

PROYECTO FIN DE CARRERA

Ingeniería Industrial

Caracterización del producto obtenido en el pretratamiento de molienda de biomasa con molino de martillos bajo diferentes condiciones de operación

Autor: Laura Beltrán Martínez

Director: Miguel Gil Cinca

Ponente: Inmaculada Arauzo Pelet

Curso académico 2010-2011

Julio 2011

Área de Máquinas y Motores Térmicos
Departamento de Ingeniería Mecánica
Centro Politécnico Superior, Universidad de Zaragoza



circe
Centro de Investigación
de Recursos y Consumos
Energéticos

Caracterización del producto obtenido en el pretratamiento de molienda de biomasa con molino de martillos bajo diferentes condiciones de operación

Resumen

El proyecto consta de la realización de una serie de pruebas experimentales donde se obtiene la biomasa molida que es sometida a ensayos, a partir de los cuales se obtienen los datos que van a ser procesados para conseguir la caracterización del material y analizar la influencia de las diferentes condiciones de operación de las pruebas. Todo esto se realiza basado en un estudio teórico y una revisión bibliográfica.

La biomasa en estudio son astillas de chopo y paja de maíz, lo que permite conocer el comportamiento de dos tipos de biomasa diferentes. La biomasa es sometida a un pretratamiento de molienda con molino de martillos para reducir su tamaño. Durante las pruebas se modifican diferentes condiciones de operación de la instalación (velocidad del molino y luz de malla del molino), así como las condiciones de entrada del material (tamaño inicial de las partículas y contenido en humedad). Estas variables proporcionan diferencias en las características granulométricas del producto final. El estudio se realiza mediante el análisis de parámetros característicos que permiten conocer cómo es el producto y por tanto cómo cambia en función de las variables.

La biomasa molida es caracterizada mediante la obtención de propiedades, centrándose en la granulometría del material molido. La distribución de los tamaños de las partículas se obtiene mediante dos métodos: tamizado vibratorio y difractor láser. El método de análisis muestra una significancia mayor o igual que las variables sometidas a estudio, lo que lleva a plantear el método de medición y sus causas como claves para una correcta caracterización del producto final.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN

2. DESCRIPCIÓN DE MATERIAL Y EQUIPOS

2.1 Material

2.2 Instalaciones experimentales

2.2.1 Planta piloto semi-industrial

2.2.2 Laboratorio analítico

3. PRUEBAS EXPERIMENTALES

3.1 Diseño de experimentos

3.2 Caracterización de la biomasa

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1 Análisis de la distribución granulométrica

4.2 Influencia de las variables de estudio

4.2.1 Astillas de chopo

4.2.2 Paja de maíz

4.2.3 Comparativa entre chopo y maíz

4.3 Comparativa de los datos según el método utilizado

4.3.1 Tamizado vibratorio

4.3.2 Difractor láser

5. CONCLUSIONES

6. BIBLIOGRAFÍA

ANEXO I. Equipos de la instalación de la nave

ANEXO II. Distribución granulométrica

ANEXO III. Protocolo de pruebas experimentales, ensayos y análisis de resultados

ANEXO IV. Análisis estadístico

1. INTRODUCCIÓN

El consumo de energía ha aumentado durante los últimos años y actualmente el suministro energético es un problema. Uno de los actuales desafíos es conseguir un suministro estable, económicamente viable, que disminuya la dependencia energética exterior y conseguir todo esto de manera medioambientalmente aceptable, equilibrando la emisión de gases de efecto invernadero. Para ello hay que potenciar el desarrollo de nuevas fuentes de energía que mejoren el uso de los recursos existentes de forma más eficiente y menos perjudicial con el medio ambiente.

Una manera de conseguirlo es la sustitución del uso de recursos fósiles por energías renovables. Se espera que en los próximos años aumenten su participación en la producción energética gracias a su reducción de emisiones contaminantes y su carácter de renovable. Dentro de las energías renovables hay diferentes opciones: eólica, solar, biomasa, hidráulica etc. Este proyecto se va a centrar en la biomasa, una de las energías renovables con mayor potencial y que actualmente ya proporciona el 14% de la energía mundial. Se pronostica que a lo largo del siglo XXI la biomasa llegará a cubrir el 50% de la demanda energética mundial [1,2].

Se considera biomasa al conjunto de materias orgánicas renovables de origen vegetal, animal, o procedentes de la transformación de las mismas. Hay multitud de tipos de biomasa según su procedencia: forestal, agrícola, residuos ganaderos... Toda esta variedad tiene como nexo común el derivar directa o indirectamente del proceso de fotosíntesis. Ésta es la causa de que se presenten de forma periódica e ilimitada en el tiempo, es decir, de forma renovable. La biomasa podrá considerarse una energía renovable siempre que se emplee en cantidades iguales a la producción neta de biomasa del territorio. Las emisiones netas de CO₂ generadas por la combustión de la biomasa se consideran prácticamente neutras, ya que el CO₂ emitido en su combustión es el mismo que el captado por el biocombustible a lo largo de su vida durante la realización de su fotosíntesis [2].

Su utilización presenta múltiples ventajas socio-económicas: disminución de la dependencia energética exterior, distribución geográfica global, creación de empleo, utilización de residuos forestales que mejoren la limpieza y prevención de incendios en los montes son ejemplos de ello. Algunas de las desventajas de este tipo de energía son: su mayor coste de generación y menor rendimiento energético que los combustibles fósiles, los problemas para el transporte y almacenamiento ya que tiene una baja densidad energética y la necesidad de acondicionamiento para su utilización.

Los distintos tipos de biomasa son muy variables en forma, tamaño, poder calorífico, contenido en humedad, composición química etc. Se puede clasificar de la siguiente manera [2]:

- Biomasa natural. Es la que se produce en la naturaleza sin intervención humana.
- Biomasa residual.
 - Seca. Subproductos sólidos no utilizados en las actividades agrícolas, forestales y en procesos de ciertas industrias. Además según su naturaleza se clasifica en semillas, biomasa herbácea, biomasa leñosa...

- Húmeda. Vertidos biodegradables, como aguas residuales urbanas y residuos ganaderos (purines). Tienen alto contenido en humedad.
- Cultivos energéticos. Especies cultivadas con la finalidad de producir biomasa para usos energéticos.

Según el tipo de biomasa se le da un uso diferente. Las dificultades de uso de la biomasa, en especial de la biomasa seca, se deben a la heterogeneidad del material. Para ser utilizada como combustible debe someterse a pretratamientos para conseguir unas ciertas características de humedad y tamaño de partículas. Los pretratamientos son tareas o procesos de acondicionamiento y transformación física o química que se realizan a los recursos biomásicos para que éstos puedan aprovecharse mejor como combustible. Existen básicamente tres tipos de procesos físicos [3]:

- Reducción de tamaño. Su objetivo es disminuir el tamaño de partícula de biomasa. Según el tamaño final deseado se llevan a cabo diferentes operaciones:
 - La trituración consiste en transformar biomasa de grandes dimensiones como troncos, ramas, etc., en piezas más pequeñas.
 - El astillado transforma biomasa de tamaño intermedio (ramas o troncos pequeños) en astillas.
 - En la molienda se produce la rotura del material para que presente la superficie adecuada para los sistemas de conversión en los que se va a utilizar (combustión, gasificación...).
- Secado. Reduce el contenido en humedad del material para aquellas tecnologías en las que se requiere biomasa seca con bajos contenidos en humedad (< 15% base húmeda).
- Densificación. Se realiza cuando se desea obtener combustibles de mayor densidad aparente y por tanto mayor densidad energética. Una posibilidad es la fabricación de pellets o briquetas para facilitar el transporte y manejo.

Todos estos pretratamientos tienen en común un importante consumo de energía, lo que conlleva un coste económico. El objetivo es alcanzar el óptimo entre el incremento de eficiencia en la conversión energética y el coste adicional que conllevan dichos pretratamientos. Por esto, estos procesos necesitan ser caracterizados de forma adecuada para el diseño y estimación de costes de la instalación que usa biomasa como combustible.

De todos ellos se va a estudiar la molienda. Para un correcto diseño de un proceso de molienda se necesita saber el tipo de material con el que se va a trabajar (biomasa herbácea, leñosa...), las características del material bruto (tamaño de partícula, contenido en humedad...) y las características del material molido (distribución granulométrica deseada). Según el material utilizado se selecciona el tipo de molino de los 3 existentes [4]:

- Molino de martillos (figura 1). Tiene un eje sobre el cual van unidos los martillos mediante un buje. Los martillos se despliegan a elevadas velocidades de rotación y son los que producen la rotura al impactar contra la partícula. En general, la cámara de molienda se encuentra rodeada por una malla cuya luz determina el tamaño máximo del producto final.



Figura 1. Molino de martillos

- Molino de cuchillas. Está compuesto por una cámara de molienda rodeada de una malla interna. La cámara de molienda está constituida por un rotor con cuchillas que realizan el corte. Es similar al de martillos, pero con cuchillas.
- Molino de discos. En las superficies de los discos existen unas barras y surcos orientados radialmente que se van estrechando a medida que aumenta la distancia desde el centro hasta la periferia del disco. El material es alimentado desde el centro del disco y es evacuado por la periferia. El tamaño de partícula final depende del espacio entre discos y la velocidad de rotación. La reducción de partícula se produce por compresión y cizalladura.

En este trabajo se pretende avanzar en la caracterización de procesos de molienda en molinos de martillos. Para ello se han realizado una serie de pruebas experimentales con un molino de martillos semi-industrial y el producto final se ha hallado su distribución granulométrica mediante un vibrotamizador y un difractor láser, los equipos más utilizados a nivel industrial. Éste estudio es parte de un proyecto de investigación más amplio que considera también el estudio del consumo energético de la molienda y su interacción con el secado. El objetivo final es realizar un modelo que prediga el consumo energético y la distribución granulométrica en función de las condiciones de operación.

Objetivos del proyecto

El primer objetivo de este proyecto es la caracterización de la biomasa tras su molienda en un molino de martillos. El estudio se ha realizado sobre el material obtenido a partir de astillas de chopo y paja de maíz.

El segundo objetivo es ver cómo influyen diferentes variables de operación y características del material bruto en la distribución granulométrica del material obtenido. En la ejecución de las pruebas se han modificado cuatro variables: humedad y tamaño de entrada, que dependen de las condiciones de entrada del material, y velocidad del molino y tamaño de salida, que son variables de la operación. En este trabajo se estudia la repercusión de cada una de ellas en la distribución granulométrica final del material.

El tercer objetivo de este trabajo es observar las diferencias obtenidas en las distribuciones granulométricas debido a la forma rectangular de las partículas. Se compararán los resultados obtenidos mediante dos métodos diferentes (tamizado vibratorio y difractor láser) y se analizará la causa de estas diferencias.

2. DESCRIPCIÓN DE MATERIAL Y EQUIPOS

2.1 Material

Los recursos biomásicos tienen una gran diversidad físico-química. Esto le ofrece la posibilidad de ser utilizado en procesos muy diferentes, y según su aplicación final poder elegir entre un tipo de biomasa u otro de manera que se aprovechen mejor sus propiedades.

Este estudio se ha realizado con dos biomassas diferentes: paja de maíz recogida tras la cosecha del cereal y astillas de chopo. Estos tipos de biomasa se caracterizan por ser un material fibroso y por presentar un comportamiento dúctil [4]. Se han elegido dos biomassas distintas para observar las variaciones en el producto obtenido en la molienda. Las principales características de cada una de ellas son:

- Paja de maíz
 - Recurso herbáceo
 - Residuo sin valorar de un cultivo alimentario
 - Elevado potencial debido a su bajo aprovechamiento actual y sus altas producciones por consumo del grano de maíz
- Chopo
 - Recurso leñoso
 - Cultivo energético
 - Elevado potencial actual y futuro en ciclos de cultivo de corta rotación

Durante la molienda se produce una reducción del tamaño de la partícula, que consiste en la ruptura del material. El proceso de reducción granulométrica está compuesto por dos etapas: la formación y la propagación de una grieta. La energía invertida en la reducción está directamente relacionada con la energía absorbida durante el proceso de ruptura, mayor en materiales dúctiles [4].

2.2 Instalaciones experimentales

La realización de las pruebas experimentales se ha llevado a cabo en las instalaciones tanto de la planta piloto semi-industrial sita en la nave 3 del Edificio Betancourt, como del laboratorio analítico del mismo edificio.

2.2.1 Planta piloto semi-industrial

El elemento principal de este estudio es el molino albergado en la nave 3. Éste es un molino de martillos de eje horizontal y 6 martillos rectangulares dispuestos en 3 líneas radiales. Previo a los martillos hay un disco con cuchillas insertadas. En la parte exterior tiene una malla intercambiable que circunda la cámara de molienda con un tamaño de poro de 2 ó 5 mm.

El resto de equipos de la instalación son equipos auxiliares para la alimentación, transporte y clasificación del material antes y después de su paso por el molino. El molino es alimentado por la banda transportadora. El material molido es trasladado hacia el ciclón por transporte neumático. La separación de partículas del material de la corriente de aire se realiza en el ciclón y en el tamizador se clasifican las partículas en función de su tamaño. Para una descripción técnica de todos los elementos de la nave se remite al lector al Anexo I.

La instalación de la nave 3 para la molienda está equipada con una serie de elementos que se combinan de diferente manera según la prueba que se vaya a llevar a cabo. A continuación se explicará el funcionamiento en conjunto de los equipos intervenientes en la realización de las pruebas y su configuración (figura 2).

Configuraciones de molienda

Se utilizan distintas configuraciones de molienda según el tamaño objetivo de molienda.

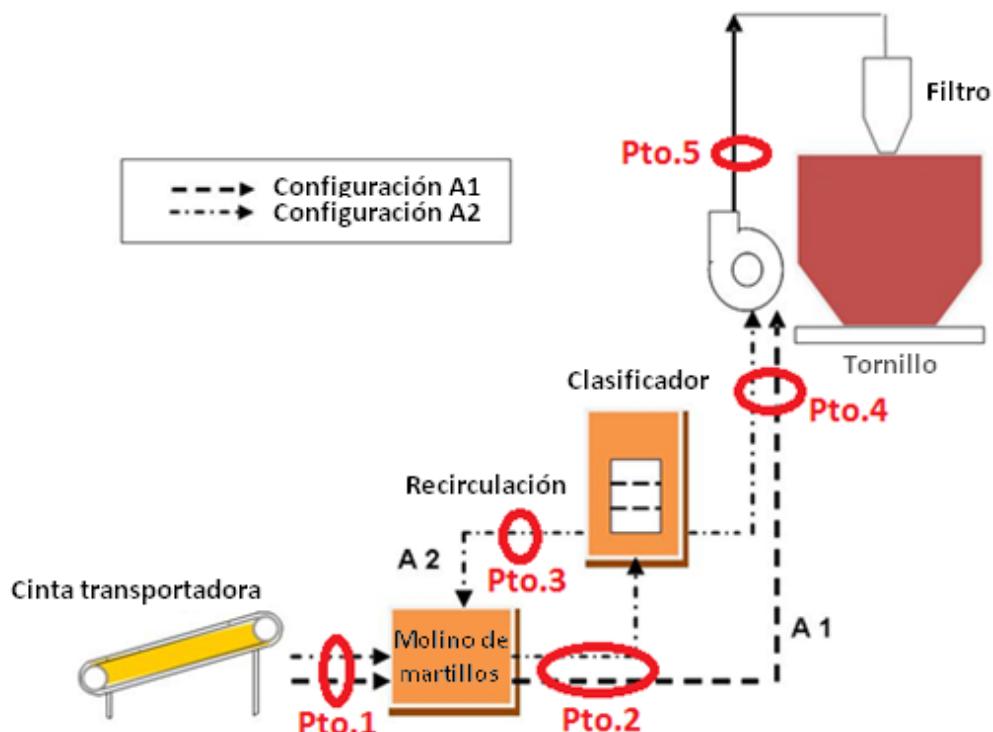


Figura 2. Representación de las instalaciones de la nave

Las configuraciones se pueden clasificar en instalaciones de circuito abierto o instalaciones de circuito cerrado. En el primero (configuración A.1) el material pasa a través del molino una sola vez. El circuito cerrado (configuración A.2) es utilizado cuando el tamaño objetivo es menor que la luz de malla más pequeña de la que se dispone (2 mm). Para esta configuración intervienen mayor número de equipos, ya que es necesaria la clasificación y separación de las partículas que van a ser recirculadas al molino hasta alcanzar el tamaño final deseado [5].

El circuito cerrado se utiliza cuando los requerimientos del tamaño objetivo son más exigentes y se requieren mallas con menor luz. Esta configuración permite que dicha luz tenga un tamaño superior al tamaño objetivo, evitando problemas de obstrucción en la malla, favoreciendo la evacuación de la partícula de la cámara y por tanto disminuyendo el consumo energético global de molienda.

Por otro lado y no menos importante, esta configuración permite evitar mallas de reducido espesor, puesto que por motivos de fabricación el espesor de la malla siempre debe ser menor o igual a su luz. Bajos espesores favorecen rupturas o grietas de la malla y consecuentemente interrupción del proceso.

Una vez la biomasa molida abandona la cámara de molienda, las partículas son transportadas neumáticamente hasta un tamizador en el cuál se clasifican en función de su tamaño. Aquellas con un tamaño superior al objetivo son recirculadas al molino, el resto son recuperadas como producto final.

En este estudio se quiere conseguir un material final con un tamaño de partícula menor que 1, 2 ó 5 mm (tamaño objetivo). Si el tamaño de salida de partícula es de 5 ó 2 mm el material pasará por el molino de martillos, que tendrá una luz de malla de 5 ó 2 mm respectivamente (configuración A.1). Sin embargo, cuando el tamaño deseado es 1 mm la configuración cambia y hay que recircular parte del material. En ese caso se coloca en el molino una malla exterior con luz 2 mm, de manera que el diámetro del material obtenido es inferior a ese valor. Para obtener un producto final con un tamaño inferior a 1 mm las partículas con un tamaño entre 1 y 2 mm son recirculadas de nuevo al molino (configuración A.2).

Cuando el material sale del molino (punto 2) es trasladado por transporte neumático hasta el ciclón (punto 4), donde las partículas son separadas de la corriente de aire. Cuando abandonan el ciclón van al clasificador (punto 5) donde pasan por varios tamices. En este punto se obtiene el producto final.

Funcionamiento de la instalación

Se quiere aprovechar al máximo las condiciones del equipo y para ello se opera con el propósito de optimizar el consumo del molino. El molino tiene un consumo de vacío como resultado de accionar el rotor del molino. En cada prueba se busca que ese consumo de vacío suponga un pequeño porcentaje del consumo total. De esta manera la mayor parte de la energía es utilizada para reducir el tamaño de las partículas y un menor porcentaje es destinado a la función de mover el rotor del molino. La intensidad necesaria para poner en marcha el molino a 3000 rpm en vacío es de 7 A. Para que esta intensidad sea mínima respecto a la utilizada se intenta trabajar a la máxima intensidad que el molino permite trabajar que es la intensidad nominal (21 A). Operando de esta manera el consumo en vacío se supone un 33% de la energía total.

Los principales problemas que pueden surgir durante el desarrollo de las pruebas se deben a la variabilidad de la biomasa Picos en el caudal de alimentación o fracciones de material con mayor resistencia a la ruptura pueden provocar sobre-consumos en el molino y deficiencias en su operación. Para ello, la instalación de molienda presenta un control de la alimentación que permite amortiguar los efectos de la heterogeneidad de la biomasa en el funcionamiento del

molino. El autómata controla las revoluciones de giro de la banda, y por tanto el caudal de alimentación, en función de la intensidad de consumo del molino, adecuándolo al ‘set point’ prefijado.

Las gráficas de los consumos energéticos registradas por el autómata muestran dicha variabilidad (figura 3). Por ello no se puede trabajar con la intensidad nominal del molino (21 A), y se hace con valores inferiores a éste (17-18 A). Trabajando con esta corriente se asegura no alcanzar una situación crítica, evitando saturaciones en el molino.

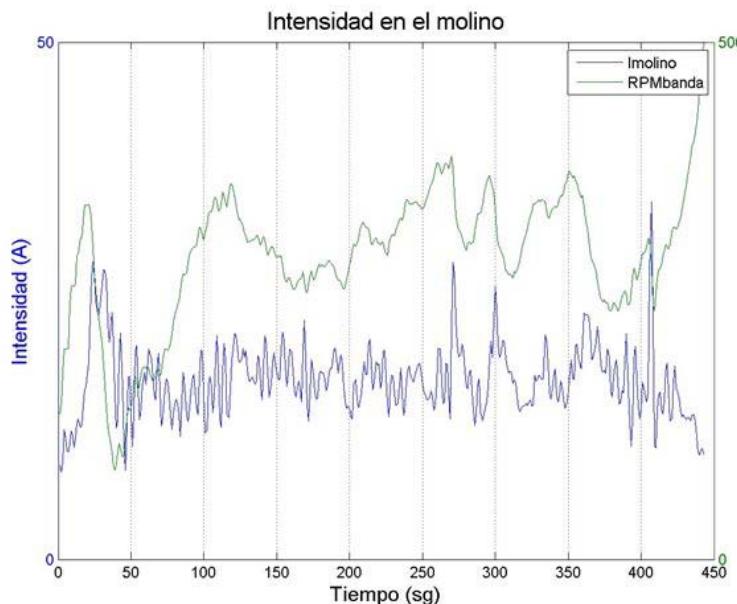


Figura 3. Gráfica sobre el consumo del molino en una de la pruebas

El consumo eléctrico del molino aumenta con el tiempo de residencia de las partículas de biomasa en su interior y aumenta con:

- Mayor tamaño de entrada del material bruto
- Mayor contenido de humedad
- Menor tamaño objetivo de la partícula (luz de malla)

Una vez que la biomasa entra en el molino permanece en su interior hasta que alcanza un tamaño suficientemente pequeño como para atravesar la luz de malla que rodea la cámara de molienda. La reducción del tamaño se consigue por el impacto del material con los martillos, por el impacto con otras partículas y por el impacto con la malla del molino. De éstas, la principal causa de la rotura del material es el impacto contra los molinos del martillo en rotación, donde la energía de impacto es la energía cinética relativa de la partícula [4].

Las muestras de material se toman en el punto 5 (figura 2). Las partículas molidas son conducidas hasta el ciclón, donde son separadas del flujo de aire y se hacen precipitar al clasificador. Entre estos dos equipos se coloca un distribuidor para cambiar la dirección del material y proporcionarle una salida en ese punto. Este método de muestreo es simple y permite tomar una muestra representativa de la biomasa que atraviesa el ciclón.

2.2.2 Laboratorio analítico

Al finalizar cada experimento las muestras de la prueba son trasladadas al laboratorio analítico del edificio Betancourt y al Instituto de Carboquímica, centro perteneciente al CSIC. En el laboratorio y en Carboquímica se obtienen datos para conocer la distribución de los tamaños de las partículas mediante tamizado vibratorio y difractor láser respectivamente. La técnica normalizada es el tamizado vibratorio y se realiza según la norma ASME (American Society for Mechanical Engineers) Standard Test for Sieve Analysis para combustibles sólidos D 293-93. Éste presenta la ventaja de ser barato en comparación con otros sistemas, pero se necesita más tiempo, pues hay que preparar las muestras, tamizar durante media hora y procesar los datos obtenidos para conseguir la granulometría. En los últimos años ha ido creciendo el uso del difractor láser como alternativa al tamizado, que es mucho más rápido, puesto que se sitúa el material en el equipo e inmediatamente es transportado neumáticamente y el ordenador te proporciona la distribución granulométrica, pero es más caro. Por ello se han elegido estos dos métodos para el estudio.

Tamizado vibratorio

El vibrotamizador utilizado en esta prueba permite el ensamblaje vertical de ocho tamices de un diámetro de 203 mm junto con una tapa y un fondo. Se sitúa el material en el tamiz superior y las partículas van pasando a través de los tamices que tienen diferente luz de malla. Para facilitar el procedimiento el tamizador simula un movimiento oscilatorio horizontal. Las partículas quedan depositadas en los tamices en función de su tamaño.



Figura 4. Vibrotamizador

Difractor láser

En el Instituto de Carboquímica se dispone del difractor láser Beckman Coulter LS 13 320. Durante su funcionamiento el material es trasladado por un fluido (aire) por el interior del equipo. Un haz de luz incide sobre las partículas y consecuentemente el haz adopta una nueva trayectoria. El haz tras la difracción es detectado por fotodiodos situados en diferentes ángulos en el interior del equipo. El ángulo con el que sale cada una de las ondas está relacionado con su tamaño. En el equipo utilizado esta técnica puede ser aplicada a ángulos de difracción inferiores a un determinado ángulo, lo que supone un límite en el tamaño.



Figura 5. Difractor láser

3 PRUEBAS EXPERIMENTALES

3.1 Diseño de experimentos

Se han realizado pruebas bajo diferentes condiciones de operación modificando cuatro variables. Dos de las variables se pueden cambiar en la ejecución de las pruebas: la velocidad angular del molino y el tamaño objetivo. La velocidad angular cuantifica las revoluciones por minuto del rotor del molino. El tamaño objetivo de la partícula es el diámetro de la malla de clasificación de tal forma que las dimensiones de las partículas sean menores que el tamaño objetivo. Las variables que dependen de la biomasa son el contenido en humedad y el tamaño inicial de la partícula. El contenido en humedad es como su nombre indica la cantidad de agua que tiene el material expresado en base húmeda. En primer lugar se realizan las pruebas con un material con mayor humedad y posteriormente con un material con menor humedad. El origen del material es el mismo, pero el material seco se obtiene por secado natural. El tamaño del material utilizado no es el que presenta en la naturaleza, sino que ha sido reducido mediante una biotrituradora para adaptarlo a la instalación. El tamaño que tiene antes de entrar en el molino es el tamaño inicial de la partícula. La tabla 1 muestra las variables que se han estudiado en el diseño de experimentos.

Tabla 1. Niveles de variación de las variables en la tanda de experimentos

Variable	Código	Niveles		
Contenido en humedad (b.h.)	h H		10%	28%
Tamaño de partícula de entrada (mm)	is IS		20x20	50x50
Tamaño de partícula de salida (mm)	1 2 5	1	2	5
Revoluciones (rpm)	rpm RPM		2000	3000

En el diseño de experimentos se han establecido dos niveles de variación para las variables de humedad, tamaño de entrada y revoluciones. Para el diámetro de salida se ha establecido tres niveles: 1, 2 y 5 mm.

En el caso de la paja de maíz no se ha considerado la variable del tamaño de entrada de la partícula. Esta variable ha sido desestimada por las siguientes razones:

- La influencia de esta variable en el estudio de otras propiedades ha sido mucho menor de lo esperado en el chopo, llegando a despreciarla.
- La maquinaria disponible en el mercado para esta tarea es escasa y sus resultados son inefficientes.

En total se realizan tantas pruebas como combinaciones posibles hay con los niveles de las cuatro variables. Consecuentemente el número de pruebas realizadas para los dos materiales son diferentes, ejecutando 12 ensayos en el caso de la paja de maíz y 24 en el de las astillas de chopo, cada una de ellas con su respectiva repetición. Además se han realizado pruebas adicionales para el punto central con 4 repeticiones para cada material. Todo ello hace un cómputo total de 80 pruebas experimentales.

Para realizar el seguimiento de las pruebas se identifican cada uno de los experimentos con un código, donde el nivel alto o bajo de las variables se representa mediante mayúsculas o minúsculas respectivamente. El nivel de la variable tamaño objetivo se representa mediante el valor de éste (5, 2 ó 1 mm).

A modo de ejemplo se explica uno de los códigos que identifica las pruebas y el significado de los diferentes caracteres:



Figura 6. Código de una de las muestras

El diseño de experimentos establece que la diferencia entre los valores de los niveles de una misma variable tienen que ser constantes, lo que no se cumple para la variable tamaño de salida: 5, 2 y 1 mm. Además en el caso de 1 mm el procedimiento de la prueba ha sido diferente ya que se ha utilizado una configuración A.2, mientras que en las otras se ha utilizado una configuración A.1. Los resultados en las pruebas de 1 mm no se deben sólo a las variables de entrada, sino que también hay un factor a tener en cuenta que sería la configuración. Por todo ello se obtiene la granulometría para todas las pruebas, pero el estudio ANOVA realizado a partir del diseño de experimentos se restringe a las pruebas de 2 y 5 mm. Además se ha realizado una prueba en la que los valores de las variables son el valor intermedio entre cada nivel (punto central). De esta manera se obtienen más datos y permite evaluar mejor la influencia de las variables.

3.2 Caracterización de la biomasa

Se llevan a cabo todas las pruebas experimentales definidas en el apartado anterior siguiendo un protocolo descrito en el Anexo III. Una vez que se obtienen las muestras de las pruebas se procede a la caracterización del producto. Ésta se realiza obteniendo la distribución granulométrica, densidad aparente, contenido en humedad y ángulo de reposo. En las sesiones de laboratorio se han realizado todos los estudios pertinentes para conocer estas propiedades. El concepto y la descripción de los ensayos de humedad, densidad aparente y ángulo de reposo se encuentra en el Anexo III.

Parte del material obtenido es sometido a estudio en la misma nave al finalizar cada experimento, con el que se conoce la densidad aparente y el ángulo de reposo, y parte del material es trasladado hasta el laboratorio analítico donde se realizan otras pruebas para conocer el contenido en humedad y la granulometría del producto. El proyecto se va a centrar en el estudio de éstas. Las partículas obtenidas tras la molienda son partículas irregulares no esféricas debido a la naturaleza del material. Esto complica la tarea de determinar el tamaño de las partículas.

La caracterización de la muestra es especialmente importante para conocer el material que se está obteniendo. Los procesos en los que se va a utilizar la biomasa tienen unos requerimientos del material, y se sabe si éstos se cumplen gracias a su caracterización. Conocer el tamaño de las partículas es especialmente importante en un pretratamiento de molienda, cuyo objetivo es la reducción de tamaño de la biomasa. Cuando se realiza este proceso se pretende que las partículas obtenidas tengan una dimensión inferior a la luz de malla, pero no se conoce el tamaño exacto de las partículas. Cuando una partícula se rompe, lo hace en diferentes fragmentos con diferentes tamaños, por ello las partículas tienen gran variedad de tamaños. El material es capaz de atravesar la malla cuando dos de las dimensiones de la partícula son menores que la luz de malla, pero no se puede garantizar que todas sus dimensiones lo cumplan. Por todo ello para conocer los tamaños de las partículas hay que obtener la distribución granulométrica.

El rango de partículas y su forma irregular permite hacer un balance de población de partículas con el que se realizará un modelo para predecir los consumos energéticos del molino. Gracias a este estudio se puede diseñar correctamente una etapa de molienda cuando el material tiene que cumplir unas condiciones de tamaño para su uso posterior.

Debido a la importancia de la distribución granulométrica se decide realizar el estudio con dos métodos diferentes.

Para conocer la granulometría del material molido se usa el tamizador vibratorio. La luz de las mallas de los tamices utilizados en cada caso es diferente, pero siempre se colocan ocho por las dimensiones del tamizador. Tras 25 minutos de tamizado se toman medidas de la cantidad de masa depositada en cada tamiz para obtener la acumulación granulométrica.

Tabla 2. Ejemplo de los datos obtenidos en el ensayo con vibrotamizador

PLANTILLA PARA CÁLCULO DE GRANULOMETRÍA				
Luz de malla (mm)	Peso retenido (g)	% retenido	% retenido acumulado	% pasa
2	0,12	0,25	0,25	99,74
1	2,56	5,35	5,6	94,39
0,8	2,41	5,03	10,64	89,35
0,5	7,70	16,07	26,71	73,28
0,355	10,19	21,26	47,98	52,02
0,25	6,92	14,44	62,42	37,57
0,1	11,65	24,32	86,74	13,25
0,045	4,09	8,53	95,28	4,71
<0,045	2,26	4,71	100,00	0,00

La misma muestra se envía hasta el Instituto de Carboquímica, donde se analizan mediante la técnica de difracción láser y proporcionan su distribución granulométrica.

La figura 7 muestra los datos recibidos del análisis del tamaño de partícula, en el que se representan los diámetros de las partículas y su porcentaje en volumen. Esta figura muestra la representación discreta del material obtenido.

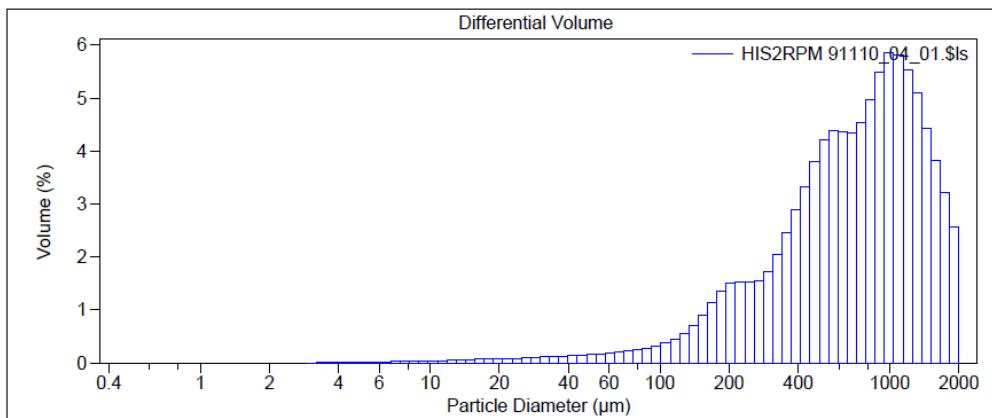


Figura 7. Ejemplo de la representación discreta proporcionada por Carboquímica

En estos datos se obtiene un error debido a la no esfericidad de la partícula. Cuando una partícula es esférica se tiene una sola dimensión característica, pero en este caso la mayoría de las partículas son cilíndricos y no se pueden identificar con una sola dimensión. Además el volumen se calcula a partir de esa dimensión característica y el volumen obtenido sólo es exacto en caso de esfericidad.

A partir de los datos discretos, tanto del vibrotamizador como del difractor láser se obtiene una representación acumulada de éstos.

Si se representa la función acumulada de la muestra, la curva de la gráfica puede ser descrita mediante una función de probabilidad. La distribución Rosin-Rammler se usa habitualmente para describir la distribución del tamaño de partículas generadas por molienda, cuya función es:

$$F(x) = 1 - e^{-(\frac{x}{l})^m}$$

Donde m es el parámetro de forma de la distribución y l es el parámetro de tamaño. Con estos dos parámetros queda definida la función Rosin-Rammler (R.R.). La distribución granulométrica de cada prueba se ajusta a esta función y se calculan una serie de parámetros que explican la distribución de la muestra analizada.

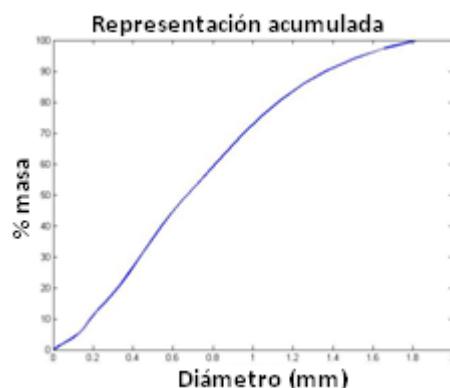


Figura 8. Ejemplo de distribución acumulada

4 ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1 Análisis de la distribución granulométrica

El análisis de los resultados se ha llevado a cabo a partir de los datos obtenidos con el tamizado vibratorio por ser el método normalizado para la obtención de distribuciones granulométricas. Posteriormente se ha realizado el mismo análisis a partir de los datos del difractor y se han comparado para analizar las diferencias en los resultados.

Para realizar el estudio de los resultados se ha llevado a cabo un análisis de varianza ANOVA con el programa Statgraphics para ver la influencia de cada una de las variables y su significancia con un nivel de confianza del 90%. En el Anexo IV se incluye información sobre el método ANOVA y los estudios realizados.

El estudio estadístico ANOVA se realiza sobre diferentes parámetros para ver cuál es la influencia de las variables en cada uno de ellos. Como se ha explicado en el apartado 3.3, la distribución granulométrica se aproxima a una función Rosin-Rammler. A partir de ésta y de los datos se calculan los siguientes parámetros: media, mediana, moda, desviación, asimetría, apuntamiento, índice de uniformidad, amplitud relativa, índice de tamaño, coeficiente de uniformidad, coeficiente de graduación y percentiles. En el Anexo II se da una breve explicación de cada uno de los parámetros estadísticos y sus cálculos.

Dichos parámetros se pueden dividir en dos grupos: los que se refieren a tamaños representativos del global de la distribución y aquellos que indican la dispersión o variedad de tamaños de las partículas. Al primer grupo pertenecen el parámetro de tamaño R.R. (l), mediana, media y tamaño efectivo y se denominan parámetros de tamaño. Al segundo grupo pertenecen índice de uniformidad, desviación geométrica, coeficiente de uniformidad, amplitud relativa, apuntamiento, asimetría, parámetro de forma R.R. (m) y coeficiente de graduación y forman el grupo parámetros de forma. Para el cálculo de todos los parámetros se han desarrollado programas en Matlab.

Los parámetros descritos anteriormente se utilizan para caracterizar la muestra y permiten conocer características o tendencias de la distribución [6].

- Coeficiente de graduación, $d_{30}^2/(d_{10} - d_{60})$, muestra si la distribución acumulada asciende de forma gradual y uniforme cuando sus valores se encuentran entre 1 y 3. Esto se cumple en este caso ya que los valores se sitúan entre 1.14 y 1.25.
- La asimetría muestra el grado de simetría de una distribución normal. Aparece cuando hay cantidades significativas de partículas, tanto de partículas finas como gruesas. El parámetro asimetría tiene en todos casos valores negativos (sesgo positivo) [-0.56, -0.19], lo que indica una predominancia de partículas finas.
- El apuntamiento describe el achatamiento de una distribución. En este caso es siempre negativa [-2.45; -1,42], por lo que la forma de las distribuciones es achatada respecto a la distribución normal.

- El parámetro amplitud relativa, $(d_{90} - d_{10})/d_{50}$, muestran la amplitud de la distribución de la muestra y se considera que ésta es amplia cuando su valor es superior a 1. Los valores de las muestras están comprendidos entre 1.28 y 2.48.
- Valores de la desviación geométrica superiores a 1 representan distribuciones amplias. Todos los valores de este parámetro se encuentran entre 2 y 3.2
- Coeficiente de uniformidad, d_{60}/d_{10} , relaciona la cantidad de partículas de tamaño medio con las de tamaño pequeño. Cuando el valor de este parámetro es menor de 4 se considera que las partículas tienen un tamaño uniforme. Este parámetro varía entre los valores 2.8 y 6.1, pero siempre es menor de 4 para las pruebas con un diámetro objetivo 1 mm.

Por todo esto se puede concluir que las distribuciones granulométricas tanto para la paja de maíz como para las astillas de chopo son uniformes, ascienden de forma gradual, tienen un gran rango de tamaños y hay una mayor cantidad de partículas finas.

Anteriormente se han dividido los parámetros en dos grupos. Conociendo las definiciones y los valores de los parámetros de un mismo grupo se observa una coherencia de éstos con la forma de la distribución en el caso de los parámetros de forma y con los tamaños de partícula obtenidos en el caso de los parámetros de tamaño. Por ello se deduce que existe una relación entre los parámetros de un mismo grupo y para comprobarlo se calcula una regresión lineal entre ellos que ayuda a ver las tendencias de evolución.

La tabla 3 muestra los coeficientes de las rectas de regresión y la calidad del ajuste (R^2) para los parámetros de forma. En la parte inferior izquierda se representan estos coeficientes para las astillas de chopo (amarillo) y en la parte superior derecha se representan los de la paja de maíz (azul).

Tabla 3. Coeficientes de correlación entre los parámetros de forma para chopo y maíz

	Desviac. geom	Asime- tría	Apunta- miento	Índ. uniform	Amplit. Relat.	Coefic. uniform.	Coef. Grad.	m
Desviac. geom (R²)	1 (1)	0,1802 (0,568)	-0,647 (0,8644)	8,30838 (0,6914)	0,22748 (0,5247)	1,3135 (0,6999)	0,05041 (0,70853)	-0,3792 (0,7243)
Asimetría (R²)	-0,4945 (0,9012)	1 (1)	-1,5061 (0,6124)	24,7560 (0,80277)	1,5427 (0,9891)	3,8721 (0,7953)	0,14701 (0,78776)	-1,0837 (0,7732)
Apuntamiento (R²)	1,503 (0,9998)	-2,727 (0,8932)	1 (1)	-14,0365 (0,9558)	-0,5752 (0,5093)	-2,2099 (0,9595)	-0,0844 (0,9631)	0,63051 (0,9694)
Índ. uniform (R²)	9,9524 (0,9343)	-19,72 (0,9963)	6,597 (0,9276)	1 (1)	0,04743 (0,7139)	0,15713 (0,9999)	0,00599 (0,9996)	-0,04457 (0,9986)
Amplit. Relat. (R²)	0,566 (0,9876)	-1,070 (0,9571)	0,37 (0,984)	0,054 (0,9782)	1 (1)	2,3511 (0,7055)	0,08914 (0,6969)	-0,6555 (0,6807)
Coef.uniform (R²)	1,601 (0,9248)	-3,194 (0,998)	1,06 (0,9178)	0,161 (0,9996)	2,882 (0,9725)	1 (1)	0,03814 (0,9999)	-0,2837 (0,9992)
Coef. Grad. (R²)	0,062 (0,9147)	-0,125 (0,9994)	0,04 (0,907)	0,006 (0,9986)	0,112 (0,966)	0,0393 (0,999)	1 (1)	-7,4392 (0,9996)
m (R²)	-0,488 (0,8938)	0,99 (0,9998)	-0,323 (0,885)	-0,050 (0,9947)	-0,884 (0,9521)	-0,309 (0,997)	-7,884 (0,9987)	1 (1)

CHOPO

M
A
Í
Z

Los parámetros índice de uniformidad, coeficiente de uniformidad, coeficiente de graduación y amplitud relativa muestran ratios entre la cantidad de partículas de tamaño grande y la cantidad de partículas de tamaño pequeño, es por ello por lo que dan una idea de la dispersión de la distribución de la muestra. Cuando la distribución de la muestra es más amplia el valor de estos parámetros aumenta, la fuerte relación entre ellos se refleja en los altos valores de R^2 .

El parámetro de forma de la distribución $R.R$ (m) da una idea de la pendiente de la gráfica de distribución. Por definición cuando su valor aumenta la dispersión de los datos disminuye y por lo tanto sufre una evolución contraria a los demás parámetros del grupo. El signo negativo de sus coeficientes lo demuestran.

De manera análoga la tabla 4 expresa los coeficientes de las rectas de regresión y la calidad del ajuste para los parámetros de tamaño.

Se ha observado también que existe una fuerte relación entre los parámetros de los tamaños de partícula d_{10} , mediana, diámetro geométrico y parámetro de tamaño de la distribución $R.R$ (I) con un ajuste superior al 90% en casi todos los casos mostrando unas tendencias idénticas. Todos ellos aumentan al incrementar el tamaño de la malla del molino, cumpliendo una correlación entre ellos de manera que siempre se cumple: $I > d_{50} > d_{geom} > d_{10}$, lo cual es lógico para alguno de los parámetros. I , d_{50} y d_{10} representan percentiles, por lo que siempre cumplirán este orden. El valor de d_{geom} se sitúa entre los de d_{50} y d_{10} ya que es un valor representativo del diámetro medio de partícula. Su valor es inferior a d_{50} debido al valor negativo del apuntamiento, que indica que hay gran cantidad de partículas finas y contribuye a disminuir el valor medio de partícula (d_{geom}) de manera significativa.

Tabla 4. Coeficientes de correlación de los parámetros de tamaño para chopo y maíz

	d_{geom}	d_{50}	d_{10}	I	Diámetro
d_{geom} (R^2)	1 (1)	1,0661 (0,9987)	0,36078 (0,9974)	1,3715 (0,9998)	0,1821 (0,9656)
d_{50} (R^2)	1,2453 (0,9999)	1 (1)	0,3385 (0,9997)	1,2852 (0,9993)	0,2316 (0,9760)
d_{10} (R^2)	0,3242 (0,9967)	0,2604 (0,9969)	1 (1)	3,7940 (0,9984)	0,0551 (0,8746)
I (R^2)	1,6045 (0,9998)	1,288 (0,9998)	4,9358 (0,9981)	1 (1)	0,0087 (0,9867)
Diámetro (R^2)	0,20447 (0,9697)	0,2647 (0,97624)	0,0571 (0,9037)	0,2912 (0,8145)	1 (1)

M
A
Í
Z

CHOPO

Hasta ahora se han dividido los parámetros en dos grupos, pero estos dos conjuntos están relacionados y ambos son necesarios para una correcta interpretación de la distribución granulométrica. A continuación se va a deducir la forma de la distribución a partir de los valores de los parámetros de tamaño y se comprueba mediante los parámetros de forma si la deducción es correcta, lo que concluiría que, a pesar de definir conceptos diferentes, los parámetros de ambos grupos están relacionados.

Para realizar este análisis se toman los datos de distribuciones con un mismo tamaño objetivo, una de las cuales tiene una gran cantidad de partículas finas. Se va a identificar esta prueba a partir de los parámetros de tamaño, por ello es importante que las distribuciones

estudiadas tengan el mismo tamaño objetivo, ya que ésta es la variable con mayor influencia en los parámetros de tamaño. Observando los valores de d_{geom} , d_{10} , d_{50} y I se comprueba que los valores de d_{50} y I son similares para las pruebas, lo cual parece lógico para pruebas con un mismo diámetro objetivo, sin embargo los valores de d_{10} y d_{geom} tienen para una de las distribuciones valores inferiores. El menor valor de d_{geom} se debe a la aportación de la gran cantidad de partículas finas. Esto hace que el volumen aportado por las partículas finas sea mayor que en distribuciones más uniformes y por lo tanto el 10% del volumen total sea aportado por partículas de diámetro pequeño (inferiores a d_{10}). Los inusuales valores de d_{10} y d_{geom} conducen a pensar que hay gran cantidad de partículas finas. Esto se puede comprobar mediante el valor de asimetría, muy negativo y el de la desviación geométrica, mayor que en los demás casos.

Ahora se realiza un estudio análogo al anterior, con distribuciones con un mismo tamaño objetivo, pero en esta ocasión hay que identificar una distribución con gran dispersión de los datos. Los valores de d_{geom} , d_{50} y I son similares para las pruebas de un mismo diámetro objetivo, sin embargo d_{10} tiene menores valores para una de las pruebas. Éste indica que hay gran cantidad de partículas finas, pero el hecho de que d_{50} , d_{geom} y I no difieran de los valores de las demás pruebas lleva a pensar que el efecto de las partículas finas ha sido compensado por gran cantidad de partículas gruesas. Consecuentemente habrá menos cantidad de partículas diámetros cercanos al valor medio. Esto coincide con elevados valores de desviación geométrica e índice de uniformidad, bajos valores del parámetro m y bajos apuntamientos.

4.2 Influencia de las variables de estudio

Las tablas 5 y 6 muestran los valores de cada uno de los parámetros para cada una de las pruebas según el diámetro inicial, el diámetro final, el contenido en humedad y la velocidad de rotación del molino. Se pueden observar ciertas tendencias en los datos:

- El tamaño alcanzado por las partículas depende principalmente del tamaño objetivo.
- Los menores tamaños de partícula se alcanzan en los casos con menor contenido en humedad y mayores revoluciones del molino.
- La dispersión de los datos es mayor cuanto mayor es el diámetro objetivo ya que los valores del parámetro de forma R.R (m) disminuyen, coeficiente de uniformidad y desviación geométrica aumentan. En este caso los valores de apuntamiento disminuyen, aproximándose más a una distribución normal.
- Cuando disminuye la humedad, la amplitud de la distribución aumenta, siendo mayor la diferencia en los casos con altas revoluciones.

Para comprobar esto se procede a realizar el análisis ANOVA de las variables. Los resultados del análisis de varianza indican que la variable diámetro objetivo es muy significativa en los parámetros de tamaño. La influencia de este factor es 15 veces mayor que la siguiente variable, por lo que los valores de estos parámetros van a depender fuertemente de la luz de la malla del molino y serán mayores cuando mayor sea éste.

Como ejemplo se muestran gráficamente los efectos principales de las variables para el parámetro d_{geom} , (figura 9), uno de los parámetros de tamaño, y para el parámetro coeficiente de graduación (figura 10), representativo de los parámetros de forma.

Cada efecto se representa por una recta positiva si al aumentar el valor de la variable aumenta el valor del parámetro y una pendiente negativa si al aumentar el valor de la variable disminuye el valor del parámetro. La pendiente es proporcional a la influencia de la variable, siendo más pendiente cuanto mayor influencia tiene en el resultado la variación de la variable.

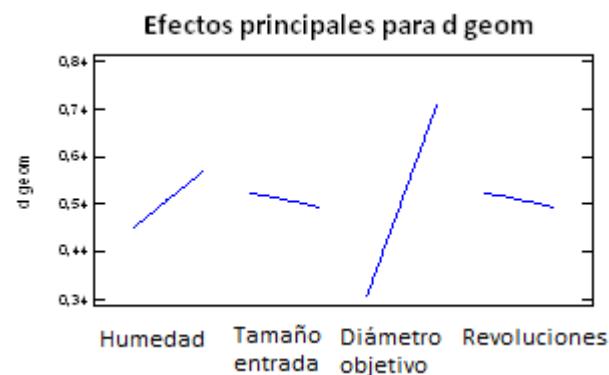


Figura 9. Variabilidad del parámetro d_{geom} con los niveles de las variables para el chopo

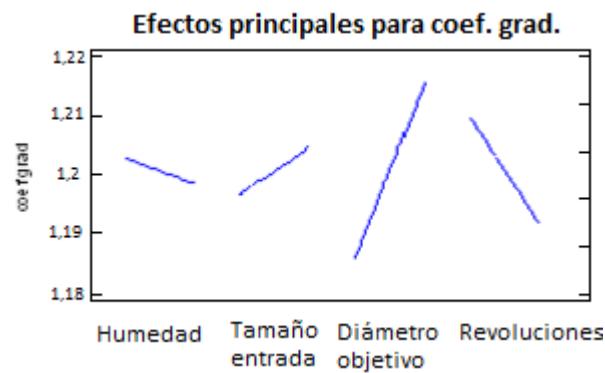


Figura 10. Variabilidad de coeficiente de graduación con los niveles de las variables para el chopo

Tabla 5. Valores de las astillas de chopo

Humedad	Velocidad	Input size	d _{geom}	d ₅₀	d ₁₀	I	Desviac. geom	Asimetría	Apuntam.	Índice uniform.	Amplit. relativa	Coefic. Uniform.	Coefic. Graduac.	m
Diámetro 1 mm														
H	RPM	IS	0,39125	0,48225	0,17165	0,5495	2,18805	-0,34405	-2,3024	8,196	1,3981	3,06075	1,1534	1,93355
H	rpm	IS	0,4266	0,51655	0,1892	0,59025	2,1473	-0,3381	-2,2897	7,94945	1,3819	3,0054	1,1504	1,97735
h	RPM	IS	0,35915	0,3992	0,13335	0,4951	2,16135	-0,2764	-2,4092	10,69705	1,6821	3,5264	1,17445	1,7164
h	rpm	IS	0,386	0,4427	0,15065	0,53285	2,14775	-0,29355	-2,3872	9,834	1,584	3,3714	1,16765	1,78075
H	RPM	is	0,43075	0,45935	0,17085	0,5394	2,17935	-0,34825	-2,292	7,9967	1,4259	3,01995	1,1514	1,95895
H	rpm	is	0,4076	0,51185	0,19175	0,5752	2,1895	-0,36645	-2,2391	7,29365	1,3165	2,8766	1,1443	2,0473
h	RPM	is	0,34275	0,38595	0,1261	0,47495	2,18915	-0,27865	-2,4067	11,086	1,68785	3,5899	1,1769	1,6968
h	rpm	is	0,4018	0,4678	0,1641	0,55005	2,10755	-0,29595	-2,3756	8,90935	1,49015	3,19885	1,15985	1,86135
Diámetro 2 mm														
H	RPM	IS	0,3203	0,4048	0,12645	0,48715	2,5052	-0,27525	-2,23865	11,51345	1,6736	3,66455	1,1801	1,66805
H	rpm	IS	0,35	0,4275	0,1254	0,5255	2,59045	-0,2119	-2,2453	8,68365	1,79735	3,9645	1,1921	1,57035
h	RPM	IS	0,29695	0,35615	0,114389	0,45225	2,48315	-0,28185	-2,23165	14,479	1,9058	4,1386	1,1985	1,5255
h	rpm	IS	0,35615	0,417	0,12525	0,5246	2,3851	-0,2523	-2,2846	13,3118	1,8384	3,96105	1,19195	1,57155
H	RPM	is	0,35405	0,4268	0,12865	0,5141	2,4689	-0,2684	-2,26035	12,24525	1,7122	3,7887	1,1852	1,6243
H	rpm	is	0,3294	0,40995	0,11335	0,50685	2,5937	-0,26	-2,2097	15,017	1,87795	4,22215	1,20165	1,5027
h	RPM	is	0,32285	0,3765	0,1295	0,46275	2,22125	-0,2365	-2,39255	10,0644	1,6322	3,4117	1,1694	1,7654
h	rpm	is	0,332	0,4135	0,1224	0,5069	2,58515	-0,2627	-2,20265	13,05075	1,78005	3,91975	1,1904	1,5835
Diámetro 3,5 mm														
Punto central			0,524733	0,6522	0,173967	0,824267	2,6731	-0,39657	-,95013	11,71007	1,984567	4,472667	1,210433	1,446567
Diámetro 5 mm														
H	RPM	IS	0,90525	1,1425	0,3357	1,3317	2,34615	-0,32445	-2,15075	12,06925	1,6516	3,7602	1,18405	1,63305
H	rpm	IS	0,83845	1,1114	0,2474	1,3466	2,73135	-0,41065	-1,86065	21,4215	2,0482	5,1002	1,231	1,32815
h	RPM	IS	0,6184	0,7364	0,20815	0,9421	2,5919	-0,3843	-1,94335	15,3883	1,9573	4,276	1,20355	1,4904
h	rpm	IS	0,59615	0,7157	0,15645	0,96955	2,8768	-0,37285	-1,8528	27,12745	2,446	5,7816	1,2508	1,2335
H	RPM	is	0,8084	1,095	0,2728	1,2722	2,6383	-0,4456	-1,8249	16,1772	1,80955	4,39375	1,2078	1,4615
H	rpm	is	0,88095	1,2013	0,2696	1,42565	2,7872	-0,47445	-1,69285	20,53425	1,97815	4,97975	1,22705	1,35095
h	RPM	is	0,65255	0,77285	0,222	0,9845	2,53145	-0,36535	-1,99455	14,77905	1,92615	4,18775	1,20045	1,51035
h	rpm	is	0,74415	0,89785	0,2389	1,1355	2,5409	-0,3479	-2,0205	17,1368	2,00625	4,5201	1,21185	1,43985

Tabla 6. Valores de la paja de maíz

Humedad	Velocidad	Input size	d _{geom}	d ₅₀	d ₁₀	I	Desviac. geom	Asimetría	Apuntam.	Índice uniform.	Amplit. relativa	Coefic. Uniform.	Coefic. Graduac.	m
Diámetro 1 mm														
H	RPM	IS	0,3044	0,38195	0,11525	0,46555	2,3677	-0,27985	-2,3565	12,4817	1,74515	3,82795	1,18675	1,61135
H	rpm	IS	0,30835	0,4002	0,11735	0,48515	2,53515	-0,3654	-2,1448	13,00745	1,75885	3,91295	1,1901	1,5854
h	RPM	IS	0,27275	0,35275	0,1008	0,2196	1,4925	-0,34825	-2,1735	13,97945	1,81815	4,0619	1,19565	1,54605
h	rpm	IS	0,27465	0,35135	0,0989	0,43245	2,5466	-0,3411	-11058,1	14,3515	1,83175	4,0959	1,19605	1,5543
Diámetro 2 mm														
H	RPM	IS	0,30325	0,3787	0,09945	0,4725	2,61475	-0,2743	-2,19085	17,25475	1,9766	4,5349	1,21225	1,43765
H	rpm	IS	0,36715	0,45125	0,1305	0,56745	2,64325	-0,3533	-2,0502	14,47545	1,8856	4,1335	1,19815	1,53015
h	RPM	IS	0,26805	0,33575	0,09275	0,41655	2,59245	-0,27895	-2,21945	15,1109	1,8888	4,2374	1,2023	1,49805
H	rpm	IS	0,3753	0,45285	0,12365	0,5791	2,63425	-0,33295	-2,04935	16,29005	1,99315	4,4102	1,2084	1,45765
Diámetro 3,5 mm														
Punto central			0,4681	0,609725	0,163375	0,7478	2,83695	-0,4428	-1,82373	15,90668	1,8909	4,339275	1,20535	1,4835
Diámetro 5 mm														
H	RPM	IS	0,65565	0,81325	0,1891	1,07035	2,9134	-0,45745	-1,65775	23,0161	2,2679	5,2995	1,23705	1,29725
H	rpm	IS	0,69255	0,91415	0,21255	1,16315	3,05895	-0,54045	-1,4482	23,3984	2,1945	5,29185	1,23515	1,31925
h	RPM	IS	0,7066	0,8175	0,2512	1,0434	2,46155	-0,3866	-1,94365	13,18735	1,85855	3,9384	1,19095	1,5805
h	rpm	IS	0,7165	0,9271	0,23465	1,163	2,90535	-0,5238	-1,52095	19,64085	2,05725	4,82005	1,2205	1,40045

4.2.1 Astillas de chopo

Se analiza la influencia de las variables contenido en humedad, tamaño de partícula a la entrada, tamaño objetivo y revoluciones en el molino en los parámetros de tamaño. El análisis ANOVA concluye que las variables más influyentes en los parámetros de tamaño con un nivel de confianza del 90% son el diámetro objetivo y el contenido en humedad. Cuanto mayor es el diámetro final deseado se obtienen unos mayores tamaños de partículas. Del mismo modo, cuando el contenido en humedad aumenta el tamaño de las partículas también lo hace. La influencia del diámetro es 3 veces mayor que el contenido en humedad. Las variables velocidad del eje del molino y tamaño de entrada tienen una baja influencia. Esto último justifica la eliminación de la variable tamaño de entrada en las posteriores pruebas con la paja de maíz.

Analizando los parámetros de forma de la función de distribución se averigua que está influenciada principalmente por el diámetro objetivo y por la velocidad del molino, teniendo el diámetro una influencia 1.5 veces superior. Cuando aumenta el diámetro aumenta la dispersión y cuando aumenta la velocidad de rotación del molino disminuye la dispersión de los datos de la muestra. Los factores humedad y tamaño de entrada no tienen repercusión en los resultados.

A modo de resumen se presenta la tabla 7, donde se han coloreado las variables significativas mediante el análisis ANOVA con un nivel de confianza del 90% sobre cada parámetro estudiado. El análisis ANOVA crea un modelo matemático para cada una de las variables respuesta (parámetros en estudio) mediante la codificación de los factores (variables). Este análisis halla una regresión, de manera que los coeficientes que acompañan a cada factor muestran la influencia de éste en la variable respuesta. La tabla 7 contiene los valores de estos coeficientes en valor absoluto, siendo mayor cuanto mayor influencia tiene el factor. En todos los casos la variable diámetro objetivo tiene un efecto mayor.

Tabla 7. Variables significativas y sus efectos en los parámetros para las astillas de chopo

	Parámetros de tamaño				Parámetros de forma								
	I	D ₅₀	D _{geom}	D ₁₀	Indic. Unif.	Desv. geom	Asimetría	Apuntam.	m	Coef. grad.	Ampl. relat	Coef. unif	
Humedad	0,137	0,108	0,061	0,023							0,083		
Diámetro entrada		0,030									0,061		
Diámetro objetivo	0,291	0,264	0,204	0,057		0,0817	0,059	0,163	0,089	0,014	0,125	0,341	
Revoluciones		0,030				0,0754		0,048	0,064	0,008	0,069	0,330	

4.2.2 Paja de maíz

Se realiza un estudio análogo para la paja de maíz. Los resultados de ANOVA para este material para los parámetros de tamaño indican que el diámetro objetivo es la variable con mayor influencia, al igual que en el chopo. Sin embargo, la velocidad angular del molino es un factor significativo. La significancia del diámetro es 30 veces mayor que la de la velocidad del

molino. Cuanto mayor es el diámetro final deseado los valores de los parámetros aumentan. La baja significancia de la humedad indica que se puede llegar a despreciar.

Destacar que la influencia de las revoluciones es inversa. Al aumentar la velocidad el tamaño de partícula alcanzado disminuye, lo cual parece lógico ya que a mayor velocidad la energía de impacto sobre la partícula será mayor y por lo tanto es más probable que se produzca una disminución del tamaño de la partícula.

Tras el análisis de varianza en los parámetros de forma de la distribución se concluye que la influencia de todos los factores es baja y no hay ninguno que destaque sobre los demás. Solamente los parámetros desviación y apuntamiento están. Es por ello por lo que se considera que la dispersión de las partículas de la muestra es aleatoria. La tabla 8 refleja todo esto gráficamente.

Tabla 8. Variables significativas y sus efectos en los parámetros para la paja de maíz

	Parámetros de tamaño				Parámetros de forma							
	I	D ₅₀	D _{geom}	D ₁₀	Indic. Unif.	Desv. geom	Asimetría	Apunt am.	m	Coef. grad.	Ampl. relat	Coef. unif
Humedad						0,079		0,048				
Diámetro objetivo	0,300	0,231	0,182	0,055		0,106		0,242				
Revoluciones	0,058	0,050	0,027			0,082		0,117				

4.2.3 Comparativa entre chopo y maíz

Una vez realizados los estudios para ambos materiales se realiza un nuevo análisis donde se considera el material como una variable. El estudio ANOVA indica que su influencia es mínima, siendo la variable con menor repercusión en los valores de la mayoría de los parámetros estudiados (figura 11).



Figura 11. Ejemplo del efecto de la variable material en el parámetro de tamaño /

En la comparativa entre las distribuciones de ambos materiales bajo condiciones de alta humedad y altas revoluciones (figura 12) se muestra que las diferencias son mínimas entre materiales, siendo más determinante el tamaño objetivo.

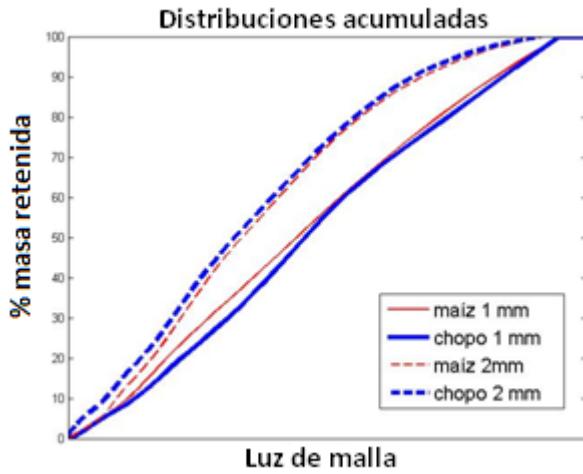


Figura 12. Ejemplo de distribución granulométrica de paja de maíz y astillas de chopo

Se concluye:

- Las diferencias en la distribución debido a la biomasa utilizada son mínimas para estos dos materiales.
- El factor más relevante en los parámetros de tamaño es el tamaño de luz de la malla.
- La influencia de las variables en los parámetros de tamaño son diferentes en la paja de maíz y chopo. En ambos casos el diámetro deseado es el factor más influyente, sin embargo para la paja de maíz también lo es la velocidad del molino, y para el chopo el contenido de humedad.
- Respecto a los parámetros de forma, las variables significativas son el tamaño de la malla y la velocidad del molino para el chopo. En el maíz no hay ningún factor relevante.
- El tamaño de entrada de la biomasa al molino no tiene significancia en el rango de variación estudiado.

4.3 Comparativa de los datos según el método utilizado

La granulometría ha sido obtenida por dos métodos diferentes: tamizado vibratorio y difractor láser. Todo los resultados obtenidos hasta ahora en el proyecto se han realizado a partir de los datos del tamizador, el método normalizado. A continuación se conoce la relevancia que tiene la procedencia de los datos, debido al diferente método utilizado.

Los valores de los parámetros de tamaño obtenidos a partir de los datos obtenidos por el difractor son mayores que los calculados a partir de los datos conseguidos con el vibrotamizador. Es decir, las granulometrías obtenidas por el difractor láser muestran tamaños de partículas superiores a los observados en el vibrotamizador.

En los parámetros de forma no existen diferencias en las tendencias debido al método utilizado, los valores varían en cada prueba siendo mayores en algunas ocasiones los valores del difractor y en otras ocasiones los valores del tamizador.

Si se realiza un análisis de varianza como en los casos estudiados anteriormente y se considera la procedencia de los datos como uno de los factores se puede conocer la significancia que tiene. El análisis de varianza ANOVA para los parámetros de tamaño muestra que la variable con mayor influencia en los resultados obtenidos es el método de medición con un nivel de confianza del 90%. Tiene una significancia 10 veces mayor que las variables que se han controlado en el proceso ejecutado en la nave. El mismo estudio sobre los parámetros de forma refleja que la influencia de la procedencia de los datos en este caso es mínima y se puede despreciar.

Por tanto, el método mediante el cual se analiza la forma de las partículas tiene mayor relevancia, por ello se va a profundizar en el funcionamiento de uno y otro.

4.3.1 Tamizado vibratorio

Se considera que las partículas que se depositan sobre un tamiz tienen un tamaño superior a la luz de la malla. Para que una partícula pase a través de una de las ranuras es necesario que dos de las tres dimensiones de ésta sean inferiores a la luz de malla. En este caso las partículas de la biomasa molida tienen una forma irregular, con un gran porcentaje de partículas alargadas, por lo que se puede asegurar que dos de sus tres dimensiones cumplen con lo anterior, pero la dimensión mayor no necesariamente tendrá una medida inferior a la luz de malla si ésta se ha colocado perpendicularmente al plano del tamiz durante el proceso, ayudada por el movimiento oscilatorio del tamizador. Además hay otro factor que puede afectar a la cantidad de partículas depositadas en cada tamiz, la llamada 'caída' de la partícula (figura 13) cuando ésta se deposita en el borde de la ranura del tamiz [7]. Una partícula que es un poco menor que dos veces el tamaño de la ranura caerá por acción de la gravedad, cuando la longitud no apoyada en la malla es mayor que la longitud apoyada. Por todo esto el tamizado vibratorio no es método adecuado para la determinación de la dimensión mayor de la partícula, aunque sí que da información sobre el tamaño de las otras dos dimensiones.

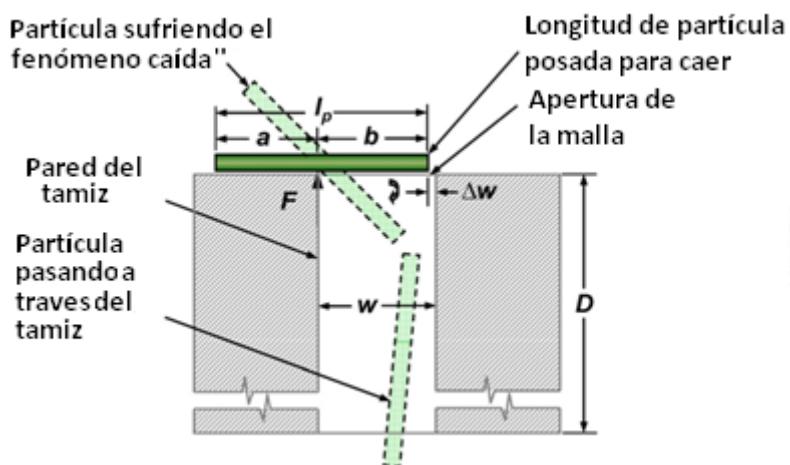


Figura 13. Efecto de caída

Por lo tanto el diámetro obtenido de la partícula dependerá de la forma de ésta, de su posición respecto al tamiz y de la probabilidad que tenga la partícula para situarse de manera adecuada para atravesar el tamiz.

4.3.2 Difractor

El uso del difractor láser ha ido creciendo durante los últimos años como una alternativa al tamizado. El material es aspirado de manera que recorre el equipo en el seno de una corriente de aire. Un haz de luz incide perpendicularmente sobre el fluido y la luz refractada es muestreada por una serie de fotodiodos. La refracción de la luz es consecuencia de la incidencia del haz sobre las partículas en el seno del flujo y su ángulo de refracción proporcionará la información sobre el tamaño de la partícula. La posición de las partículas en el seno del fluido es especialmente importante para determinar sus dimensiones [8]. En este caso la mayoría de las partículas tienen una forma irregular por lo que según la posición que adopte en el flujo la dimensión que se obtiene es diferente. La orientación de las partículas depende de las características del flujo en el que se mueve, sin tener apenas repercusión sus propiedades (densidad del material, ratio de las dimensiones...)[9]. Para caracterizar la orientación de la partícula se utiliza el ángulo θ , que es el ángulo formado entre la dirección del flujo y la dirección de la orientación de la partícula (figura 14). La función de distribución de la orientación (función de distribución $f(\theta)$) está influenciada tanto por el gradiente de velocidad del fluido como por factores aleatorios.

El fluido se mueve en el interior de un tubo de 2 mm de diámetro con varios codos y tiene un flujo variable que se regula a lo largo del tránsito del proceso de medición. En este caso es complicado calcular el número de Reynolds, pero se sabe que para estas condiciones se tiene un flujo laminar. Cuando se cumple esto la distribución del ángulo de orientación tiene un pequeño rango, situándose los valores de θ entre 0 y 30 grados [10,11,12]. De esta orientación dependerá la dimensión analizada. Si la longitud de la partícula es L y su ángulo de orientación es θ , el haz de luz incide perpendicularmente sobre una partícula de dimensión $L \cos \theta$ (figura 14).

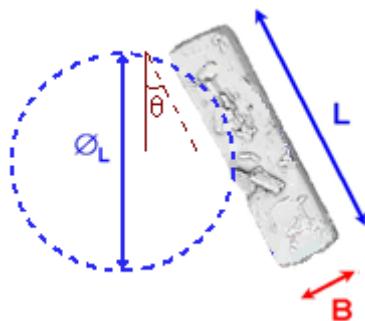


Figura 14. Dimensiones de una partícula no esférica en el difractor láser según su posición respecto al flujo [8]

El tamaño de las partículas es inversamente proporcional al ángulo de difracción. Esto, junto a la ubicación de los fotodiodos en el equipo establecen unos límites en los tamaños de partícula que el difractor puede reconocer. Cuando el tamaño de partícula es superior a 2 mm el ángulo de difracción es muy pequeño y el difractor lo detecta como si el haz no hubiese incidido. Por el contrario, cuando la partícula es muy pequeña el ángulo es grande y la luz refractada no puede ser detectada si se sitúa por encima de la zona de los fotodiodos.

Una vez se tienen los datos de los ángulos, el ordenador conectado al difractor convierte estos ángulos en tamaños mediante el método de Fraunhofer. Este método está diseñado para el análisis de partículas esféricas, pero en este caso se tienen principalmente partículas

alargadas, por lo que se obtendrán errores. Si se tiene una partícula de dimensiones $B \times L$ (figura 14), al asumir que son partículas esféricas el difractor interpreta que hay una partícula de diámetro ϕ_L , donde $\phi_L = L \cos\theta$, como se indica en la figura 14. De esta manera hay grandes diferencias entre el valor del área real y del área de la esfera ϕ_L , así como entre sus volúmenes y por tanto su contribución a la distribución granulométrica. La esfera de diámetro ϕ_L sobredimensiona los volúmenes de la partícula real.

Las figuras 15 y 16 muestran ejemplos de las distribuciones obtenidas a partir de los datos obtenidos mediante vibrotamizador y difractor.

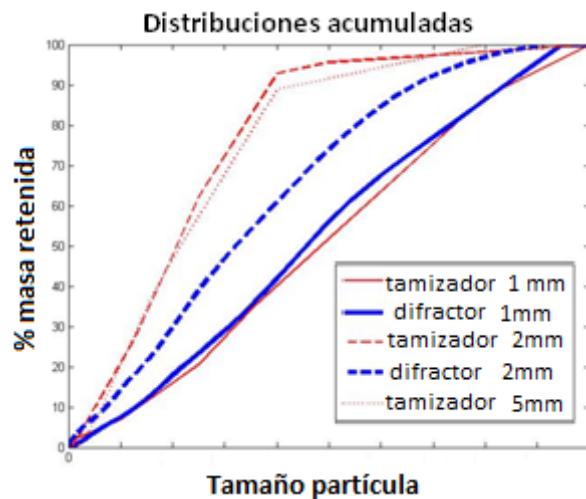


Figura 15. Ejemplos de distribución granulométrica según los dos métodos para el chopo

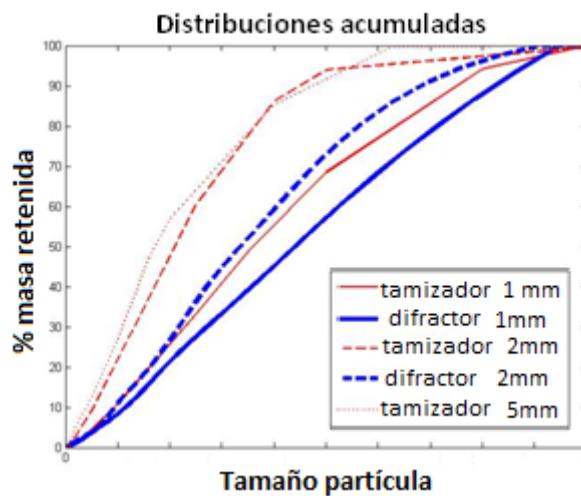


Figura 16. Ejemplos de distribución granulométrica según los dos métodos para el maíz

En las figuras 15 y 16 no aparecen las gráficas de los datos analizados con el difractor cuando el diámetro objetivo es 5 mm. Esto se debe a las limitaciones que se han comentado antes y que no permiten determinar la dimensión de partículas de un tamaño superior a 2 mm.

Observando las gráficas se puede concluir que las diferencias en las granulometrías según el método utilizado es mayor en los casos con mayores diámetros objetivos, ya que cuanto menor es el diámetro objetivo, el ratio de las dimensiones L/B de las partículas tiende a

disminuir [13] pues en las sucesivas roturas es más probable que se rompa por la dimensión mayor y el ratio es más próximo a 1.

La tabla 9 muestra los valores del parámetro d_{geom} según los datos del tamizador y del difractor para diferentes pruebas, donde se ve que el tamaño de las partículas del difractor son mayores y que efectivamente el ratio L/B es mayor para diámetros objetivos mayores.

Tabla 9. Valores de d_{geom} según el método de medición para pruebas con maíz

	HIS2RPM	HIS2rpm	hIS2RPM	hIS2rpm	HIS1RPM	HIS1rpm	hIS1RPM	hIS1rpm
Tamizador	0,3291	0,3497	0,2642	0,3757	0,2901	0,2954	0,2778	0,2849
Difractor	0,5644	0,5923	0,474	0,5979	0,3492	0,3713	0,3596	0,3599
Ratio	1,715	1,693	1,794	1,591	1,203	1,256	1,294	1,263

La figura 17 muestra imágenes de la biomasa obtenida donde se ve que la forma de las partículas no es esférica.

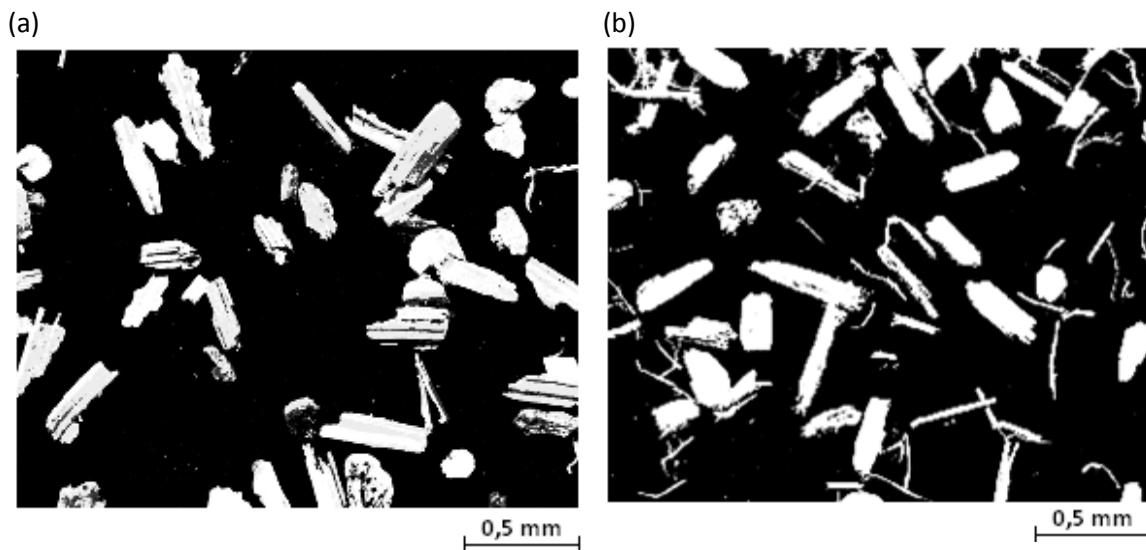


Figura 17. Imagen de las partículas de maíz (a) y chopo (b)

Las principales diferencias en los valores se deben a:

- La forma irregular de la partícula, que da un tamaño diferente según cuál de sus dimensiones se mide
- El tamizado vibratorio da tamaños de dimensión menor de la partícula.
- Los datos del difractor dependen de la posición de la partícula en el fluido en el momento en que la onda incide sobre ella y por el tipo de flujo suele ser la dimensión mayor.
- La suposición de esfericidad de las partículas en el difractor láser

5 CONCLUSIONES

A lo largo de este proyecto se ha explicado la importancia de una buena caracterización de la biomasa molida para sus usos posteriores. Se ha analizado la influencia de las condiciones de trabajo tanto de las instalaciones como del material y se ha observado que el método utilizado para la medición tiene repercusiones en los resultados. Tras evaluar los resultados de todas las pruebas experimentales se concluye lo siguiente:

- La calidad del ajuste (R^2) de las distribuciones a la distribución Rosin-Rammler es siempre superior a 95%, por lo que se considera un ajuste adecuado para describir la distribución de los tamaños de partículas de biomasa molida.
- El conjunto de parámetros de tamaño y de forma ofrecen información sobre las tendencias de la distribución y ésta puede ser definida mediante los valores numéricos de los parámetros.
- Las distribuciones granulométricas tanto para la paja de maíz como para las astillas de chopo son uniformes, ascienden de forma gradual, tienen un gran rango de tamaños y hay una mayor cantidad de partículas finas.
- La influencia de las variables estudiadas (contenido en humedad, tamaño de entrada, tamaño final deseado y revoluciones del molino) es diferente en la paja de maíz y astillas de chopo.
Para el caso del chopo las variables diámetro objetivo y humedad tienen una mayor repercusión en los parámetros de tamaño y las variables diámetro objetivo y revoluciones la tienen en los parámetros de forma.
Para el maíz las variables más influyentes son diámetro objetivo y revoluciones en los parámetros de tamaño y se considera que el comportamiento de los parámetros de forma es aleatorio.
- La variable con mayor influencia para los dos materiales es la luz de malla (tamaño objetivo) llegando a tener en algunas ocasiones una influencia 5 veces mayor que la siguiente variable. Sin embargo, no da una información cuantitativa sobre los tamaños de la partícula ya que la reducción del diámetro de tamaño implica una reducción en los tamaños de partícula pero no se conoce la disminución cuantitativa.
- El tamaño de entrada de la biomasa al molino en el rango de variación estudiado no tiene repercusión en los resultados.
- Se ha comprobado que los resultados obtenidos dependen fuertemente del método utilizado para la medición. En este caso los datos sobre los tamaños de la partícula con el difractor pueden llegar a ser 2 veces el valor obtenido con el tamizador.

Líneas futuras

Tras la realización del estudio se puede concluir que el método utilizado para la obtención de los resultados es esencial para una buena caracterización de la muestra. En este caso las dos técnicas utilizadas acarrean errores debidos a su metodología.

La diferencia en los resultados de los tamaños se debe a la forma irregular de las partículas y al principio de medida de cada método. El tamizado vibratorio da tamaños de dimensión menor de la partícula, mientras que el difractor da tamaños de dimensión mayor. Si la forma de la partícula fuera esférica esto no supondría un problema, pero si lo supone al ser la forma de las partículas cilíndricas.

En líneas futuras se investigará sobre la utilización de otros métodos que puedan eliminar los errores presentes en éstos. Un ejemplo de esto es el análisis de imágenes, que consiste en la obtención de imágenes de las partículas gracias a un escáner y el procesamiento de los datos obtenidos a través del ordenador. Con este método se conoce la forma de la partícula, una de las causas de los errores y permite aplicar correcciones a los resultados.

6 BIBLIOGRAFÍA

- [1]. Intergovernmental panel on climate change (IPCC), "Special report on renewable energy sources and climate change mitigation", pp. 1-7, 2011, Abu-Dabi (Emiratos árabes unidos)
- [2]. Fernando Sebastián, "Energía de la biomasa", volumen 1, Máster Europeo en Energías Renovables, Prensas Universitarias de Zaragoza, pp. 1-21, 2004, Zaragoza (España)
- [3]. Paula Canalís, "Capítulo 1: Introducción al aprovechamiento energético de biocombustibles sólidos", Energía de la biomasa, Volumen 1, pp.47-55, Prensas Universitarias de Zaragoza, 2010, Zaragoza (España)
- [4]. Miguel Gil, "Capítulo 7: Pretratamiento: reducción granulométrica", Energía de la biomasa, Volumen 1, pp.239-278, Prensas Universitarias de Zaragoza, 2010, Zaragoza (España)
- [5]. M.Gil, A.González, A.Gil, "Evaluation of milling energy requirements of biomass residues in a semi-industrial pilot plant for co-firing", Proceedings 16th European Biomass Conference and Exhibition, 2008, Valencia (España).
- [6]. Alvin R. Womac, "Knife milling operating factors effects on switchgrass particle size distributions", Bioresource Technology, Volume 100, Issue 21, pp. 5176-5188, 2009, Knoxville (EEUU)
- [7]. C.Igathinathane, "Sieveless particle size distribution analysis of particulate materials through computer vision", Computers and Electronics in Agriculture, Volume 66, Issue 2, pp. 147-153, 2009, Mississippi (EEUU)
- [8]. A.P.Tinke, "Particle shape and orientation in laser diffraction and static image analysis size distribution analysis of micrometer sized rectangular particles", Powder Technology, Volume 186, Issue 2, pp 154-156, 2007, Beerse (Bélgica)
- [9]. Lin Jianzhong, "Numerical research on the orientation distribution of fibers immersed in laminar and turbulent pipe flows", Journal of Aerosol Science, Volume 35, Issue 1, pp. 63-82, 2004, Hangzhou (China)
- [10]. Natalie Nathier-Dufour, L.Bougeard, "Comparison of sieving and laser diffraction for the particle size measurements of raw materials used in foodstuff", Powder Technology, Volume 76, Issue 2, pp 191-200, 1993, Nantes (Francia)
- [11]. Odette Bernstein, Michael Shapiro, "Direct determination of the distribution orientation function of cylindrical particles immersed in laminar and turbulent shear flow", Journal of Aerosol Science, Volume 25, Issue 1, pp 113-136, 1993, Ness-Ziona (Israel)
- [12]. Sudhir K. Sastry, "Orientation distribution of solids in continuous solid-liquid flow in a vertical tube" Chemical Engineering Science, Volume 59, Issue 13, pp. 2771-2775, Elsevier, 2004, Ohio (EEUU)
- [13]. Moustafa Saad, "Morphological characterization of wheat powders, how to characterize the shape of particles?", Journal of Food Engineering, Volume 102, Issue 4, pp.293-301, 2011, Montpellier (Francia)
- [13]. C.Andrés, "Particle-size distribution of a powder: comparison of three analytical techniques", International Journal of Pharmaceutics, Volume 144, Issue 2 ,pp. 141-146, 1996, Dijon (Francia)

- [14]. Makio Naito, "Effect of particle shape on the particle size distribution measured with commercial equipment", Powder Technology, Volume 100, Issue 1, Pp. 52-60, 1998, Mississippi (EEUU)
- [15]. Hiroaki Masuda, Ko Higashitani , Hideto Yoshida, "Powder technology handbook", 3^a edición, Taylor & Francis, pp. 1-52, 2006, Boca Ratón (EEUU)
- [16]. Miguel Gil, "Diseño y puesta en marcha de una instalación de pretratamiento de carbón y biomasa", Proyecto fin de carrera, 2006, Zaragoza
- [17]. José Luis Sánchez Cebrián, "Curso diseño de experimentos", Máster Universitario en Iniciación a la Investigación en Ingeniería Química y del Medio Ambiente, Prensas Universitarias de Zaragoza, pp.
- [18]. C.Igathinathane, "Shape identification and particle size distribution from basic shape parameters using ImageJ", Computers and Electronics in Agriculture, Volume 63, Issue 2, pp. 168-182, 2008, Mississippi (EEUU)
- [19]. A.G.Borrego, C.Abanades, "El problema energético mundial", Curso Fronteras de la Energía, 2009, Benasque (España)
- [20]. Agencia Internacional de Energía, "Clean energy progress report", IEA input to the clean energy ministerial, pp. 40-58, 2011, París (Francia)
- [21]. Consejo Nacional del Petróleo, "Hardthruths, enfrentando el problema energético mundial", pp. 13-19, 2007, Washington D.C. (EEUU)
- [22]. United Nations Framework Convention on Climate Change, '*KYOTO PROTOCOL REFERENCE MANUAL ON ACCOUNTING OF EMISSIONS AND ASSIGNED AMOUNT*', pp. 13, 31-39, 2008, Kyoto (Japón)