

UNIVERSIDAD DE EXTREMADURA
ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

**ESTUDIO DE LOS PARÁMETROS DE PELLETIZADO
DE RESIDUOS BIOMÁSICOS EN PELLETIZADORA
SEMI-INDUSTRIAL**

TRABAJO PRESENTADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE
GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA (RAMA INDUSTRIAL)

POR

DAVID CANCHO FRANCO

BADAJOS, FEBRERO DE 2015

TRABAJO FIN DE GRADO

Autor:

DAVID CANCHO FRANCO

Director o Directores:

M^a TERESA MIRANDA GARCÍA-CUEVAS / JOSÉ IGNACIO ARRANZ BARRIGA

Tribunal de evaluación:

IRENE MOTERO PUERTAS

CARMEN VICTORIA ROJAS MORENO

FRANCISCO DEL MORAL GARCÍA

ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN, ANTECEDENTES Y OBJETIVOS	1
1.1	Introducción	1
1.2	Antecedentes	6
1.3	Objetivos	7
2	BIOMASA, PRETRATAMIENTOS Y DENSIFICADOS	10
2.1	Tipos de biomasa	10
2.2	Pretratamientos	11
2.2.1	Astillado	11
2.2.2	Secado	13
2.2.2.1	Secado natural	13
2.2.2.2	Secado forzado.....	14
2.2.3	Molienda	15
2.2.4	Tamizado	17
2.2.5	Almacenamiento	18
2.3	Densificados	19
2.3.1	Empacado.....	19
2.3.2	Briquetado	20
2.3.3	Pelletizado.....	21
2.3.3.1	Fuerzas y energías en el pelletizado	22
2.3.3.2	Equipos para el pelletizado	23
2.3.3.3	Normativa de referencia	24
3	MATERIALES Y MÉTODOS.....	28
3.1	Materia prima	28
3.1.1	<i>Pinus pinaster</i> en Extremadura	29
3.2	Caracterización de materia prima.....	30
3.2.1	Humedad.....	30
3.2.2	Densidad aparente	31
3.2.3	Distribución granulométrica	32
3.2.4	Análisis inmediato	32
3.2.5	Análisis elemental	32
3.2.6	Poder calorífico	33
3.3	Caracterización de los productos.....	33
3.3.1	Humedad.....	34
3.3.2	Densidad aparente	34
3.3.3	Dimensiones.....	34
3.3.4	Durabilidad mecánica	34
3.3.5	Resistencia a la compresión	35
3.4	Equipamiento	35
3.4.1	Caudal de alimentación	36
3.4.2	Caudal de humectación	36

3.4.3	Matriz de pelletizado	37
3.4.4	VARIABLES A CONTROLAR	37
3.5	Ensayos.....	39
3.5.1	Sesión uno. Establecimiento de longitud	39
3.5.2	Sesión dos. Búsqueda del pellet mecánicamente óptimo.....	40
4	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	42
4.1	Caracterización del equipo	42
4.1.1	Caudal de alimentación	42
4.1.2	Caudal de humectación	43
4.2	Caracterización de la materia prima.....	45
4.2.1	Humedad.....	45
4.2.2	Densidad aparente.....	46
4.2.3	Distribución granulométrica	46
4.2.4	Análisis inmediato.....	47
4.2.5	Análisis elemental	48
4.2.6	Poder calorífico	48
4.3	Caracterización de los pellets	49
4.3.1	Sesión uno. Establecimiento de la longitud.....	49
4.3.1.1	Humedad.....	50
4.3.1.2	Densidad aparente.....	51
4.3.1.3	Dimensiones.....	53
4.3.1.4	Durabilidad mecánica	54
4.3.1.5	Resistencia a la compresión.....	55
4.3.2	Sesión dos. Búsqueda del pellet mecánicamente óptimo.....	56
4.3.2.1	Humedad.....	58
4.3.2.2	Densidad aparente.....	59
4.3.2.3	Dimensiones.....	61
4.3.2.4	Durabilidad mecánica	63
4.3.2.5	Resistencia a la compresión.....	65
5	CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS.....	67
6	BIBLIOGRAFÍA	69

1 INTRODUCCIÓN, ANTECEDENTES Y OBJETIVOS

1.1 Introducción

El cambio climático y las consecuencias que este conlleva se han convertido en la principal amenaza para el futuro global. Si no se consigue reducir la emisión de gases de efecto invernadero, la temperatura mundial ascenderá provocando la desertificación, el deshielo de los polos que provocaría un ascenso del nivel de mares que pondría en peligro muchas ciudades y vidas.

En todo el mundo se investiga para paliar los efectos del calentamiento global así como desarrollar tecnologías que hagan más sostenible la vida en el planeta. Una de estas tecnologías es la biomasa.

La biomasa, según la definición de la Real Academia Española de la Lengua tiene dos acepciones:

- 1- Materia total de los seres que viven en un lugar determinado, expresada en peso por unidad de área o de volumen.
- 2- Materia orgánica originada en un proceso biológico, espontáneo o provocado, utilizable como fuente de energía[1].

La primera acepción es utilizada en la biología y ecología. La segunda se refiere a la materia orgánica producida por fotosíntesis y que puede ser utilizada como recurso energético por medio de la combustión.

La biomasa es pues un tipo de almacenamiento de la energía solar ya que, en la combustión, la materia orgánica interactúa con el oxígeno produciendo dióxido de carbono y agua. Pero la naturaleza del ciclo no se detiene aquí, la energía solar, por medio de la fotosíntesis y junto con el dióxido de carbono y el agua, crea de nuevo el combustible y oxígeno, cerrando el ciclo.

Mediante la fotosíntesis, las plantas toman el dióxido de carbono junto con el agua de su alrededor y usando la energía solar, lo convierten en materia vegetal. La planta crece usando estos tres elementos generando un carbohidrato con liberación de oxígeno. Si se aplica una combustión sobre la planta, la reacción del combustible con el oxígeno libera energía en forma de calor.

La biomasa es una fuente de energía renovable por fotosíntesis. Su consumo sostenible no entraña riesgos para las futuras generaciones y permite reducir el consumo de energías cuyas reservas son limitadas (petróleo, gas, carbón y uranio) y están repartidas de forma irregular en el planeta.

Tabla 1.1 Comparativa de tiempos de reconstrucción de biomasa, carbón y petróleo

Energía	Periodo de reconstrucción	Estimación de reservas
Biomasa	De 15 a 200 años	Renovable
Carbón	De 250 a 300 millones de años	500 años.
Petróleo	De 450 a 1200 millones de años	50 años

Dado que la cantidad de dióxido de carbono absorbida por fotosíntesis corresponde con la cantidad de este liberada en la combustión, la utilización de la biomasa como fuente energética es

más respetuosa en el ámbito de gases de efecto invernadero, lográndose un equilibrio y un balance neutro en las emisiones [2].

El desarrollo de la biomasa no limita sus beneficios a la producción energética, sino que cuenta en importantes efectos positivos en ámbitos medioambientales y socioeconómicos en todas las escalas. Por ejemplo, una gestión adecuada de los montes llevará implícita una valorización energética de las biomásas forestales y supondría evitar entre el 50 y 70% de los incendios forestales.

La biomasa es una fuente energética renovable que permitiría cubrir la demanda energética de la sociedad en todas sus vertientes: transporte, calor y electricidad. Según su aplicación, la biomasa se divide en dos grandes usos:

- Biomasa para usos térmicos: Las explotaciones de este tipo de usos son, sobre todo las dedicadas al suministro de calor para calefacción, producción de agua caliente sanitaria y/o procesos industriales. Se ven claramente dos vertientes, una para aplicaciones en el sector residencial y otra para usos en procesos industriales.
- Biomasa para usos eléctricos: Explotaciones de generación de energía eléctrica de forma exclusivas como con sistemas de cogeneración y co-combustión.

Desgraciadamente, la biomasa no ha tenido el desarrollo esperado bajo el contexto actual. Al no existir datos al respecto, es complicado conocer la penetración que ha tenido la biomasa térmica aunque, la estimación hecha en el PER 2011-2020 es de 3655 ktep consumida para usos térmicos en 2010, no alcanzándose el objetivo del PER 2005-2010 de 4070 ktep [3].

Para evaluar la magnitud del sector térmico en relación al consumo de energía primaria, es necesario destacar que el consumo de energía térmica, entendido como energía no eléctrica utilizada para producir calor en aplicaciones estacionarias, alcanzó el 47% del consumo mundial de energía en 2008 [4].

En cuando a la biomasa para el aprovechamiento térmico, cabe destacar su uso residencial. En este sentido, el uso de mayor extensión es el de calefacción y agua caliente sanitaria (ACS), ya que una caldeara de biomasa puede ser utilizada, unida al sistema de climatización, de igual manera que una caldera de gas, gasóleo o eléctrica.

En este sentido, se puede tener producción térmica mediante:

- Estufas, normalmente de pellets o leña, que calientan una única estancia y normalmente actúan simultáneamente como elementos decorativos.
- Calderas de baja potencia para viviendas unifamiliares o construcciones de tamaño reducido.
- Calderas diseñadas para un bloque o edificio de viviendas, que actúan como calefacción centralizada.
- Centrales térmicas que calientan varios edificios o instalaciones (district heating) o grupo de viviendas.

El desarrollo del mercado de la biomasa ha permitido que en la actualidad exista una gran variedad de biocombustibles sólidos que pueden ser susceptibles de ser utilizados en sistemas de

producción térmica en edificios. Los formatos de comercialización de la biomasa más extendidos son los siguientes:

- Pellets producidos de forma industrial.
- Astillas, proveniente de industrias de primera y segunda transformación de la madera o de tratamientos selvícolas y forestales.
- Residuos agroindustriales, como huesos de aceituna, cascara de frutos secos, almendra, piña, etc.
- Leña, producida por el usuario o adquirida en el mercado [5].

En la región, en algunos sectores está muy extendido el uso del propio residuo para producción de calor para el proceso industrial, como puede ser el sector almazarero, utilizando el propio orujillo residual. El sector tabacalero está utilizando este recurso en secaderos en la provincia de Cáceres.

En el sector terciario y residencial no existen datos oficiales de la cantidad de calderas de biomasa instaladas [7], pero se sabe que su tendencia es creciente gracias al impulso del Gobierno de Extremadura con las subvenciones al respecto.

En este aspecto, el Plan de Bioenergía 2014-2020, presentado en Noviembre de 2013 por el Gobierno de Extremadura, pretende incentivar la inversión y quiere concluir en 2020 con 2000 calderas de biomasa térmica, de las que casi 1300 estarían en el ámbito doméstico, así como 100 redes térmicas y en torno a 30 plantas de biogás [6].

La barrera más importante para la implantación de la biomasa son los costes de producción, aprovisionamiento y la dificultad de tener un suministro periódico razonable en el tiempo. A esto hay que sumar las características negativas propias de la biomasa para su uso directo como combustible, sin tratar, que la hace poco atractiva.

La transformación de la biomasa en combustible a un precio competitivo es uno de los grandes retos en cuanto a la utilización de esta fuente de energía. Esta transformación puede realizarse por medio de un proceso de naturaleza física cuyo objetivo sea reducir o eliminar las características negativas de la biomasa recolectada.

Este proceso permite la adecuación de la biomasa a la tecnología que va a explotarla y puede realizarse específicamente para cada uso aplicando pretratamientos o densificados, sin descartar las posibles mezclas de biomasa para una mejora del producto final. Dentro de la preparación de los residuos, el pelletizado se enmarca como una tecnología clave [3].

El pelletizado es el proceso de fabricación de pellets. Estos son un biocombustible sólido estandarizado a nivel internacional. Se conforman como cilindros de pequeñas dimensiones procedentes de la compactación de serrines y residuos provenientes de aserraderos o a partir de biomasa de distintos orígenes como los agro pellets. En este proceso de fabricación no interviene ningún agente químico, sino que por medio de la presión, la temperatura y la humedad, la lignocelulosa presente en los residuos, actúa como aglutinante [5].

En los últimos años, la industria de producción de pellets ha experimentado un gran auge a escala mundial como consecuencia del gran desarrollo de equipos de combustión que utilizan específicamente este tipo de producto. Estos equipos poseen elevados niveles de automatización y autonomía así como reducidas necesidades de mantenimiento. Este motivo determina su

capacidad de competir en el mercado de las pequeñas y medianas instalaciones de producción de calor, especialmente en el sector doméstico.

El pelletizado es un proceso en el que generalmente se utilizan residuos de la industria maderera, aunque también serían susceptibles de pelletización otras biomásas como residuos forestales, agrícolas, agroindustriales o los cultivos energéticos. En el uso de estas biomásas requieren de un nivel de atención superior teniendo en cuenta cuestiones propias del manejo de las mismas, del proceso de densificado y la aplicación térmica posterior, así como posibles costes añadidos por la necesidad de operaciones previas a realizar sobre dichas biomásas.

En 2010, en el mundo se produjeron 14,3 millones de toneladas de pellets de madera con un consumo de 13,5 millones de toneladas [3]. En la Figura 1.1 se pueden ver la evolución de la producción y consumo total de pellets en 2009 y 2010 [8].

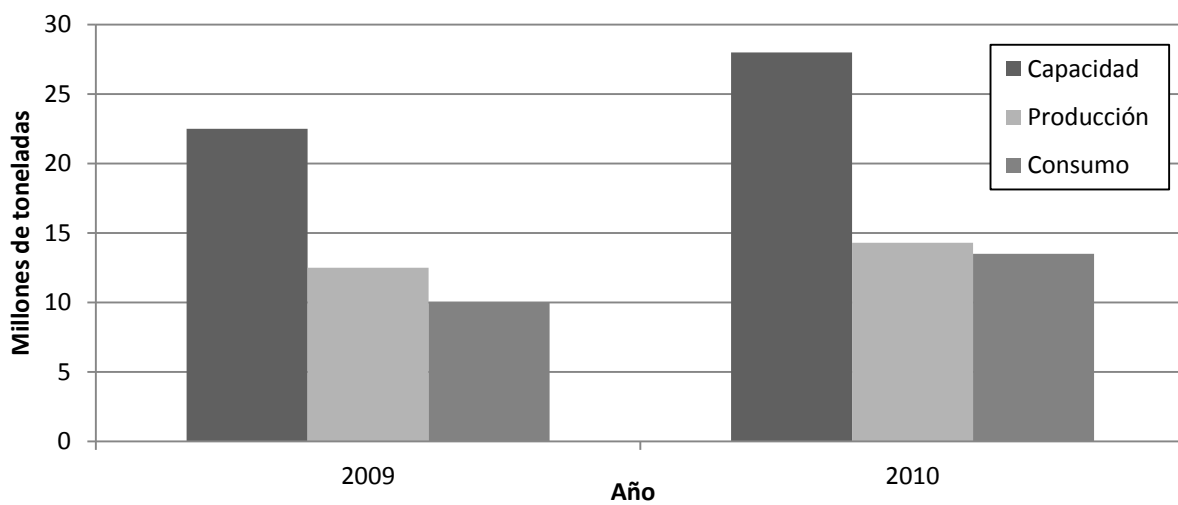


Figura 1.1 Evolución de la producción y consumo global de pellets en 2009 y 2010.

Las previsiones mundiales para 2015 y 2020 se pueden ver en la Figura 1.2 [9].

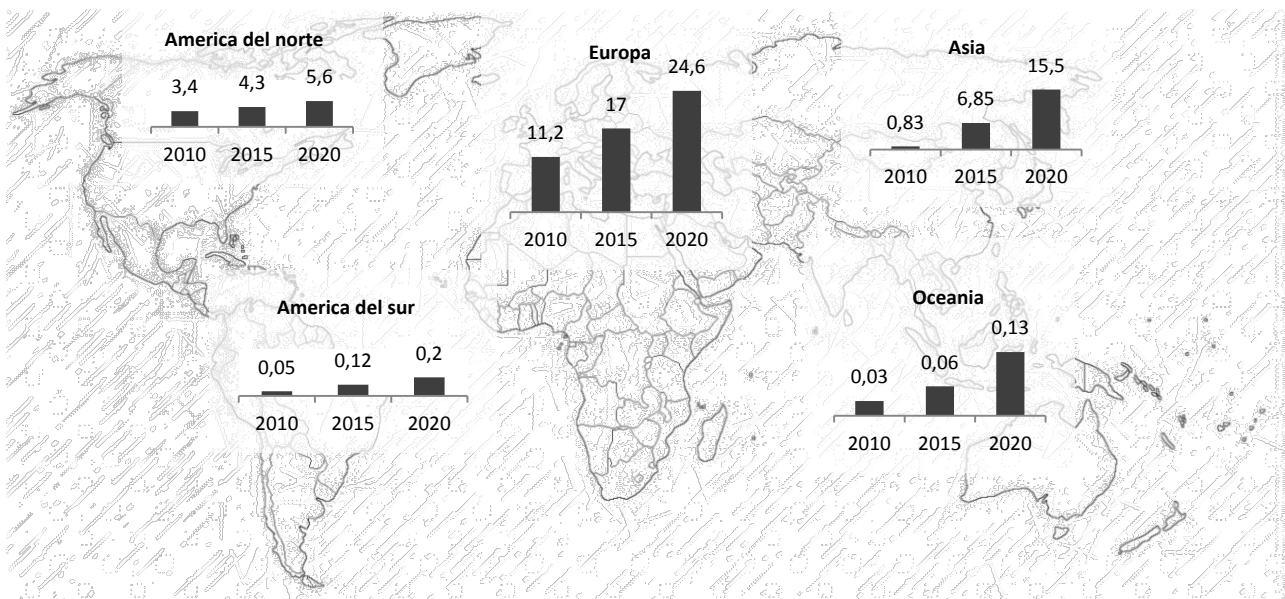


Figura 1.2 Consumo mundial y previsiones en millones de toneladas de pellets.

Según estos datos, Europa es la que mayor producción mundial de pellets posee y se espera que esta producción vaya en aumento. Entre 2008 y 2010 se produjo un 20,5% de aumento de la producción, llegando a acaparar casi el 85% de la producción mundial de pellets de madera.[3] En estos años, en España, se produjo un incremento del consumo y producción de pellets como se refleja en la Figura 1.3 [10].

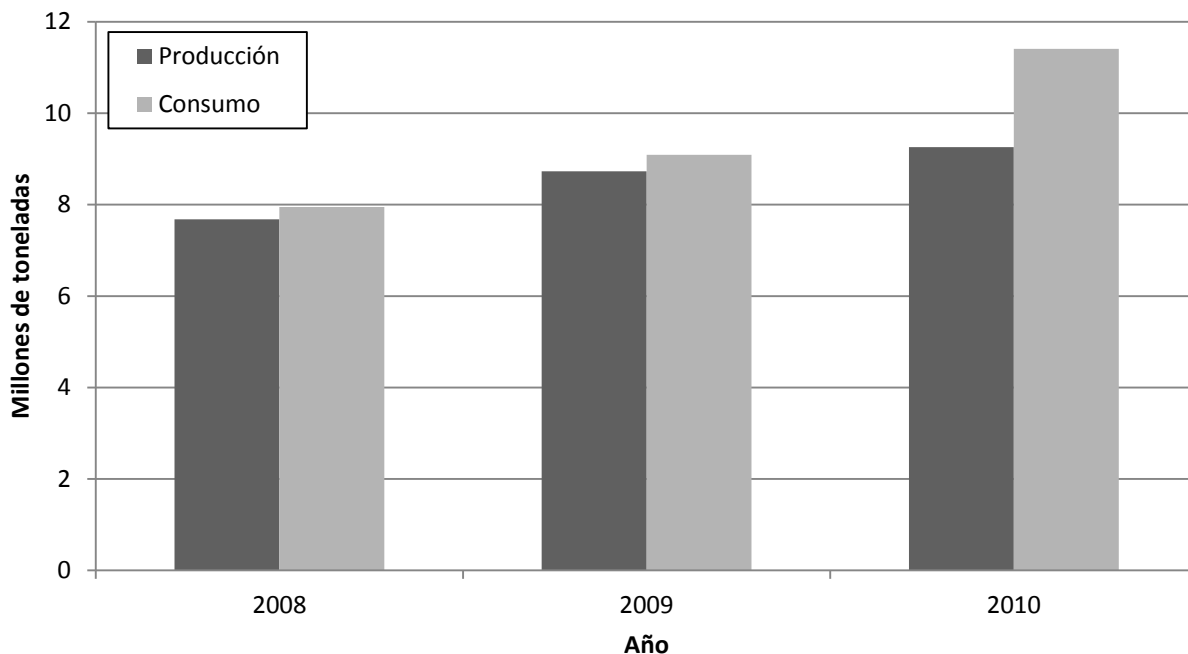


Figura 1.3 Evolución de la producción y consumo de pellets en España.

Estos datos resultan muy esperanzadores para la industria pero hay unas barreras a superar para poder penetrar en el mercado, estos son:

- Los grandes clientes pueden hacer fluctuar el mercado.
- La regulación en los distintos estados miembros de la UE puede ser diferente y, por tanto, un impedimento a la exportación.
- El desconocimiento del sector impide un incremento de la demanda.
- La calidad exigida al producto depende del usuario final [3].

La calidad es determinante en los pellets y viene definida en la Norma UNE EN ISO 17225-2 y en función de su calidad se determina su uso.

Un buen pellet de madera posee menos de un 10% de humedad, una durabilidad mecánica superior al 96,5%, con un contenido de finos entra el 1 y 6%, mientras que las cantidades de cenizas no superan el 3%. La cantidad de aditivos no debe superar el 3% del total, especificando el fabricante el tipo y cantidad de aditivo. El poder calorífico de los pellets debe superar los 16,5 MJ/kg, estableciéndose que de 2 a 2,5 kg de pellets equivalen, aproximadamente, a un litro de gasóleo [11].

Las calderas de pellets admiten normalmente pellets de calidades medias y altas, aunque, en algunos casos, pueden llegar a utilizar otros residuos. Existen así mismo, calderas de biomasa que

pueden funcionar con pellets de calidad inferior, más económicos pero con mayores concentraciones de cenizas y menor poder calorífico.

Una de las características a controlar en los pellets es su posible degradación en ambientes húmedos, por lo que resulta necesario su almacenamiento en recintos impermeabilizados, tanto en suministro como en edificios y viviendas.

Los pellets necesitan una durabilidad mecánica suficiente para evitar su desintegración en polvo y evitar las consecuencias de estas, como problemas en combustión, transporte, carga, descarga y almacenamiento. Así mismo, los finos a los que puede dar lugar la desintegración implican una mayor cantidad de polvo en los almacenamientos, posibles daños en calderas, menor eficiencia, mayor cantidad de cenizas volantes y mayores emisiones de aerosoles [3].

En 2011, el European Pellet Council aprobó la normativa de certificación energética de pellets de madera para usos térmicos. El objetivo de esta certificación es asegurar el suministro de pellets de determinada calidad para usos térmicos. ENplus certifica la calidad de los pellets en base a la norma EN 14961-2 ya derogada por la UNE EN ISO 17225, por lo que, en un futuro cercano se espera su actualización [3].

1.2 Antecedentes

Ya se comentó cómo los usos térmicos de la biomasa son el futuro de la explotación de este tipo de recursos. Un aprovechamiento correcto de los densificados de este tipo de recursos puede suponer una gran diferencia en cuanto en tanto a reducción de emisiones de efecto invernadero.

Más concretamente, los densificados biomásicos en formato pellet para usos térmicos en viviendas, dada la expansión de las calderas de esta tecnología, son el auténtico punto en el que hay que enfocar los esfuerzos en el desarrollo de los densificados.

La calidad de los pellets determina su uso, así como las características de los equipos de combustión, por lo tanto, la obtención de densificados de alta calidad, que permitan un aprovechamiento correcto de estos recursos es el objetivo.

En la calidad del pellet influirá tanto la materia prima como el proceso de pelletizado. Dentro de este proceso, hay una serie de variables que condicionan el proceso productivo y que pueden ser controladas. Estas variables son: la cantidad de producto que entra en la prensa, la humedad de este producto y la presión de los rodillos.

En cuanto a información de estas variables no existe mucha información. Se pueden encontrar muchos análisis de distintos residuos biomásicos pelletizados y del estudio de las características de estos pero no de cómo las variables del pelletizado afectan a estas variables.

Dentro de los pocos análisis existentes, en 2006, Sudhar Mani, Lope G. Tabil y Shahab Sokhansaj [12] realizaron un estudio de cómo afectaban la fuerza de compresión, el tamaño de partícula y el contenido de humedad en las propiedades mecánicas de pellets de pastos.

En este estudio se muestra cómo las fuerzas de compresión afectan a la densidad del pellet cuando la humedad es del 12% en base húmeda. Para todas sus muestras, el incremento de presión genera un incremento de densidad en la muestra llegando, para el caso de la paja del trigo, a valores cercanos a la densidad de las partículas incluso para valores bajos de presión.

También se menciona que un incremento del contenido de humedad provoca una reducción de la densidad del pellet, tal como demostraron Guftafson y Kjelgaard[13]. Así mismo, Rehkugler y Buchele informan sobre una reducción relajada de la densidad para contenidos de humedad entre el 6 y el 25% en base húmeda[14].

En 2010, Clara Serrano, Esperanza Monedero, Magín Lapuerta y Henar Portero [15] publicaron un estudio del efecto del contenido de humedad y el tamaño de partícula en la calidad de los pellets.

Los resultados obtenidos en este estudio muestran que la durabilidad de los pellets es superior al 90% cuando los valores de humedad en el pellet ya fabricado están por encima del 7,5% en base húmeda [15].

En 2013, Mahdi Kashaninejad, Lope G. Tabil y Ron Knox [16] hablan en su artículo de cómo las fuerza de compresión, el tamaño de partícula afectan a las características de pellets de pajas de trigo seleccionadas.

En este se expone que la densidad de todas las muestras aumentó con el incremento de densidad aplicada en el proceso de densificación, obteniendo a alta presión muy poca diferencia entre la densidad de las diferentes muestras.

En cuanto a durabilidad, el efecto de la compresión genera un aumento de la durabilidad en las cuatro muestras analizadas. Según ellos, esto se puede deber al incremento de superficie de contacto relativo entre las fibras [16] ya que, como demostró Adapa PK et al., la durabilidad del densificado se incrementa significativamente con un incremento del tamaño de partícula [17].

Más recientemente, en septiembre de 2014, Kazuei Ishii y Toru Furuichi [18] publicaron un estudio de la influencia del contenido de humedad, tamaño de partícula y temperatura de conformado en la productividad y calidad de pellets de paja de arroz. Se llega a la conclusión de que un tamaño de partícula es generalmente bueno para la formación de pellets de madera, por la elevada superficie de contacto, pero no se produce lo mismo en el caso de la paja de arroz. Así mismo, expresan que la durabilidad se reduce cuando la pelletización ocurre a 100°C por la pérdida de humedad [18].

Como se puede comprobar, estos estudios ofrecen una información escasa en cuando al proceso productivo de fabricación de pellets y las variables implicadas para poder comparar los resultados en la manufactura de estos biocombustibles sólidos. Así pues, en este trabajo se tratará de una manera más profunda este tema, estudiando las variaciones de las características del proceso de pelletizado y optimizando su fabricación.

1.3 Objetivos

Expuestas las posibles capacidades de la biomasa en términos energéticos, la revalorización de los productos residuales ya sean procedentes de residuos de procesos agrarios, agroindustriales o de la industria resulta beneficioso, tanto para los productores, obteniendo rédito económico, como para la sociedad, reduciendo las cantidades de dióxido de carbono emitido.

Si se observan los datos de producción de pellets en el Mundo, Europa y España, la tendencia alcista de este tipo de densificado y de su uso justifica una profundización en el estudio de este tipo de recurso energético.

El problema reside en la calidad del producto. Existen parámetros en el pelletizado que afectan directamente a la calidad del residuo densificado. Una variación de estos parámetros durante el proceso productivo generará unas propiedades distintas en los pellets y determinará el uso de los pellets de acuerdo con la normativa vigente.

Hay poca información en cuanto a las variables del proceso y muy dependiente del tipo de residuo, por lo tanto, un estudio de la influencia de estos valores como su variación afecta al producto densificado resulta necesario para intentar establecer la influencia real de estos parámetros.

En la extensión del presente proyecto se pretende determinar cómo afectan las variables del proceso de pelletizado, susceptibles de control, a las características mecánicas de los densificados y de su ajuste a la normativa vigente.

Más concretamente, se pretende estudiar cómo afecta la cantidad de residuo introducido por segundo a la longitud de los pellets. También se busca determinar cómo afecta la humedad añadida durante el proceso y la presión de rodillos a humedad, densidad aparente, durabilidad y resistencia mecánica.

Para conseguir lo anteriormente mencionado, en el presente proyecto se recogen las siguientes actividades:

- **Selección del residuo de estudio.** Para este estudio lo interesante es usar un residuo de fácil acceso y en grandes cantidades. Por ello se decidió usar el serrín de *Pinus pinaster*, un subproducto de la industria maderera de fácil pelletizado, lo cual resulta muy útil dado el objetivo final del presente proyecto.
- **Recogida del residuo en su almacenamiento original.** Las condiciones de almacenamiento en el lugar de recogida son parte importante de las características del residuo básico.
- **Almacenamiento y pretratamientos antes de la densificación.** Una vez recogido el residuo, un almacenamiento adecuado y aplicación de pretratamientos necesarios para la preparación del producto antes del densificado.
- **Caracterización del residuo original,** mediante análisis, tanto de sus propiedades físicas como químicas.
- **Caracterización del equipo a utilizar.** Un correcto control de las variables a controlar durante el pelletizado resulta necesario en las pretensiones del proyecto y, por tanto, caracterizar los valores de caudal másico, caudal de aporte de agua y presión de rodillos.
- **Establecimiento de los experimentos a realizar previos al densificado.** Estableciendo los valores de las variables a aplicar durante el pelletizado.
- **Densificación de las muestras** previamente establecidas mediante pelletizado.
- **Caracterización mecánica de los densificados** para conocer sus características físicas y poder dictaminar al respecto.

En la extensión de este proyecto se hablará, en primera instancia, de la biomasa, de los pretratamientos que se suelen aplicar a esta y los métodos generalizados de densificación para

mejorar sus características, con un especial cuidado en el método de pelletizado, describiendo las fuerzas que intervienen en el proceso y los equipos más extendidos.

Posteriormente se hablará de la materia prima empleada en este proyecto, de su caracterización y de la caracterización de los productos obtenidos a partir de ella. Seguidamente se analizará el equipo de densificado y se caracterizarán las posibles variables a controlar dentro del proceso para así evaluar su influencia en las características del producto final.

Tras analizar el equipo, se establecerá los estándares para las características de los pellets y, se determinarán los ensayos a realizar para la obtención de resultados.

Una vez realizados los ensayos, se expondrán los resultados de la caracterización de la materia prima y de los densificados para, finalmente, establecer unas conclusiones respecto a ellos y las posibles líneas futuras de investigación al respecto.

2 BIOMASA, PRETRATAMIENTOS Y DENSIFICADOS

En la extensión de este capítulo se pretende contestar a tres preguntas principales. En primera instancia, responder los tipos de biomasa y cómo se clasifican estos en función de la fuente o de sus características.

Posteriormente se definirán los pretratamientos y describirán los tipos de estos. Finalmente, se definirán y describirán los tipos de densificados.

2.1 Tipos de biomasa

La biomasa se presenta de muy diversas formas y es denominada de muy distintas formas en función del autor al que se haga referencia. Cada una de estas clasificaciones viene en función de las características, procedencia o uso final que pretenda dársele a la biomasa.

Así, se clasifica como biomasa primaria la que se obtiene directamente de un ecosistema natural para su aprovechamiento directo y como biomasa secundaria la obtenida como sub-producto de una actividad del ser humano. Existe una tercera biomasa, no contemplada en estos dos tipos anteriores, la generada directamente para su uso final, denominada cultivos energéticos.

La biomasa, en función de su obtención se puede clasificar en biomasa agrícola o forestal. En función del sector del que se obtiene como agrícola, forestal o industrial.

Una clasificación típica es en función de cómo se extrae la energía de ella. Así los tipos de biomasa son:

- **Biocombustibles sólidos:** Son aquellos residuos procedentes de cultivos energéticos, operaciones selvícolas de poda, generado de la actividad agrícola o del procesado de la industria maderera y/o agroalimentaria. Se pueden aprovechar directamente a partir de pirolisis, gasificación o combustión.
- **Biomasa residual húmeda:** Son residuos con elevada humedad que permite una fácil degradación de la materia orgánica por procesos bioquímicos. Suelen encontrarse en estado líquido o semisólido procedente de residuos ganaderos, urbanos, aguas fecales, etc.
- **Biocombustibles:** Combustibles líquidos que provienen de transformaciones de materia vegetal o animal. Estos biocombustibles pueden ser utilizados como combustibles para motores de combustión modificados o como aditivos para gasolinas convencionales.

En lo siguiente en este proyecto, lo que interesa son los biocombustibles sólidos o biomasa sólida. Estos pueden presentarse de muy diversas formas, como biomasa primaria en forma de leña, astillas o residuos agroindustriales, o como densificados en forma de empacados, briquetas y pellets.

La leña, astillas y residuos agroindustriales pueden ser utilizados directamente como combustibles biomásicos para uso térmico. Para el primero, su uso se reduce a estufas caseras que disponen de disponibilidad del recurso. Las astillas cuya calidad es variable en función de la materia prima y sistema de recogida así como por su heterogeneidad. Los residuos agroindustriales más convenientes para su uso son los procedentes de almazaras, alcohólicas y fábricas de frutos secos.

2.2 Pretratamientos

Dadas la heterogeneidad de la biomasa, resulta necesario recurrir a pretratamientos que homogenicen la materia prima permitiendo su densificación o uso directo como biocombustible.

Las etapas de pretratamiento son muy importantes teniendo influencia directa en el rendimiento de la bioenergía, sobre todo en materia logística. De esta manera, un correcto densificado puede convertir la biomasa de modesta portadora energética en alta portadora energética facilitando su transporte y manipulación [19].

Los procesos de transformación física de la biomasa residual suponen un reto tanto técnico como económico para el aprovechamiento energético de estos materiales, que por su heterogeneidad presentan elevados costes de manejo y dificultad en la puesta a punto de la tecnología encareciendo y condicionando los proyectos potencialmente realizables en el sector de las energías renovables.

Dependiendo de la naturaleza de los residuos empleados como materia prima, de su estado y características, se suelen realizar una o varias etapas de transformación física y acondicionamiento. Estas etapas estarán justificadas siempre que se añada valor a los productos obtenidos permitiendo su introducción en mercados donde el precio compense los costes.

Así, en función de las características de la materia prima, puede ser necesaria una disminución de humedad o someterla a reducción granulométrica y acondicionamiento estructural. También puede ser necesario, tras reducir la granulometría, homogenizar un tamaño de grano por medio del tamizado o la aplicación de otro pretratamiento antes del densificado.

De esta manera, los principales pretratamientos de la biomasa residual son los siguientes: secado (natural o forzado), astillado, molienda y tamizado [20] [21].

En adelante se describirán los posibles pretratamientos a los que se puede someter la biomasa residual partiendo del precepto de que en este estudio, la molienda y tamizado no han sido necesarios ya que el residuo objeto del proyecto, serán de *Pinus pinaster*, ya estaba homogenizado en cuanto a granulometría siendo apto para su densificación. Lo mismo ocurre con el astillado, el residuo no es susceptible de ser astillado por sus características intrínsecas.

2.2.1 Astillado

El astillado es un pretratamiento que su uso se limita para biomásas forestales. Es recomendable realizarlo in situ para una reducción inicial de la densidad aparente del residuo y así reducir los costes de transporte desde el lugar de recogida a la planta de transformación.

Es un proceso por el que se consigue una primera reducción granulométrica para obtener astillas con un tamaño máximo que permita el manejo, almacenaje, carga y transporte de forma viable tanto técnica como económicamente. De otra forma, estos residuos serían inmanejables por métodos convencionales.

El principal problema de este tipo de pretratamiento radica en la dispersión que se produce de los residuos, dificultando la concentración en los puntos donde se realizan los trabajos forestales ya que los residuos, en muchos casos, se generan en lugares de difícil accesibilidad por las fuertes pendientes y características del terreno, en los que existen pocas vías de saca, pistas, caminos

forestales o cortafuegos por donde pueda acceder la maquinaria pesada hasta los puntos de concentración de la biomasa forestal.

Existen varios tipos de equipos de astillado in situ:

- **Astilladoras móviles**, arrastradas mediante tractores forestales y accionadas desde la toma de fuerza de estos. Pueden ser trasladadas a lugares de difícil acceso gracias a su elevado grado de maniobrabilidad. Sus niveles de productividad suelen ser bajos y suelen requerir de la intervención de varios operarios que alimentan de residuos la máquina, aunque algunas de ellas si pueden estar dotadas de plumas, pinzas o sistemas similares para la alimentación.
- **Astilladoras instaladas en el panel frontal del tractor** y que actúan recorriendo las vías donde se han alineado los residuos. Su principal inconveniente es la necesidad de apilado y alineado de forma manual que encarece notablemente el coste de los trabajos.
- **Astilladoras autopropulsadas**, dotadas de su propio sistema de tracción, pueden desplazarse más rápidamente y presentar ventajas técnicas frente a las astilladoras arrastradas.
- **Astilladoras fijas o semifijas**, solamente se utilizan en lugares donde la envergadura de la explotación y los elevados volúmenes manejados hacen amortizable su instalación.
- **Astilladoras con autocontainer**, estas poseen una tolva o contenedor donde se depositan las astillas para su posterior extracción del lugar de recolección [22].



Figura 2.1 Astilladora móvil SH22 (Fuente: chimenacosta.es).

Generalmente, la materia prima recibe un primer astillado donde se trocea a tamaños de 150-200mm, posteriormente se realiza un segundo astillado reduciendo los tamaños hasta los 30-50mm. Tras esto puede reducirse la humedad (base húmeda) al 20 ó 30%, para generar las condiciones adecuadas para su almacenamiento y consumo en calderas. Las astillas de mayor

humedad deben consumirse rápidamente ya que, su almacenamiento durante largos periodos temporales, puede generar problemas de putrefacción y proliferación de hongos [5].

El problema del alto contenido de humedad que los residuos presentan dificulta el manejo de los mismos. Un residuo húmedo, se astilla con mayor dificultad y las astillas obtenidas son más heterogéneas con un importante porcentaje de piezas largas, que dificultan su manipulación posterior. Así mismo, se produce un incremento de los costes energéticos del astillado y transporte, por lo que es necesario realizar técnicas de secado que se describen posteriormente.

2.2.2 Secado

El secado es un pretratamiento para reducir la humedad de un producto cualquiera obteniéndose otro producto con características muy diferentes a las del inicial. Puede llevarse a cabo por tres procedimientos [23] [22].

- Evaporación y/o vaporización con calor, secado natural o forzado (aire caliente, radiación solar, etc.).
- Procesos físico-químicos (liofilización, osmosis, adsorción, congelación, etc.).
- Extracción de agua mediante medios mecánicos (presión, vibración, centrifugación, etc.).

Una vez seco el subproducto o residuo puede, bien ser utilizado tal y como se encuentra, ser almacenado para un posterior uso, ser densificado si sus características fuesen propicias para tal fin, ser transportado de manera más eficiente, etc.

Los dos tipos de secados más extendidos en su uso son el secado natural y el secado forzado. Ambos son descritos en los siguientes apartados.

2.2.2.1 Secado natural

El secado natural es una técnica simple que aprovecha las condiciones ambientales favorables para la deshidratación de los residuos obteniendo unos niveles de humedad que permita un manejo más económico y faciliten los posteriores procesos sobre la biomasa o bien, permitan obtener rendimientos aceptables en los procesos de combustión para producción energética a los que sean destinados.

En primera instancia, se debe distinguir entre secado natural de los residuos según se generan y el secado una vez han sido molidos o granulados.

En el primer caso, la posible presencia de patógenos, hongos o insectos y su proliferación y desarrollo pueden afectar a la biomasa por lo que, si existe esta posibilidad, el residuo debe ser retirado del lugar de extracción en la mayor velocidad posible.

Por otro parte, en lugares de riesgo de incendio elevado, los residuos secos son un posible foco de generación y propagación del fuego, por lo que habrá que tener en cuenta estas consideraciones a la hora de diseñar las labores de secado tanto en el espacio como en el tiempo.

En cuanto a los factores que limitan la eficacia del secado a natural, cabe destacar:

- La **humedad ambiental**, ya que a menor humedad ambiental, más cantidad de agua será desprendida del residuo para la estabilización.

- La **distribución de temperaturas** medias y extremas. Elevadas temperaturas suele resumirse en un clima soleado, que genera una reducción de la humedad ambiental, al menos en nuestra región.
- El régimen de **precipitaciones**, tanto en valores absolutos como de frecuencia. La lluvia aumenta la humedad ambiental, disminuyendo la capacidad del secado natural.
- Las **heladas**. Una helada provoca la condensación y posterior congelación de agua sobre la superficie del residuo provocando un aumento de la humedad de este.
- La **intensidad de los vientos** dominantes. La presencia de viento permite una renovación del aire en el entorno del residuo permitiendo un secado más rápido.
- **Grado de insolación y exposición**, ya que la exposición directa al sol provocará un secado mayor que si el residuo se encuentra a la sombra.

Los factores mencionados condicionan la eficacia de la deshidratación producida y dependen de las características climáticas, de la estación y de la zona considerada, del tiempo que permanezcan los residuos apilados, el tamaño y forma de las pilas, del tamaño de las piezas del residuo y de la propia naturaleza de este.

En el secado natural de los residuos granulados, cabría hacer las mismas consideraciones que las realizadas anteriormente. Si los montones se preparan en el propio monte o si se almacenan extendidas en campos al aire libre. Si se preparan grandes montones de residuo, habrá que tener otros factores en cuenta, debidos a las condiciones ambientales que se producen en el interior de la pila, al estar aisladas de la influencia ambiental exterior, que solo afecta a una capa de biomasa superficial de un espesor medio máximo de 50 cm.

2.2.2.2 Secado forzado

Muchas veces la biomasa residual se presenta con valores muy elevados de humedad, superiores al 50%, que plantea problemas muy serios para su uso con fines energéticos:

- Incremento de los costes de extracción y manejo.
- Encarecimiento del transporte.
- Dificultad o imposibilidad de transformación en combustibles de calidad.
- Reducción de rendimientos en las fases de transformación.
- Baja eficacia en procesos de conversión termoquímica.
- Incremento de producción de sustancias contaminantes.
- Formación de incrustaciones en calderas, con combustiones inestables y poco eficientes.

Estos motivos fuerzan la necesidad de reducir el contenido de humedad hasta valores entorno al 20-30% o inferiores, en función de la aplicación.

Cuando la reducción de la humedad del residuo no es suficiente con técnicas de secado natural se recurre al secado forzado o a sistemas de combinación de ambos, por medio de equipos que, mediante un flujo térmico, permiten la desecación hasta los valores deseados.

Se emplean dos tipos de secaderos principalmente:

- **Secaderos neumáticos:** Se basan en el arrastre de los residuos con un flujo térmico que extrae la humedad de los sólidos. Son utilizados en productos de granulometría fina y/o en los que se requiere una deshidratación ligera.

Constan de un foco térmico (hogar de combustión de combustibles convencionales y la propia biomasa previamente secada), canal de secado (conducto de diámetro y sección variable donde el flujo térmico arrastra los sólidos en suspensión, al tiempo que provoca la evacuación del agua que contienen estos) y sistema de succión (aspirador ciclónico que produce una depresión que es la que posibilita el movimiento del sistema).

- **Secaderos rotatorios (tipo Trommel):** Se utilizan para materiales muy húmedos y/o granulometría gruesa. Constan de las mismas partes que el caso anterior, si bien el canal es un cilindro de diámetro y longitud variable que gira con velocidad variable, facilitando un contacto íntimo entre los sólidos y el flujo secante.

El cilindro posee pendiente interior que junto con el giro produce un avance de los sólidos a una velocidad controlable. Suelen instalarse espas, paletas o tornillos sin fin para regular el flujo y garantizar una adecuada exposición al flujo térmico.

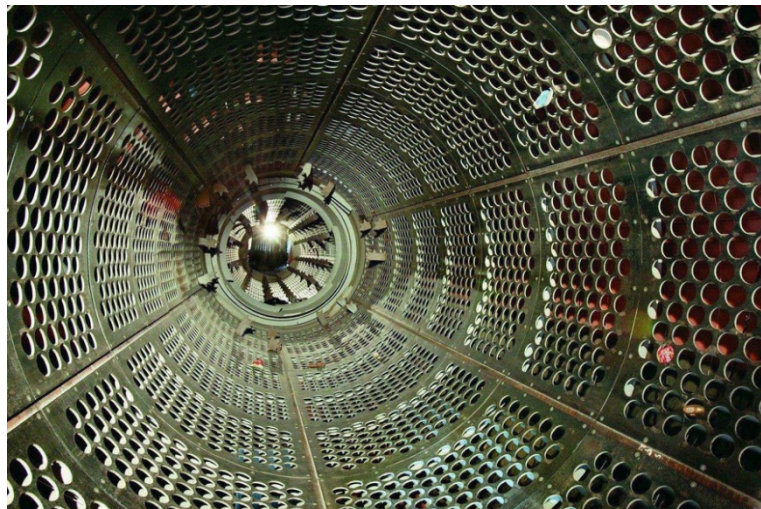


Figura 2.2 Interior de secadero Trommel (Fuente: masiasrecycling.com).

En ambos casos, la segregación del material sólido se realiza con un ciclón decantador donde el fluido pierde velocidad y los sólidos secos precipitan por gravedad, llevándose el aire la humedad anteriormente presente en el residuo [22].

2.2.3 Molienda

Para la obtención de residuos combustibles de mayor calidad, la operación de molienda es recomendable o imprescindible cuando se quiere utilizar estos productos en equipos de conversión energética diseñados para su utilización con productos más finos. También es necesaria la molienda cuando se pretenden fabricar densificados de estos productos, ya que estos procesos necesitan una granulometría inferior [22].

Este proceso se realiza tras el astillado para obtener un tamaño de partícula útil inferior a 5mm, aumentando la superficie específica de la materia prima. Se pueden identificar dos tipos de molinos empleados de manera general.

- **Molino de martillos:** Consiste en unas placas que golpean el producto contra una criba. Cuando el tamaño de grano es suficientemente pequeño, el residuo puede pasar a través de la criba y por tanto queda granulado de manera correcta.
- **Molino de bolas:** Consiste en un tambor con bolas de acero en su interior. El giro del tambor provoca que, por fuerza centrífuga, las bolas se levanten y cangan produciendo el efecto de molienda.

La problemática de la molienda es compleja ya que hay muchas variables a considerar, desde el propio material, las características de la instalación y la maquinaria utilizada. En lo referente a las características del propio residuo, la posible presencia de materiales indeseables como metales, piedras, arena, etc. Estos provocan desperfectos en los molinos por lo que es necesaria su eliminación antes de la molienda.



Figura 2.3 Molino granulador Kahl (Fuente: ahahl.de).

Para casos de piedras, gravilla y arena se recomienda usar martillos no templados, más flexibles aunque más blandos, que dada su resistencia y flexibilidad que permiten la presencia de piedras, gravilla y arena en su interior sin provocar un desastre.

El mayor problema lo generan los elementos metálicos que se pueden introducir en el molino. Estos pueden provocar roturas de mallas o martillos, chispas por la fricción y choque de metales a gran velocidad o incluso la ignición del producto molido, si los niveles de humedad de este están por debajo de ciertos valores, con la posible deflagración del polvo en suspensión.

Para su eliminación se usan imanes permanentes y electroimanes que situados en los puntos de confluencia del flujo puedan extraer las piezas metálicas. Estos pueden eliminar los materiales férricos, pero para la eliminación del resto se debe recurrir a detectores de metales que detengan

el funcionamiento de la instalación cuando detecten metal en el flujo de material. Esto, obviamente, generará una pérdida de rendimiento al tener que eliminar la pieza metálica y volver a poner en marcha la instalación.

2.2.4 Tamizado

Una clasificación del residuo por tamaño de partícula puede ser interesante para la eliminación de fracciones indeseables o el aprovechamiento diferencial de las distintas fracciones granulométricas del residuo.

La separación de algunas partes del material que cumplen ya con los posibles requisitos de granulometría puede resultar interesante para un aumento del rendimiento de la molienda, ya que estas partículas del tamaño ya deseado solo reducirían este.

La problemática derivada del tamizado viene por la obstrucción de los orificios de los tamices o a sobrecargas en estos, impidiéndose el paso de parte del producto por la malla del tamiz por la capa intermedia que se crea.

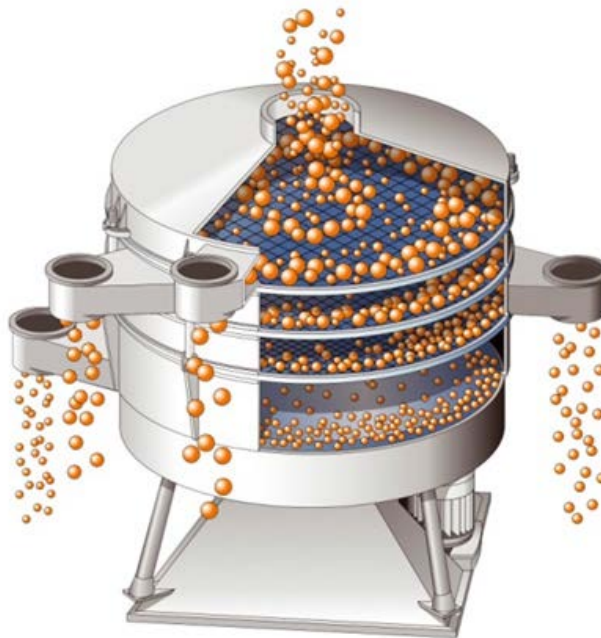


Figura 2.4 Tamizadora centrífuga industrial (Fuente: interempresas.net).

Para la separación de partículas muy gruesas para el uso destinado, el tamaño del tamiz delimita el tamaño de partícula máximo, estableciendo el tamaño mínimo de las piezas que no rebasan la malla en al menos una de las direcciones de esta. Al ser objetos sólidos tridimensionales, con que una de las dimensiones permita su paso, la partícula atravesará el tamiz, por lo que la presencia de partículas de mayor longitud de la deseada es probable.

Un correcto diseño y funcionamiento del equipo de cribado en cuanto a superficie, forma, espesor e inclinación de la maya, frecuencia e intensidad del movimiento y flujo del material por metro cuadrado de malla puede minimizar el efecto anteriormente descrito.

2.2.5 Almacenamiento

Si bien, propiamente dicho, el almacenamiento de biomasa no puede ser considerado un pretratamiento, un almacenaje defectuoso puede generar alteraciones en la composición de la materia prima [25] y, por tanto, afectar a las características y propiedades de los pellets [26].

Dada la estacionalidad de la biomasa, un volumen de almacenamiento suficiente para la continuación de la actividad sin interrupción es necesario. Las características de este almacenamiento dependerán del uso final de la biomasa y del contenido de humedad de esta.

Para biomásas con alto contenido de humedad y que serán utilizadas en estado húmedo, con procesos de fermentación o digestión anaerobia, se pueden emplear almacenamiento húmedo, si bien habrá que controlar los tiempos de almacenamiento para que no se produzca una degradación excesiva de la materia prima.



Figura 2.5 Almacén de biomasa cubierto (Fuente: multitekingenieros.com).

Para biomásas procedentes de residuos agrícolas secos, estos deben protegerse contra la combustión y descomposición, y la humedad máxima dependerá del tipo de almacenamiento. La humedad debe controlarse para evitar la combustión y la emisión de compuestos.

Los métodos más generalizados de almacenamiento de biomasa son:

- Estructura cerrada con suelo de cemento o grava.
- Estructura abierta con suelo de cemento o grava.
- Lona reutilizable sobre roca triturada.
- Al aire libre sin cobertura sobre grava o roca triturada.
- Al aire libre sin cobertura sobre el suelo directamente.

Los costes de almacenamiento son importantísimos para la viabilidad de una planta. El almacenamiento puede realizarse en el lugar de suministro o, cuando los volúmenes son elevados, combinar residuos de distintos orígenes. Se considera rentable el suministro en un radio de 75 km [27].

2.3 Densificados

En determinadas circunstancias, los residuos biomásicos pueden necesitar un incremento de su densidad aparente por medio de la densificación. Estos procesos de densificado suponen tanto un reto técnico como económico para el aprovechamiento energético de estos materiales, dificultando, encareciendo y condicionando los proyectos en el sector de las energías renovables.

Históricamente, el primer proceso de densificado se remonta a 1880, con la primera patente de un proceso de compresión de polvo en molde con martillo y vapor a 150 °C registrada por Sr. William Harold Smith en Chicago, Illinois [28].

Con esta patente, por primera vez, aparecieron productos comerciales de densificados. A mediados del siglo pasado, el proceso se extendió y empezó a usarse para aumentar las propiedades de la biomasa, tanto como fuente de energía como método de generación de piensos para animales.

En la década de los 70, en Norteamérica, aparecieron los pellets con el objetivo de resolver la crisis energética nacional. Se destinaron a uso industrial, comercial y gubernamental como combustible para calefacción. No fue hasta los 80 cuando aparecieron los primeros pellets para uso residencial [29]. En Europa, la expansión comenzó posteriormente, en Suecia en 1980, después se extendió su uso por todo el continente.

Los densificados son productos de alto valor añadido cuyo coste es superior al de otros residuos como astillas, serrín, cascaras de frutos secos, hueso de aceituna, etc., con menos manipulación. No obstante, el precio de venta potencial de estos combustibles más elaborados justifica, en muchos casos, las inversiones y costes adicionales de su obtención.

Estos costes adicionales provienen del acondicionamiento previo de los residuos mediante todas o algunas de las etapas de transformación física comentadas anteriormente (astillado, secado, molienda), por lo que, el coste final del producto obtenido (pacas, briquetas y pellets) es superior.

La problemática de este tipo de tratamiento viene derivada por el incumplimiento, por parte de las materias primas utilizadas, de las condiciones de idoneidad en cuanto humedad y granulometría, que oscilan entre valores muy específicos para el correcto funcionamiento de la maquinaria utilizada que, con pequeñas variaciones en las características del flujo de material, el funcionamiento se resiente notablemente produciéndose paradas, atascos, sobrecargas y otras deficiencias que impiden el correcto funcionamiento de los equipos [22].

Estos residuos biomásicos anteriormente mencionados, suelen ser poco densos, por lo que un tratamiento típico es el densificado. Existen diversos tipos de densificados pero los más comunes son el empacado, el briquetado y el pelletizado.

2.3.1 Empacado

El empacado es una densificación de la biomasa forestal y agrícola quedando comprimida y atada formando balas, pacas, roto pacas, fardos, etc., con unas dimensiones establecidas de antemano. El proceso se realiza con empacadoras, máquinas diseñadas para tal fin e instaladas junto al auto cargador convencional [30].

Las dimensiones de los productos varían en función del productor y de la máquina diseñada para tal menester. Esto genera una gran variedad de productos de distintos tamaños y con

composición de distintos tipos de biomasa en función del productor, que suele ser el propio generador de la biomasa, para generar una facilidad en el transporte, la capacidad de almacenamiento prolongado y la limpieza impidiendo posibles incendios.



Figura 2.6 Empacadora gigante (Fuente: deltacinco.es).

En el caso de cultivos energéticos herbáceos, la siega de la biomasa se puede realizar por medio de una empacadora convencional y el empacado, cuando se trate de cultivos de tallo largo, que no requiere picado de la biomasa, este se podrá realizar con roto empacadoras, que producen pacas cilíndricas ya que las prismáticas pueden tener problemas para comprimir la biomasa sin picar [31].

2.3.2 Briquetado

Las briquetas o bloque sólido de combustible son un biocombustible para generar energía térmica en estufas, chimeneas, hornos y calderas.

El término “briqueta” es un término confuso ya que puede estar fabricada de diversos materiales compactados, pero una vez vista una, no queda ninguna duda de lo que es. La materia prima de puede ser biomasa forestal, residual, carbón vegetal o una mezcla de ellas. Generalmente, están fabricadas con material residual como serrín, cascarilla de arroz, bagazo de caña de azúcar, pulpa de papel, papel, cáscara de coco, residuos de algodón, cartón, carbón, etc [32].

Las briquetas son compactaciones biomásicas de forma cilíndrica, con diámetros comprendidos entre los 5 y los 10 cm y con elevada densidad. Cuando para su fabricación se utilizan productos lignocelulósicos, como la madera, las temperaturas del proceso durante el prensado producen un reblandecimiento de la lignina, de forma que, tras su enfriamiento, esta funciona como aglomerante de las partículas.

La acción aglomerante de la lignina permite que, como en el caso de los pellets, no sea necesario añadir ningún tipo de aglomerante al proceso. Para que esto ocurra, la humedad del material debe estar comprendida entre el 8 y 15% en base húmeda y que el tamaño de partícula no supere el centímetro.



Figura 2.7 Briquetadora y sus productos (Fuente: made-in-china.org).

En nuestros días, la tendencia es la de producir briquetas combustibles de bajo coste a partir de residuos no utilizados para otros usos de mayor valor. Con estos residuos, los tipos de briquetados más utilizados son.

- **Briquetado por impacto con briquetadoras de pistón:** La compactación del material se consigue por el golpeo de un pistón sobre la biomasa. El pistón suele estar accionado por medio de un motor junto con un volante de inercia que permiten conseguir densidades de entre 1000 y 1200 kg/m^3 .
- **Briquetado por extrusión con briquetadora de tornillo:** La compactación se produce por la presión ejercida por un tornillo sin fin que hace avanzar el material a través de una cámara de forma cónica. Este tipo de proceso de fabricación permite la obtención de briquetas con orificios interiores que permiten una mejor combustión de estas. La densidad de estas briquetas es superior a las obtenidas por el anterior proceso, llegando a obtener entre 1300 y 1400 kg/m^3 pero con un mayor coste energético.
- **Briquetado hidráulico o neumático:** La presión para el densificado se produce por uno o varios cilindros accionados por sistemas hidráulicos o neumáticos. Su uso está extendido para residuos de baja calidad, muy húmedos y en los que no se requiere una gran calidad de la briqueta final. La densidad de las briquetas obtenidas está entre los 700 y 800 kg/m^3 , pudiéndose alcanzar los 1000 kg/m^3 en algunos casos concretos. Los equipos tienen muy poco consumo y mantenimiento [22].

2.3.3 Pelletizado

El pelletizado es el proceso de fabricación de pellets, estos son densificados de biomasa con diámetros comprendidos entre los 4 y 12 mm con longitudes que oscilan entre los 10 a 30 mm . Su tamaño, muy inferior a las briquetas, permite que puedan ser alimentados y/o dosificados mediante sistemas automáticos en sus distintos usos. Esta cualidad amplía sus posibilidades de utilización.

Para su fabricación es necesario disponer de biomasa con una humedad comprendida entre el 8 y el 15% en base húmeda y con un tamaño de partícula del orden de 5 mm . La densidad de los

pellets suele variar entre los 1000 y los 1200 kg/m³, donde la densidad aparente suele estar en el orden de los 800 kg/m³.

La densificación de materias lignocelulósicas con fines energéticos está muy extendida, sobre todo, en Norteamérica, donde se suele emplear en usos semi-industriales. En Europa destaca la zona de Austria, sur de Alemania y norte de Italia en su uso. No obstante, existen fábricas de pellets por todo el mundo.

En esencia, el proceso de pelletizado consiste en alimentar una prensa con el residuo biomásico y forzarlo a atravesar una matriz (normalmente cilíndrica) con orificios circulares por dónde salen los pellets, de manera similar a la producción de piensos compuestos para animales.

2.3.3.1 Fuerzas y energías en el pelletizado

El pelletizado también puede ser descrito por las fuerzas y energías que intervienen en el proceso. De esta manera, en la Figura 2.8 se muestra esquemáticamente este proceso.

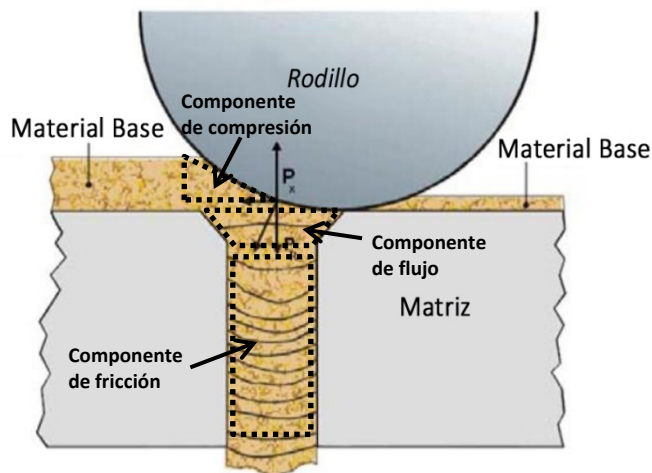


Figura 2.8 Esquema de las fuerzas que intervienen en el pelletizado.

El proceso tiene tres componentes principales, la componente de compresión, la componente de flujo y la componente de fricción. N.P.K. Nielsen et al. [33] lo describen como la relación entre la fuerza aplicada por el rodillo (P_R) y la fuerza requerida para el movimiento descendente de la biomasa comprimida por los canales de prensado (P_x).

Cuando el rodillo se aproxima a la superficie de la matriz, la fuerza P_x es superior a la P_R , or lo tanto la biomasa forma una capa comprimida en la superficie de la matriz. Cuando P_R es superior a P_x , el material se ve forzado a entrar en el canal de prensado ya que al estar comprimido, este es un alivio para esta presión.

Dado que no todo el material entra en los canales de prensado, existe un área horizontal entre canales en las que se sigue manteniendo una cantidad de material que debe ser redistribuida, por lo tanto P_x depende de la fuerza y viscosidad de esta capa que se encuentra muy comprimida. La fuerza de la matriz también dependerá de la fricción entre la biomasa y las paredes de los canales de prensado.

La conjunción de la presión de compresión, la componente de flujo y la componente de fricción junto con la temperatura de la matriz, permite la unión de partículas de la materia prima y mediante la lignina, se produce la autoadhesión sin aditivos adhesivos.

2.3.3.2 Equipos para el pelletizado

Una vez conocidas las fuerzas que intervienen dentro del proceso de pelletizado, hablar de los equipos que permiten este proceso, las pelletizadoras, resulta necesario.

Dentro de estos equipos, se pueden distinguir dos grandes tipos en función de la estructura de la prensa de pelletizado. Bien se tendrán pelletizadoras de matriz anular y de matriz plana. Así, a su vez, ambas pueden ser de matriz fija y rodillos móviles o, en su defecto, de matriz móvil y rodillos fijos.

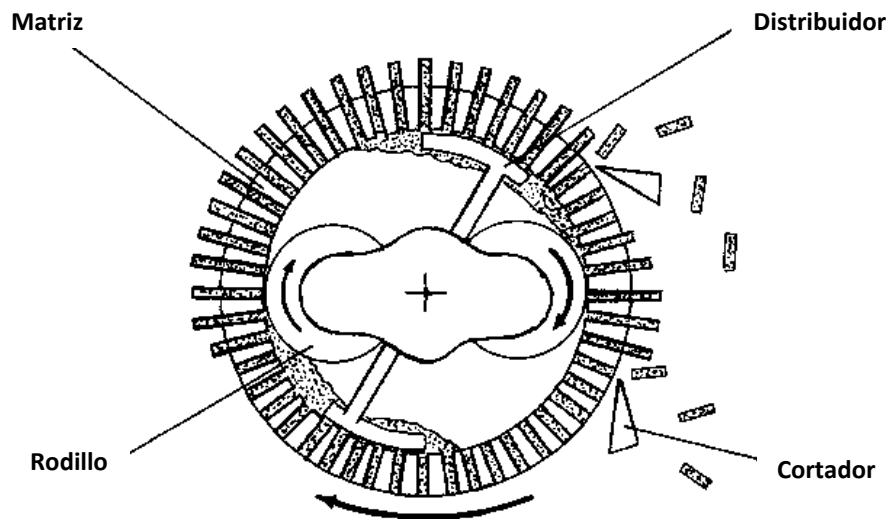


Figura 2.9 Esquema pelletizadora anular.

Las pelletizadoras de matriz anular son aquellas en las que la matriz posee forma anular. Este tipo de equipos es el más indicado para la producción de pellets de manera industrial. Dentro de este tipo de pelletizadora, como ya se mencionó, existen dos grupos:

- **Pelletizadora de matriz anular fija y rodillos móviles**, en las cuales los rodillos giran siguiendo el contorno interior de la matriz impulsados por el movimiento de un eje accionado por un motor.
- **Pelletizadora de matriz anular móvil y rodillos fijos**, en las cuales, la matriz gira en torno al eje principal de giro. Así mismo, los rodillos poseen un movimiento relativo entorno a su propio eje.

Las pelletizadoras de matriz plana son aquellas con un disco de plano instalado de manera horizontal. Al igual que en el caso anterior, se pueden distinguir dos grandes grupos:

- **Pelletizadora de matriz plana fija y rodillos móviles**, también llamadas discos, donde los rodillos están impulsados por el movimiento del eje principal. Los rodillos, y su movimiento relativo propio, impulsan la materia prima a través de los agujeros de la matriz.
- **Pelletizadora de matriz plana móvil y rodillos fijos**, en las cuales, la matriz gira sobre el eje principal de la máquina. Los rodillos, fijados en una misma posición, giran sobre sí mismos por la fricción que se provoca entre la matriz y ellos por la presencia de la materia lignocelulósica [22].

2.3.3.3 Normativa de referencia

Finalizado el proceso de densificado y caracterización de los pellets, comparar estos con los requisitos establecidos en la normativa para la determinación de su posible uso. Estas normas de calidad responden a la necesidad de proporcionar un producto con las garantías necesarias al consumidor final.

En la mayoría de los países Europeos, hay poca o ninguna normativa específica escrita. Tan solo Austria, Suecia y Alemania tienen estándares oficiales para combustibles de biomasa densificada. Otros países, con mercados de pellets significativos como Dinamarca, Finlandia o España decidieron esperar a la publicación de la estandarización Europea, presente en la norma UNE EN ISO 17225. Las normas en los países mencionados anteriormente son:

- En Austria: ÖNORM M1735 (Briquetas y pellets).
- En Suecia: SS 18720 (pellets) y SS 187121 (briquetas).
- En Alemania: DIN 51731 (Briquetas y pellets)[34].

En España, la normativa aplicada es la norma UNE EN ISO 17225-2 [11]. Esta norma se divide en siete partes las cuales quedan recogidas en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1 Partes de la norma UNE EN ISO 17225

Parte	Título
1	Requisitos generales
2	Clases de pélets de madera
3	Clases de briquetas de madera
4	Clases de astillas de madera
5	Clases de leña de madera
6	Clases de pélets de origen no leñoso
7	Clases de briquetas de origen no leñoso

Dentro de las partes mencionadas, la UNE EN ISO 17225-2 Biocombustibles sólidos: Especificaciones y clases de combustibles. Parte 2: Clases de pélets de madera, es la que hace referencia a la materia prima mencionada y clasifica los pellets en tres grupos: A1, A2, B, I1, I2 e I3.

Las clases de propiedad A1, A2, I1 e I2 son aquellos fabricados con madera virgen y residuos de madera no tratados químicamente. Los A1 representan los que tienen bajo contenido en ceniza y nitrógeno, mientras que A2 tienen algo más de cenizas y nitrógeno. Las clases de propiedades I1 e I2 tienen un contenido de ceniza y nitrógeno similar a la de A2.

Las clases de propiedad B e I3 permiten subproductos y residuos industriales de madera tratada químicamente y madera usada no tratada químicamente.

Las propiedades quedan delimitadas para su clasificación en las tablas siguientes. Tabla 2.2 y Tabla 2.3 en función de su uso o en aplicaciones comerciales y residenciales o en aplicaciones industriales [11].

Tabla 2.2 Especificación de pellets de madera clasificados para aplicaciones comerciales y residenciales

Clase de propiedad/ Método de análisis.	Unidades	A1	A2	B
Origen y fuente		1.1.3 Fuste 1.2.1 Residuos de madera no tratada químicamente	1.1.1 árboles enteros sin raíces 1.1.3 Fuste 1.1.4 Restos de corta 1.2.1 Residuos de madera no tratada químicamente	1.1 Bosque, plantaciones y otra madera virgen 1.2 Subproductos y residuos de la industria del procesado de la madera 1.3.1 Madera usada no tratada químicamente
Diámetro, D	mm	6 ±1 o 8±1	6 ±1 o 8±1	6 ±1 o 8±1
Longitud, L	Mm	3,15<L≤40	3,15<L≤40	3,15<L≤40
Humedad, M	%(m/m) según se recibe, en base húmeda	≤10	≤10	≤10
Cenizas, A	%(m/m) en base seca	≤0,7	≤1,2	≤2,0
Durabilidad mecánica, DU	%(m/m) según se recibe	≥97,5	≥97,0	≥96,5
Finos, F	%(m/m) según se recibe	≤1,0	≤1,0	≤1,0
Aditivos	%(m/m) según se recibe	≤2 A declarar tipo y cantidad	≤2 A declarar tipo y cantidad	≤2 A declarar tipo y cantidad
Poder calorífico neto, Q	MJ/kg o kWh/kg según se recibe	≥16,5 o ≥4,6	≥16,5 o ≥4,6	≥16,5 o ≥4,6
Densidad a granel, BD	Kg/m ³ según se recibe	≥600	≥600	≥600
Nitrógeno, N	%(m/m) en base seca	≤0,3	≤0,5	≤1,0
Azufre, S	%(m/m) en base seca	≤0,04	≤0,05	≤0,05
Cloro, Cl	%(m/m) en base seca	≤0,02	≤0,02	≤0,02
Arsénico, As	mg/kg en base seca	≤1	≤1	≤1
Cadmio, CD	mg/kg en base seca	≤0,5	≤0,5	≤0,5
Cromo, Cr	mg/kg en base seca	≤10	≤10	≤10
Cobre, Cu	mg/kg en base seca	≤10	≤10	≤10
Plomo, Pb	mg/kg en base seca	≤10	≤10	≤10
Mercurio, Hg	mg/kg en base seca	≤0,1	≤0,1	≤0,1
Níquel, Ni	mg/kg en base seca	≤10	≤10	≤10
Zinc, Zn	mg/kg en base seca	≤100	≤100	≤100
Comportamiento de fusión de ceniza	°C	Se debe declarar	Se debe declarar	Se debe declarar

Tabla 2.3 Especificación de pellets de madera clasificados para uso industrial

Clase de propiedad/ Método de análisis.	Unidades	I1	I2	I3
Origen y fuente		1.1 Bosque, plantaciones y otra madera virgen 1.2.1 Residuos de madera no tratada químicamente	1.1 Bosque, plantaciones y otra 1.2.1 Residuos de madera no tratada químicamente	1.1 Bosque, plantaciones y otra madera virgen 1.2 Subproductos y residuos de la industria del procesado de la madera 1.3.1 Madera usada no tratada químicamente
Diámetro, D	mm	6 ±1 o 8±1	6 ±1; 8±1 o 10±1	6 ±1; 8±1; 10±1 o 12±1
Longitud, L	Mm	3,15<L≤40	3,15<L≤40	3,15<L≤40
Humedad, M	%(m/m) según se recibe, en base húmeda	≤10	≤10	≤10
Cenizas, A	%(m/m) en base seca	≤1,0	≤1,5	≤3,0
Durabilidad mecánica, DU	%(m/m) según se recibe	97,5≤DU≤99,0	97,0≤DU≤99,0	96,5≤DU≤99,0
Finos, F	%(m/m) según se recibe	≤4,0	≤5,0	≤6,0
Aditivos	%(m/m) según se recibe	≤3 A declarar tipo y cantidad	≤3 A declarar tipo y cantidad	≤3 A declarar tipo y cantidad
Poder calorífico neto, Q	MJ/kg o KWh/kg según se recibe	≥16,5	≥16,5	≥16,5
Densidad a granel, BD	Kg/m ³ según se recibe	≥600	≥600	≥600
Nitrógeno, N	%(m/m) en base seca	≤0,3	≤0,3	≤0,6
Distribución de tamaño de partícula de pellets desintegrados	%(m/m) en base húmeda equilibrada	≥99%(<3,15mm) ≥95%(<2mm) ≥60%(<1,0mm)	≥98%(<3,15mm) ≥90%(<2mm) ≥50%(<1,0mm)	≥97%(<3,15mm) ≥85%(<2mm) ≥40%(<1,0mm)
Azufre, S	%(m/m) en base seca	≤0,05	≤0,05	≤0,05
Cloro, Cl	%(m/m) en base seca	≤0,03	≤0,05	≤0,1
Arsénico, As	mg/kg en base seca	≤2	≤2	≤2
Cadmio, CD	mg/kg en base seca	≤1,0	≤1,0	≤1,0
Cromo, Cr	mg/kg en base seca	≤15	≤15	≤15
Cobre, Cu	mg/kg en base seca	≤20	≤20	≤20
Plomo, Pb	mg/kg en base seca	≤20	≤20	≤20
Mercurio, Hg	mg/kg en base seca	≤0,1	≤0,1	≤0,1
Zinc, Zn	mg/kg en base seca	≤100	≤100	≤100
Comportamiento de fusión de ceniza	°C	Se debe declarar	Se debe declarar	Se debe declarar

Con estas propiedades, más concretamente, las propiedades mecánicas, se establecerá la calidad de los pellets y se buscará la configuración de variables más óptima para el proceso.

3 MATERIALES Y MÉTODOS

En este capítulo se expondrán los distintos materiales utilizados en la elaboración del trabajo así como los métodos de caracterización de estos. También se describirán los ensayos realizados para la obtención de los productos una vez fabricados para, una vez evaluados, se puedan sacar conclusiones al respecto.

Se empezará describiendo de la materia prima utilizada y se continuará con el equipamiento empleado. Posteriormente se hablará de la caracterización de la materia prima y de sus densificados.

Para finalizar, se expondrán las variables con las que se trabaja y las distintas combinaciones de estas que en un análisis permitirá obtener las conclusiones buscadas en la extensión de este trabajo.

3.1 Materia prima

La materia prima que será empleada es serrín de *Pinus pinaster* procedente de Aserrexa resultado de la fabricación de pallets, estacas, tablones, etc., en definitiva, de la explotación del aserradero.

El *Pinus pinaster* es un árbol de la familia de las pináceas, que alcanza una altura de entre 20 y 30m llegando, en condiciones excepcionales, a los 40m. Su tronco tiene tendencia a ser flexuoso, dependiendo su grado de rectitud de la raza y de la calidad de la estación. El sistema radical es bastante desarrollado y profundo, confiriéndole buena resistencia al viento. Las ramas aparecen agrupadas en verticilos, correspondientes cada uno de estos a un crecimiento en altura. Suelen tener forma de candelabro.



Figura 3.1 *Pinus pinaster*.

Algunas cualidades a considerar en el *Pinus pinaster* son:

- Es un árbol muy frugal que vive y crece en suelos someros, arenosos y poco fértiles, donde otras especies no serían alternativa productiva.
- Resiste más el frío que el eucalipto, pudiendo usarse en repoblación a altitudes limitantes para este (500-800m).
- Tiene facilidad para regenerar, de forma natural, por lo que se ahorran costes de repoblación y en cuidados selvícolas [35].

Este serrín fue recogido de su fábrica situada en la en la carretera EX328 km 3,6 de uno de los montones de almacenamiento al aire libre.

3.1.1 *Pinus pinaster* en Extremadura

El tratamiento selvícola aplicable a esta especie es el clareo, que se produce uno cada veinte años. Partiendo de esto y adoptando que por cada hectárea de *Pinus pinaster* se producen 459 kg de residuos, se obtendrá las cantidades totales según Ecuación (3.1) [36].

$$C_{rpp} = S_{pinaster} \cdot 0,459 \tag{3.1}$$

Siendo:

C_{rpp} : Cantidades anuales de residuos (t).

$S_{pinaster}$: Superficie de *Pinus pinaster* (ha).

0,459: cantidad de residuo por unidad de superficie y año (t/ha y año).

De esta manera, las cantidades de producción de residuo de *Pinus pinaster* anual en Extremadura son los expresados en la Tabla 3.1 y en la Figura 3.2.

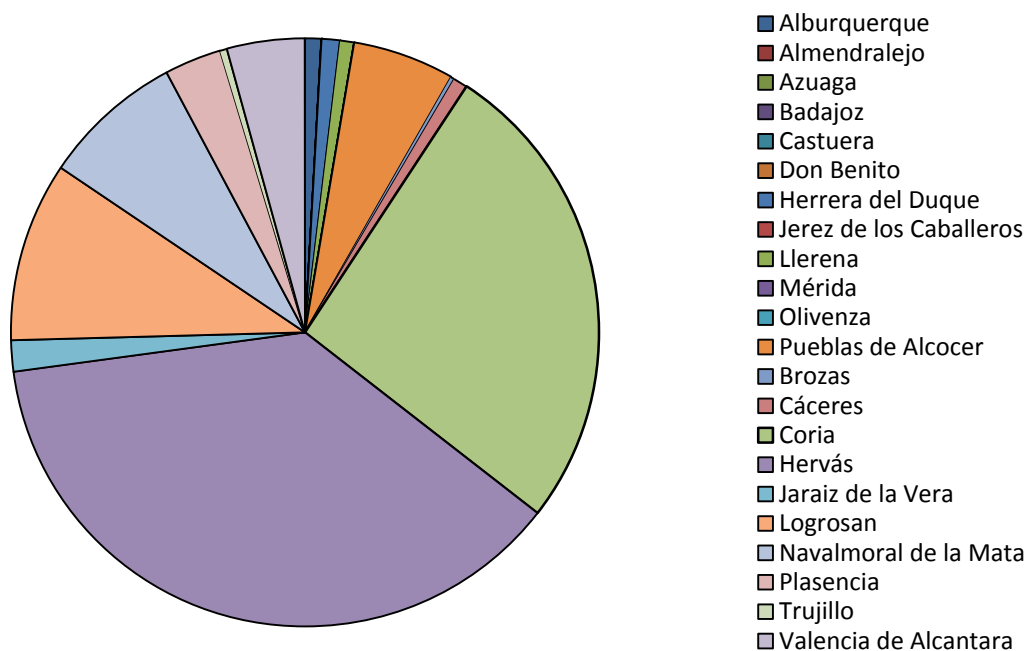


Figura 3.2 Distribución comarcal del residuo de *Pinus pinaster*.

Tabla 3.1 Cantidades de residuo de *Pinus pinaster* al año en Extremadura

Provincia	Comarca	t mh/año
Badajoz	Alburquerque	341,65
	Almendralejo	0
	Azuaga	0
	Badajoz	0
	Castuera	0
	Don Benito	0
	Herrera del Duque	385,23
	Jerez de los Caballeros	0
	Llerena	291,44
	Mérida	0
	Olivenza	0
	Pueblas de Alcocer	2127,79
	Caceres	Brozas
Cáceres		292,98
Coria		9998,55
Hervás		14222,25
Jaraiz de la Vera		650,28
Logrosan		3758,89
Navalmoral de la Mata		2952,2
Plasencia		1189,46
Trujillo		149,26
Valencia de Alcantara		1629,3
TOTAL		38068,7

Conocida la materia prima con la que se va a trabajar, determinar cuáles son sus características de esta será necesario para la obtención de conclusiones al final del proceso. Los procesos para la caracterización de la materia prima son descritos en el siguiente apartado.

3.2 Caracterización de materia prima

Para conocer cómo influye en el proceso de pelletizado los parámetros a controlar, se debe conocer previamente las características de la materia prima. Estas características afectaran al producto obtenido a partir de ellas y por tanto afectará a las variables de control del pelletizado.

En nuestro caso, la determinación las principales características físicas y químicas de la materia prima para así obtener conclusiones con los distintos resultados obtenidos en el laboratorio.

3.2.1 Humedad

La humedad que posee la materia prima viene determinada por el agua contenida en la biomasa y la añadida en el proceso de preparación o almacenamiento de la misma. La humedad de la biomasa puede reflejarse de tres formas distintas:

- **Biomasa con la humedad de recepción:** Los resultados en esta base reflejan los resultados más exactos pero plantea problemas en su manipulación por el grado de humedad elevado. Así mismo, esta humedad tiende a descender en el almacenaje.
- **Biomasa con humedad estabilizada:** La estabilización se consigue dejando secar el producto al aire en el ambiente del laboratorio. Las posteriores manipulaciones

modificarán la cantidad de humedad presente en la muestra por lo que tampoco es recomendable su uso.

- **Biomasa libre de humedad:** La muestra se libera de su humedad por secado en estufa a 105°C hasta alcanzar peso constante. En esta situación la muestra es fácilmente reproducible y por tanto, es la base a utilizar.
- **Biomasa libre de humedad y cenizas:** Esta forma tiene poco interés dado que las cenizas calculadas darán un valor inferior al presente el la biomasa [37].

Es importante saber la cantidad de humedad de la materia prima. Un contenido excesivo de humedad disminuye el efecto de compresión de la pelletizadora y evita el efecto de aglomerante de la lignina. Por lo tanto, el contenido de humedad debe ser aproximadamente del 15% en base húmeda [38].

En nuestro caso, la determinación de la humedad se realiza con el método simplificado de secado en estufa descrito en la norma UNE-CEN/TS 14774-2 EX [39]. La muestra pesada, se introduce en una estufa a 105 °C durante un tiempo no superior a 24 h para evitar la pérdida de materia volátil. Se obtienen registros del contenido de humedad mediante pesaje hasta alcanzar un peso constante. El resultado se expresa en % de agua tanto en base húmeda (muestra inicial) y base seca (producto final).

La humedad en base húmeda se expresa según la Ecuación (3.2) [37].

$$X_h = \frac{X_s(\%)}{100 + Hu_s(\%)} \cdot 100 \quad (3.2)$$

La humedad en base seca según la Ecuación (3.3) [37].

$$X_s = \frac{X_h(\%)}{100 - Hu_h(\%)} \cdot 100 \quad (3.3)$$

3.2.2 Densidad aparente

La densidad se define como la relación entre la masa de una muestra y su volumen. En el caso de residuos biomásicos la densidad aparente es la que corresponde al volumen que ocupa en la práctica el residuo incluyendo huecos entre partículas, volumen de poros y volumen intersticial [22].

Bajo esta premisa, cuanto mayor sea la densidad aparente, mayor cantidad de producto y por tanto de energía se transportará o almacenará para un mismo volumen.

Para determinar la densidad aparente se seguirá el criterio de la norma UNE-CEN/TS 15103 EX [40]. Una cantidad de muestra se coloca en un recipiente de volumen conocido (V) y masa (m_1) llenándolo hasta que rebose. Este se deja caer varias veces para que la muestra asiente, enrasando y pensando (m_2). La densidad aparente se calcula con respecto a la Ecuación (3.4).

$$D_{ap} = \frac{(m_2 - m_1)}{V} \quad (3.4)$$

3.2.3 Distribución granulométrica

La distribución granulométrica es una medida del tamaño medio de las partículas que forman la materia prima. Esta suele ser heterogénea en cuanto a tamaño de las partículas que la forman y por lo tanto necesario su conocimiento.

En este caso se realizará según la técnica de la norma UNE-CEN/TS 15149-2 EX [41]. La determinación de la granulometría se realiza por vibrado y pesadas de tamices de distintos tamaños de malla, clasificando la muestra por tamaño decreciente. Se usará la tamizadora Retsch AS 200 con mallas de 20 cm de diámetro y tamaños de mallas de 3.15, 2.80, 2.00, 1.40, 1.00, 0.50 y 0.25mm.

3.2.4 Análisis inmediato

La determinación del contenido de volátiles, cenizas y carbono fijo que posee una materia prima se realizará con un conjunto de análisis complementarios. Estos son el análisis inmediato.

- **Volátiles (*Vol*):** Para la determinación de la materia volátil se aplicará la norma UNE CEN/TS 15148 EX [42]. En esta, la muestra de material se cubre una vez pesada y se calienta en horno de mufla hasta los 900 °C durante 7 minutos. Se deja enfriar en ambiente y se vuelve a pesar para determinar la materia volátil perdida entre ambas pesadas, en tanto por ciento.
- **Cenizas (*Ce*):** La determinación de las cenizas se realiza según la norma UNE CEN/TS 14775 EX [43]. En este proceso se introduce la muestra en un horno de mufla hasta los 250 °C con un incremento de 5 °C por minuto. Se mantiene a esta temperatura durante 1 hora para que se evaporen los volátiles. Una vez transcurrida la hora, se aumenta progresivamente la temperatura hasta los 550 °C y manteniéndola durante al menos 2 horas. La diferencia de peso permite obtener la cantidad de cenizas, en tanto por ciento.
- **Carbono fijo (*C_f*):** Este se obtiene por diferencia a 100% a partir de las cantidades de volátiles y cenizas que contiene la materia prima.

Para obtener los porcentajes de cenizas, volátiles y carbono fijo en base húmeda es necesario aplicar la siguiente conversión de la Ecuación (3.5) [37].

$$X_h = X_s \cdot \frac{100 - Hu_h(\%)}{100} \quad (3.5)$$

Para obtener el porcentaje de carbono fijo y materia volátil sobre el producto seco y libre de cenizas, se seguirá el criterio de la Ecuación (3.6).

$$X = X_s \cdot \frac{100}{100 - Ce} \quad (3.6)$$

3.2.5 Análisis elemental

El análisis elemental es un método de determinación de los principales elementos que componen una sustancia. La cantidad de carbono (C), hidrógeno (H), nitrógeno (N) y azufre se obtienen por el análisis de los gases de la combustión de materia prima. La cantidad de oxígeno (O) se determina

por diferencia al 100% de los elementos y cenizas. En algunas ocasiones resulta interesante determinar también contenidos de cloro, sodio, potasio u otros elementos.

En la biomasa, el contenido de carbono suele oscilar entre el 40 y 60% en base seca y suele ser altamente oxigenado, entre el 30 y 40 % en base seca. El tercer componente mayoritario es el hidrógeno, con porcentajes en torno al 5 y 6%. Los niveles de nitrógeno, azufre y cloro, suelen ser pequeños, entorno al 1% [22].

La determinación de carbono, hidrógeno, nitrógeno y azufre es importante para los cálculos de la combustión del biocombustible. El contenido de nitrógeno y azufre es, así mismo, necesario para la determinación de las emisiones de NO_x y SO_x . El contenido en hidrógeno resulta interesante para determinar el poder calorífico y el carbono para las emisiones de CO_x .

Determinar la cantidad de cloro, sodio, potasio viene provocada por la posible aparición de problemas de corrosión, suciedad y de escorias en las calderas, así como afectar a los gases emitidos por la combustión.

La determinación de las cantidades se realizó por medio del analizador elemental LECO (CHNS 932) instalado en el Servicio de Apoyo a la Investigación de la Universidad de Extremadura.

3.2.6 Poder calorífico

El poder calorífico se define como la cantidad de energía que puede desprender la unidad de masa de materia bajo una reacción de oxidación.

En la combustión se rompen los enlaces químicos del combustible. La energía de estos enlaces, que mantenían unidos los átomos, menos la energía utilizada para la formación de las nuevas moléculas, es el poder calorífico. Se puede hablar de dos poderes caloríficos:

- **Poder calorífico superior (PCS):** Es la cantidad total de calor desprendido en la combustión completa de una unidad de volumen de combustible cuando el vapor de agua originado en la combustión ha sido condensado desprendiendo el calor latente de condensación.
- **Poder calorífico inferior (PCI):** Es la cantidad total de calor desprendido en la combustión completa de una unidad de volumen de combustible sin contar la cantidad de calor latente del agua evaporada [22].

En nuestro caso, se utilizará la norma UNE-CEN/TS 164001 EX [44], con la bomba calorimétrica Parr 1351 del laboratorio de Termodinámica de la Escuela de Ingenierías industriales de la UEx.

La determinación del PCI se realizará a partir de la Ecuación (3.7).

$$PCI = PCS - 5400 \left(\frac{kcal}{kg} \right) \cdot H(\%) \quad (3.7)$$

3.3 Caracterización de los productos

Conocer las características de los pellets una vez obtenidos es el objetivo de este trabajo. Saber cómo afectan las variables del pelletizado al producto final. Así el conocimiento de la humedad, densidad aparente, durabilidad mecánica, dimensiones y resistencia a compresión de los productos será lo que permita sacar conclusiones.

3.3.1 Humedad

La humedad que posean los pellets es una característica importante. Los densificados más húmedos necesitan mayor tiempo de residencia en el hogar de las calderas para secarse, gasificación y combustión necesiéndose mayores tamaños para la cámara de combustión [38].

El método de análisis de la humedad para los productos va a ser exactamente la misma que para la materia prima. Se aplicará, pues, la norma UNE-CEN/TS 14774-2 EX [39] con el procedimiento anteriormente mencionado en el Apartado 3.2.1.

3.3.2 Densidad aparente

Como ya se mencionó anteriormente, una mayor densidad aparente permite un mayor transporte de energía en un mismo volumen.

Cuando un producto no tiene las dimensiones adecuadas provoca un incremento de la densidad aparente que no es beneficiosa, sino una consecuencia de este defecto dimensional. Hay que tener esto en cuenta para no malinterpretar los resultados.

Para la determinación de la densidad aparente se seguirá el criterio de la norma UNE-CEN/TS 15103 EX [40] como ya se hizo en el Apartado 3.2.1 de este trabajo.

3.3.3 Dimensiones

La dimensión diametral ya ha sido definida anteriormente dada las características de la matriz de pelletizado por lo tanto, la dimensión a tener en cuenta en este análisis es la dimensión longitudinal. La longitud de los pellets suele estar comprendida entre los 10 y 30mm, variando según el residuo y técnica de pelletizado [45].

Aplicando un control de la longitud de una muestra de los productos, se hallará la media aritmética para obtener un único valor representativo. La medición de la longitud será realizada por medio de un calibre pié de rey por observación directa.

3.3.4 Durabilidad mecánica

Esta característica permite conocer el grado de compactación y resistencia a la desintegración de los pellets. Para cuantificar esta cualidad, se realiza un ensayo en el que se maltratan y cuantifica la pérdida de masa que sufren, en tanto por ciento.

Esta característica es importante para el análisis planteado por la necesidad de que los pellets soporten los procesos de transporte, carga, descarga, almacenamiento y combustión a los que se les somete.

En este trabajo, para la determinación de la durabilidad, se aplicará la norma UNE-CEN/TS 15210-1 EX [45], basada en el método ASABE S269.4 [46]. En esta, con una muestra de $500 \pm 10g$ (m_i) de pellets tamizados que se introducen en una caja giratoria a 50rpm durante 10min. Una vez transcurridos los 10min, se tamizan y pesan de nuevo (m_f). Aplicando la Ecuación (3.8) se puede obtener el valor de la durabilidad mecánica (Du).

$$Du = \frac{m_f}{m_i} \cdot 100 \quad (3.8)$$

3.3.5 Resistencia a la compresión

También conocida como dureza, es la máxima carga que puede llegar a soportar un pellet antes de romperse. Para su determinación se utiliza un durómetro, aplicando una fuerza que se incrementa de manera constante hasta la rotura del pellet. La fuerza indicada por el durómetro es, pues, la fuerza límite de resistencia a la compresión del pellet.

De esta manera se puede realizar una evaluación del comportamiento del pellet sometido a una compresión cuando está almacenado en silos o cuando son transportados por tornillos sinfín [22].

3.4 Equipamiento

La principal herramienta con la que se tratará es la Kovo Novàk MGL 200. Esta es una pelletizadora semi-industrial de pequeño tamaño, perfecta para el trabajo en laboratorio dadas sus reducidas dimensiones, altura máxima de 2.23m y 3m de ancho.

Este equipo, tal y como se observa en la Figura 3.3, posee una tolva para alojar la materia prima. Para extraerlo de la tolva posee un sinfín de alimentación en el cual, una compuerta, permite regular la cantidad de caudal que proporciona. El sobrante, retorna a la tolva por un conducto de retorno.

Una vez ha pasado la materia prima a través de la compuerta, cae al mezclador que posee una bomba de humectación. Esta es una bomba de impulsos que inyecta en el producto agua para ayudar a la posterior compactación. El mezclador ayuda a una homogenización de la humedad.

Tras el paso por la zona de humectación la materia prima cae a la prensa. En esta, unos rodillos introducen el producto en la matriz de pellets a presión, generando el producto final a la salida de esta. Para controlar la longitud de los pellets, a la salida, en su interior, hay una herramienta para cortarlos.

Una vez fabricados los pellets, estos caen al tambor de enfriamiento donde se enfrían. Las partículas de pequeño tamaño son recogidas en este tambor y devueltas a la tolva por medio del retorno de finos.

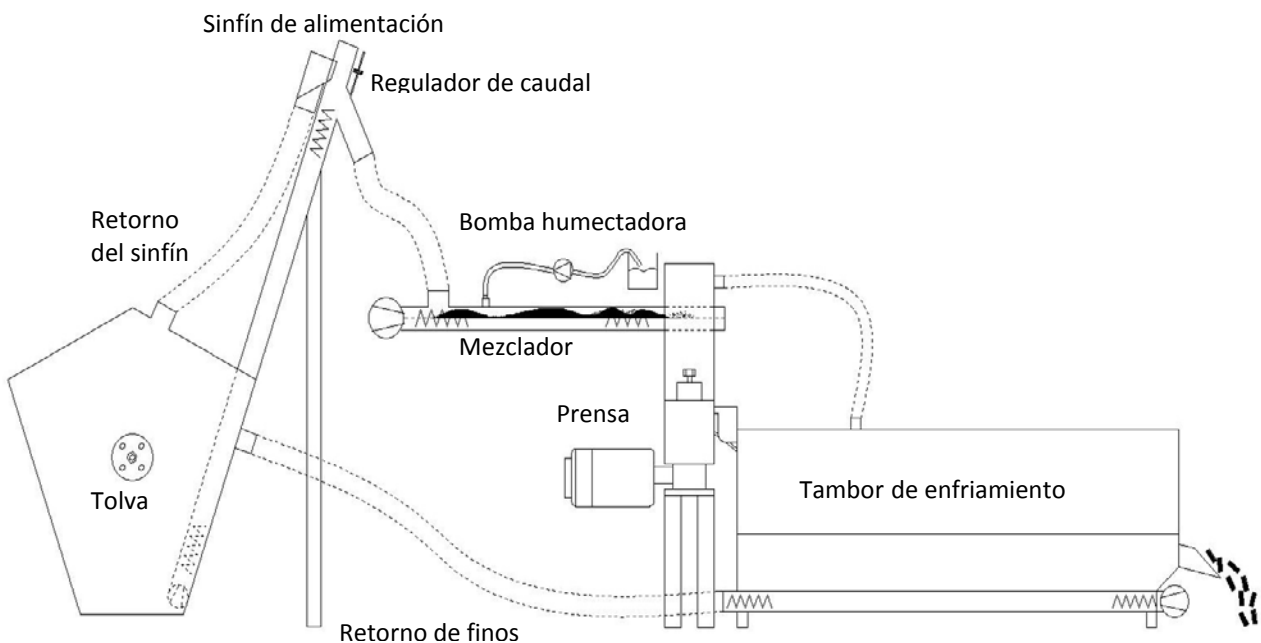


Figura 3.3 Esquemización Kovo Novàk MGL 200.

En la Tabla 3.2 se expresan sus características según el fabricante.

Tabla 3.2 Características de la pelletizadora

Característica	Valor	Unidad
Potencia	8,85	kW
Peso	310	kg
Altura	2,23	m
Tensión de alimentación	400/230	V
Corriente de alimentación	25/16	A

La potencia total de la pelletizadora vendrá dada por la agregación de la potencia de cada uno de los elementos que la forman, tal y como se presenta en la Tabla 3.3, con valores obtenidos por observación de cada uno de los elementos.

Tabla 3.3. Potencia de los distintos motores que forman la pelletizadora

Denominación	Potencia [kW]
Motor recogida de finos	0,8
Motor rodillos 400V	5,5
Motor agitador silo grande 230V	0,75
Motor sinfín silo grande	0,37
Motor sinfín silo pequeño 230v	0,37
Motor sinfín rodillos	0,75
TOTAL	8,54

Estas son las características básicas de la máquina. En los próximos apartados se realiza una descripción de los distintos caudales a tener en cuenta durante el proceso de fabricación así como de las características de la matriz de pelletizado.

3.4.1 Caudal de alimentación

Una vez la materia es extraída de la tolva por el sinfín, esta asciende y puede tomar dos caminos. El primero, que pase a través de la compuerta de alimentación y pase al mezclador con el sistema de humectación o, que en su defecto, retorne a la tolva.

La compuerta de alimentación es un sistema de tornillo tuerca. El movimiento de la tuerca a lo largo del tornillo permite el movimiento de la compuerta y por tanto su cierre y apertura. Una regulación de la apertura de esta es necesario para el estudio que se pretende realizar.

Para ello se planteará un experimento, mediante el pesado de la cantidad de producto que atraviesa la compuerta para distintos niveles de apertura en un tiempo determinado. En este caso se estableció un tiempo entorno a los 15 segundos, se utilizará para llevarlo a cabo una cubeta de 20l, pesada de antemano, para la colecta del producto, una báscula de precisión de hasta 5kg y un cronómetro.

3.4.2 Caudal de humectación

Cuando la materia prima cae al sinfín de humectación en este hay instalado una bomba de chorro. Esta bomba introduce una cantidad de agua al conducto que es absorbida por la biomasa aumentando la humedad propia de esta.

Esta humedad es un valor a considerar. Es tremendamente importante el conocimiento del caudal de agua introducido en la materia prima para poder establecer cómo afecta al proceso de pelletizado.

Para conocerlo se planteará un experimento similar al anterior. Se encenderá la bomba y se medirá la cantidad de agua que esta introduce en un tiempo de 30 segundos para cada una de las regulaciones que posee. La medición de la masa de agua y conocido el tiempo, se obtendrá el caudal que esta proporciona por unidad de tiempo, caracterizando la bomba.

En este caso, se utilizará un vaso de precipitado de 400ml, previamente pesado, una báscula de precisión de hasta 5kg y un cronómetro. La repetición del proceso anteriormente descrito tres veces reducirá los posibles errores de medición.

3.4.3 Matriz de pelletizado

La pelletizadora anteriormente descrita es de matriz plana. Estas tienen forma de disco horizontal, girando, con unos rodillos fijos que introducen la materia prima en el interior de la matriz por presión generando los pellets.

Las características diametrales del producto vienen determinadas por la matriz de fabricación. Los diámetros de estos varían generalmente entre los 4 y los 12 mm [22]. Por lo tanto, la misma pelletizadora puede proporcionar distintos pellets en función de la matriz con la que trabaje.

En nuestro caso, se trabaja con una matriz reversible cuyos orificios son de entrada troncocónica pasando a cilíndrica, tal y como se puede observar en la Figura 3.4. En esta se encuentran definidas las dimensiones de los orificios de la matriz de fabricación.

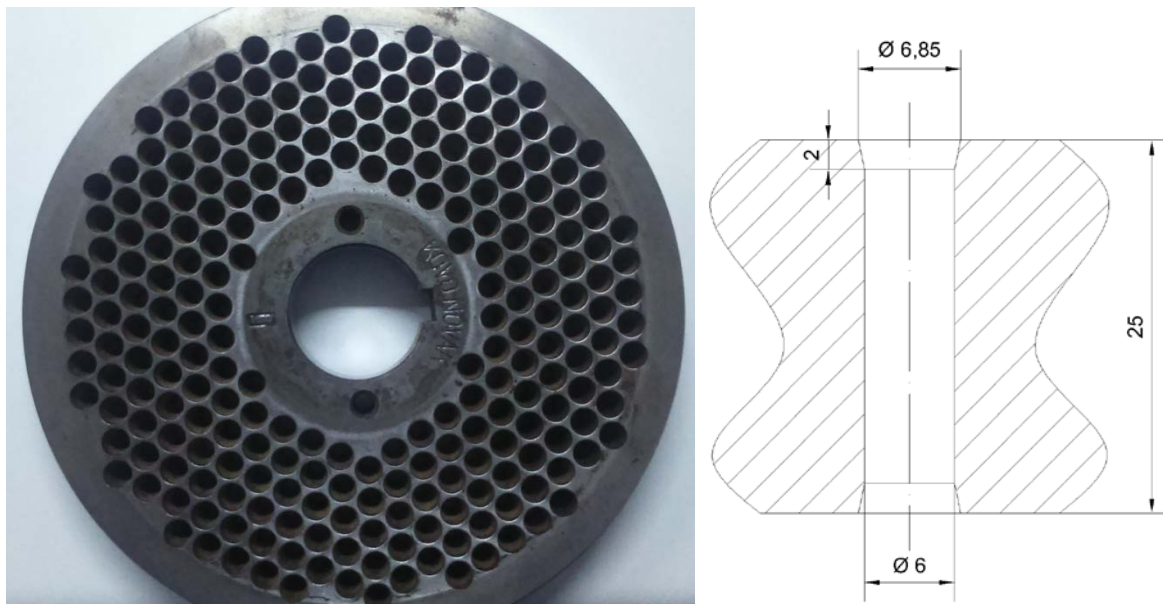


Figura 3.4 Matriz de fabricación y esquematización de los orificios de pelletización con cotas en mm.

3.4.4 Variables a controlar

En el proceso productivo hay distintas variables a controlar durante el pelletizado. Estas variables afectan al producto final y, como ya fue mencionado en los objetivos, corresponden al estudio que se desea realizar en el presente proyecto. Estas variables a controlar son las siguientes.

- **Caudal de alimentación:** Como ya se mencionó anteriormente, una de las características propias del equipo de pelletizado es la posibilidad de controlar el caudal de alimentación. Este se controla por medio de una compuerta con un sistema de tornillo tuerca que, una vez caracterizado en el apartado anterior, permite la instalación de una regla para controlar el valor de la apertura de la compuerta, tal y como se observa en la Figura 3.5.



Figura 3.5 Compuerta reguladora de caudal.

- **Caudal de humectación:** El equipo posee una bomba de chorro, caracterizada en el apartado anterior, que permite controlar la cantidad de agua introducida en el mezclador. Controlar la humedad de la materia prima y la añadida por el sistema de humectación permitirá analizar su influencia en el producto final.



Figura 3.6 Bomba de humectación.

Como se puede observar en la Figura 3.6, la bomba posee un sistema de regulación para el control de su funcionamiento.

- **Presión de los rodillos:** La última variable sobre la que se puede actuar es la presión de los rodillos. Para ello el equipo posee un sistema de tornillo tuerca que permite aumentar la presión que ejercen los rodillos sobre la matriz por medio de incrementar el par de apriete sobre estos tornillos.

El control de esta presión no puede hacerse directamente, sino por medio de una llave dinamométrica. A través de ella, establecer un valor de par de apriete y de esta manera controlar distintos valores de presión de los rodillos sobre la matriz.



Figura 3.7 Cabezal de prensado.

3.5 Ensayos

El proceso de pelletizado se inicia con la carga de la tolva de la máquina, cierre del aporte de humedad, establecimiento de la presión de los rodillos y la puesta en funcionamiento del equipo con la compuerta de alimentación totalmente cerrada.

Dejando el equipo funcionando en vacío durante un tiempo prolongado se consigue un aumento de la temperatura de la matriz y de los rodillos. Así mismo, utilizando un producto secundario situado en la segunda tolva del equipo, se realiza el calentamiento previo del sistema.

Una vez caliente el equipo, se procede con el inicio de los ensayos. Estos son descritos a continuación para cada una de las sesiones de fabricación descritas.

3.5.1 Sesión uno. Establecimiento de longitud

En la primera sesión de pelletizado, se estableció el objetivo de establecer la longitud de los pellets óptima. En la normativa anteriormente descrita se marca que los valores de longitud tienen que oscilar entre los 3,5 y los 40 mm.

Los ensayos realizados se describen en la Tabla 3.4 en la que se muestran los valores establecidos para las variables de regulación de humedad añadida, presión de rodillos y regulación del caudal másico.

Tabla 3.4 Ensayos realizados en la primera sesión de fabricación

Ensayo	Humedad añadida (%)	Presión rodillos (Nm)	Caudal másico (%)
1	0	20	10
2	0	20	15
3	0	20	20
4	0	20	25
5	0	20	30
6	0	20	35
7	10	20	15
8	10	20	20
9	10	20	25
10	10	20	30

En estos ensayos el objetivo era establecer el valor fijo de caudal másico con el que se obtendría una longitud de los pellets de acuerdo con la normativa. Para ello, se estableció un valor fijo de presión, de par de apriete, de los rodillos y, a partir de este, se incrementó el valor de la apertura de la compuerta desde un 10 hasta un 35%.

Así mismo, se realizó el mismo experimento, pero entre 15 y 30% de apertura con una humedad añadida de 10%. La motivación de estos ensayos viene del intento de interpretación de cómo afecta la humedad añadida a la longitud.

3.5.2 Sesión dos. Búsqueda del pellet mecánicamente óptimo

Una vez establecida la longitud de los pellets por medio de la regulación del caudal másico, el siguiente paso es la obtención el pellet de mejor calidad, de acuerdo con la normativa vigente. Para ello se realizarán los experimentos expuestos en la Tabla 3.5.

Tabla 3.5 Ensayos realizados en la segunda sesión de fabricación

Prueba	Humedad añadida (%)	Presión rodillos (Nm)	Caudal másico (%)
1	0	20	25
2	10	20	25
3	20	20	25
4	30	20	25
5	0	30	25
6	10	30	25
7	20	30	25
8	30	30	25
9	0	40	25
10	10	40	25
11	20	40	25
12	30	40	25
13	40	40	25
14	50	40	25

En estos ensayos se pueden resaltar tres grandes grupos, en función del par de apriete en los rodillos, así sea 20, 30 o 40 Nm. Así mismo, dentro de cada uno de estos grupos, se debe diferenciar en función de la regulación de la humedad añadida. Así se modificará entre 0 y 30% la regulación de la bomba de humectación para dos de los casos y entre 0 y 50% para el caso de 40 Nm de par.

Con estos ensayos se pretende estudiar cómo afectan los valores de humedad añadida y presión al producto densificado, más concretamente, cómo afecta a sus propiedades mecánicas y de humedad final.

4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el presente capítulo se exponen los resultados obtenidos en el desarrollo del presente proyecto.

Se expondrán en primera instancia los resultados de la caracterización del equipo de densificado, estableciendo los valores de regulación tanto para caudal de alimentación como caudal de humectación-

Posteriormente se hablará de la caracterización de las propiedades de la materia prima, estableciendo los valores de humedad, densidad aparente, distribución granulométrica, análisis inmediato, análisis elemental y poder calorífico.

Posteriormente, se presentarán los resultados de la caracterización de los productos de cada una de las sesiones descritas en el Apartado 3.5, en cuanto a valores de humedad, densidad aparente, dimensiones, durabilidad mecánica y resistencia a la compresión.

4.1 Caracterización del equipo

4.1.1 Caudal de alimentación

Para la caracterización del caudal de alimentación del equipo se aplicó el experimento descrito en el Apartado 3.4.1 del presente proyecto, para el que se utilizó una cubeta de 20l, pesada de antemano, para la colecta del producto, una báscula de precisión de hasta 5kg y un cronometro. La activación del sinfín de alimentación durante el tiempo anteriormente mencionado y el pesado de las muestras obtenidas en este periodo se obtienen los resultados. La repetición de este proceso tres veces, para evitar los posibles errores de medida, generan unos resultados expresados en la Tabla 4.1 y la Figura 4.1.

Tabla 4.1 Valores de apertura/caudal de la compuerta de alimentación

Apertura (%)	Q(g/s)
8,333	0,892549
16,667	6,19119
25	17,12524
33,333	36,30233
41,667	65,14698
50	84,7843
58,333	109,9215
66,667	133,8306
75	156,1644
83,333	180,0118
91,667	191,7901
100	217,1526

Si se analiza el resultado, en valores pequeños de apertura, inferiores al 20%, el caudal crece muy lentamente. No es hasta el entorno del 20-25% cuando estos valores se estabilizan y el crecimiento hasta valores del 80% resulta lineal. A partir de aquí y hasta el 100% la curva se aplatina disminuyendo la cantidad de caudal en función de la apertura.

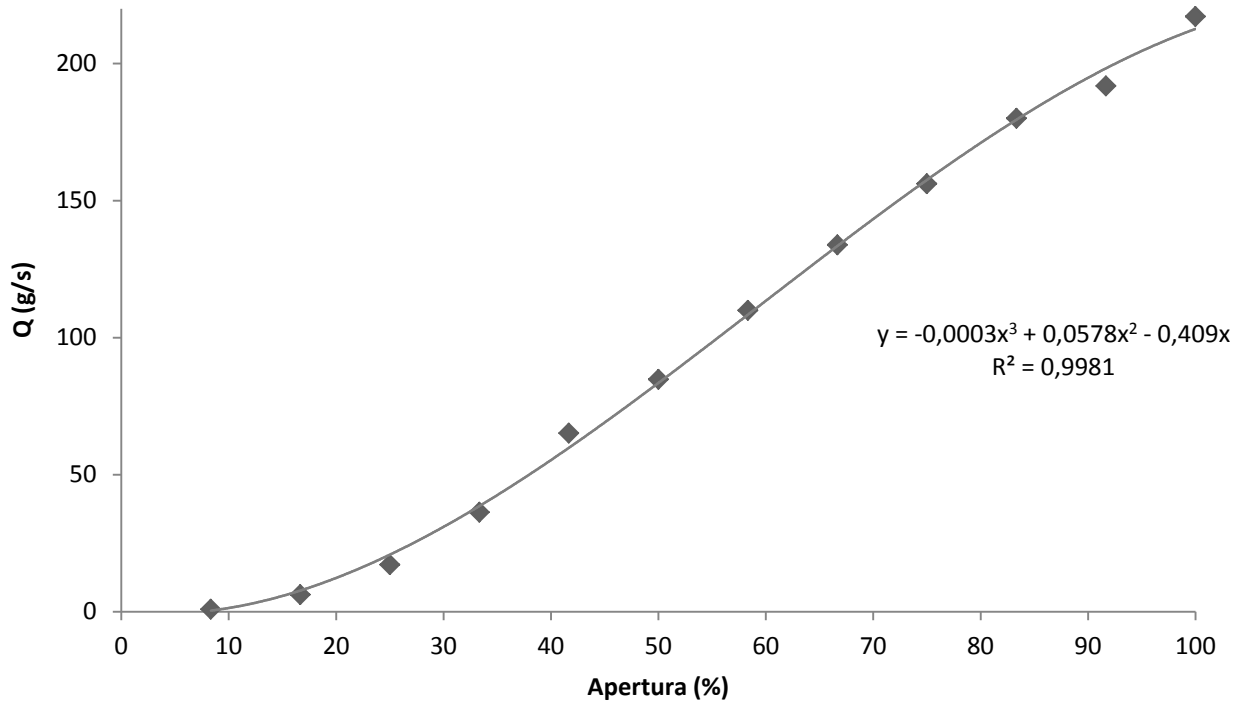


Figura 4.1 Representación apertura/caudal de la compuerta de alimentación.

4.1.2 Caudal de humectación

Para la determinación del caudal de humectación del equipo se aplicó el experimento descrito en el Apartado 3.4.2, para el que se utilizó un vaso de precipitado de 400ml, previamente pesado, una báscula de precisión de hasta 5kg y un cronómetro. La repetición del proceso anteriormente descrito tres veces reducirá los posibles errores de medición.

Los resultados obtenidos en el experimento se muestran en la Tabla 4.2 y en la Figura 4.2.

Tabla 4.2 Valores de regulación/caudal de agua proporcionado por la bomba de humectación

Regulación (%)	Q (cm ³ /s)
5	0,167
10	0,340
15	0,532
20	0,627
25	0,734
30	0,872
35	0,953
40	1,088
45	1,178
50	1,251
55	1,346
60	1,481
65	1,565
70	1,628
75	1,715

Regulación (%)	Q (cm ³ /s)
80	1,742
85	1,942
90	1,947
95	1,901
100	1,939

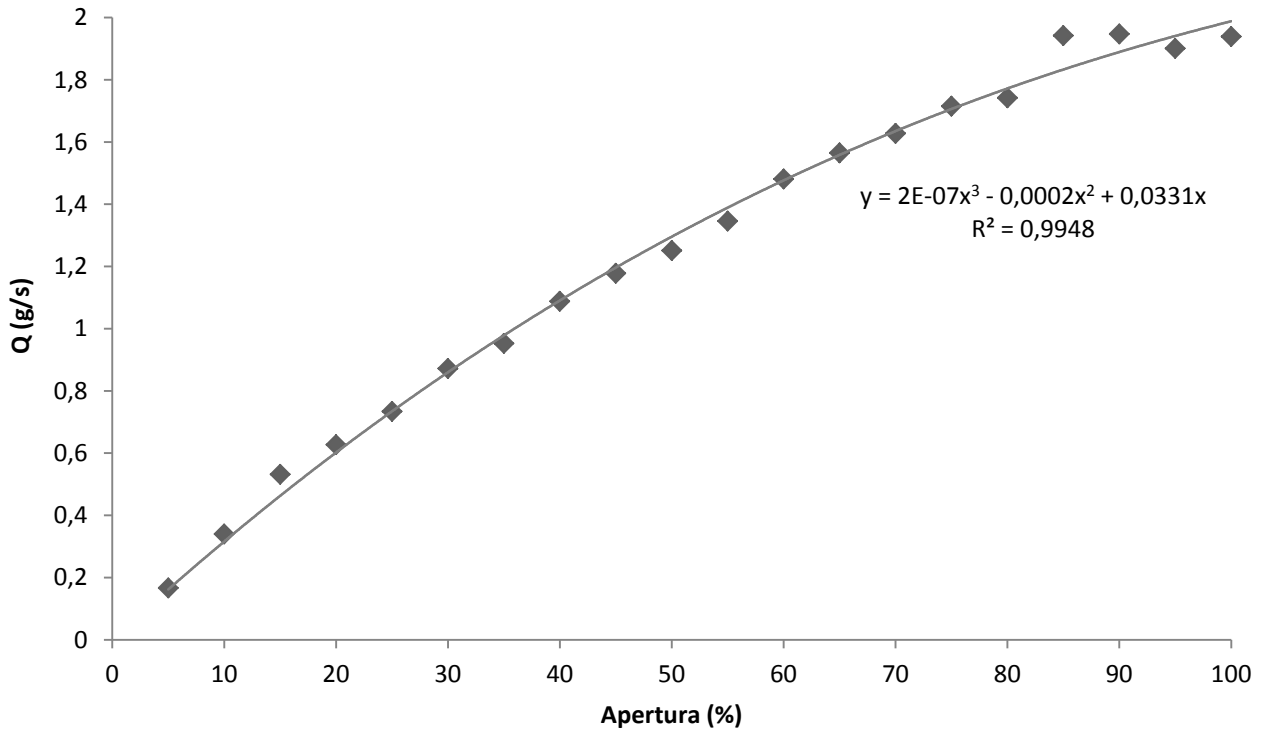


Figura 4.2 Representación de regulación/caudal de agua proporcionado por la bomba de humectación.

La distribución de datos obtenida ajusta con una curva polinómica de grado 3 que, excepto en su parte superior, resulta muy lineal para valores inferiores al 50% de regulación.

Hay que hacer notar dos valores discordantes con la tendencia de todos los demás para las regulaciones de 85% y 90%. Estos valores se repitieron sistemáticamente para confirmar los resultados que fueron confirmados repetitivamente. Dado que son valores demasiado elevados y que generarían un producto no útil, estos no tienen influencia en el posterior estudio a realizar.

4.2 Caracterización de la materia prima

Conocer las características de la materia prima resulta imprescindible para la determinación de la capacidad de rentabilidad de la inversión en densificado de esta.



Figura 4.3 Serrín de madera de *Pinus pinaster*.

4.2.1 Humedad

Conocer los valores de humedad que contienen los residuos es muy importante ya que esta puede modificar algunas de sus características, como su densidad aparente o el poder calorífico. Así mismo, un nivel de humedad óptimo facilita la actuación de los agentes aglomerantes propios del residuo [48] y afecta al rendimiento energético de la fabricación de los pellets [49].

Tal y como se menciona en el Apartado 3.2.1 del presente proyecto, la determinación de la humedad se realizará con el método simplificado de secado en estufa descrito en la norma UNE-CEN/TS 14774-2 EX [39]. La muestra pesada, se introduce en una estufa a 105 °C durante un tiempo no superior a 24 h para evitar la pérdida de materia volátil. Se obtienen registros del contenido de humedad mediante pesaje hasta alcanzar un peso constante. El resultado se expresa en % de agua tanto en base húmeda (muestra inicial) y base seca (producto final).

En la Tabla 4.3 se expresan los valores de humedad de los residuos utilizados en cada una de las sesiones de fabricación.

Tabla 4.3 Humedad de los residuos

Sesión	Humedad (% base humedad)
1	15,08
2	13,05

En ambos casos, los valores de humedad están en términos que permiten su densificación directa.

Contenidos bajos de humedad pueden provocar problemas en el densificado, desde fallos en el equipo, por las elevadas temperaturas que pueden alcanzarse o por el desgaste excesivo de la matriz de pelletizado, hasta problemas en los propios pellets, ya que el proceso seca aún más el producto y esto evita que se pueda compactar el producto de manera satisfactoria.

Contenidos elevados de humedad provoca una disminución de la presión de los rodillos sobre el producto, haciendo que este se desplace fácilmente por el interior de la matriz impidiendo que la lignina pueda producir su efecto aglomerante.

4.2.2 Densidad aparente

La densidad aparente del residuo utilizado, obtenida bajo el criterio de la norma UNE-CEN/TS 15103 EX [40] como se indicó en el Apartado 3.2.2 del presente proyecto, es de 231,425 kg/m³ (base húmeda).

Si se compara este resultado con otras materias primas, según W. Stelte [50], las densidades aparentes de los residuos biomásicos suele ser baja debido a la estructura porosa de estos, con valores que oscilan entre los 40 y los 150 kg/m³ (base húmeda) para biomásas herbáceas y entre 320 y 720 kg/m³ (base húmeda) para biomásas de maderas blandas.

En nuestro caso, el residuo está triturado y es muy poroso, esto determina claramente su densidad aparente a valores que no se acercan a los anteriormente mencionados para maderas, por lo que una densificación resultará muy interesante tanto para un mejor aprovechamiento del residuo como un incremento de su densidad aparente para un transporte y manipulación más económico.

4.2.3 Distribución granulométrica

El tamaño y forma de partícula influye en las propiedades físicas, químicas y mecánicas tanto de los residuos originales, como en la calidad de los pellets fabricados. Dependen de muchos factores, tales como las características intrínsecas de la biomasa, del equipo empleado para tratar los residuos, de su almacenamiento y recogida, etc. [22].

La determinación de la distribución granulométrica se realizó por medio de la técnica descrita en la norma UNE-CEN/TS 15149-2 EX [41], tal y como se menciona en el Apartado 3.2.3 del presente proyecto.

En la Tabla 4.4 y Figura 4.4 se exponen los datos de granulometría del residuo con el que se trata durante toda la extensión del presente proyecto.

Tabla 4.4 Distribución granulométrica del residuo

Tamiz (mm)	%	% Acumulado
3,15	2,654682	2,654682
2,8	0,083612	2,738294
2	0,877926	3,616221
1,4	2,403846	6,020067
1	3,992475	10,01254
0,5	24,62375	34,63629
0,2	38,44064	73,07692
0	26,92308	100

Como puede apreciarse, la granulometría del residuo es pequeña, dado que en los tres últimos tamices se acumula el 89,09% de la muestra. La mayor parte del residuo tiene una granulometría inferior a 0,5mm, cosa totalmente coherente con el residuo, al tratarse de serrín proveniente de aserradero.

Las partículas finas permiten que, durante el densificado, los huecos sean rellenados de manera más efectiva, permitiendo obtener pellets de mayor durabilidad ya que las partículas gruesas generan líneas de roturas que causan las fracturas de los pellets [51].

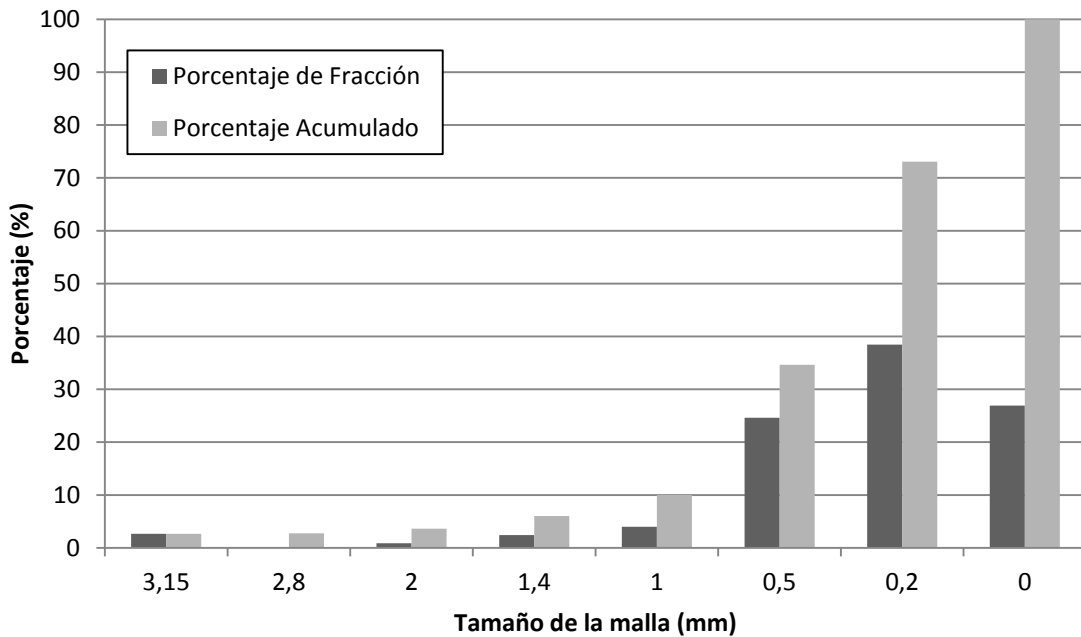


Figura 4.4 Distribución granulométrica.

4.2.4 Análisis inmediato

El análisis inmediato permite obtener la cantidad humedad, materia volátil, cenizas y carbono fijo para, posteriormente obtener un valor de poder calorífico.

En la mayor parte de residuos, la materia volátil es el elemento con mayor porcentaje, entre un 65 y un 85% (base seca). El carbono fijo se encuentra en valores que oscilan entre 15 y 30% (base seca), mientras que las cenizas pueden oscilar entre el 0,5 y el 20% [52].

La Tabla 4.5 muestra los valores obtenidos en el análisis inmediato del residuo con el que se está tratando.

Tabla 4.5 Análisis inmediato

Característica	Porcentaje (% base seca)
Humedad	0
Volátiles	84,83
Carbono Fijo	14,01
Cenizas	1,14

De esta manera se aprecia que los valores están en el entorno de los mencionados anteriormente. Con un contenido de materia volátil como el que poseen, la ignición de estos materiales es mucho

más fácil que para carbones, produciéndose un efecto de combustión y descomposición térmica más rápido y difícil de controlar

La mayor parte del combustible se vaporiza antes de que se produzca la combustión de los gases desprendidos, produciéndose una reacción de combustión heterogénea con una pérdida de combustible durante la volatilización que aumenta con el incremento del ratio oxígeno/carbono [22].

4.2.5 Análisis elemental

En la biomasa, el contenido de carbono suele oscilar entre el 40 y 60% en base seca y suele ser altamente oxigenado, entre el 30 y 40 % en base seca. El tercer componente mayoritario es el hidrógeno, con porcentajes en torno al 5 y 6%. Los niveles de nitrógeno, azufre y cloro, suelen ser pequeños, entorno al 1% [22].

En la Tabla 4.6 se exponen los valores obtenidos en el análisis elemental del residuo estudiado.

Tabla 4.6 Análisis elemental del residuo en base seca

C (%)	H (%)	O (%)	N (%)	S (%)	Cl (%)
46,26	6,53	46,04	No se detecta	No se detecta	0,03

Los valores de carbono e hidrógeno se encuentran en los valores mencionados anteriormente. El nivel de cloro queda por debajo del 1% esperado y no se detectan trazas de nitrógeno, lo que deja una cantidad de oxígeno muy elevada.

Según Irene Mediavilla en su estudio sobre la optimización de la pelletización y la combustión en un caldera de 17,5 kW_{th} para los sarmientos de vid y los residuos de la industria corchera, se obtuvieron valores de carbono (C) de 52 % (base seca), de hidrógeno (H) de 6% (base seca), de nitrógeno 0,61% (base seca), de azufre y de cloro, 0,03% y 0,06% (base seca), respectivamente, valores muy cercanos a los obtenidos para los polvos de densimetrías 1-2 mm y 2-3 mm [53].

4.2.6 Poder calorífico

El poder calorífico se obtuvo por la aplicación de la UNE-CEN/TS 164001 EX [44]. Los resultados son los que se muestran en la Tabla 4.7.

Tabla 4.7 Poderes caloríficos del residuo

	Kcal/kg	MJ/kg
Poder calorífico superior (PCS)	5103,33	21,33
Poder calorífico inferior (PCI)	4750,71	19,85

Comparándolo con otros residuos, como la cáscara de arroz con 16,1 MJ/kg [54], cáscara de semilla de girasol con 18,3 MJ/kg [55], paja de trigo con 17,94 MJ/kg [56] o cáñamo con 16,57 MJ/kg [55], resulta evidente que posee mejor poder calorífico que cualquiera de ellos, permitiendo obtener una cantidad energética superior del serrín de *Pinus pinaster* que de los residuos mencionados anteriormente.

4.3 Caracterización de los pellets

Para poder determinar cómo afecta las variables del pelletizado a los productos, se deben analizar estos para conocer sus propiedades. Los resultados de la caracterización de propiedades se exponen en la longitud del presente apartado.

4.3.1 Sesión uno. Establecimiento de la longitud

Una vez fabricados los pellets de la primera sesión se procede a su caracterización. Los resultados se expondrán posteriormente. En las figuras siguientes se presentan fotografías de los pellets fabricados.



Figura 4.5 Fotografías ensayos 2 a 9 de la sesión uno.

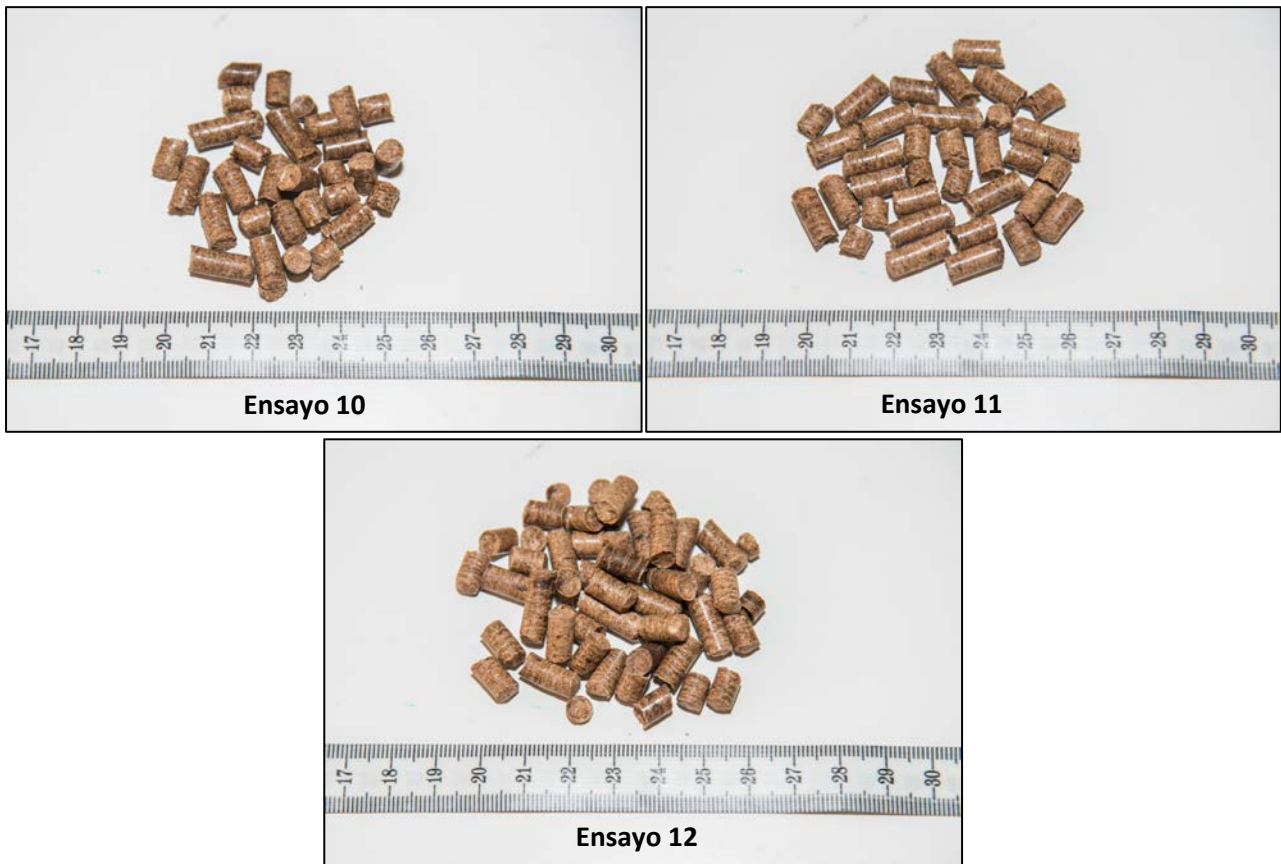


Figura 4.6 Fotografías ensayos 10 a 12 de la sesión uno.

4.3.1.1 Humedad

La humedad es un parámetro determinante en la calidad de los pellets ya que un contenido elevado puede provocar problemas de densidad y un contenido inferior a un límite, impedir el densificado propiamente dicho.

El método de análisis de la humedad para los productos va a ser exactamente la misma que para la materia prima. Se aplicará, pues, la norma UNE-CEN/TS 14774-2 EX [39], tal y como se menciona en el Apartado 3.3.1 del presente proyecto. Los valores de humedad para cada uno de los ensayos quedan descritos en la Tabla 4.8.

Tabla 4.8 Valores de humedad obtenidos de los ensayos de la sesión uno

Ensayo	Humedad (% base húmeda)
1	
2	7,72
3	9,09
4	8,03
5	9,86
6	8,65
7	7,49
8	10,51
9	11,56
10	11,33

Ensayo	Humedad (% base húmeda)
11	10,60
12	9,29

Cómo se puede observar tanto en la Tabla 4.8 como en la Figura 4.7, todos los valores de humedad quedan por debajo de la humedad propia del residuo, en este caso, 15,08% de humedad en base húmeda. Esto indica que, aún con leves adiciones de humedad, el proceso productivo disminuye el contenido de humedad.

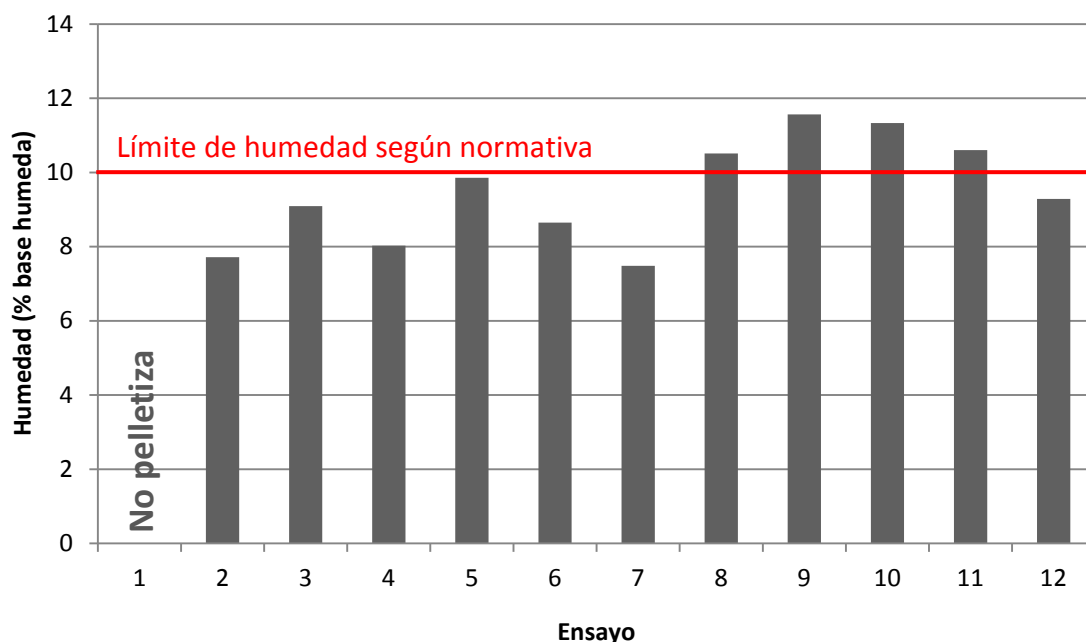


Figura 4.7 Humedad para los ensayos de la sesión uno.

Tal y cómo se aprecia en la Figura 4.7, el límite de humedad establecido en la normativa es como máximo del 10% en base húmeda, por lo tanto los ensayos 8, 9, 10 y 11 quedan por encima de este valor. Estos corresponden a los ensayos con regulación en caudal de humectación del 10%.

4.3.1.2 Densidad aparente

La densidad aparente es una de las características principales para hacer que los pellets sean competitivos en el mercado. La normativa no establece unos valores mínimos de densidad aparente pero, un valor elevado es interesante para la competitividad.

Un valor excesivo de densidad aparente puede presentar problemas en la longitud de los pellets. Así mismo, un valor relativamente pequeño puede venir provocado por valores elevados de humedad.

Para determinar la densidad aparente se seguirá el criterio de la norma UNE-CEN/TS 15103 EX [40]. Los valores de densidad aparente para cada uno de los ensayos quedan recogidos en la Tabla 4.9.

Tabla 4.9 Valores de densidad obtenidos de los ensayos de la sesión uno

Ensayo	Densidad (kg/m ³)
1	No pelletiza
2	761,50
3	686,03
4	724,23
5	677,20
6	733,43
7	674,59
8	750,98
9	698,78
10	674,45
11	740,48
12	780,33

El incremento de densidad del residuo al producto resulta evidente, tal y como se muestra en la Figura 4.8.

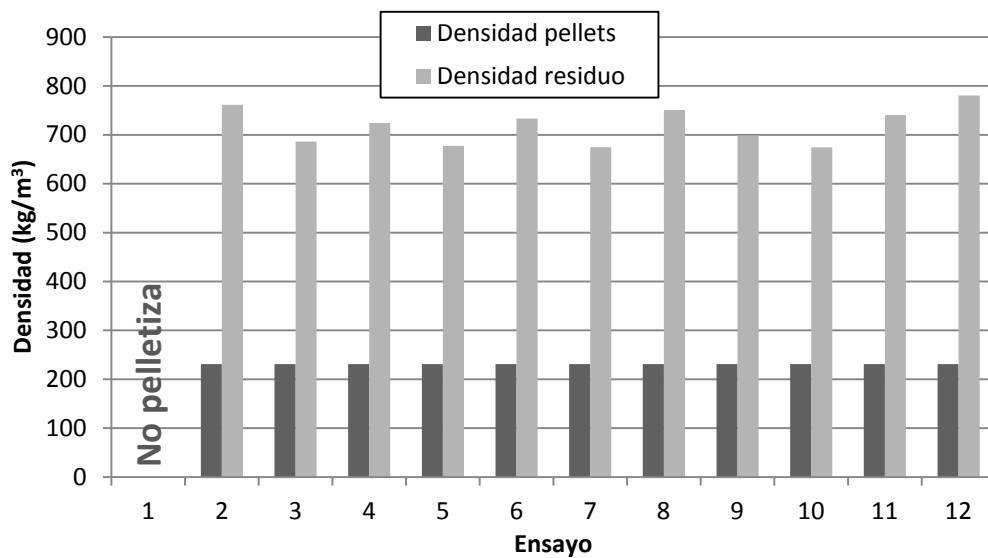


Figura 4.8 Comparativa densidad residuo/densidad productos.

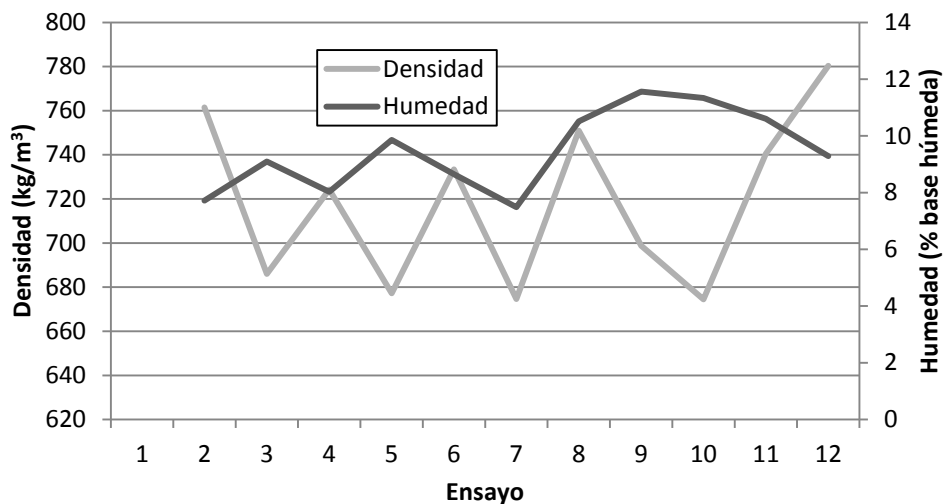


Figura 4.9 Comparativa Densidad/Humedad de los productos del ensayo uno.

Si se realiza una comparación de la densidad y la humedad, Figura 4.9, para valores elevados de humedad la densidad cae, excepto para los ensayos 7 y 8, dónde se aprecia una discrepancia, probablemente debida a la heterogeneidad de la biomasa y sus densificados. Para los demás casos, se cumple el aumento de densidad al disminuir la humedad.

4.3.1.3 Dimensiones

Las dimensiones de los pellets a evaluar son el diámetro y la longitud. El diámetro es una característica fija para todos los pellets y es directamente dependiente del tamaño de los orificios de la matriz, en este caso, 6mm.

Las longitudes de cada uno de los ensayos para esta primera sesión se recogen en la Tabla 4.10.

Tabla 4.10 Valores de longitud obtenidos de los ensayos de la sesión uno.

Ensayo	Longitud promedio (mm)
1	No pelletiza
2	6,82
3	11,45
4	11,04
5	9,76
6	10,75
7	9,06
8	14,10
9	15,49
10	12,63
11	13,69
12	13,82

En la Figura 4.10 se muestra la relación entre la longitud del caudal másico. Como puede observarse, las longitudes aumentan al aumentar el caudal hasta que, llega a un máximo, en el entorno de regulación 25% de caudal másico, disminuyendo para caudales mayores.

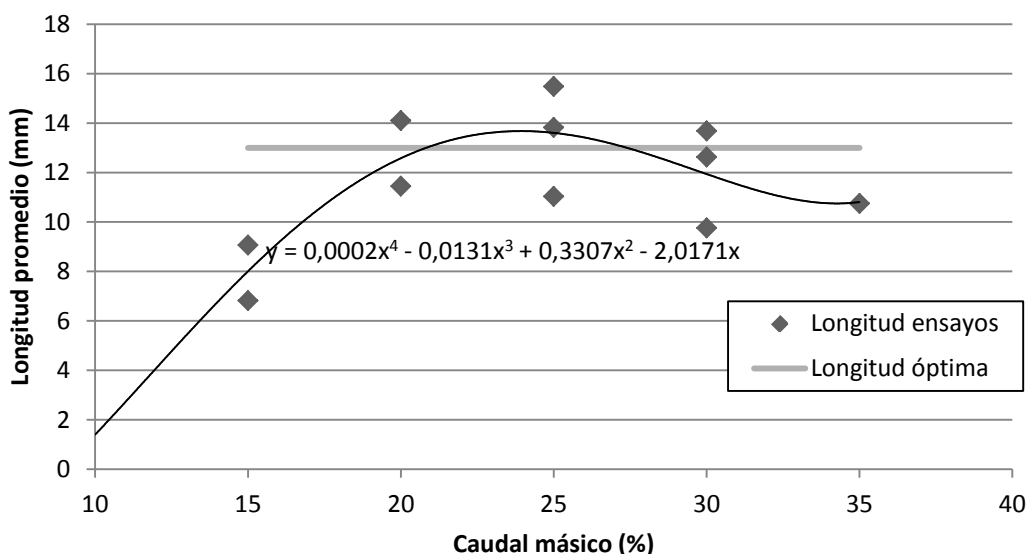


Figura 4.10 Longitud en función del caudal en los productos del ensayo uno.

La normativa establece que la longitud de los pellets debe oscilar entre los 3,5 y los 40 mm de longitud. Obviamente, todos los pellets fabricados quedan en este límite pero, dada la influencia de la longitud en la densidad aparente, establecer una longitud óptima, ni muy pequeña ni muy elevada, controlada por el caudal másico, permitirá obtener un valor de longitud óptimo.

De esta manera, la longitud óptima para los pellets estará por encima de los 10 mm de manera que, no sean excesivamente largos, disminuyendo su densidad aparente, ni excesivamente cortos, por los posibles problemas de compactación. Se establece una longitud promedio óptima en los 13mm. Esta es proporcionada por un caudal másico con la regulación del 25% de apertura de compuerta. Esta será pues, la regulación que se utilizará en los futuros ensayos de la sesión dos.

4.3.1.4 Durabilidad mecánica

Para que el producto final sea realmente satisfactorio para los consumidores, una buena durabilidad mecánica que garantice su buen estado resulta necesaria. Los resultados de durabilidad mecánica se obtienen a partir de la norma UNE-CEN/TS 15210-1 EX [45], basada en el método ASABE S269.4 [46] sobre los ensayos realizados se recogen en la Tabla 4.11 y Figura 4.11.

Tabla 4.11 Valores de durabilidad obtenidos de los ensayos de la sesión uno

Ensayo	Durabilidad (%)
1	No pelletiza
2	94,06
3	91,17
4	90,34
5	92,64
6	92,67
7	91,75
8	96,00
9	96,09
10	95,26
11	96,31
12	97,36

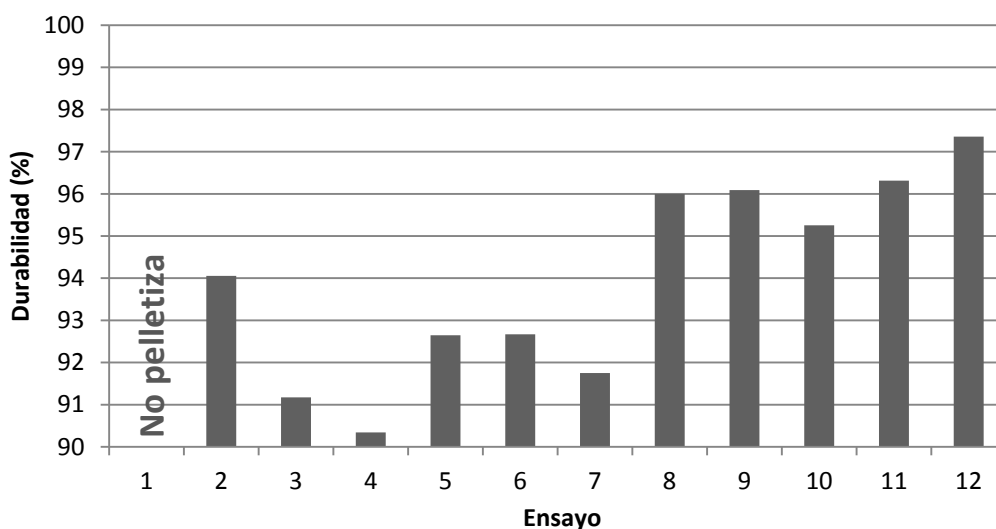


Figura 4.11 Durabilidad de los ensayos realizados para la sesión uno.

La normativa establece un mínimo de durabilidad en para la certificación de la calidad de los pellets, tal y como se expuso en el 2.3.3.3, oscilando entre el 96 y el 100%. Para pellets de uso no industrial, este valor debe ser siempre superior al 97,5% para las clases A1 y A2 y superior al 96,5% para la clase B [11]. Para nuestros ensayos, tan solo el ensayo 12 entraría dentro de estos parámetros.

Así mismo, para uso industrial, la durabilidad se fija, para clase I1 en superiores al 97,5%, para clase I2, en superiores al 97% y para clase I3 en superiores al 96, 5% [11]. Al igual que para uso no industrial, tan solo el ensayo número 12 entraría en este límite.

Los demás, pese a poseer un valor de durabilidad elevado, superiores al 90%, no cumplen con el mínimo exigido de calidad.

4.3.1.5 Resistencia a la compresión

En la Tabla 4.12 y Figura 4.12 se expresan los valores de resistencia a compresión de los pellets obtenidos de la fabricación en la sesión uno.

Tabla 4.12 Valores de resistencia a la compresión obtenidos de los ensayos de la sesión uno

Prueba	Resistencia (kg)
1	No pelletiza
2	13,05
3	14,37
4	16,30
5	11,86
6	17,50
7	20,63
8	16,27
9	15,68
10	14,25
11	17,21
12	18,08

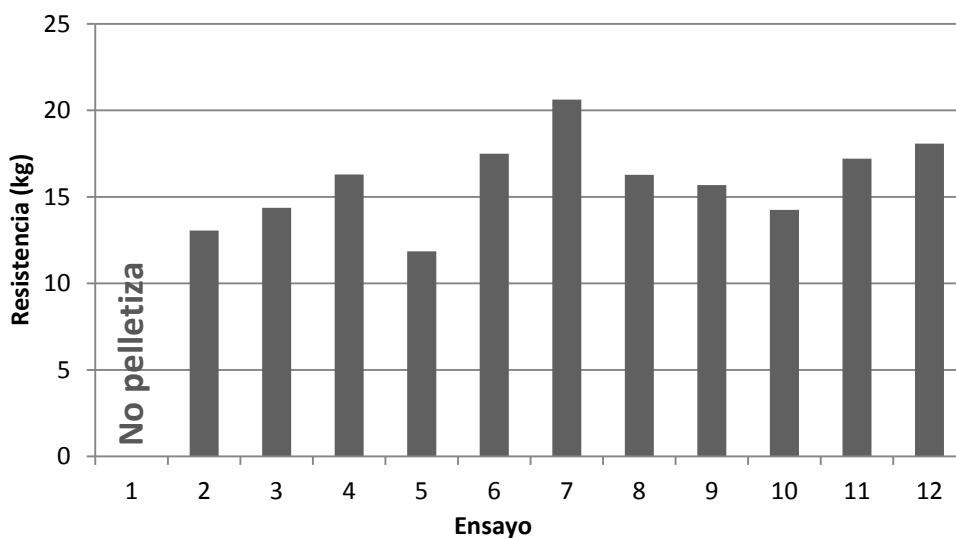


Figura 4.12 Resistencia a la compresión de los ensayos de la sesión uno.

El valor superior de dureza lo establece el ensayo número 7 con 20,62 kg, que comparado con los valores para pellets de rebollo (28,1 kg), orujo de aceituna (15,2 kg), orujo de uva (13,6 kg) y polvo de corcho (13,7 kg)[22], resulta un valor en el entorno de los pellets. Este valor de resistencia probablemente venga debido a la adición de agua producida durante el densificado de esta muestra.

La normativa que se viene aplicando en la extensión de este proyecto no hace referencia a esta característica.

4.3.2 Sesión dos. Búsqueda del pellet mecánicamente óptimo

Tras el establecimiento de la regulación del caudal másico anteriormente expuesta, la caracterización de los densificados de la sesión dos, quedarán expuestos en los siguientes apartados.



Figura 4.13 Fotografías ensayos 1 a 6 de la sesión dos.

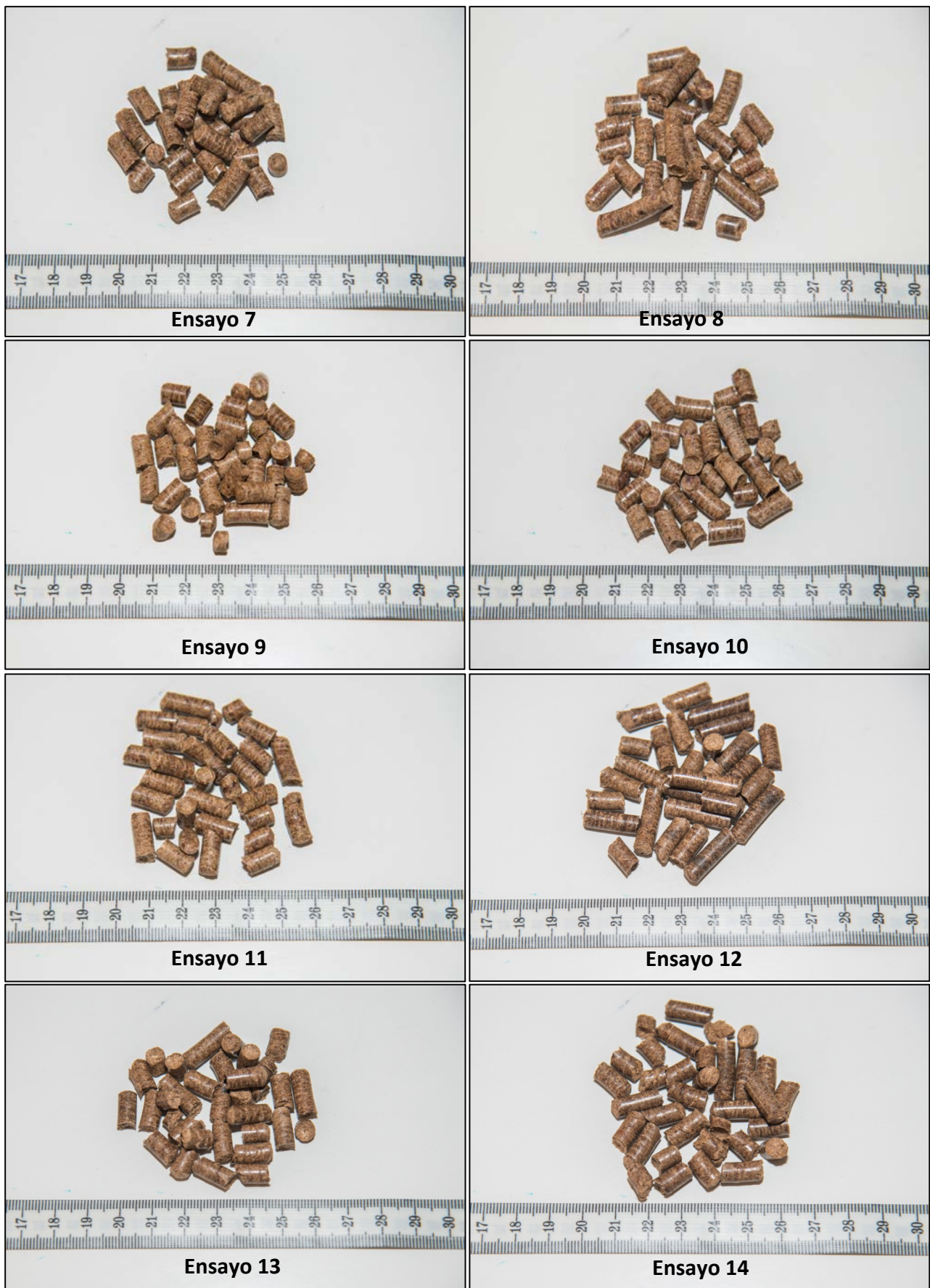


Figura 4.14 Fotografías ensayos 7 a 14 de la sesión dos.

4.3.2.1 Humedad

Para la obtención de la humedad se aplicará la norma UNE-CEN/TS 14774-2 EX [39], tal y como se menciona en el Apartado 3.3.1 del presente proyecto. Los valores de humedad para los ensayos de la sesión dos se exponen en la Tabla 4.13 y Figura 4.15.

Tabla 4.13 Valores de humedad obtenidos para los ensayos de la sesión dos

Ensayo	Humedad (% base húmeda)
1	8,62
2	7,90
3	9,01
4	9,72
5	6,87
6	6,84
7	10,13
8	11,60
9	6,70
10	8,71
11	10,39
12	11,76
13	12,78
14	12,47

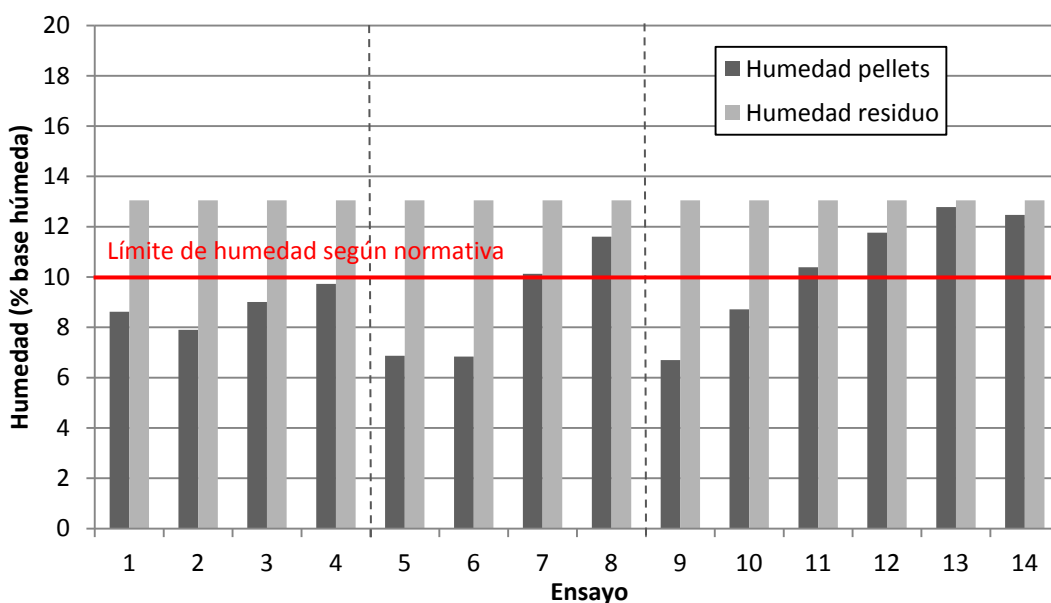


Figura 4.15 Humedad para los ensayos de la sesión dos.

Como puede observarse, para todos los ensayos con 20 Nm de apriete para la regulación de presión de rodillos, se obtienen valores de humedad inferiores al límite normativo, cosa que no ocurre para los ensayos de 30 Nm. En estos, para valores inferiores al 10% de regulación de humedad añadida, la humedad se reduce respecto a la humedad del residuo pero, al incrementarse la humedad al 20% de regulación, el densificado aumenta su humedad por encima de la humedad máxima permitida.

Para el caso de los ensayos de 40 Nm, para aportes inferiores al 20% de caudal de humectación, se mantiene la humedad del producto dentro de los límites normativos, pero al llegar al 20% de humedad, y siguientes regulaciones, la humedad del producto se incrementa hasta casi alcanzar los valores de humedad del residuo, sobrepasando los máximos establecidos en la normativa.

En la Figura 4.16 se observa cómo, para cada una de las regulaciones de par de apriete, un aumento de la regulación de caudal de humectación aumenta la humedad del producto, hasta valores superiores al máximo establecido por la normativa.

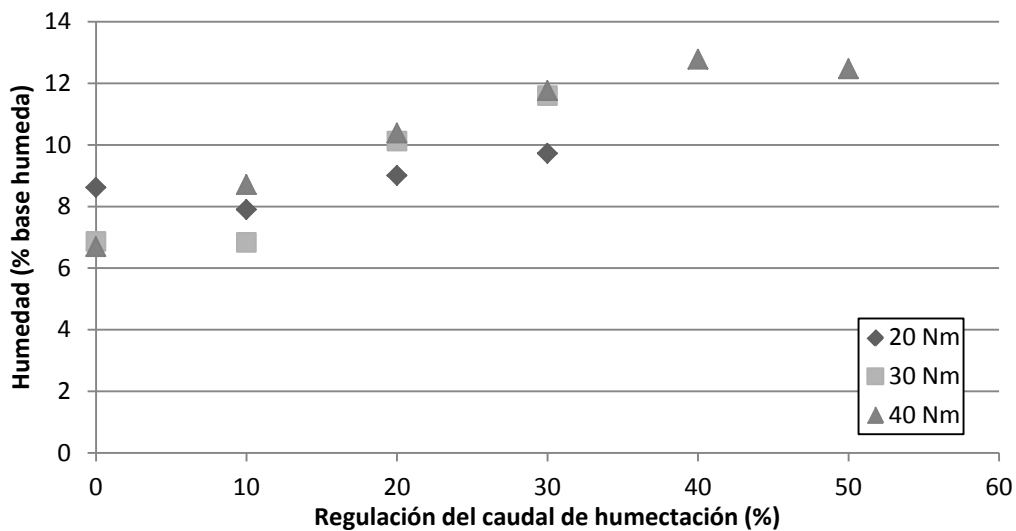


Figura 4.16 Representación regulación caudal y humedad de los productos de la sesión dos.

4.3.2.2 Densidad aparente

Los resultados de densidad aparente para los ensayos de la sesión dos son los expresados en la Tabla 4.14 y Figura 4.17, obtenidos tal y como se expuso en el Apartado 3.2.2 aplicando la norma UNE-CEN/TS 15103 EX [40].

Tabla 4.14 Valores de densidad aparente para los ensayos de la sesión dos

Ensayo	Densidad (kg/m ³)
1	792,93
2	789,15
3	780,30
4	759,60
5	799,98
6	766,18
7	755,45
8	724,40
9	789,75
10	752,85
11	745,35
12	707,35
13	669,08
14	666,00

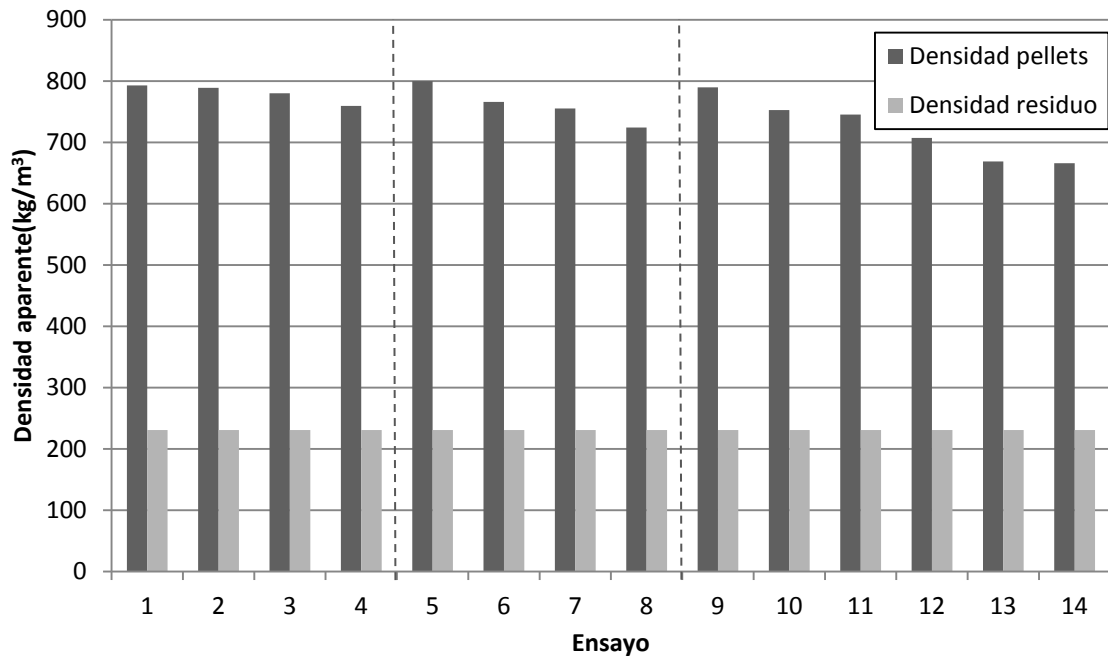


Figura 4.17 Comparativa densidad de pellets y densidad del residuo para los ensayos de la sesión dos.

Como era de esperar, los valores de densidad aparente se triplican o incluso más para algunos de los ensayos. La mayor densidad aparente la se obtiene para el ensayo 5, a 30 Nm de par de regulación de la presión de los rodillos y sin adición de humedad. El peor resultado se obtiene para 40 Nm de par de regulación de presión de rodillos y 50% de regulación del caudal de humectación.

Una comparativa de la densidad frente a la humedad, Figura 4.18, deja claro que, a mayor aporte de humedad, se produce un descenso de la densidad aparente de los pellets para cada una de las regulaciones de presión de rodillos estudiadas. Cabe destacar que, cuanto mayor es la presión que ejercen los rodillos, menor es la densidad aparente de los pellets.

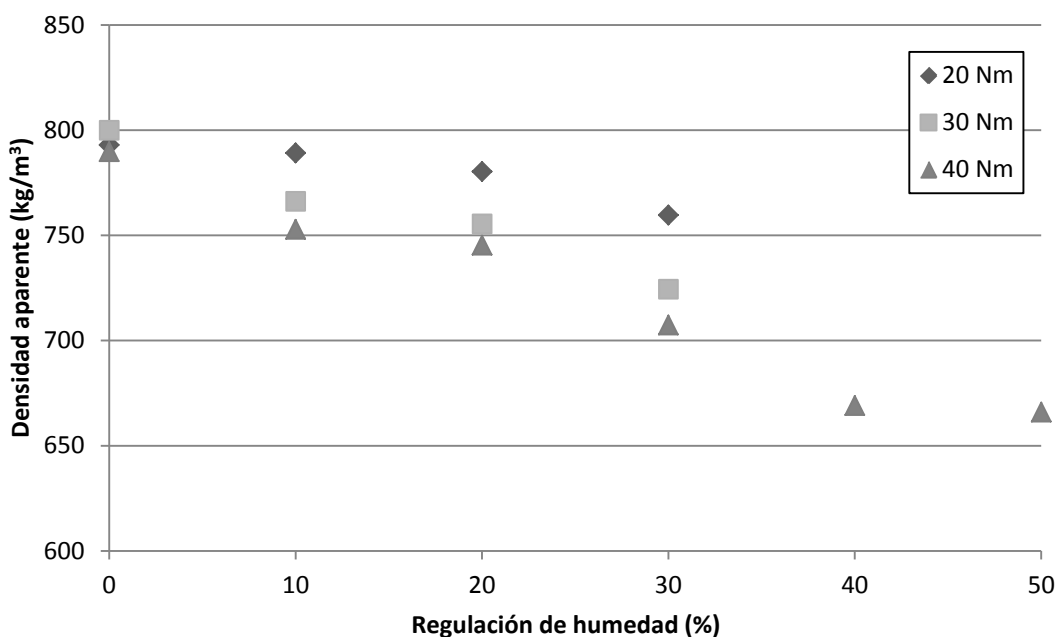


Figura 4.18 Comparativa densidad aparente frente al aporte de humedad para los ensayos de la sesión dos.

Como ya fue mencionado en el 4.3.1.1, el aumento del caudal de humectación produce un aumento en la humedad de los pellets y, esta humedad, reduce la densidad de estos tal y como se muestra en la Figura 4.19, dónde se observa la comparación entre humedad y densidad aparente de los ensayos.

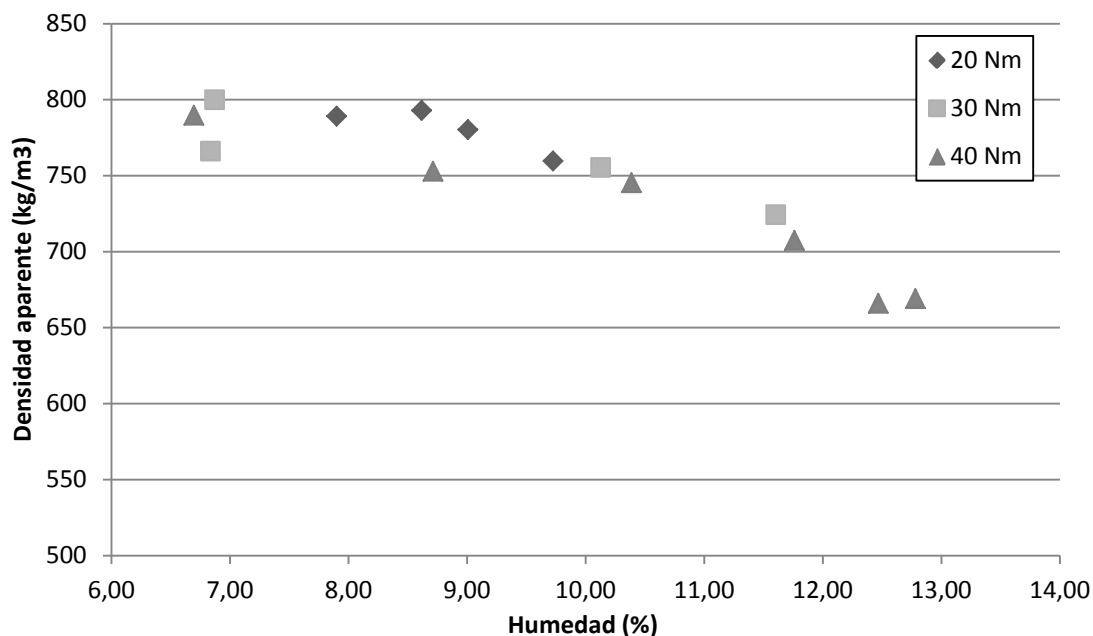


Figura 4.19 Comparativa humedad de los ensayos/densidad aparente de los ensayos de la sesión dos.

4.3.2.3 Dimensiones

La Tabla 4.15 expresa los valores de longitud promedio obtenidos en los ensayos de la sesión dos.

Tabla 4.15 Valores de longitud promedio obtenidos para los ensayos de la sesión dos

Ensayo	Longitud promedio (mm)
1	12,37
2	13,46
3	15,55
4	14,81
5	10,18
6	9,73
7	14,28
8	15,51
9	8,86
10	11,06
11	15,33
12	17,32
13	13,84
14	10,91

Como fue mencionado en el Apartado 4.3.1.3, la longitud de los pellets queda fácilmente dentro de los valores de la normativa con una regulación adecuada del caudal másico que se introduce en el equipo.

Si se realiza una comparativa de cómo afecta a la longitud promedio la humedad, Figura 4.20, se produce un aumento de la longitud de los pellets para regulaciones inferiores al 30%, para regulaciones superiores, el valor de la longitud cae, como se aprecia en los ensayos a 40 Nm de regulación de presión de rodillos.

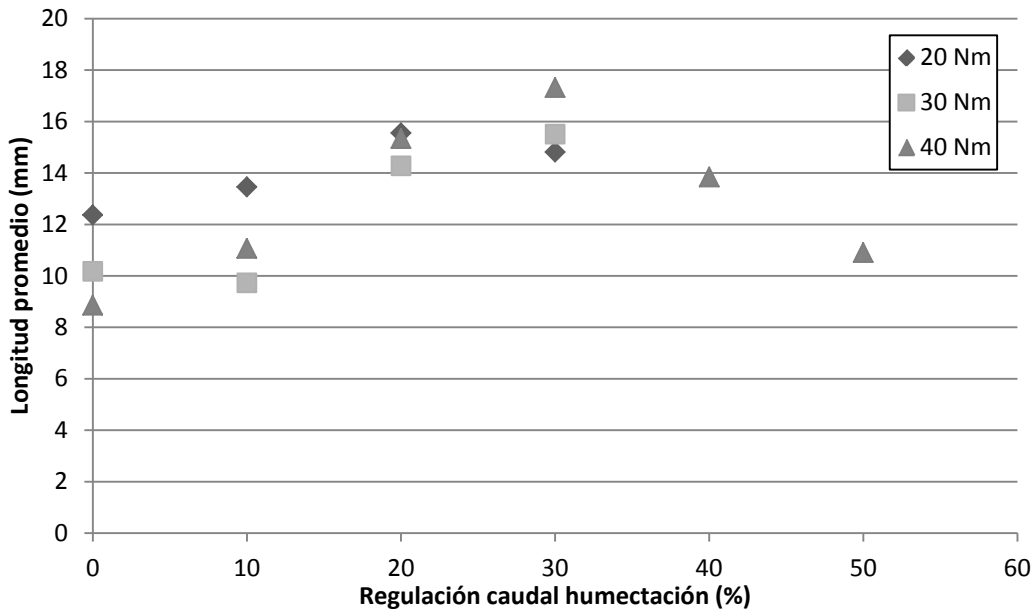


Figura 4.20 Comparativa de longitud promedio frente a la regulación del caudal de humectación para los ensayos de la sesión dos.

Si se realiza una comparativa de la densidad aparente de los pellets y su longitud, Figura 4.21, se observa como para valores superiores de longitud, los valores de densidad aparente son inferiores que para valores menores de longitud. Esto se debe a la capacidad de los pellets de menor tamaño a llenar los huecos del recipiente de medición de densidad, provocando valores superiores de densidad aparente.

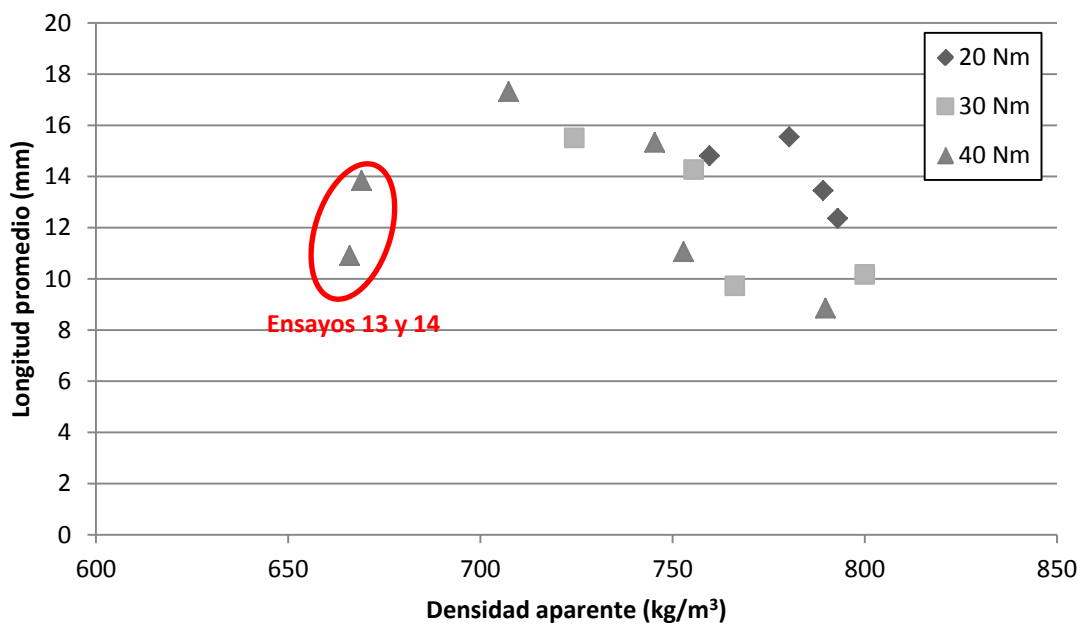


Figura 4.21 Comparativa densidad aparente frente a longitud promedio para los ensayos de la sesión dos.

Hay dos excepciones en el razonamiento expuesto anteriormente, los ensayos 13 y 14, en los que con una longitud inferior, poseen una densidad aparente también baja. Este resultado proviene de la combinación de pequeña longitud con una presencia de humedad elevada, generando este resultado.

4.3.2.4 Durabilidad mecánica

El establecimiento de durabilidad mecánica se realizó con la norma UNE-CEN/TS 15103 EX [40]. Los resultados obtenidos para los pellets de la sesión dos se pueden ver en la Tabla 4.16 y Figura 4.22.

Tabla 4.16 Valores de durabilidad obtenidos de los ensayos de la sesión dos

Ensayo	Durabilidad (%)
1	97,13
2	96,67
3	96,87
4	95,89
5	94,84
6	95,51
7	96,78
8	96,41
9	95,08
10	96,26
11	97,79
12	95,27
13	96,59
14	96,44

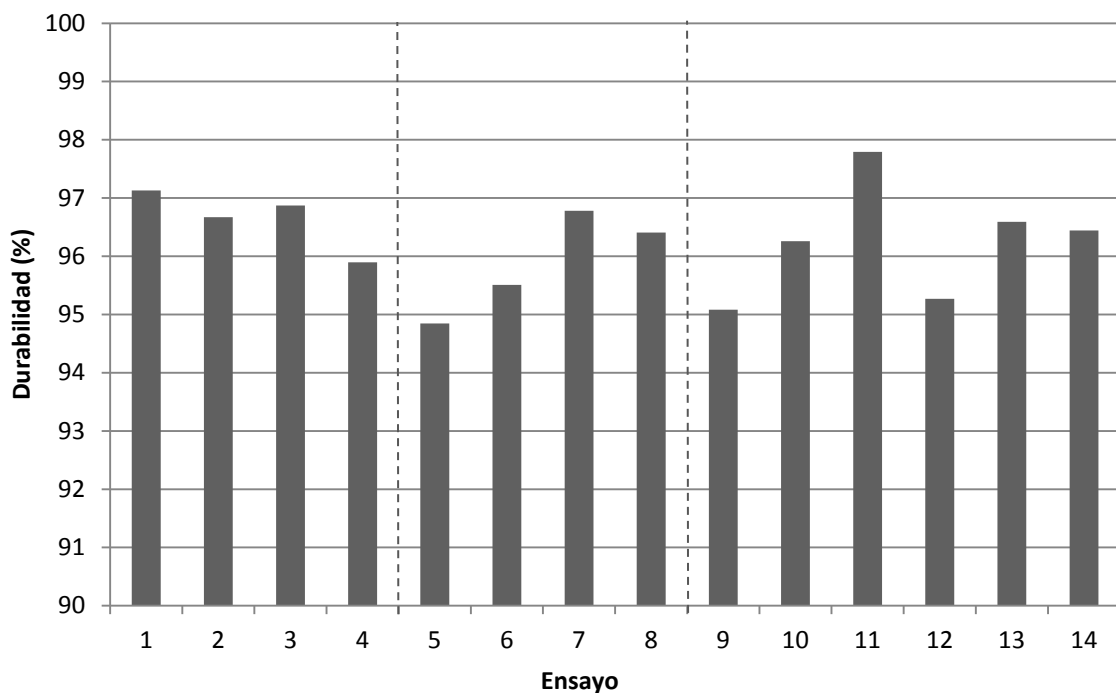


Figura 4.22 Durabilidad de los ensayos realizados para la sesión dos.

La normativa establece un mínimo de durabilidad en para la certificación de la calidad de los pellets, tal y como se expuso en el 2.3.3.3, oscilando entre el 96 y el 100%. Para pellets de uso no industrial, este valor debe ser siempre superior al 97,5% para las clases A1 y A2 y superior al 96,5% para la clase B [11]. Para nuestros ensayos, tan solo el ensayo 11, entraría dentro de estos parámetros para una calidad de A1 o A2, en función de otras características. Así mismo, los ensayos 1, 2, 3, 7 y 13, entran dentro de los mínimos establecidos para calidad B.

Para uso industrial, la durabilidad se fija, para clase I1 en superiores al 97,5%, para clase I2, en superiores al 97% y para clase I3 en superiores al 96, 5% [11]. Al igual que para uso no industrial, tan solo el ensayo número 11 entraría en este límite para clasificarlo como I1, el ensayo número 1 para I2 y los ensayos 2, 3, 7 y 13 para calidad I3.

Los demás ensayos, pese a poseer valores de durabilidad superiores al 95%, no entrarían dentro de los estándares de calidad a los que hace referencia la norma.

Si se realiza una comparación entre la regulación del caudal de humectación y su durabilidad se obtiene la Figura 4.23, dónde se presentan los valores de humedad y durabilidad para los ensayos de cada regulación de presión de rodillos.

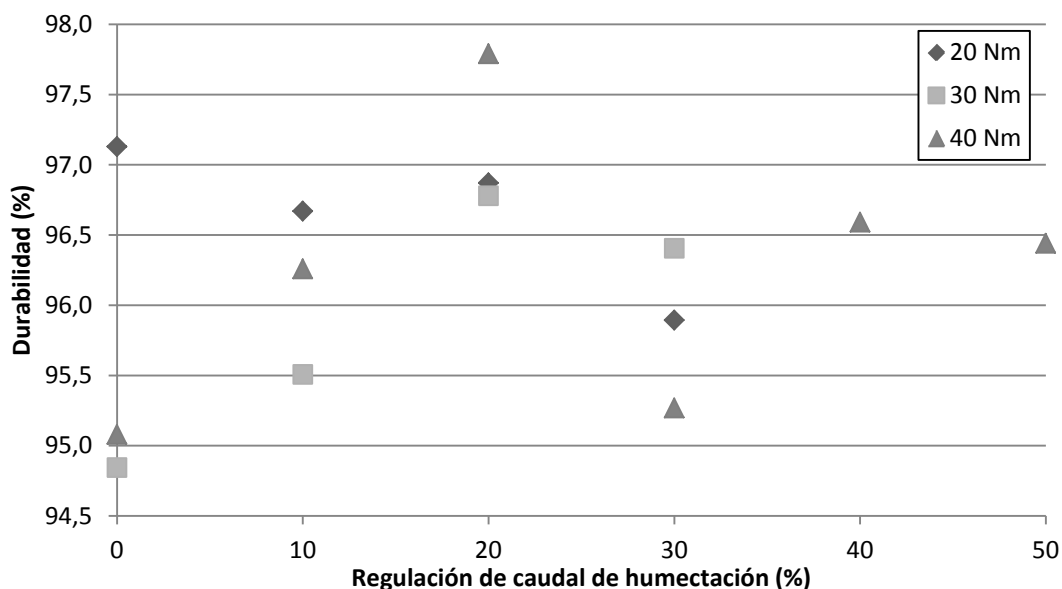


Figura 4.23 Grafico humedad añadida/durabilidad de los pellets de la sesión dos.

En esta figura se puede observar cómo, excepto para la regulación de 20 Nm con 0% de caudal de humectación, los valores de durabilidad se incrementan con el incremento de caudal de humectación hasta llegar al 30% dónde estos valores disminuyen.

El valor de durabilidad del ensayo 1, probablemente de ese resultado por la posible heterogeneidad de la biomasa. Una porción de esta que tuviese un mayor contenido de humedad podría afectar fácilmente al resultado y proporcionar un valor discordante como este.

Para la regulación de 40 Nm, se observan como los ensayos 13 y 14, cuya regulación de caudal de humectación es superior al 30% pero que proporcionan un valor de durabilidad entorno al 96,5%.

4.3.2.5 Resistencia a la compresión

La Tabla 4.17 y Figura 4.24 muestran los valores obtenidos para los pellets de la sesión dos.

Tabla 4.17 Valores de resistencia a la compresión obtenidos de los ensayos de la sesión dos

Ensayo	Resistencia (kg)
1	21,93
2	23,08
3	25,33
4	24,91
5	18,80
6	18,69
7	20,65
8	23,53
9	18,11
10	21,80
11	26,09
12	27,87
13	22,58
14	18,22

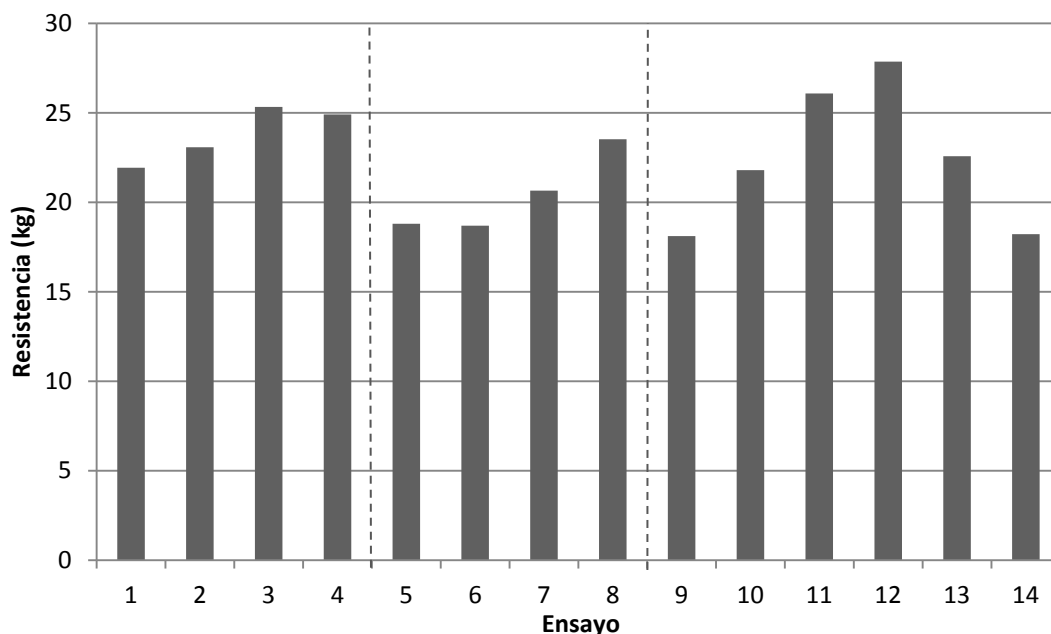


Figura 4.24 Resistencia a la compresión de los ensayos de la sesión dos.

Si se comparan los resultados, al igual que en el Apartado 4.3.1.5, los ensayos están muy por encima de los valores de resistencia para el orujo de aceituna (15,2 kg), orujo de uva (13,6 kg) y polvo de corcho (13,7 kg)[22].

Si se observan los resultados con la resistencia a compresión de los pellets de rebollo (28,1 kg) [22], los valores de resistencia de nuestros ensayos se sitúan en su entorno.

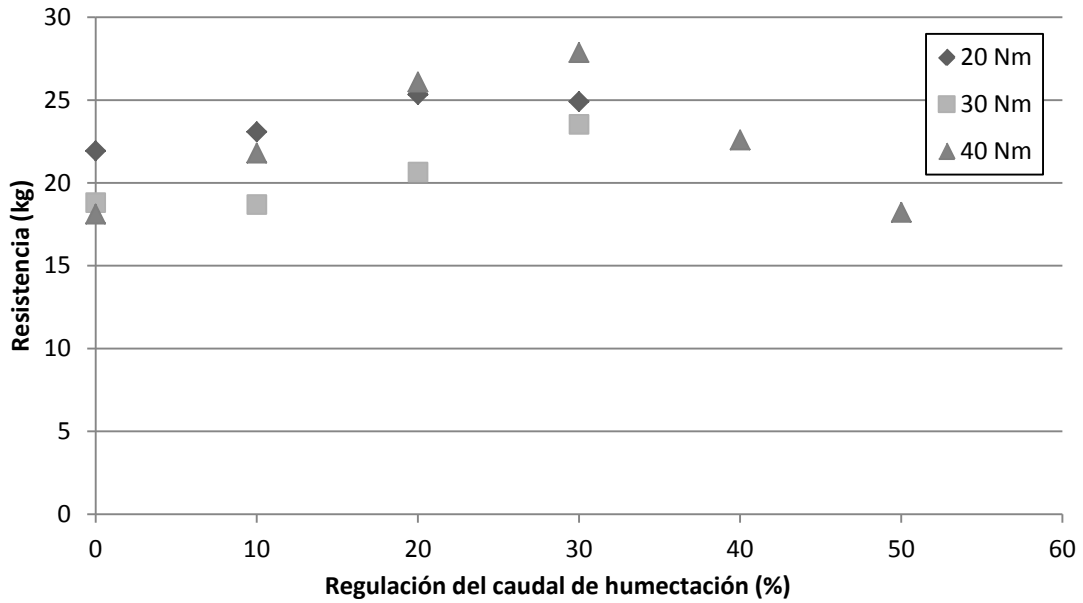


Figura 4.25 Comparativa entre caudal de humectación y resistencia de los pellets de la sesión dos.

Como puede observarse en la Figura 4.25, cuando se aumenta el caudal de humectación, aumenta la resistencia a compresión, excepto para los ensayos 13 y 14, en los cuales, con un caudal de humectación superior al 30%, la resistencia a compresión se reduce drásticamente. Es decir, para valores elevados de caudal de humectación, la resistencia a compresión se reduce a valores cercanos a los de regulación de caudal de humectación nula.

5 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

Una vez presentados los análisis y caracterización tanto del residuo como de los productos en el capítulo anterior y habiendo analizado la influencia de las variables a controlar obtener conclusiones a estos análisis es el objetivo final.

Se procederá a obtener conclusiones en función de la variable en concreto.

- **Caudal de alimentación.** La influencia del caudal de alimentación en el pellet final reside en la longitud de estos. Un caudal de alimentación pequeño no permite la pelletización, como ocurre en el ensayo uno de la sesión uno.

Aumentos de caudal hasta la regulación del 25% producen aumentos en la longitud de los pellets. Valores superiores generan un descenso en la longitud de estos. Por lo tanto, establecer qué la regulación óptima del caudal de alimentación es el 25% parece adecuado, es decir, un caudal de 17,125 g/s de serrín de *Pinus pinaster* producirá los pellets de mayor longitud.

- **Caudal de humectación.** La regulación del caudal de humectación tiene diferentes efectos, desde un aumento de la humedad de los pellets, que afecta a los niveles de densidad aparente, hasta aumentos en la longitud y resistencia a la compresión para valores inferiores al 30% de regulación, disminuyendo ambas características para valores superiores.

Así mismo, la durabilidad mecánica de los pellets aumenta para valores de regulación inferiores al 20%, reduciéndose para valores superiores.

Queda claro, pues, que los valores óptimos de regulación de caudal de humectación se establecen entre el 20 y 30% de regulación, que corresponden a la horquilla de 0,627 a 0,872 cm³/s de agua.

- **Presión de rodillos.** Los valores de humedad son superiores para las regulaciones con mayor presión cuando existe aporte de humedad al proceso por parte de la bomba de humectación, como se observa en Figura 4.16.

En cuanto en tanto a la densidad, valores superiores de regulación de presión de los rodillos, generan valores inferiores de densidad, tal y como se observa en la Figura 4.18. Ambos resultados son coherentes ya que, a valores superiores de humedad, se obtienen valores inferiores de densidad.

En cuanto en tanto a las demás características, los resultados obtenidos no alumbran luz para la obtención de conclusiones al respecto.

Líneas futuras de investigación podrían ser las siguientes:

- Desarrollo de más análisis para la evaluación de cómo afecta realmente la presión de los rodillos al producto, con mayor diferencia entre las regulaciones para intentar obtener conclusiones al respecto.
- Realización de los mismos análisis aquí expuestos con otra materia prima, para confirmar estos resultados y permitir su generalización.

- Realización de análisis térmicos del proceso para poder evaluar la influencia de la temperatura de la matriz en la calidad del pelletizado, instalando sensores en el interior de la prensa.
- Estudio del enfriamiento brusco del pellet una vez finalizada su compactación para observar cómo afecta este a las calidades de este.

6 BIBLIOGRAFÍA

- [1] Diccionario Real Academia Española de la Lengua. <<http://lema.rae.es/drae/?val=biomasa>>. Consultado el 28 de noviembre de 2014.
- [2] EFIMEX. *Manual: La biomasa como fuente de energía*. Badajoz. 2010.
- [3] BioPlat. *Pélets de biomasa en España*. Ministerio de Economía y Competitividad. Gobierno de España. 2011.
- [4] Agencia Internacional de la Energía. *Situación energética mundial 2010*.
- [5] IDAE. *Guía técnica de Instalaciones de Biomasa Térmica en edificios*. Madrid, Mayo 2009.
- [6] Energías Renovables. *Extremadura 2020: 2.000 calderas de biomasa, 100 redes térmicas y 30 plantas de biogás*. <<http://www.energias-renovables.com/articulo/extremadura-2020-2-000-calderas-de-biomasa-20131128>>. Consultado 6 Enero 2015.
- [7] AGENEX. *Estudio del estado actual de la biomasa en Extremadura*. 2011.
- [8] Proyecto PELETIN. *Desarrollo de un pélet para aplicaciones industriales*. <<http://www.peletin.es/>>.
- [9] Informe. *Wood Pellets- Becoming a Global Commodity*. PÖYRY 2011.
- [10] APROPELLETS. Información de la Asociación Productores de Pellets de Madera del Estado Español. 2010.
- [11] UNE EN ISO 17225-2. *Biocombustibles sólidos. Especificaciones y clases de pélets. Parte 2: Clases de pélets de madera*. AENOR 2014
- [12] Sudhagar Mani, Lope G. Tabil, Shahab Sokhansanj. *Effects of compressive force, particle size and moisture content on mechanical properties of biomass pellets from grasses*. ELSEVIER. 31 Marzo 2006.
- [13] Gustafson AS, Kjelgaard WL. *Hay pellet geometry and stability*. Agricultural Engineering 1963; 44(8): 442–5.
- [14] Rehkugler GE, Buchele WF. *Bio-mechanics of forage wafering*. Transactions of American Society of Agricultural Engineers 1969;12:1–
- [15] Clara Serrano, Esperanza Monedero, Magín Lapuerta, Henar Portero. *Effect of moisture content, particle size and pine addition on quality parameters of barley straw pellets*. ELSEVIER. Diciembre 2010.
- [16] Mahdi Kashaninejad, Lope G. Tabil, Ron Knox. *Effect of compressive load and particle size on compression characteristics of selected varieties of wheat straw grinds*. ELSEVIER. Diciembre 2013.
- [17] Adapa PK, Tabil LG, Schoenau GJ, Opoku A. *Pelleting characteristics of selected biomass with and without steam explosion pretreatment*. Int J Agricul Biol Eng 2010;3(3):62e79.
- [18] Kazuei Ishii, Toru Furuichi. *Influence of moisture content, particle size and forming temperature on productivity and quality of rice straw pellets*. ELSEVIER. Agosto 2014.
- [19] Ayla Uslu, André P.C. Faaij, P.C.A. Bergman. *Pre-treatment technologies and their effect on international bioenergy supply chain logistics*. Techno-economic evaluation of torrefaction, fast pyrolysis and pelletisation. Department of Science, Technology and Society, Copernicus Institute, Utrecht University, Heidelberglaan 2, 3584 CS Utrecht, The Netherlands. Energy Research Centre of the Netherlands (ECN) ECN Biomass, Westerduinweg 3, 1755 ZG Petten, The Netherlands. 26 September 2006
- [20] *La biomasa como fuente de energía*. Proyecto EFIMEX. Fundación para el Desarrollo de la Ciencia y la Tecnología en Extremadura. 2009.
- [21] L. Ortiz. *Procesos de transformación física de la biomasa residual*. 2003.
- [22] J.I. Arranz Barriga. *Análisis del densificado de la combinación de distintos residuos biomásicos*. Universidad de Extremadura. 2011.
- [23] F. Kneule. *El Secado*. Urmo, S.A. de Ediciones (1982).

- [24] S. García. *Centrales Termoeléctricas de Biomasa*. Renovetec. Madrid, 2012.
- [25] R. Jirjis, M. Öhman, J. Vinterbäck, *Pellets quality effects of raw material properties and manufacturing process parameters*. (In Swedish with English summary), Pelletskvalitet - påverkan av råvaruegenskaper och tillverkningsprocess, Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala, Sweden, 20068, Report no 14.
- [26] R. Samuelsson, M. Thyrel, M. Sjöström, T.A. Lestander, *Effect of biomaterial characteristics on pelletizing properties and biofuel pellet quality*. Fuel Processing Technology 90 (2009) 1129–1134.
- [27] Emesico. *Un vistazo a los métodos de almacenamiento de biomasa*. <<http://www.emesico.com/es/blog/2013/04/17/un-vistazo-a-los-metodos-de-almacenamiento-de-biomasa/>>. Consultado el 04/01/2015.
- [28] Smith, W. H. US Patent 233887, 1880.
- [29] Peksa Blanchard, M.; Dolzan, P.; Grassi, A.; Heinimö, J.; Junginger, M.; Ranta, T.; Walter, A. IEA Bioenergy Task 40 Global wood pellets markets and industry: policy drivers, market status and raw material potential. International Energy Agency (IEA): Paris, 2007
- [30] R. Agudo Moreno. *Empacado discontinuo a pie de tocón de residuos selvícolas: gestión integral de biomasa forestal*. Tesis Doctoral. Universidad de Córdoba, Córdoba, Marzo 2010.
- [31] José María de Juana Sardón. *Energías renovables para el desarrollo*. Paraninfo. 2003.
- [32] Wikipedia España. *Briqueta*. <<http://es.wikipedia.org/wiki/Briqueta>> Consultado el día 11/12/2014.
- [33] N.P.K. Nielsen, D.J. Gardner, T. Poulsen, C. Felby. Importance of temperature, moisture content, and species for the conversion process of wood into fuel pellets. Wood Fiber Science 41 (2009) 414-425.
- [34] European Pellet Centre. *Quality standards for pellets in European countries*. <<http://www.pelletcentre.info/cms/site.aspx?p=2550>> .Consultado el día 8/10/2014.
- [35] Agrobyte. R. Rodríguez Soalleiro. *Manual técnico de silvicultura del Pinus pinaster*. <<http://www.agrobyte.com/publicaciones/pino/indice.html>>. Consultado el día 09/10/2014.
- [36] J.I. Arranz Barriga, M.T. Miranda García-Cuevas, I. Montero Puertas, y otros. *Valoración de la producción de biomasa en Extremadura*. Agencia Extremeña de la Energía. 2005.
- [37] E. Granada Álvarez. *Estudio de la influencia de los parámetros humedad, temperatura y presión en el proceso de densificación, mediante autoaglomeración, de biomasa lignocelulósica residual*. Universidad de Vigo. 1999.
- [38] S. van Loo, J. Koppejan. *Handbook of Biomass Combustion and Cofiring*. Twente University Press (2003).
- [39] UNE-CEN/TS 14774-2 EX. *Biocombustibles sólidos. Método para la determinación del contenido de humedad. Método de secado en estufa. Parte 2: Humedad total. Método simplificado*. AENOR. 2007.
- [40] UNE-CEN/TS 15103 EX. *Biocombustibles sólidos. Métodos para la determinación de la densidad aparente de pila*. AENOR. 2007.
- [41] UNE-CEN/TS 15149-2 EX. *Biocombustibles sólidos. Métodos para la determinación de la distribución de tamaño de partícula. Parte 2: Método del tamiz vibrante con apertura de malla inferior o igual a 3,15 mm*. AENOR. 2007.
- [42] UNE-CEN/TS 15148 EX. *Biocombustibles sólidos. Método para la determinación del contenido en materias volátiles*. AENOR. 2008.
- [43] UNE-CEN/TS 14775 EX. *Biocombustibles sólidos. Método para la determinación del contenido en cenizas*. AENOR. 2007.
- [44] UNE-CEN/TS 164001 EX. *Biocombustibles sólidos. Método para la determinación del poder calorífico*. AENOR. 2005.

- [45] UNE-CEN/TS 15210-1 EX. *Biocombustibles sólidos. Métodos para la determinación de la durabilidad mecánica de pélets y briquetas*. AENOR. 2008.
- [46] ASABE Standards. S269.4: *Cubes, pellets, and crumbles – definitions and methods for determining density, durability, and moisture content*. St. Joseph, MI: ASABE; 2003.
- [47] Pelletcentre. *Quality standars for pellets in European countries*. <<http://www.pelletcentre.info/cms/site.aspx?p=2550>>
- [48] N. Kaliyan, R. V. Morey. *Factors affecting strength and durability of densified products*. ASABE Annual International Meeting, American Society of Agricultural and Biological Engineers (2006), Portland, Oregon.
- [49] N. P. K. Nielsen, D. J. Gardner, T. Poulsen, C. Felby. *Importance of temperature, moisture content, and species for the conversion process of wood residues into fuel pellets*. Wood and Fiber Science 41(4) (2009) 414-425.
- [50] W. Stelte, J. K. Holm, A. R. Sanadi, S. Barsberg, J. Ahrenfeldt, U. B. Henriksen. *A study of bonding and failure mechanisms in fuel pellets from different biomass resources*. Biomass and Bioenergy 35 (2011) 910-918
- [51] MacBain R. *Pelleting animal feed*. Chicago, IL: American Feed Manufacturing Association; 1966.
- [52] C. Y. Yin. *Prediction of higher heating values of biomass from proximate and ultimate analyses*. Fuel 90 (2011) 1128-1132.
- [53] I. Mediavilla, M.J. Fernández, L.S. Esteban. *Optimization of pelletisation and combustión in a boiler of 17.5 kW_{th} for vine shoots and industrial cork residue*.
- [54] C. S. Chou, S. H. Lin, W. C. Lu. *Preparation and characterization of solid biomass fuel made from rice straw and rice bran*. Fuel Processing Technology 90 (2009) 980-987.
- [55] K. Szemmelveisz, I. Szűcs, Á.B. Palotás, L. Winkler, E.G. Eddings. *Examination of the combustion conditions of herbaceous biomass*. Fuel Processing Technology 90 (2009) 839-847.
- [56] B. Jenkins, L. Baxter, T. Miles Jr, T. Miles. *Combustion properties of biomass*. Fuel Processing Technology 54 (1998) 17-46.