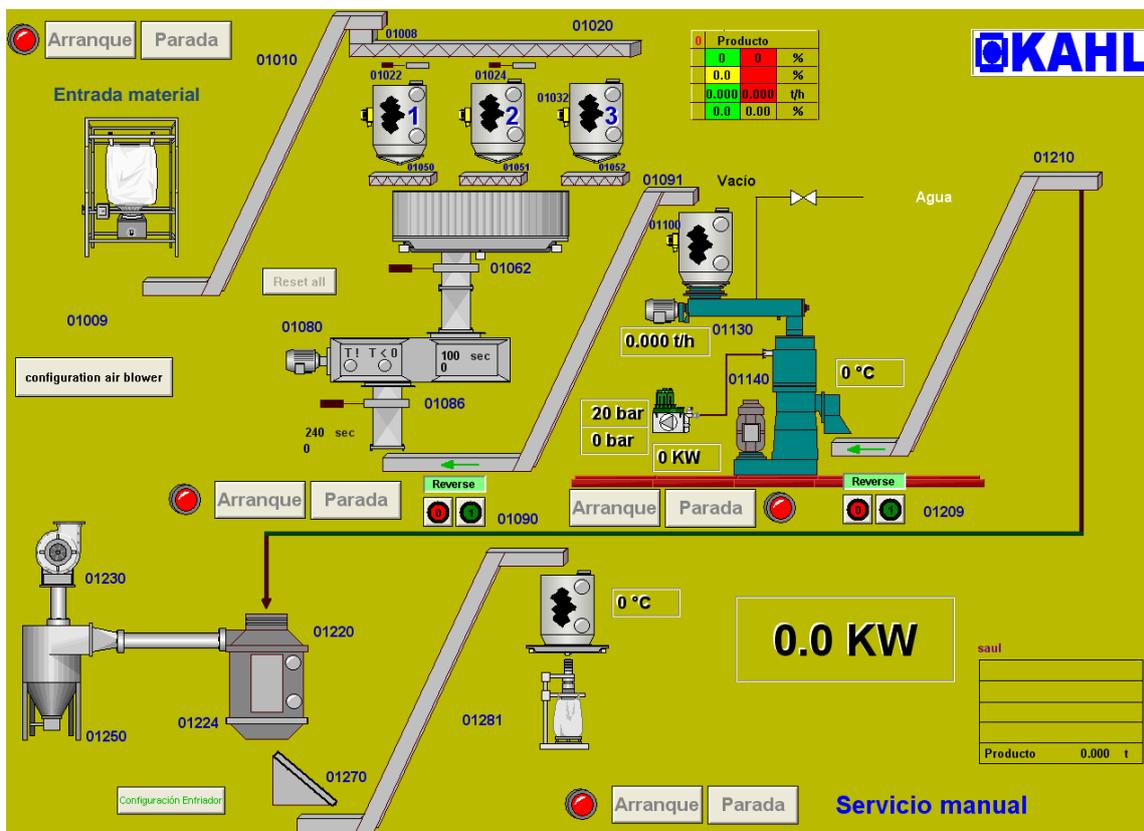


Figura 23. Diagrama de flujo de la planta piloto de peletizado. Fuente: Elaboración propia

4.2.2 Determinación de la humedad

4.2.2.1 Determinación en laboratorio

La determinación de la humedad de cada muestra de biomasa se realiza en laboratorio. Se toman 3 muestras de diferentes partes del montón de astillas, se sellan en bolsas de polietileno y se etiquetan para su posterior análisis en laboratorio. El valor resultante se extrapola a toda la pila de astillas.

El procedimiento para la determinación de la humedad llevado a cabo en el laboratorio, es el mismo para todos los casos, independientemente del proceso en el que se encuentre el material (astillas húmedas, secas, molidas o pélets).

El proceso consiste en disponer las muestras en bandejas de peso conocido. Una vez colocadas las muestras en las mismas se pesan y se meten en la estufa durante 24 horas a una temperatura de 105 °C para eliminar completamente la humedad. Al sacar

las muestras de la estufa, se vuelven a pesar y se compara ambos valores, obteniendo por diferencia la cantidad de agua de la muestra. Como indica la ecuación 3, dividiendo este valor por el peso de la muestra húmeda se obtiene el grado de humedad de la muestra en base humedad (bh).

$$\text{Humedad (\%)} = \frac{\text{Agua contenida muestra}}{\text{Peso inicial muestra}} \times 100 \quad (3)$$

Donde *Agua contenida muestra* es la diferencia entre el peso inicial de la muestra (antes de meterla a la estufa) y el peso final de la muestra (una vez seca tras salir de la estufa).

Se obtiene así el contenido de humedad de la muestra en % en base húmeda, es decir, teniendo en cuenta la cantidad de producto húmedo que teníamos.

4.2.2.2 Determinación en planta de secado

La humedad puede determinarse de forma automática tras el proceso de secado (en el trómel) o durante el mismo (en el secadero solar) mediante un medidor de humedad MCT360 Moisture Gauge (NIR) (ver Figura 23) que determina la humedad instantánea de las muestras utilizando la absorbancia de la longitudes de onda discretas de luz del infrarrojo cercano para la medición del contenido de humedad del producto (Process Sensors Corporation, 2011).

Se utiliza para conocer la eficacia de ambos proceso de secado: En el tromel se sitúa en la cinta de salida del material secado de tal forma que señala la humedad final del material secado tal y como se puede observar en la Figura 25. En cambio en el secadero solar se dispone sobre el carro donde se encuentra el volteador, mostrando la evolución del proceso a lo largo de todo el canal de secado, siendo una pieza base para la automatización del secadero piloto.



Figura 24. Medidor de humedad (NIR).
Fuente : Process Sensors Corporation (2011)

En ambos casos los datos obtenidos, son recogidos mediante el software de adquisición de datos PROASIS para su posterior procesado.

El funcionamiento de este aparato se describe a continuación (Process Sensors Corporation, 2011):

Los enlaces moleculares O-H en la molécula de agua y C-H en los aceites y grasas absorben la radiación infrarroja en varias longitudes de onda específicas. Por medio de un disco rotatorio, que contiene hasta 6 filtros infrarrojos, el medidor MCT genera estas longitudes de onda que responden a la absorbancia y varias otras longitudes de onda no absorbentes. Esta luz se refleja de la superficie del producto y está recogida por los componentes ópticos dentro del sensor de medición. Los impulsos eléctricos resultantes de la luz reflejada se transforman por medio de los algoritmos matemáticos especiales para calcular las mediciones primas de contenido de la humedad y/o aceite. Estos valores primos son, a continuación, escalados por los factores de compensación y sensibilidad para proporcionar lecturas directas de contenidos % de humedad y % de aceite. La compensación por el envejecimiento de los componentes ópticos y por las variaciones en la reflectividad de los diferentes productos se proporciona gracias a la utilización de transformación algorítmica de los valores de reflectancia de filtros.



Figura 25. Detalle del NIR funcionando a la salida del material del secadero rotativo. Fuente: Elaboración propia

4.2.3 Determinación de parámetros energéticos

La recaudación de datos de todos los procesos llevados a cabo en cada fase del proceso de fabricación de los pélets, se lleva a cabo mediante un Sistema de Adquisición de Datos. Estos sistemas, constan de sensores que convierten un fenómeno físico en una señal eléctrica que se puede medir; un hardware de medidas de adquisición de datos, que digitaliza señales analógicas entrantes para que el PC pueda interpretarlas; y un PC con software programable, que controla la operación del dispositivo de adquisición de datos y se usa para procesar, visualizar y almacenar datos de medida. La función de todo este equipo electrónico es el control o simplemente el registro de una o varias variables de un proceso cualquiera.

En el caso del CEDER, la adquisición de datos se lleva a cabo mediante la aplicación PROASIS DAS_WIN 3.0.

La aplicación PROASIS DAS_WIN, son una serie de programas para la supervisión y el control de procesos industriales que, funcionando en un PC compatible y bajo el entorno WINDOWS, permite comunicar con el sistema de adquisición de medidas DAS-8000 y la gama de indicadores y reguladores LS-3000, para centralizar las señales analógicas y digitales que hay en procesos industriales, gestionando alarmas, históricos, registradores gráficos y sinópticos (Dpto. de sistemas y software y aude, 1999).

Está organizado por menús y preparado para la recepción de eventos producidos por el usuario, funciona como cualquier otra aplicación diseñada para el entorno de WINDOWS tipo MDI, en las que cada una de sus ventanas posee un tipo de utilidad y/o visualiza la información de forma diferente.

4.2.4 Determinación del balance global de energía

El consumo energético producido en cada fase del proceso de peletizado, se corresponde con la energía utilizada por cada equipo en dicha fase ensayada.

En el caso de la premolienda, se corresponde con el consumo energético llevado a cabo por la astilladora forestal (contabilizado a través del consumo de gasoil del tractor agrícola) o en su defecto, el triturador de giro lento, más el realizado por el molino de cuchillas.

Para el secado, se diferencia el consumo de energía eléctrica, de la térmica procedente de un combustible (biomasa o gasoil, en el secadero solar o en el tromel, respectivamente). El total de energía consumida en el secadero rotativo será la suma de ambas. En el secadero solar, a este dato se le añadirá la energía procedente del sol, determinada por un piranómetro.

En el caso de la molienda se registran los valores de consumo de electricidad del molino de martillos primario junto con los correspondientes al molino de refinado secundario.

Finalmente, para evaluar el proceso de peletizado propiamente dicho, se registran los valores eléctricos derivados del conjunto de equipos de la planta de peletizado citados en el punto 4.2.1.4. Planta piloto de peletizado.

El resultado del consumo energético producido en cada fase del proceso de peletizado, se relaciona con el contenido energético de los pélets obtenidos, que se corresponde con el PCI en base húmeda de cada biocombustible, y el resultado se expresa en porcentaje. Por tanto, para obtener el valor de la energía utilizada en cada fase de producción de los pélets de cada biomasa respecto al contenido energético de los mismos, se dividirá, el total de energía consumida en cada fase del proceso, entre el poder calorífico inferior en base húmeda de los pélets obtenidos correspondientes a la biomasa estudiada (ecuación 4).

$$\text{Energía consumida respecto a la contenida en el pélet} = \frac{\text{Energía consumida}}{\text{PCI (bh)}} \quad (4)$$

4.2.5 Determinación de la eficiencia del secado

Para evaluar las prestaciones energéticas de cada equipo de secado utilizado en el presente estudio, se empleará por un lado, el ratio de consumo energético unitario, *CEU* (ecuación 5), también denominado rendimiento real del secado, ya que los datos provienen directamente de los ensayos realizados. Se define como la cantidad de energía suministrada por cantidad de agua evaporada, expresado en kJ por kg de agua evaporada (Montero, 2005).

$$CEU (kJ/kg \text{ ag ev}) = \frac{\text{Energía suministrada}}{\text{Agua evaporada}} \quad (5)$$

Por otro lado, se utilizará el rendimiento teórico del proceso de secado, que se corresponde con el calor teórico de evaporación (CTE) (6), es decir, la energía invertida en el proceso de secado, si ésta se utilizara únicamente para llevar a un líquido a su punto de ebullición, más el calor necesario para que éste se evapore. Todo ello suponiendo que no se produjeran pérdidas de ningún tipo y se realizara a la presión normal (760 mm de Hg).

$$CTE = Ag\ ev \times C \times (100 - T^{a\ ent}) + \frac{Ag\ ev \times Lv}{Ag\ ev} \quad (6)$$

Donde $Ag\ ev$ se corresponden con los kg de agua evaporada en el proceso, C al calor específico del agua a 15°C y a presión normal constante, que se corresponde con $4,19 \times 10^3 \text{ J/kg } ^\circ\text{C}$, $T^{a\ ent}$ es la temperatura de la biomasa en el momento de la entrada en el secadero ($^\circ\text{C}$) y Lv es el calor latente de vaporización, que se corresponde a la cantidad de energía requerida para evaporar 1 kg de agua a 100 °C a presión normal y convertirlo en vapor. Este valor es de 2.260 kJ.

Con los datos de CEU y de CTE, se puede determinar la eficacia térmica de un secadero, que se calcula según la ecuación 7, dividiendo el calor teórico de secado entre el consumo energético unitario.

$$Eficacia\ térmica\ de\ secado\ (\%) = \frac{CTE}{CEU} \times 100 \quad (7)$$

4.2.6 Determinación del sello ENplus

El programa de certificación ENplus divide a los pélets de madera en tres calidades. Para ello, los clasifica con diferentes exigencias sobre la materia prima utilizada así como también las características de los pellets. Las tres calidades del sello ENplus son: ENplus A1, ENplus A2 y ENplus B.

En el presente estudio se va a realizar únicamente la clasificación por el valor del Poder Calorífico Inferior en base húmeda de los pélets obtenidos. En la Tabla 5 se especifican los requisitos para formar parte de cada una de ellas.



Tabla 5. Características de los pélets de madera en función de las calidades ENplus

	Unidades	ENplus A1	ENplus A2	ENplus B	Norma
PODER CALORÍFICO INFERIOR	MJ/kg (bh)	16,5<Q<19	16,3<Q<19	16,0<Q<19	EN-14918

Donde Q, se corresponde con el poder calorífico inferior en base húmeda de cada biomasa.

Como se observa en la Tabla 5, los pélets que pertenecen a la calidad A1, necesitan tener un PCI en bh superior a 16,5; los pertenecientes a las A2 superior a 16,3; y por último la calidad B está limitada por PCI en bh superiores a 16,0. Los pélets que no alcancen estos valores no podrán ser incluidos dentro del sello de calidad ENplus.

4.3. PROCESAMIENTO DE DATOS

4.3.1. Parámetros energéticos

El total de la energía suministrada para el proceso de peletización se clasificó según la fuente de la energía: energía eléctrica, energía térmica (procedente de un combustible (gasoil o biomasa)), y energía solar.

Las unidades de medida del SI (Sistema Internacional de Unidades) para estos parámetros son el julio (J), el vatio-hora (Wh) y los múltiplos de estas unidades

La energía consumida en las operaciones básicas se expresa en términos de energía específica, es decir, energía eléctrica activa consumida por unidad de masa en base seca, expresada en kilovatio-hora por tonelada (t) de materia seca: kWh/t ms.

Los datos energéticos correspondientes a los pélets obtenidos (poderes caloríficos de las distintas biomاسas y los consumos llevados a cabo en cada tratamiento) por su magnitud y facilidad de interpretación, serán expresados en Mega Julios (MJ) por tonelada de pélets en base seca: MJ/t pélet (bs)

Para evaluar la eficiencia energética de los procesos de secado, se expresarán los valores de energía consumida, por kg de agua evaporada durante el proceso de la siguiente forma: kilojulios (kJ) por kilogramo (kg) de agua (ag) evaporada (ev) kJ/kg ag ev

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el siguiente apartado se presentan y discuten los resultados obtenidos empleando la metodología expuesta en el apartado anterior.

5.1 BALANCE ENERGÉTICO

5.1.1 Energía consumida

A continuación, se va a proceder a plasmar los resultados del consumo energético durante el proceso de producción de pélets de forma desglosada, en función de las fases de las que consta dicho proceso.

5.1.1.1. Premolienda

Los resultados del consumo energético producido durante la premolienda de las diferentes biomasas se presentan en la Tabla 6. Para determinar la energía específica se tiene en cuenta la energía utilizada por la astilladora forestal móvil o el triturador de giro lento en su defecto, más la del molino de cuchillas. En todo caso, las principales variables del proceso de premolienda son la humedad a la que se encuentra cada biomasa, las características físicas de las mismas y el tamaño de las partículas al final del proceso, que viene determinado por el tamaño de paso del tamiz del molino de cuchillas.

Tabla 6. Energía consumida en el proceso de premolienda

Biomasa	Humedad bh (%)	Premolienda (mm)	Consumo (kWh/t ms)
Astilla de pino	27,3	25	31,93
Nicotiana	39,1	25	37,46
Astilla de olmo 1	26,6	25	34,08
Astilla de olmo 2	26,6	25	33,49
Roble 25 mm	23,1	25	29,71
Roble 50 mm	23,5	50	27,51
Roble verde triturado	39,2	25	39,24
Roble verde astillado	40,6	25	35,02

Como puede observarse en la Tabla 6, el consumo específico varía desde los 27,51 kWh/t ms en el *Roble 50 mm*, hasta los 39,24 correspondientes al *Roble verde triturado*. El menor consumo específico coincide con el mayor tamaño de molienda. Numerosos estudios apoyan este resultado (Sebastian et al, 2010; Ortíz et al, 2003)

por lo que se puede concluir por tanto, que la energía específica consumida aumenta, cuanto más se reduce el tamaño final del material procesado. Por otro lado, la influencia de la humedad no es tan clara. Se aprecia una ligera tendencia ascendente en el consumo específico cuanto mayor es el grado de humedad. Autores como Mani et al (2004), obtienen tendencias parecidas, un aumento del consumo, al incrementarse el contenido de humedad del recurso, pero como los contenidos de humedad no son muy dispares no producen un efecto determinante.

5.1.1.2 Secado

Esta fase se llevo a cabo de forma paralela en los dos secaderos (solar y trómel), con las mismas biomosas, con el fin de obtener los consumos energéticos que cada secadero habría necesitado para procesar el mismo material. El resultado de estos ensayos se recoge en la Tabla 7. El consumo energético en cada secadero se determinó sumando el consumo eléctrico más el térmico provisto por el combustible fuente de calor en cada caso (gasoil o biomasa; en el trómel o en el secadero solar, respectivamente). En el caso del secadero solar, a esta cifra hay que añadirle la energía proveniente del sol registrada por el piranómetro, que se contabilizará a parte ya que ésta, se considera una energía “gratuita”. De hecho, a efectos de cálculo solo se contabilizará la energía eléctrica y térmica en ambos secaderos.

Tabla 7. Energía consumida en el proceso de secado en cada secadero

Biomasa	Tipo de secado	Premolienda (mm)	Contenido Humedad		Consumo Energético		
			Humedad inicial bh (%)	Humedad final bh (%)	Eléctrico + térmico (kWh/t ms)	Solar (kWh/t ms)	Total
Astilla de pino	Solar	25	25,20	11,60	166,81	541,78	708,59
	Tromel	25	25,45	12,32	264,50	-	264,50
Nicotiana	Solar	25	31,00	13,00	367,02	810,63	1177,64
	Tromel	25	30,90	13,30	519,07	-	519,07
Astilla de olmo	Solar	25	25,10	11,74	185,17	429,92	615,09
	Tromel	25	19,50	8,40	425,02	-	425,02
Roble 25 mm	Solar	25	21,77	14,20	127,38	518,20	645,58
	Tromel	25	22,15	12,78	228,76	-	228,76
Roble 50 mm	Solar	50	22,75	10,10	132,42	482,52	614,95
	Tromel	50	22,75	12,00	281,09	-	281,09
Roble verde triturado	Solar	25	37,70	15,60	229,13	337,07	566,20
	Tromel	25	36,37	15,51	596,32	-	596,32
Roble verde astillado	Solar	25	39,70	15,30	225,65	266,32	491,97
	Tromel	25	40,16	12,97	821,12	-	821,12

Como se puede observar en la tabla anterior, el Consumo Energético Total en cada secadero varía notablemente. Las principales variables de las que depende este valor en el secado son el tamaño de las partículas, las características físicas y químicas de cada biomasa y sobre todo de la humedad de la misma. El Consumo Energético Total en el secadero solar es ampliamente superior en todos los casos, si se compara con el trómel. Esto es debido a la gran contribución que supone el aporte solar en el primer equipo. Si comparamos únicamente el Consumo Eléctrico + Térmico, sucede lo contrario. El secadero solar consume una cantidad considerablemente menor que el secadero rotativo. Se observa también en el secadero solar, que cuanto mayor es el aporte solar recibido, menor es el consumo de energía eléctrica y térmica.

Por otro lado, centrándose únicamente en el secadero rotativo, ya que su consumo total es más representativo que en el solar, debido a la inestabilidad que produce el aporte solar en este último, se puede observar que, como era de esperar, cuanto mayor es el rango de humedad mayor es el consumo, como por ejemplo en el caso del *Roble verde triturado*, que se seca desde un valor de 36,37 % bh a 15,51 % bh, consumiendo 596,32 kWh/t ms. Sin embargo, como afirma Sebastián et al (2010), también se destaca que con rangos de humedades más pequeños, el consumo sigue siendo alto en los casos en los que estas humedades son bajas, dada la mayor resistencia que presenta el material a su secado cuanto menor sea el gradiente de humedad en la partícula. Por ejemplo, para un rango de secado similar, en la biomasa *Astilla de olmo*, en la que se alcanza un contenido de humedad en bh del 8,40 % se requieren 425,02 kWh/t ms mientras que en la biomasa *Roble 25 mm*, para ese mismo rango de humedad, pero secada a un valor superior, 12,78 % bh, se consume prácticamente la mitad, 228,76 kWh/t ms.

Por esta razón, la influencia que tiene el tamaño de las astillas en el secado no es tan significativa comparada con la de la humedad, aunque numerosas fuentes como Montero, (2005) afirman que a mayor granulometría más costoso es el proceso de secado. Respecto al sistema utilizado en la premolienda, la biomasa *Roble verde triturado*, ha obtenido valores más bajos (596,35 kWh/t ms) que su homólogo astillado, *Roble verde astillado*. Esto puede deberse a que el triturado aumenta la superficie específica de las muestras aumentando ésta, la eficiencia del secado.

5.1.1.3 Molienda

Los resultados del consumo energético producido durante la molienda de las diferentes biomásas se presentan en la Tabla 8. Para determinar el consumo específico se tiene en cuenta la energía utilizada por el molino primario más la del molino de refino secundario. Las principales variables del proceso de molienda son la humedad a la que se encuentra cada biomasa a su entrada al molino, las características físicas de las mismas y el tamaño de las partículas tras el proceso de molienda, que viene determinado por el tamaño de paso del tamiz del molino de refino secundario.

Tabla 8. Energía consumida en el proceso de molienda

Biomasa	Humedad (% bh)	Premolienda (mm)	Molienda (mm)	Consumo (kWh/t ms)
Astilla de pino	11,2	25	4	16,85
Nicotiana	11,9	25	4	20,84
Astilla de olmo 1	10,8	25	4	41,28
Astilla de olmo 2	8,5	25	4	37,86
Roble 25 mm	13,6	25	4	20,58
Roble 50 mm	10,2	50	4	45,24
Roble verde triturado	12,3	25	4	38,16
Roble verde astillado	13,7	25	4	32,14

Como puede observarse en la Tabla 8, el contenido de humedad de las muestras a la entrada del molino primario es similar entre ellas, por lo que no produce una gran influencia sobre el consumo de energía. Este valor, varía desde los 16,85 kWh/t ms en la biomasa *Astilla de pino*, hasta los 45,24 correspondientes a la biomasa *Astilla de olmo 1*. El menor consumo específico del primero, puede deberse a las características de la madera del pino, las cuales hacen que se muele con menor esfuerzo que el roble o el olmo. En referencia al tamaño de las partículas, es destacable que la muestra *Roble 50 mm*, que es la biomasa que más ve reducido su tamaño en la molienda, obtiene el valor más alto de consumo específico. Como afirman numerosos autores (Sebastian et al, 2010) la energía consumida aumenta para un mismo tamaño de malla, cuanto mayor es el tamaño del material a moler.

5.1.1.4 Peletizado

El resultado del consumo energético por tonelada de materia seca durante el proceso de peletizado se recoge en la Tabla 9. Este consumo específico se corresponde con la suma del gasto energético de todos los equipos que forman en la planta de peletizado y que interfieren durante el proceso. Las principales variables que influyen en el consumo durante la fase de peletizado son: la humedad de entrada del material procedente del molino, la granulometría del mismo, las propiedades físicas y químicas de cada biomasa, el diámetro de los agujeros de la matriz correspondientes con el diámetro del pélet resultante, y la longitud de compresión.

Tabla 9. Energía consumida en el proceso de peletizado

Biomasa	Humedad (% bh)	Molienda (mm)	Tipo Matriz	Consumo (kWh/t ms)
Astilla de pino	10,8	4	8/5/26/19	92
Nicotiana	11,2	4	6/5/13/12	189
Astilla de olmo 1	10,4	4	6/5/13/12	166
Astilla de olmo 2	8,8	4	6/5/13/12	172
Roble 25 mm	13,2	4	6/5/19/26	155
Roble 50 mm	10,0	4	6/5/19/26	151
Roble verde triturado	11,6	4	6/5/17/28	167
Roble verde astillado	12,5	4	6/5/17/28	138

Como puede verse en la Tabla 9, el resultado del proceso de peletizado produjo unos consumos por tonelada de materia seca de entre 92 y 189 kWh. Para evaluar el efecto de las diferentes variables sobre el consumo específico, se descartarán los posibles efectos producidas por la humedad, debido a que todas las muestras se encuentran en un rango muy próximo y por ello no se aprecian influencias importantes en el consumo específico final como afirman algunos autores (Li et al, 2014), el cual obtiene un menor consumo específico cuanto mayor contenido de agua tienen las muestras llegando hasta un 20 % bh.

El efecto producido por la granulometría de las muestras a la entrada tampoco se considera relevante, ya que el tamaño de las mallas utilizadas en la fase de molienda en general, varía muy poco. Por ello, todas las muestras se muelen al mismo tamaño ya que su influencia sobre el consumo no es importante. Por el contrario, la variable que más influye a la hora de averiguar el consumo derivado de cada material es el tipo de matriz utilizada. En primer lugar, destaca como un aumento en el diámetro de los

agujeros de la matriz hasta 8 mm, para la prensa de la biomasa *Astilla de pino*, produce un consumo notablemente menor que el resto de biomásas prensadas a 6 mm. Este resultado coincide con lo que afirma Simón (2007), sobre el aumento del diámetro de los pélets en el consumo energético. Así mismo, se puede observar en la tabla anterior, que el efecto de la longitud de compresión no es tan significativo como lo ha sido en otros ensayos, en los que este efecto se ha estudiado con mayor profundidad (Simón, 2007), donde se afirma que, cuanto más larga es la longitud de compresión de la matriz, se produce una mayor presión por parte de los rodillos sobre la matriz y en consecuencia un consumo más elevado. Es destacable que Simón, en su ensayo, compara únicamente una única especie, y consecuentemente unas características físico-químicas iguales, al contrario del presente estudio, en el que el efecto que tiene la longitud de compresión no es tan claro debido a las diferentes propiedades de las biomásas que influyen y han de tenerse en cuenta a la hora de analizar esta comparación.

5.1.2. Energía contenida en los pélets obtenidos

El poder calorífico de cada biomasa ensayada refleja la heterogeneidad en cuanto a las características de cada una. En la Tabla 10 se recogen los distintos poderes caloríficos inferior y superior de cada muestra, en base seca y en base húmeda.

Tabla 10. Contenido energético de los pélets obtenidos

Biomasa	Humedad (% bh)	PODER CALORÍFICO PÉLETS			
		PCS (bs) (MJ/kg)	PCS (bh) (MJ/kg)	PCI (bs) (MJ/kg)	PCI (bh) (MJ/kg)
Astilla de pino	27,3	20,44	19,18	19,37	17,42
Nicotiana	39,1	17,89	15,88	16,67	14,53
Astilla de olmo 1	26,6	19,26	17,35	17,95	15,93
Astilla de olmo 2	26,6	19,26	17,35	17,95	15,93
Roble 25 mm	23,1	19,24	17,28	17,93	16,06
Roble 50 mm	23,5	19,26	17,28	17,92	16,08
Roble verde triturado	39,2	19,14	17,19	17,87	15,80
Roble verde astillado	40,6	19,13	17,20	17,85	15,80

Como se observa en la Tabla 10, el contenido en humedad de la madera modifica el poder calorífico de esta última, reduciéndolo significativamente en el caso de las muestras en base húmeda en comparación con las mismas en base seca. Valter y Zuccoli (2008) afirman que durante el secado, una reducción de la humedad en un 10% supone aproximadamente un aumento de 2,16 MJ/kg en el contenido energético.

Por otro lado se puede observar que el poder calorífico inferior es muy similar en los pélets de las frondosas, como el olmo o el roble. Este valor en coníferas como el pino, es ciertamente superior. Esta diferencia se debe fundamentalmente al mayor contenido en lignina, y en parte también, al mayor contenido en resina, ceras y aceites, de las coníferas.

Si consideramos el sello de calidad ENplus, sólo los pélets de pino sobrepasan el valor de 16,5 MJ/kg necesario para obtener la calidad A1. Los pélets de las muestras *Roble 25 mm* y *Roble 50 mm* se clasificarían dentro de la calidad B. El resto de los pélets del ensayo no obtendrían el sello de calidad ENplus por encontrarse su PCI por debajo de los 16,0 MJ/kg (bh) demandados por el programa de certificación.

5.1.3 Balance global del proceso productivo

Una vez obtenido el resultado del consumo específico en cada fase del proceso de peletizado de las biomásas ensayadas (ver Tabla 11 y 12), se realizará, respecto al contenido energético de los pélets elaborados (ver Tabla 10), un cuadro que contenga el porcentaje de energía consumida en la elaboración de los pélets respecto a la energía contenida en los mismos. De esta forma, los resultados del proceso se presentan de modo que pueden ser interpretados de manera más intuitiva por el lector. Para la elaboración de este cuadro se tendrá en cuenta el tipo de secadero utilizado durante el proceso de secado, y dado que se obtuvieron resultados diferentes en cada secadero, ambos ensayos se dispondrán de forma separada; el consumo de las muestras secadas en el secadero rotativo se recogen en la Tabla 13, y el de las muestras en las que se utilizó el secadero solar en Tabla 14.

Tabla 11. Energía consumida total en cada fase del proceso de peletizado para el secado en secadero rotativo

TIPO DE BIOMASA	PROCESO DE TRATAMIENTO				TOTAL
	PREMOLIENDA	SECADO TROMEL	MOLIENDA	PELETIZADO	
Energía consumida (MJ/t pélet (bs))					
Astilla de pino	114,9	952,2	60,7	331,2	1459,0
Nicotiana	134,9	1868,7	75,0	680,4	2758,9
Astilla de olmo 1	122,7	1530,1	177,4	597,6	2427,8
Roble 25 mm	125,0	823,5	74,1	558	1580,6
Roble 50 mm	137,4	1011,9	162,9	543,6	1855,8
Roble verde triturado	141,3	2146,7	137,4	601,2	3026,6
Roble verde astillado	126,0	2956,0	115,7	496,8	3694,5

Tabla 12. Energía consumida total* en cada fase del proceso de peletizado para el secado en secadero solar

TIPO DE BIOMASA	PROCESO DE TRATAMIENTO				TOTAL
	PREMOLIENDA	SECADO SOLAR	MOLIENDA	PELETIZADO	
Energía consumida (MJ/t pélet (bs))					
Astilla de pino	114,9	600,5	60,7	331,2	1107,3
Nicotiana	134,9	1321,3	75,0	680,4	2211,5
Astilla de olmo 2	120,6	666,6	136,3	619,2	1542,7
Roble 25 mm	125,0	458,6	74,1	558	1215,6
Roble 50 mm	137,4	476,7	162,9	543,6	1320,6
Roble verde triturado	141,3	824,9	137,4	601,2	1704,7
Roble verde astillado	126,0	812,3	115,7	496,8	1550,8

(*) Dato referente a la energía convencional por lo que no se incluye el aporte solar

Comparando las dos tablas anteriores, destaca principalmente el gran consumo energético que supone el secado en ambos casos. Como ya se ha mencionado con anterioridad, la energía solar no se tiene en cuenta a la hora de realizar el balance de consumos energéticos. Teniendo en cuenta esta condición, se observa que los resultados obtenidos en el secadero solar en todos los casos son considerablemente más bajos que en el trómel. Esto se debe a la gran contribución que supone que el aporte solar.

Respecto al primer tratamiento realizado, la premolienda, se observa que los consumos en cada biomasa se encuentran en valores cercanos. Comprendidos entre los 114,9 MJ/t de pélet producido en bs, correspondientes a la muestra *Astilla de pino*, hasta los 141,3 MJ/t de pélet producido en bs, correspondiente a la biomasa *Roble verde triturado*.

En el caso del secado, estos valores son más dispares debido a la mayor influencia que suponen las distintas variables que afectan a este proceso, como ya se ha comentado con anterioridad. Destaca que en todas las biomasas, más de la mitad de la energía consumida en la peletización, se emplea en el proceso de secado cuando éste se lleva a cabo en el secadero rotativo. Por el contrario, el consumo en el secadero solar, en casi todos los casos se encuentra por debajo de este nivel.

La molienda está claramente influenciada por los valores de humedad alcanzados durante el secado y por las características físicas de cada material. Es por ello, que se alcanzan valores de hasta 177,4 MJ/t de pélet producido en bs, en el caso de *Astilla de olmo 1* y sin embargo en otros casos, donde la madera es más blanda como en *Astilla de pino*, el consumo es de 60,7 MJ/t de pélet producido en bs.

La fase de peletizado, destaca por ser el segundo proceso más costoso después del secado. En este proceso las propiedades físicas y químicas de la biomasa tienen una gran influencia en el consumo final. Los valores en este caso rondan los 500 MJ/t de pélet producido en bs.

Por último, destacar, que no se aprecian diferencias derivadas de los diferentes equipos de secado empleados, en los consumos de las fases posteriores al secado.

En las Tablas 13 y 14, se recogen los datos anteriores, comparados con la energía contenida en los pélets de cada biomasa. El resultado se presenta como los costos energéticos totales para la producción de los pélets estudiados relacionados con el contenido energético del combustible, referido al PCI de cada producto en base húmeda, todo ello expresado en porcentaje.

Tabla 13. Energía consumida en cada fase del proceso de peletización respecto a la contenida en los pélets obtenidos. Secado realizado en secadero rotativo.

TIPO DE BIOMASA	PROCESO DE TRATAMIENTO				TOTAL
	PREMOLIENDA	SECADO TROMEL	MOLIENDA	PELETIZADO	
Energía consumida respecto a la contenida en el pélet (%)					
Astilla de pino	0,7	5,5	0,3	1,9	8,4
Nicotiana	0,9	12,9	0,5	4,7	19,0
Astilla de olmo 1	0,8	9,6	1,1	3,8	15,2
Roble 25 mm	0,8	5,1	0,5	3,5	9,8
Roble 50 mm	0,9	6,3	1,0	3,4	11,5
Roble verde triturado	0,9	13,6	0,9	3,8	19,2
Roble verde astillado	0,8	18,7	0,7	3,1	23,4
PROMEDIO	0,8	10,2	0,7	3,4	15,2

Tabla 14. Energía consumida* en cada fase del proceso de peletización respecto a la contenida en los pélets obtenidos. Secado realizado en secadero solar.

TIPO DE BIOMASA	PROCESO DE TRATAMIENTO				TOTAL
	PREMOLIENDA	SECADO SOLAR	MOLIENDA	PELETIZADO	
Energía consumida respecto a la contenida en el pélet (%)					
Astilla de pino	0,7	3,4	0,3	1,9	6,4
Nicotiana	0,9	9,1	0,5	4,7	15,2
Astilla de olmo 2	0,8	4,2	0,9	3,9	9,7
Roble 25 mm	0,8	2,9	0,5	3,5	7,6
Roble 50 mm	0,9	3,0	1,0	3,4	8,2
Roble verde triturado	0,9	5,2	0,9	3,8	10,8
Roble verde astillado	0,8	5,1	0,7	3,1	9,8
PROMEDIO	0,8	4,7	0,7	3,5	9,7

(*) Dato referente a la energía convencional por lo que no se incluye el aporte solar

Teniendo en cuenta los resultados de las Tablas 13 y 14, se observa que el secado es la fase del proceso productivo de fabricación de pélets que más energía consume, seguida por el peletizado y por último, y con consumos similares ambas, la premolienda y la molienda. Este resultado coincide con varios autores (Fernández, 2006; Malisius et al, 2000)

Es destacable el reducido consumo energético del secadero solar en comparación con su homólogo rotativo. La diferencia media entre ambos es de más de la mitad, originando una reducción en el consumo medio global desde un 15,2 % para el proceso en el que se ha utilizado el secadero rotativo, a un 9,7 % en el caso de la utilización del solar.

El consumo medio de energía en el proceso de premolienda es del 0,8 % respecto a la energía contenida en los pélets, valor muy similar al que Fernández (2006) afirma que se produce durante este proceso.

En cuanto al secado, considerando únicamente el método convencional, es decir el secadero rotativo, el valor medio obtenido del 10,2%, coincide con otras publicaciones (Fernández, 2006; Apropellets, 2013) para rangos de humedad similares. Los valores del secadero solar son difícilmente contrastables con otras publicaciones debido a la novedad del método y al variante aporte que supone la energía solar en cada ensayo.

El consumo medio del proceso de molienda es de 0,7% respecto a la energía contenida en los pélets. Este valor es ligeramente inferior a los publicados por otros autores (Fernández, 2006) debido, posiblemente, a la baja humedad de los materiales durante su procesado.

Durante el proceso de peletizado, se obtuvieron valores medios del 3,4%, los cuales contrastan con autores como Fernández (2006), que afirman que no se requiere tanta energía para este proceso. Es difícil obtener valores exactos en este tipo de ensayos, debido a la gran cantidad de variables que afectan a los resultados, por lo que los resultados han de tomarse de forma orientativa. En cualquier caso, la diferencia con este autor es relativamente pequeña, de un 1,4%.

El porcentaje total de la energía requerida para la producción de pélets, en el caso de aquellos en los que el secado se ha realizado de forma convencional (trómel), representa el 15,2% de la energía total contenida en los mismos. Este valor se corresponde con el publicado por numerosos autores sobre este tema (Fernández, 2006; Malisius et al, 2000). Por otro lado, destaca que los ensayos realizados con el secadero solar se han logrado disminuir esta cifra, tomada como estándar por la bibliografía, por debajo del 10%, concretamente un 9,7% de media de la energía contenida en el pélet producido.

5.2 EFICIENCIA TÉRMICA DEL SECADO

El resultado de la evaluación de las prestaciones energéticas de cada equipo de secado se recoge en la Tabla 15. En ella, se ha realizado, según las variables: tipo de biomasa, secadero utilizado durante su procesado y humedades de entrada y de salida del secadero; el cálculo de la eficacia de secado de los dos equipos testados.

Tabla 15. Comparativa de la eficiencia térmica del proceso de secado en el secadero rotativo y en el secadero solar.

TIPO DE BIOMASA	TIPO DE SECADO	H _o	H _f	CEU			CTE	EFICACIA TÉRMICA SECADO	
				Elect + Term	Aport solar	Total		Eficacia Eléct+ Térmica (%)	Eficacia real (%)
				(kJ/kg ag ev)					
Astilla de pino	Solar	25,2	11,6	3638	5621	9259	2585	71,1	27,9
	Tromel	25,5	12,3	4500	-	4500	2585	57,5	57,5
Nicotiana	Solar	31	13	4816	10637	15453	2616	54,3	16,9
	Tromel	30,9	13,3	6057	-	6057	2616	43,2	43,2
Astilla de olmo	Solar	25,1	11,7	2356	5914	8269	2613	110,9	31,6
	Tromel	19,5	8,4	5846	-	5846	2610	44,7	44,7
Roble 25 mm	Solar	21,8	14,2	2581	8742	11323	2614	101,3	23,1
	Tromel	22,2	12,8	5965	-	5965	2606	43,7	43,7
Roble 50 mm	Solar	22,8	10,1	2851	10388	13239	2616	91,8	19,8
	Tromel	22,8	12	6399	-	6399	2601	40,7	40,7
Roble verde triturado	Solar	37,7	15,6	1896	1788	3684	2603	137,3	70,7
	Tromel	36,4	15,5	5533	-	5533	2603	47,0	47,0
Roble verde astillado	Solar	39,7	15,3	2003	2364	4366	2608	130,3	59,7
	Tromel	40,2	13	5661	-	5661	2596	45,9	45,9
PROMEDIO	Solar	29,0	13,1	2877,2	6493,3	9370,6	2608,0	99,6	35,7
	Tromel	28,2	12,5	5708,7	-	5708,7	2602,6	46,1	46,1

CEU= Consumo energético unitario; CTE= Calor teórico de evaporación; H_o= Humedad inicial; H_f= humedad final; Elect = Energía eléctrica; Term = Energía térmica; Aport = Aporte

Como se puede observar en la tabla anterior, el CEU Total en el secadero solar es ampliamente superior al del trómel. Esto se debe, al gran aporte que supone la energía solar en este secadero, llegando a alcanzar los días más favorables los 10388 kJ/kg ag ev en el caso de la muestra *Roble 50 mm*. Si este valor no se tiene en cuenta y se comparan únicamente los valores de energía convencional (eléctrica y térmica), el resultado es el contrario. Por cada kg de agua evaporada se necesita más energía convencional en el secadero rotativo que en el solar. Los valores promedios en el

secadero solar se encuentran alrededor de los 2900 kJ/kg de agua evaporada, mientras que en el rotativo superan ampliamente los 5000 kJ/kg ag ev.

Por otro lado, se observa que el CTE no sufre grandes variaciones en cada biomasa, ni en cada tipo de secadero, ya que únicamente depende de la temperatura a la que se encuentre la muestra en el momento de comenzar el secado.

Por este motivo, al analizar la eficiencia térmica del secado con cada biomasa, los resultados obtenidos reflejan la misma tendencia que el CEU. Si se observa la eficiencia real de cada secadero, los valores obtenidos en el secado solar (del orden del 35%), son considerablemente menores que en el rotativo (45%). Además destaca la baja eficiencia de ambos secaderos, en especial, la de secadero rotativo, ya que el secadero solar es un prototipo que se encuentra en fase de prueba por lo que se admite una mayor tolerancia. El secadero rotativo en condiciones normales de operación suele tener una eficiencia térmica de secado del 50-75% (Esteban, 2014). La justificación a esta baja eficiencia se debe a que, las muestras ensayadas contenían valores de humedad relativamente bajos a la entrada de los equipo de secado, por lo que la evaporación del agua contenida en las mismas se realizó de forma más costosa que si la humedad hubiera sido más alta.

Por otro lado, si sólo se contabiliza el aporte eléctrico y térmico, los resultados cambian, pasando a ser el secadero solar más eficaz, con una media alrededor del 100%, en la cual, la energía teórica de evaporación es la misma que la energía suministrada de forma convencional al secadero. En algunos casos, en los que las condiciones meteorológicas fueron favorables (radiación solar alta, temperatura ambiente suave y humedad relativa baja), se llegó incluso a necesitar menos energía convencional de la que teóricamente se necesita para el secado de la muestra estudiada. Esto sucede, por ejemplo, en el caso de la biomasa *Roble verde triturado*, para el cual la eficiencia del secado fue de un 137,3 %. Sin embargo, en este mismo caso, al disponer de ese gran aporte solar la eficiencia total del secadero baja hasta un 23%.

Los datos de la eficiencia del secado en el equipo solar, revelan que se aprovecha poca cantidad de toda la energía disponible para el secado. Como se detalla en profundidad en Montero, (2005), se producen pérdidas considerables en este tipo de equipos. López-Vidan et al (2013) afirma que la eficiencia del secado solar por sí solo, adquiere valores máximos del 24%, sin embargo, si el secado solar es apoyado con

una fuente de calor, como en el presente estudio es la biomasa, la eficiencia del secado puede alcanzar valores de hasta el 71%, y aunque a escala piloto estos valores sean difíciles de conseguir, anima a seguir realizando ensayos para el testado y mejora en la eficiencia de la planta de secado solar.

5.3 AHORRO ENERGÉTICO

La energía específica convencional consumida en el conjunto del proceso de fabricación de pélets, respecto del equipo utilizado en la fase de secado, se muestra en la Tabla 16. Se ha comparado el consumo medio de energía eléctrica y térmica de todos los procesos llevados a cabo en la producción de pélets, debido a que es la energía consumida por los equipos. La energía solar no se tiene en cuenta para realizar este cálculo, ya que su consumo, se produce de forma directa a través de los cristales del secadero o mediante un colector solar, que capta la radiación libre y gratuita del sol, el cual, la transfiere a un sistema para su aprovechamiento, por lo que no produce un gasto monetario por sí sólo como en el caso de la energía convencional.

Tabla 16. Ahorro energético producido durante el proceso de fabricación de pélets derivado de la utilización del secadero solar respecto al trómel.

Consumo energético	SECADERO		Ahorro energético
	SOLAR	TROMEL	
Eléctrica + térmica (MJ/t pélet)	1513,9	2388,3	36,61

Como se puede observar en la tabla anterior, el consumo específico medio del proceso de producción de pélets en el que se incluye el secado con secadero solar es de 1513,9 MJ/t pélet respecto a los 2388,3 MJ/t pélet del proceso en el que se utiliza el trómel. El consumo en el secadero solar, como ya se ha comentado con anterioridad, es ampliamente inferior al del secadero rotativo debido, a que no se contabiliza el gran aporte de energía solar. Es por ello, que en términos de energía convencional, el uso del secadero solar supone un ahorro energético en el conjunto de procesos de fabricación de pélets del 36,61% respecto al uso del secadero rotativo, sin perder con ello, calidad en el producto secado.

A la vista de los resultados, el secado solar de biomasa lignocelulósica, queda demostrado con este estudio, que su utilización es viable y al mismo tiempo, rentable. Aunque, es preciso seguir realizando ensayos en este proyecto piloto, de tal forma, que se puedan obtener resultados totalmente fiables, al igual que una mayor eficiencia de secado, para poder establecer comparaciones definitivas con otros sistemas de secado convencionales, como el secadero rotativo, en distintas condiciones (humedad, granulometría, tipo de biomasa, radiación solar etc).

6. CONCLUSIONES

6. CONCLUSIONES

A continuación, se exponen de forma breve y concisa, las principales conclusiones a las que se ha llegado, tras haber analizado el proceso productivo de fabricación de pélets con diferentes biomasas lignocelulósicas en la instalación piloto del CEDER-CIEMAT. Cabe destacar que la heterogeneidad del material y el reducido número de ensayos, limitado por las características de la instalación con la que se ha trabajado, hacen que los resultados obtenidos en la ejecución de este estudio deban ser tomados con precaución y cautela.

El balance energético del proceso productivo de fabricación de pélets a partir de biomasa lignocelulósica resulta positivo. Se consume durante el proceso de transformación, alrededor de un 15% de la energía respecto a la contenida en los pélets obtenidos.

El proceso más costoso desde el punto de vista energético de todo el proceso de transformación es el secado, seguido del peletizado, y por último, con consumos similares, la molienda y la premolienda.

El ensayo de secado en la planta piloto solar respecto al secado convencional en un secadero rotativo, proporciona un ahorro de energía convencional de más de la mitad. Lo que supone que el consumo de energía específica pasa del 15 al 10%, o lo que es lo mismo, supone un ahorro final de más del 33% de la energía consumida durante todo el proceso de producción, respecto a la contenida en el pélet obtenido.

La variable que más afecta al balance energético del proceso productivo, es el porcentaje de humedad en base húmeda de cada biomasa, debido a que interfiere directamente en la fase de secado.

Respecto a la evaluación de las prestaciones energéticas de cada equipo de secado estudiado, se obtuvieron rendimientos, energéticos en cuanto a la energía convencional, muy superiores en el secadero solar que en el trómel. Sin embargo, el resultado es mejorable debido a la gran cantidad de energía solar no aprovechada en el primero.

El ahorro energético medio de energía convencional del conjunto del proceso de fabricación de pélets, proporcionado al utilizar en la fase de secado, el secadero piloto

solar respecto al secadero rotativo convencional, es ciertamente considerable, aproximadamente del 37%. Lo cual supone un ahorro monetario potencial muy importante, sobre todo si se realizara a escala industrial.

Como última conclusión, se considera pertinente continuar realizando ensayos en esta planta piloto de secado solar, de tal forma, que se puedan obtener resultados totalmente fiables, que permitan establecer comparaciones definitivas con otros sistemas de secado convencionales.

7. BIBLIOGRAFÍA

7. BIBLIOGRAFÍA

Alakangas E & Paju P, 2002. Wood pellets in Finland, technology economy and market.

OPET Report 5, Technical Research Center of Finland

Amos WA, 1998. Report on Biomass Drying Technology. National Renewable Energy Laboratory, vol NREL/TP-570-25885

Apropellets, 2013. Guía básica del uso del pellet de madera con fines térmicos. Apropellets. Madrid. Disponible en: <http://www.mercadobiomasa.com/>

BioPlat, 2013. Pélets de biomasa en España. BioPlat. Madrid

Brammer JG, 1999. Drying technologies for an integrated gasification-based bio-energy system. Renewable and Sustainable Energy Reviews; 3(4):243-289.

Caputo AC, Scacchia F, Pelagagge PM, 2003. Disposal of by-products in olive oil industry: waste-to-energy solutions. Applied Thermal Engineering.23(2)197-214

Ciolkosz D, 2009. Manufacturing Fuel Pellets from Biomass. Pennsylvania State University

Comisión Nacional de los Mercados y la Competencia (CNMC), 2015. [Internet] Madrid, CNMC. Citado el 04/06/15. Listado de Informes de Etiquetado de Electricidad. Disponible en: www.cnmc.es

Corvalan R, Horn M, Roman R, Saravia L, 1995. Ingeniería del secado solar. CYTED-D.

Cova Walter JD, Marinelli Humberto E, 2009. Desección de Productos Agrarios: Antecedentes teóricos y bibliográficos. Universidad tecnológica nacional. La Rioja – Argentina

Dpto. de sistemas y software y aude, 1999. PROASIS DAS-Win Versión 3.0. Manual del usuario

Ekechukwu OV, 1999. Review of solar-energy drying systems I: an overview of drying principles and theory. Energy Conversion and Management;40(6):593-613

Energías Renovables. (Web en línea, <http://www.energias-renovables.com/>).
Consulta: 25/05/2015

Esteban Pascual LS, Bados Sevillano R, 2013. Proyecto de planta piloto de secado solar híbrido para biomasa. CEDER-CIEMAT

Esteban Pascual LS, Bados Sevillano R, 2014. Secadero híbrido solar para el secado de biomasa lignocelulósica. Estudio de mercado. CEDER-CIEMAT

Fagnäs L, Brammer J, Wilén C, Lauer M, Verhoeff F, 2010. Drying of biomass for second generation synfuel production biomass and bioenergy: 34:1267-1277

Fernández, J. (2006). Materias primas para producción de biocombustibles sólidos. Jornadas Energías Renovables, Ávila.

García Calvo JL, Hidalgo A, Alonso MC, Luxán MP, Fernández Luco L, 2010. Caracterización de residuos procedentes de los procesos de combustión de biomasa. Viabilidad de uso como materiales de construcción. XI Congreso nacional de materiales, Zaragoza, España. Pp. 946-949

González T, 2012. Secado y estabilización de biomasa. Energética XXI. 119; 110

Grupp M, Bergler H, Owen M, Schröder G, 1995. Comparative test of solar dryers. TDC Serial Report 2/95. PSA – CIEMAT

Hollick JC, 1999. Commercial scale solar drying. Renewable Engineering; 16(1-4):714-719

IMARTEC, 2014. [Internet]. Lleida: IMARTEC; [citado 19 may 2015]. Ahorro energético. Disponible en: www.imartec.es

Instituto para la diversificación y ahorro de la energía (IDAE), 2007a. Energía de la biomasa. Manuales de energías renovables vol 2. Madrid

Instituto para la diversificación y ahorro de la energía (IDAE), 2007b. Bioamasa: Producción eléctrica y cogeneración. BESEL. Madrid

Instituto para la diversificación y ahorro de la energía (IDAE), 2007c. Biomasa: Maquinaria agrícola y forestal. BESEL. Madrid

- Instituto para la diversificación y ahorro de la energía (IDAE), 2008. Bioamasa: Industria. BESEL. Madrid
- Instituto para la diversificación y ahorro de la energía (IDAE), 2009. Guía técnica. Instalaciones de biomasa térmica en edificios. Escan. Madrid
- Instituto para la diversificación y ahorro de la energía (IDAE), 2011a. [Internet]. Madrid: IDAE; [citado 19 may 2015]. Biomasa. Disponible en: www.idae.es
- Instituto para la diversificación y ahorro de la energía (IDAE), 2011b. Plan de energías renovables (PER) 2011-2020. Madrid
- Instituto para la diversificación y ahorro de la energía (IDAE), 2012. Área tecnológica: Biomasa y residuos. Observatorio tecnológico de la energía. Madrid
- Jara Millar H, 2009. Biomasa y sus propiedades como combustible. ATCP; 25(3):24-28
- Junta de Andalucía, 2009. [Internet]. Balance energético de la producción de pelets a partir de *Cynara cardunculus*. Secretaría general de agricultura, ganadería y desarrollo rural. Disponible en: <http://www.juntadeandalucia.es>
- Kneule F, 1982. El secado. Urmo, S.A. de Ediciones, Bilbao
- Li H, Jiang LB, Li CH, Liang J, Yuanc XZ, Xiao ZX et al, 2014. Co-pelletization of sewage sludge and biomass: The energy input and properties of pellets. Fuel Processing Technology 132 (2015) 55–61
- Liang T, Khan MA, Meng Q, 1996. Spatial and temporal effects in drying biomass for energy," Biomass and Bioenergy. 10(5-6): 353-360.
- López-Vidan EC , Méndez-Lagunas LL , Rodríguez-Ramírez J , 2013. Efficiency of a hybrid solar–gas dryer. Solar Energy 93 (2013) 23–31
- Malisius, U. Jauschnegg H, Schmidl H, Bengt N, Rapp S, Strehle A, et al, 2000. Wood Pellets in Europe. Industrial Network on Wood Pellets, Thermie B Project Dis/2043/98-AT, Coordinado por UMBERA GmbH, St.Polten,Austria
- Mani, S., Tabil, L.G., Sokhansanj, S., 2004. Grinding performance and physical properties of wheat and barley straws, corn stover and switchgrass. Biomass and Bioenergy 27, 339–352

- Mani S, Sokhansanj S, Bi X, Turhollow A, 2006. Economics of producing fuel pellets from biomass. *Applied Engineering in Agriculture*. 22(3): 421-426
- McKendry P, 2002. Energy production from biomass (part 1): overview of biomass. *Bioresource Technol*; 83:37-46
- Meza JI, Bartolomé C, Gil M, Ramos I, 2009. Planta piloto semi-industrial de secado, molienda y cocombustión de biomasa en el instituto de investigación circe. IX Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica CIBIM 2009, Las Palmas de Gran Canaria, Islas Canarias, España
- Monteiro E, Mantha V, Rouboa A, 2012. Portuguese pellets market: Analysis of the production and utilization constrains. *Energy Policy*. 42:129-135
- Montero Puertas I, 2005. Modelado y construcción de un secadero solar híbrido para residuos biomásicos. Tesis doctoral. Universidad de Extremadura, Badajoz, España.
- Ordóñez Jiménez JL, 2014. Pellets: Energía Limpia con Buen Futuro. *M&M*. 83:76-84
- Ortíz Torres L, 2008. Producción de biocombustibles sólidos de alta densidad en España. *CIDEU* 5: 107-123
- Ortíz L, Tejada A, Vázquez A, Piñeiro G, 2003. Aprovechamiento de la biomasa forestal producida por la cadena monte-industria. Parte III: producción de elementos densificados. *CIS-madera* (11):17-32
- Paino Lloret A, Báscones Palacios E, Antolín Giraldo G, 2006. Metodología para ensayos de peletizado de biomasa. *Energética XXI*. CARTIF
- Process Sensors Corporation, 2011. Medidor de humedad NIR MCT360: Instrucciones de uso e instalación
- Rojas Valdivia AM, 2004. Prefactibilidad técnica y económica para la instalación de una planta de pellets para combustibles a partir de desechos de madera. Memoria para optar al Título Profesional de Ingeniero Forestal. Universidad de Chile. Santiago de Chile.
- Sebastián F, García-Galindo D, Rezeau A, 2010. Energía de la biomasa Vol I. Prensas universitarias de Zaragoza, 1ª edición. Zaragoza

- Simón Manchado M, 2007. Evaluación del proceso de producción de pélets con residuos de pino silvestre (*Pinus sylvestris* L). Proyecto fin de carrera. Universidad de Valladolid
- Smith ED, 2002. An Introduction to Wood Pelleting. ESA Process Equipment, Inc. Canada.
- Stelte W, Holm JK, Sanadi AR, Barsberg S, Ahrenfeldt S, Henriksen UB, 2011. Fuel pellets from biomass: The importance of the pelletizing pressure and its dependency on the processing conditions. Fuel 90, 3285–3290
- Trigueros García A, 2009. Planta piloto de secado de sólidos: calibrado de sensores NIR, supervisión y modelado. Proyecto Fin de Carrera. Escuela Superior de Ingenieros. Universidad de Sevilla.
- UNE-EN 14961-2:2012. Biocombustibles sólidos. Especificaciones y clases de combustibles. Parte 2: Pélets de madera para uso no industrial. Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR). Madrid
- Valter Francescato EA, Zuccoli Bergomi L, 2008. Manual de combustibles de la Madera. AVEBIOM. Valladolid
- Wang C, Yan J, 2005. Feasibility analysis of wood pellets production and utilization in China as a substitute for coal. Int J Green Energy; 2(1): 91-107
- Williams-Gardner A, 1971. Industrial Drying; Leonard Hill Books. London
- Wolf A, Vidlund A, Andersson E, 2006. Energy-efficient pellet production in the forest industry—a study of obstacles and success factors. Biomass and Bioenergy; 30:38-45
- Wood pellet association of Canada (WPAC), 2014. [Internet]. Québec (Canada):WPAC 2014[citado 19 may 2015]. Publications;Pellet Markets and Canadian Pellet Industry Update. Disponible en: www.pellet.org

