

**EVALUACIÓN DE LA DENSIFICACIÓN TEÓRICA DE TAMO DE ARROZ Y  
RASTROJO DE MAÍZ PROVENIENTES DE ZNI DE COLOMBIA- CASO DE  
ESTUDIO**

**JENSSY PAOLA BUITRAGO BELTRÁN  
KAREN YINETH MEDINA PAIPILLA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
BUCARAMANGA**

**2017**

**EVALUACIÓN DE LA DENSIFICACIÓN TEÓRICA DE TAMO DE ARROZ Y  
RASTROJO DE MAÍZ PROVENIENTES DE ZNI DE COLOMBIA- CASO  
ESTUDIO**

**JENSSY PAOLA BUITRAGO BELTRÁN  
KAREN YINETH MEDINA PAIPILLA**

**Trabajo de grado como requisito parcial para optar al título de Ingeniero  
Químico**

**Director:**

**Viatcheslav V. Kafarov  
Ingeniero Químico, Dr.Sc.**

**Co-director:**

**Yurley Paola Villabona Durán  
Ingeniera Química**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
BUCARAMANGA**

## DEDICATORIA

*A Dios por darme la sabiduría para llegar a este punto*  
*A mis Padres por ser un ejemplo de vida, por su apoyo incondicional,*  
*paciencia e infinito amor*  
**PAOLA BUITRAGO BELTRAN**

## DEDICATORIA

*A Dios por la vida*

*A mi Padre, por su apoyo incondicional, amor y ejemplo de  
perseverancia, responsabilidad y entrega*

*A mi Madre, por su infinito amor, paciencia y ejemplo de humildad,  
sentimientos puros y bondad*

*A mi hermana, por su compañía en cada paso de mi vida y su voz de  
aliento para motivarme.*

*Son mi razón de ser.*

*KAREN MEDINA PAIPILLA*

## **AGRADECIMIENTOS**

Las autoras expresan sus más sinceros agradecimientos a la Universidad Industrial de Santander por el privilegio de hacer parte de su comunidad universitaria y formar profesionales y personas.

Al Dr. Sc, Viatcheslav Kafarov, la Ingeniera Paola Villabona y al Centro de Investigación para el Desarrollo Sostenible en Industria y Energía por brindarnos la oportunidad de realizar este trabajo de grado.

A nuestros profesores de la escuela de Ingeniería Química, por brindar su conocimiento y experiencia a nuestra formación integral, siendo guías en el camino.

## TABLA DE CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	16
<b>1. DENSIFICACIÓN DE LA BIOMASA</b> .....	19
<b>2. OBJETIVOS</b> .....	21
<b>2.1. OBJETIVO GENERAL</b> .....	<b>21</b>
<b>2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS</b> .....	<b>21</b>
<b>3. METODOLOGÍA</b> .....	22
<b>3.1. ETAPA 1: ANÁLISIS DE LA EXERGÍA QUÍMICA DE LA BIOMASA</b> .....	<b>22</b>
<b>3.1.1. Calculo del factor <math>\beta</math>.</b> .....	<b>23</b>
<b>3.1.2. Calculo de la exergía química total</b> .....	<b>23</b>
<b>3.2. ETAPA 2: ANÁLISIS TEÓRICO DEL PROCESO DE DENSIFICACIÓN</b> .....	<b>24</b>
<b>3.2.1. Procesamiento y selección de datos</b> .....	<b>24</b>
<b>3.3. ETAPA 3: FACTORES QUE INCIDEN EN EL PROCESO DE DENSIFICACIÓN</b> .....	<b>25</b>
<b>3.3.1. Procesamiento de datos y selección de rangos</b> .....	<b>25</b>
<b>3.4. ETAPA 4: EQUIPO DE DENSIFICACIÓN DE BIOMASA</b> .....	<b>26</b>
<b>3.4.1. Procesamiento de datos</b> .....	<b>26</b>

3.4.2. Diseño del sistema de densificación .....	27
4. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	29
4.1. ANÁLISIS EXERGÉTICO DE LA BIOMASA.....	29
4.1.1. Cálculo del factor $\beta$ .....	30
4.1.2. Cálculo de la exergía química total.....	30
4.2. ANÁLISIS TEÓRICO DEL PROCESO DE DENSIFICACIÓN .....	30
4.2.1. Procesamiento y selección de datos.....	31
4.3. FACTORES QUE INCIDEN EN EL PROCESO DE DENSIFICACIÓN .....	36
4.3.1. Procesamiento y selección de rangos .....	37
4.4. EQUIPO DE DENSIFICACIÓN DE BIOMASA.....	40
4.4.1. Procesamiento de datos .....	40
4.4.2. Diseño del equipo de densificación .....	43
5. CONCLUSIONES .....	47
6. RECOMENDACIONES.....	48
7. REFERENCIAS.....	49
BIBLIOGRAFIA .....	57
ANEXOS.....	64

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
<b>Figura 1.</b> Desarrollo metodológico .....	22
<b>Figura 2.</b> Análisis del diámetro, longitud y humedad .....	32
<b>Figura 3.</b> Análisis del diámetro, longitud y humedad para briquetas .....	34
<b>Figura 4.</b> Análisis de la molienda para el tamo de arroz y el rastrojo de maíz .....	35
<b>Figura 5.</b> Análisis del secado para el tamo de arroz y el rastrojo de maíz .....	35
<b>Figura 6.</b> Análisis rango de humedad.....	37
<b>Figura 7.</b> Análisis tamaño de partícula .....	38
<b>Figura 8.</b> Análisis tipo de aglomerante .....	39
<b>Figura 9.</b> Tipo de equipo de densificación.....	40
<b>Figura 10.</b> Máquina Pelletizadora con Matriz Plana. ....	44

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
<b>Tabla 1.</b> Cultivos, residuos y áreas cosechadas por departamento de las ZNI .....	17
<b>Tabla 2.</b> Componentes del tamo de arroz y el rastrojo de maíz. ....	29
<b>Tabla 3.</b> Parámetros termodinámicos del azufre, agua y cenizas .....	29
<b>Tabla 4.</b> Parámetro $\beta$ para el tamo de arroz y el rastrojo de maíz.....	30
<b>Tabla 5.</b> Exergía química del tamo de arroz y el rastrojo de maíz.....	30
<b>Tabla 6.</b> Tipos de equipos de densificación.....	41
<b>Tabla 7.</b> Parámetros prensa granuladora .....	43
<b>Tabla 8.</b> Parámetros iniciales .....	44
<b>Tabla 9.</b> Parámetros de la pelletizadora .....	45

## ANEXOS

	<b>Pág.</b>
<b>Anexo A.</b> Resultados de los análisis fisicoquímicos de la biomasa residual .....	64
<b>Anexo B.</b> Resultados de la búsqueda de información acerca de pellets y briquetas .....	65
<b>Anexo C.</b> Resultados de la búsqueda de información acerca del tipo de molino para biomasa agrícola .....	71
<b>Anexo D.</b> Resultado de la búsqueda a cerca del tipo de secado para biomasa agrícola .....	73
<b>Anexo E.</b> Resultados de la búsqueda a cerca de los factores que influyen en el proceso de densificación.....	75
<b>Anexo F.</b> Resultados del diseño del equipo de densificación.....	80

## RESUMEN

**TÍTULO:** EVALUACIÓN DE LA DENSIFICACIÓN TEÓRICA DE TAMO DE ARROZ Y RASTROJO DE MAÍZ PROVENIENTES DE LAS ZONAS NO INTERCONECTADAS DE COLOMBIA <sup>1\*</sup>

**AUTORES:** JENSSY PAOLA BUITRAGO BELTRÁN, KAREN YINETH MEDINA PAIPILLA<sup>\*\*</sup>

**PALABRAS CLAVE:** Biomasa, densificación, humedad, tamaño de partícula, pellets, briquetas, pelletizadora.

### DESCRIPCIÓN:

La biomasa corresponde a la materia orgánica proveniente de residuos de animales, forestales, urbanos y agrícolas. Debido a que la recolección de dichos residuos resulta complicada, como ocurre en las Zonas no Interconectadas de Colombia que ocupan el 52% de territorio nacional, se ha estudiado la densificación de esta biomasa para producir biocombustibles sólidos con la calidad suficiente para suplir deficiencias energéticas de estos departamentos, como por ejemplo el Meta; aprovechando los residuos de cosecha, tamo de arroz y rastrojo de maíz, gracias a su contenido de exergía química cercano al de los combustibles derivados del petróleo. La densificación consiste en la reducción de volumen mediante un sistema de compactación. Este trabajo de investigación tiene como propósito evaluar la densificación teórica de esta biomasa, teniendo en cuenta su proceso de molienda en un molino de cuchillas y secado forzado; también la forma de compactación en pellets y briquetas, acorde a sus dimensiones, contenido de cenizas y humedad. De igual forma se estudian los rangos adecuados de humedad (15%-30%), tamaño de partícula (3 mm) y el tipo de aglomerante (almidón) para el proceso de densificación, garantizando así la correcta formación de la biomasa compactada. Este proceso, es realizado en una máquina pelletizadora de rodillos de matriz granuladora plana, debido a su estructura menos compleja y ventajas como: facilidad de construcción, montaje y mantenimiento, además de presentar mayor vida útil.

---

\* Trabajo de grado.

\*\* Facultada de Ingeniería Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director. Dr. Sc. Viatcheslav V. Kafarov Co-directora: Ing. Yurley Paola Villabona Durán.

## ABSTRACT

**TITLE:** ASSESSMENT OF THE THEORETICAL DENSIFICATION OF RICE STRAW AND CORN STOVE<sup>2</sup>R FROM NO-INTERCONNECTED ZONES OF COLOMBIA\*.

**AUTHORS:** JENSSY PAOLA BUITRAGO BELTRÁN, KAREN YINETH MEDINA PAIPILLA\*\*

**KEYWORDS:** Biomass, densification, moisture, particle size, pellets, briquettes, pelletizer.

### DESCRIPTION:

The biomass corresponds to the organic matter from of animals, forest, urban and agricultural waste. Because the collection of such waste is complicated, as occurs in the no-interconnected areas of Colombia that occupy 52% of national territory, the densification of this biomass have been examined to produce solid biofuels in sufficient quality in order to address energy deficiencies of these departments; such as Meta, building on the crop wastes, rice straw and corn stubble; thanks to its content of chemical exergy close to that of the oil-based fuels. The densification is the reduction in volume through a compacting system. This research is intended to evaluate the theoretical densification of this biomass, taking into account its process of grinding in a Blade Mill and a Forced Dry System, also how to compact in pellets and briquettes, appropriate to its size, ash and moisture content. In the same way we study the moisture appropriate ranges (15%-30%), particle size (3 mm) and kind of binder (starch) for the process of densification, thereby ensuring the correct formation of the compacted biomass. This process is carried in a pelletizer machine of rollers of granulator with a flat matrix, because of their less complex structure and advantages, such as facility of construction, assembly and maintenance, in addition to presenting long service life.

---

\* Bachelor Thesis.

\*\* Physic-chemist Engineering Faculty. Chemical Engineering School. Director Dr. Sc. Viatcheslav V. Kafarov. Co-director Ing. Yurley Paola Villabona Durán.

## INTRODUCCIÓN

El término biomasa se refiere a la materia orgánica proveniente de desechos de animales, agricultura, proceso de aserrío, residuos urbanos, plantas y árboles; la agricultura genera cantidades considerables de residuos; se estima que del proceso de cosecha queda más del 60% de la biomasa total, aprovechándose solo un 40% que representa el producto. En los procesos pos cosecha, de ese 40% aprovechable, entre 20% y 40% termina convirtiéndose en material residual [1].

La recolección de esta materia representa uno de los principales inconvenientes al utilizarla, ya que las actividades tradicionales la dejan distribuida a lo largo de la superficie de cosecha, como es el caso de las zonas con alta producción agrícola. Dentro de estas zonas, se encuentran las llamadas ZNI (zonas no interconectadas) [2]. Según el Artículo 1º, Ley 855 de 2003: “Para todos los efectos relacionados con la prestación del servicio público de energía eléctrica se entiende por ZNI a los municipios, corregimientos, localidades, y caseríos no interconectados al SIN” [3].

Las ZNI son equivalentes al 52% del territorio nacional, donde se incluyen 92 municipios, 20 territorios especiales, biodiversos y fronterizos [4]. están ubicadas a larga distancia de los centros urbanos, tienen difícil acceso y gran riqueza de recursos naturales [5], [6]. Además, altos costos de prestación de servicio de energía eléctrica y alto nivel de pérdidas.

El departamento del Meta hace parte de estas zonas y tiene un gran potencial de biomasa agrícola que puede ser aprovechada en procesos termoquímicos, gracias a su bajo contenido de humedad (Ver Anexo A), están inversamente correlacionada

con el poder calorífico [7],[8]; como por ejemplo: los rastrojos de maíz, que reúne el conjunto de hojas y tallos sobrantes en el terreno después de cortar un cultivo y el tamo de arroz, también conocido como paja, que es un subproducto obtenido en el proceso del pulido de la obtención del arroz blanco [9]. Esto demuestra la posibilidad de ser utilizada para la densificación con fines energéticos. En la Tabla 1 se presentan estos cultivos y sus desechos para este departamento:

**Tabla 1.** Cultivos, residuos y áreas cosechadas por departamento de las ZNI

DEPARTAMENTO	CULTIVO	RESIDUO	AREA COSECHADA (HA)
META	Maíz	Rastrojo	9.759
	Arroz	Tamo (TA)	6.021

Fuente: (Rodríguez, 2016) [9]

En cuanto a la disponibilidad y aprovechamiento de estas biomásas, se ha tomado en consideración sus diferentes aplicaciones, con el fin de sustituir o complementar los combustibles fósiles como el gas, petróleo o el carbón para la generación de energía [10]. La incorporación de la biomasa a las demandas térmicas industriales y sobre todo urbanas y rurales, requiere un cambio de modelo de suministro energético, con menor costo en instalaciones más sofisticadas y sencillas en aplicaciones térmicas como calefacción, refrigeración y producción de agua caliente en el sector doméstico, calor para procesos industriales y generación de electricidad [11].

Para facilitar el manejo de la biomasa y su posterior uso es necesario secarla previamente y de esta forma también reducir costes en el transporte. Existen dos formas de secado, secado natural y secado forzado. El secado natural es ideal para zonas en donde la materia prima se encuentra con humedad mayor al 30% [12], se

basa en aprovechar las condiciones ambientales favorables para facilitar la deshidratación de la biomasa [13]. El secado forzado tiene un costo y sólo es necesario para algunos usos finales como la producción de pellets; en este, un flujo térmico realiza la deshidratación de la biomasa hasta la humedad deseada, a partir de sistemas neumáticos que se basan en el arrastre de la materia prima con granulometría fina que requieren una deshidratación ligera; o sistemas rotatorios, que se utilizan con materia prima de granulometría fina y muy húmeda [14].

## 1. DENSIFICACIÓN DE LA BIOMASA

Para el aprovechamiento de la biomasa se han empleado procesos como la densificación que tiene grandes ventajas como facilidad de manejo, reducción considerable de las pérdidas por degradación durante periodos largos de almacenaje [11], recirculación ecológica de los gases de efecto invernadero y emisiones controlables de materiales pesados [15]. Este proceso consiste en la reducción del volumen de la biomasa mediante sistemas de compactación [16]; estos se pueden clasificar en empaçado, pelletización, extrusión y fabricación de briquetas. La pelletización y la fabricación de briquetas son los procesos más comunes que se utilizan para la densificación de la biomasa para su posterior uso como biocombustible sólido[11]; los pellets, generalmente tienen entre 6 y 8 mm de diámetro y de 25 a 60 mm de longitud; las briquetas son cilindros de 50 a 130 mm de diámetro y de longitud variable de 5 a 30 mm [17], [18].

Se han llevado a cabo varias investigaciones para preparar combustibles a partir de biomasa. Rhen *et al.* [19] investigaron los efectos de la humedad en el material, la presión de densificación y la temperatura sobre algunas propiedades de los pellets a base de Abeto rojo, concluyendo que la humedad es el factor más importante para la compactación. Mani y Sokhansanj [20] analizaron los efectos de la fuerza de compresión, tamaño de partícula y contenido de humedad sobre las propiedades mecánicas de los pellets de biomasa a base de pasto (como la paja del trigo, paja de cebada), considerando estos factores como los más significativos para la densificación. Kaliyan y Morey [21] discuten los factores que afectan la fuerza y la durabilidad de los productos de la biomasa densificada concluyendo que la humedad, tamaño de partícula y el equipo de densificación, inciden en la durabilidad de la biomasa compactada. Con los estudios anteriores se concluye que la densificación de biomasa conlleva muchos factores para su adecuado proceso, entre los que se destacan la humedad, tamaño de partícula y tipo de aglomerante,

siendo importantes para hacer de este proceso una alternativa de gran potencial para el aprovechamiento de desechos.

Las características de pellets y briquetas están reglamentadas por las normas UNE-CEN/TS 14961:2007 EX, CTI R04/06, DIN PLUS y DIN 5173, siendo la UNE-CEN/TS 14961:2007 EX la más utilizada en Colombia. La elaboración de briquetas y pellets se puede hacer con o sin aglomerante, como son resinas fenólicas, almidones provenientes de los vegetales modificados, y de las arcillas [22], prescindir de estos es más conveniente, pero requiere de equipos que generan aumento de costos y procesos más complejos para su preparación, por lo que en la industria para la fabricación de estos el éxito reside en diseñar equipos simples con uso práctico y de bajo costo [15]. Las propiedades mecánicas de los biocombustibles sólidos alcanzados, dependen de la materia prima utilizada, la humedad y la presión de compactación [1].

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. OBJETIVO GENERAL**

Realizar un estudio teórico del proceso de densificación de tamo de arroz y rastrojo de maíz provenientes de zonas no interconectadas (ZNI) de Colombia – Caso de estudio

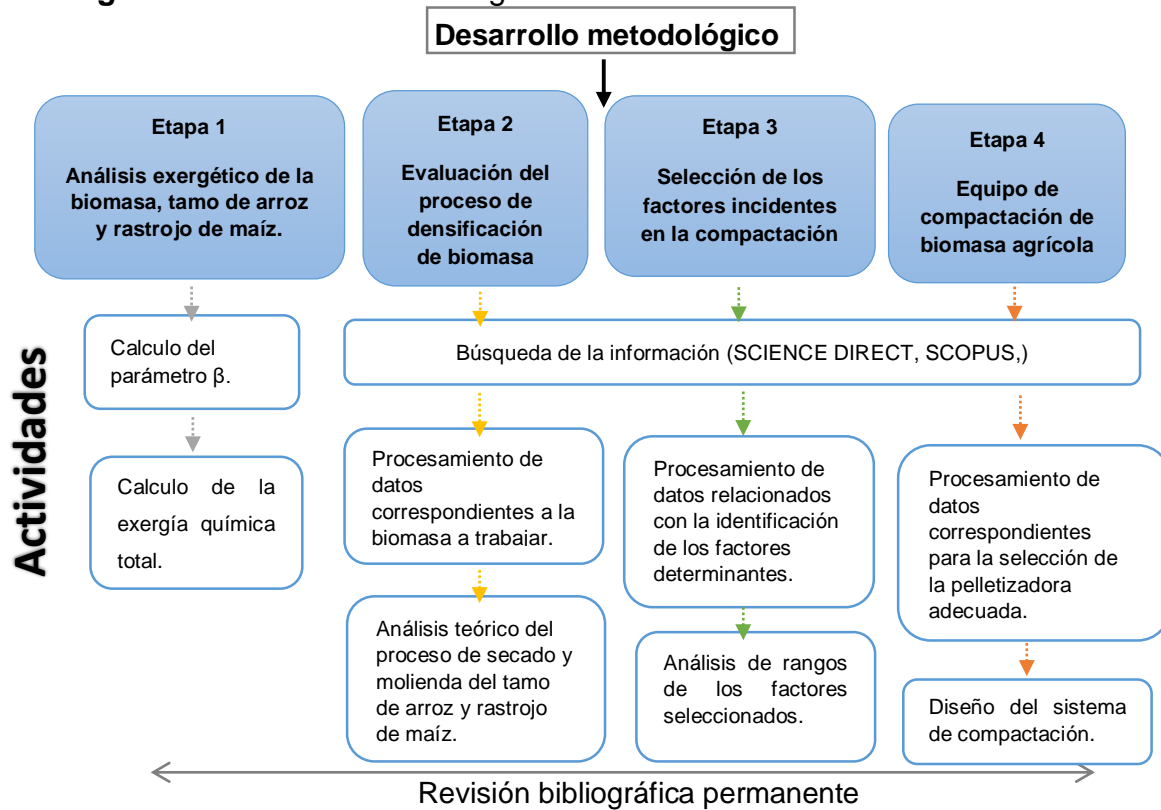
### **2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

1. Evaluar el tamo de arroz y rastrojo de maíz por medio de análisis exergético.
2. Analizar de forma teórica el proceso de densificación de biomasa de tamo de arroz y rastrojo de maíz.
3. Determinar los factores que inciden en el proceso de densificación de tamo de arroz y rastrojo de maíz.
4. Realizar un prototipo del equipo de densificación.

### 3. METODOLOGÍA

A continuación se expone la metodología empleada, en donde se llevó a cabo la revisión bibliográfica para cada una de las etapas presentes.

**Figura 1.** Desarrollo metodológico



#### 3.1. ETAPA 1: ANÁLISIS DE LA EXERGÍA QUÍMICA DE LA BIOMASA

El análisis de la exergía química permitió identificar el máximo trabajo útil que puede ser producido por el proceso de equilibrio químico y físico de la sustancia con el ambiente [23]. Para la biomasa la exergía química se calculó usando el valor calórico neto (LHV), las fracciones másicas de los materiales orgánicos, sulfuros,

agua y ceniza presentes en la biomasa por medio de la ecuación (1) [24], estas características fueron suministradas por un estudio previo que se realizó en el Centro de Investigación para el Desarrollo Sostenible en Industria y Energía (CIDES) [9] (ver Anexo A).

**3.1.1. Calculo del factor  $\beta$ :** El factor  $\beta$  se calculó utilizando las correlaciones estadísticas desarrolladas por Szargut y Styrylska (1964) y a lo reportado por Hepbasli (2008) [23], ecuación (1):

$$\beta = \frac{1.042 + 0.2160\left(\frac{W_{H_2}}{W_c}\right) - 0.2499\left(\frac{W_{O_2}}{W_c}\right) \left[1 + 0.7884\left(\frac{W_{H_2}}{W_c}\right)\right] + 0.045\left(\frac{W_{N_2}}{W_c}\right)}{1 - 0.3035\left(\frac{W_{O_2}}{W_c}\right)} \quad (1)$$

Donde:

$\beta$  : Relación entre la exergía química y el LHV de la sustancia orgánica seca (adimensional).

$W_i$  : Fracción másica del compuesto i

**3.1.2. Calculo de la exergía química total:** Para realizar el cálculo de la exergía química total se empleó la siguiente ecuación:

$$E_{ch,total} = W_{org}(\beta LHV_{org}) + W_S(E_{ch,S} - C_S) + W_{agua}E_{ch,agua} + W_{ceniza}E_{ch,ceniza} \quad (2)$$

Donde:

$E_{ch}$  : Exergía química (kJ/kg)

$W_i$  : Fracción másica del compuesto i

$LHV_{org}$  : Valor calorífico inferior de la fracción orgánica por kilogramo (kJ/kg org.fr.)

$\beta$  : Relación entre la exergía química y el LHV de la sustancia orgánica seca (adimensional)

$C_S$  : Calor calorífico del sulfuro (kJ/kg)

### **3.2. ETAPA 2: ANÁLISIS TEÓRICO DEL PROCESO DE DENSIFICACIÓN**

Se analizaron dos formas de densificación de biomasa agrícola, pellets y briquetas, con respecto a sus parámetros fisicoquímicos según normatividad internacional (NTC 2060, UNE-CEN/TS 14961:2007 EX, CTI R04/06) y revisión en bases de datos (SCIENCE DIRECT y SCOPUS) para los últimos 5 años, teniendo en cuenta para cada una de estas el tipo de densificación (pellets y briquetas), molienda y secado, enfocado en dos tipos de biomasa: Tamo de arroz y Rastrojo de maíz de ZNI de Colombia (Puerto Concordia-Meta). Como resultado se obtuvo la información necesaria para realizar el procesamiento de datos y la selección de información para realizar el análisis teórico de molienda y secado del tamo de arroz y el rastrojo de maíz.

**3.2.1. Procesamiento y selección de datos:** Una vez realizada la búsqueda de información, se analizaron los datos conforme a los siguientes criterios:

**3.2.1.1. Forma de compactación:** Con la información seleccionada de las bases de datos, se establecieron los parámetros de cada forma de compactación de biomasa, como lo son su diámetro, longitud, contenido de cenizas y humedad, para pellets y briquetas.

**3.2.1.2. Análisis teórico de la molienda de la biomasa:** A partir de la información seleccionada en base a estos criterios se estableció el equipo más adecuado para la molienda del tamo de arroz y el rastrojo de maíz, bajo los siguientes criterios de tipo de biomasa y tipo de molino.

**3.2.1.3. Análisis teórico del secado de la biomasa:** A partir de la información seleccionada en base a estos criterios se estableció la forma adecuada para realizar el secado en el tamo de arroz y el rastrojo de maíz, bajo los siguientes criterios de tipo de biomasa, secado natural y secado forzado.

### **3.3. ETAPA 3: FACTORES QUE INCIDEN EN EL PROCESO DE DENSIFICACIÓN**

Se realizó la búsqueda de información en bases de datos (SCIENCE DIRECT y SCOPUS) de los últimos 5 años, sobre el contenido de humedad de la biomasa, el tamaño de partícula y el tipo de aglomerante como factores influyentes en el proceso de densificación. Resultado de esto, se realizó el procesamiento de datos y la selección de los rangos adecuados para cada uno de estos factores.

**3.3.1. Procesamiento de datos y selección de rangos:** Luego de realizar la búsqueda de información se escogieron los rangos propicios para cada uno de los factores estudiados de acuerdo al tipo de biomasa.

**3.3.1.1. Humedad:** Se estableció el rango más adecuado de humedad para la biomasa de estudio bajo las normas internacionales.

**3.3.1.2. Tamaño de partícula:** De acuerdo a los estudios realizados, se identificó el tamaño de partícula necesario para la densificación del tamo de arroz y rastrojo de maíz.

**3.3.1.3. Aglomerante:** Con la búsqueda bibliográfica realizada, se estableció el tipo de aglomerante adecuado para la biomasa a trabajar.

#### **3.4. ETAPA 4: EQUIPO DE DENSIFICACIÓN DE BIOMASA**

Mediante la búsqueda de producción bibliográfica en bases de datos (SCIENCE DIRECT y SCOPUS) y la información proveniente de empresas fabricantes de equipos de densificación, se analizaron las briqueteadoras y las pelletizadoras como tipos equipos para densificación.

**3.4.1. Procesamiento de datos:** Una vez realizada la recopilación bibliográfica, se seleccionó el tipo de equipo de densificación adecuado para el tamo de arroz y el rastrojo de maíz.

**3.4.1.1. Selección del equipo de densificación:** Se seleccionó el tipo de equipo más adecuado para este proceso teniendo en cuenta los criterios de tipo de biomasa, forma de compactación (pellet, briquetas) y clase de matriz (anular, plana). Finalmente la selección de la granuladora más adecuada, se evaluó, mediante puntajes de 0 y 1, de las principales características de las dos clases en una tabla de decisión.

**3.4.2. Diseño del sistema de densificación :** Como resultado del procesamiento de datos y la selección del equipo, se llevó a cabo el diseño preliminar y conceptual de este por medio de cálculos de acuerdo al sistema seleccionado, teniendo en cuenta las condiciones iniciales y la normativa para la densificación de biomasa agrícola. Se obtuvieron los siguientes parámetros:

- Presión de compactación:  $P_{rodillo} = \bar{Y}_f * \varepsilon_x$  (3)

Donde:

$\bar{Y}_f$  = esfuerzo de fluencia promedio de la biomasa durante la deformación

$\varepsilon_x$  = deformación de extrusión

- Fuerza de compactación del rodillo (N):  $K = P_{rodillo} * A_{dado}$  (4)

-

- Presión en el dado (MPa):  $P_f = \bar{Y}_f * \frac{2h_f}{D}$  (5)

Donde:

$P_f$  = Presión adicional requerida para superar la fricción, (MPa)

$h_f$  = Altura final del material luego de pasar por el área de trabajo del rodillo (m).

D = diámetro del pellet (m)

- Masa del rodillo (kg):  $m_{rodillo} = V_{rodillo} * \rho_{acero}$  (6)

- Tiempo de salida de los pellets (s):  $t_{extrusión} = \frac{\theta}{\omega}$  (7)

Donde:

$\Theta$  = Angulo de desplazamiento del rodillo (rad)

$\omega$  = velocidad angular de la matriz (rpm)

– Potencia requerida para compactar (w):  $P = 2\pi * rpm_{matriz} * K * X$  (8)

Donde:

X = desplazamiento angular (m).

## 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

A continuación se presentan los resultados obtenidos para cada una de las etapas mencionadas en la metodología.

### 4.1. ANÁLISIS EXERGÉTICO DE LA BIOMASA

Para el análisis de exergía química de la biomasa se tomó el poder calorífico para el tamo de arroz y el rastrojo de maíz de 13.854,12 KJ/kg y 12.903,72 KJ/kg respectivamente [9], teniendo en cuenta los siguientes parámetros:

**Tabla 2.** Componentes del tamo de arroz y el rastrojo de maíz.

PARÁMETRO	FRACCIÓN MÁSICA	
	Tamo de arroz	Rastrojo de maíz
C	0,37	0,40
N <sub>2</sub>	0,02	0,008
O <sub>2</sub>	0,37	0,40
H <sub>2</sub>	0,05	0,05
S	0,002	0,001
Ceniza	0,16	0,04
Agua	0,82	0,49

Fuente: (Rodríguez, 2016) [9]

**Tabla 3.** Parámetros termodinámicos del azufre, agua y cenizas

PARÁMETRO	UNIDADES	VALOR
Ech, s	KJ/kg	19.163,2
Ech, agua	KJ/kg	16.209
Ech, ceniza	KJ/kg	Despreciable
Cs	KJ/kg	8.400
LHV (Tamo de arroz)	KJ/kg	13.854,12
LHV (Rastrojo de maíz)	KJ/kg	12.903,72

Fuente: (Ojea, 2011) (Rosen et. al., 2007) (Hepbasli et. al., 2007) (Szargut,1980) [23][25][26][27]

**4.1.1. Cálculo del factor  $\beta$ :** Por medio de la ecuación 2 y la tabla 2 se calculó el parámetro  $\beta$ .

**Tabla 4.** Parámetro  $\beta$  para el tamo de arroz y el rastrojo de maíz.

PARÁMETRO	TAMO DE ARROZ	RASTROJO DE MAÍZ
$\beta$	0,82	0,82

**4.1.2. Cálculo de la exergía química total:** Finalmente de acuerdo a las tablas 3 y 4 se calculó la exergía química para el tamo de arroz y el rastrojo de maíz.

**Tabla 5.** Exergía química del tamo de arroz y el rastrojo de maíz.

PARÁMETRO	UNIDADES	TAMO DE ARROZ	RASTROJO DE MAÍZ
Ech	KJ/kg	22.556,7	16.995,1

De acuerdo a los valores de exergía calculados se infiere que el tamo de arroz y el rastrojo de maíz son biomásas con potencial para ser usadas en para procesos termoquímicos como la combustión, gasificación, entre otros [9], debido a que estos valores corresponden al máximo trabajo útil que puede ser producido por un proceso químico o físico [23].

## 4.2. ANÁLISIS TEÓRICO DEL PROCESO DE DENSIFICACIÓN

Se realizó la búsqueda del tipo de compactación en SCIENCE DIRECT empleando palabras clave como “*Properties, characteristics, classification, “agricultural biomass, rice straw, corn stover, pellets, briquettes, diameter, length, moisture”*”, y en la plataforma SCOPUS con una ecuación de búsqueda (ver Anexo B).

Se obtuvo un total de 45 artículos en los últimos 5 años y 5 normas internacionales; de los artículos resultantes, 20 estaban relacionados con pellets y 11 con briquetas. Esta información se organizó y dividió para analizar los parámetros de pellets y briquetas tales como diámetro, longitud, humedad (ver Anexo C).

De igual forma, se realizó una búsqueda de información sobre la molienda y el secado de esta biomasa. En la base de datos SCIENCE DIRECT se utilizaron las palabras clave “*Mil, grind, densification, biomass, agricultural, rice, straw, corn, stover*” para el análisis de la molienda; y para el análisis del secado “*Forced, drying, natural, agricultural, biomass, rice, straw, corn, stover, densification*”. Se plantearon unas ecuaciones de búsqueda en la plataforma SCOPUS para cada uno de estos procesos (ver Anexo B).

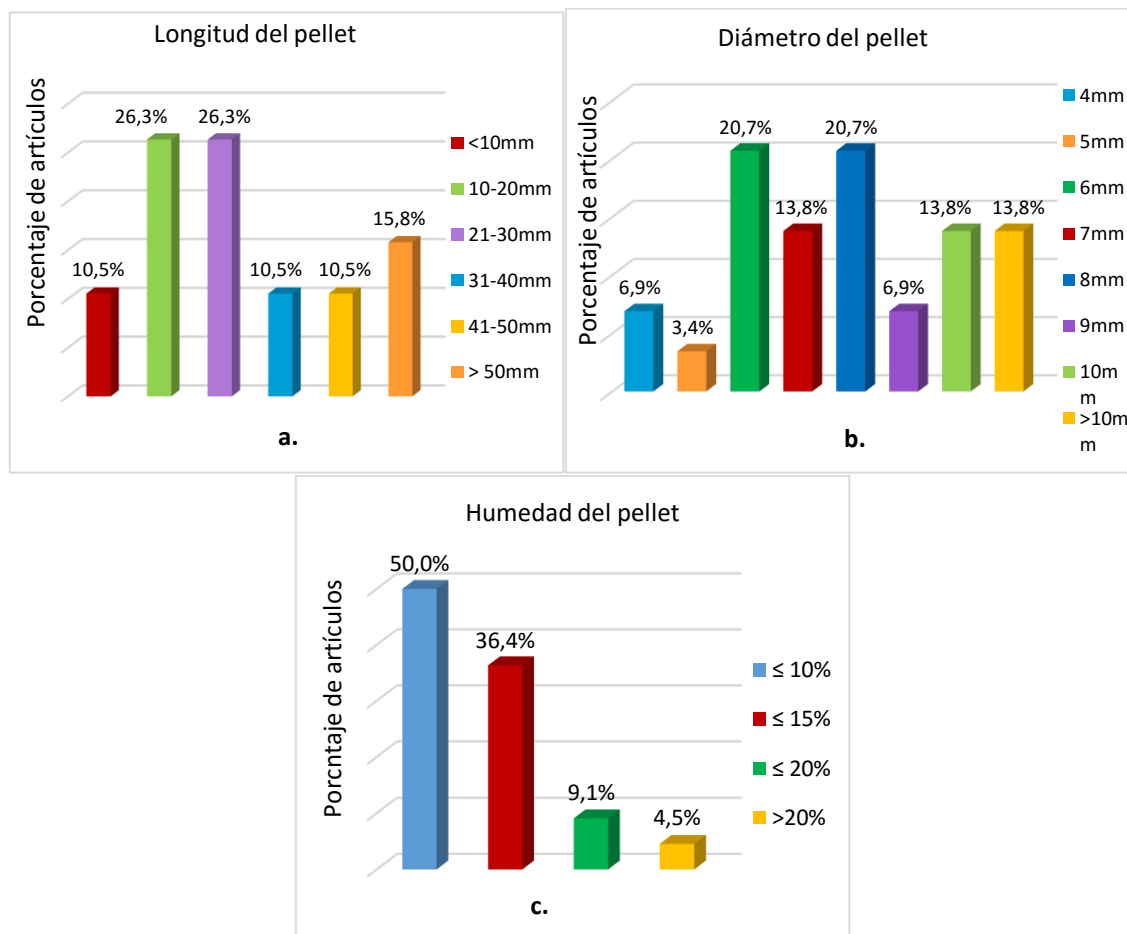
Se obtuvo un total de 45 artículos en los últimos 5 años, de los cuales 20 hablaban del proceso de molienda para biomasa agrícola (ver Anexo D) y 50 artículos en los últimos 5 años, de los cuales 15 hablaban del proceso de secado para biomasa agrícola (ver Anexo E), esta información se organizó y dividió para analizar el tipo de molino y el tipo de secado que se requieren para realizar estos procesos.

**4.2.1. Procesamiento y selección de datos:** La información encontrada se organizó y dividió para analizar la forma de compactación, tipo de molino y tipo de secado de la siguiente manera:

**4.2.1.1. Forma de compactación:** En la figura 2 se recopila la información obtenida sobre los parámetros diámetro, longitud y humedad para pellets y en la figura 3 los mismos parámetros para briquetas.

– Pellets

**Figura 2.** Análisis del diámetro, longitud y humedad



La producción de pellets de biomasa agrícola en Colombia está reglamentada por la norma UNE-CEN/TS 14961:2007 EX la cual estipula un diámetro entre 6mm y 25mm, longitud de 10mm a 100mm, contenido de humedad  $\leq 20\%$  y contenido de ceniza  $< 3,0\%$ . En la figura 2a se observa que los rangos de longitud más estudiados fueron de 10-20mm y 21-30mm con un 26,3% cada uno, que incluyen más del 50% de los resultados, por lo que se infiere que se puede abarcar todo el resultado tomando un rango que va de 10-30mm, y se encuentran dentro del rango permitido por la norma mencionada anteriormente. En la figura 2b se evidencia que los

diámetros más estudiados son de 6mm y 8mm con un 20,7%, estos valores ocupan más del 40% de los resultados; sin embargo, a pesar de que el valor de 7mm tiene un porcentaje más bajo (13,8%) se toma el rango de 6mm a 8mm, debido a que estos están dentro del rango de la reglamentación mencionada. De la figura 2c se deduce que la humedad más estudiada es  $\leq 10\%$  con un 50% abarcando la mayor parte del estudio, siendo esto acorde con la humedad permitida en la norma mencionada.

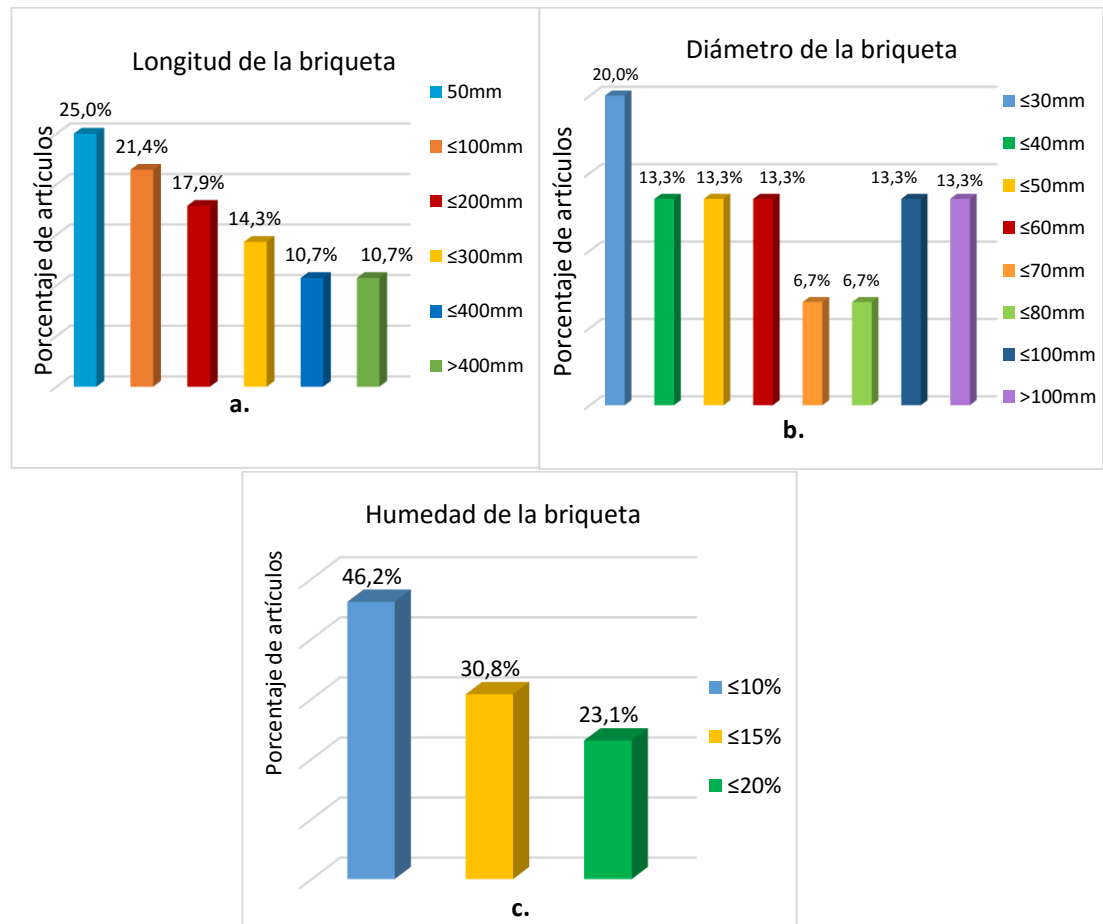
Los resultados anteriores pueden deberse, como lo explica Martin [28], y Torres [15], con estas condiciones los pellets presentan fácil manejo al momento de ser utilizados en procesos termoquímicos (combustión gasificación, etc.), además, con el rango de humedad presentado, se puede controlar la degradación de los pellets durante su almacenamiento para asegurar la correcta combustión.

#### – **Briquetas**

La norma UNE-CEN/TS 14961:2007 EX también reglamenta la producción de briquetas, estipulando un diámetro entre 25mm y 125mm, longitud desde 50mm en adelante, humedad  $\leq 20\%$  y cenizas  $< 10\%$ . De acuerdo a la figura 3a se puede inferir que la longitud más estudiada es 50mm con un 25%, aunque los porcentajes no tienen una gran variación, este es un valor que está permitido de acuerdo a la norma mencionada. En la figura 3b se evidencia que el diámetro más estudiado es  $\leq 30\text{mm}$  con un 20%, este porcentaje no es representativo en comparación a los demás que tienen el mismo porcentaje 13,3%, estando en el rango permitido por norma. Los valores más estudiados para el diámetro y la longitud se deben a que según a lo estudiado por la IUFOR, Kaliyan y Morey [21] se utilizan dichos valores para facilitar el manejo de estas en sus estudios. De la figura 3c se puede deducir que la humedad más estudiada es  $\leq 10\%$  con un 46,2%, abarcando la mayor parte de los resultados, debido a que es la permitida por la norma anterior y según lo estudiado por Kaliyan y Morey [21] este valor beneficia la durabilidad de las

briquetas.

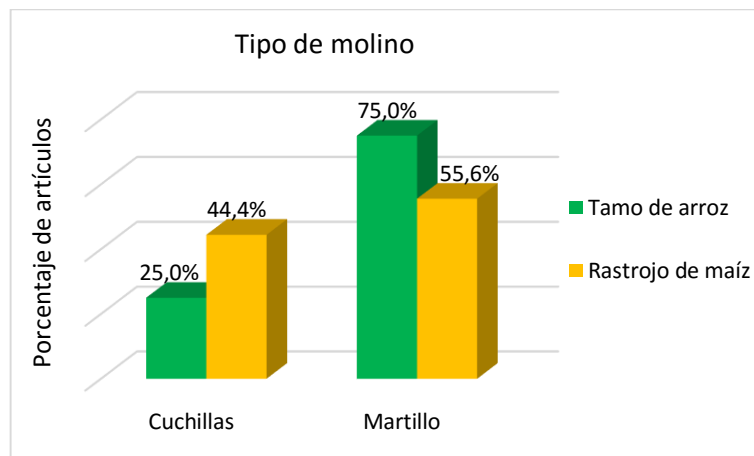
**Figura 3.** Análisis del diámetro, longitud y humedad para briquetas



Este resultado puede deberse a que como estipula Enrique Encías *et al.* con estas características las briquetas pueden ser empleadas en procesos termoquímicos (combustión, gasificación, etc.) sin requerir equipos especializados para estos y sin la producción de humos en dichos procesos [29].

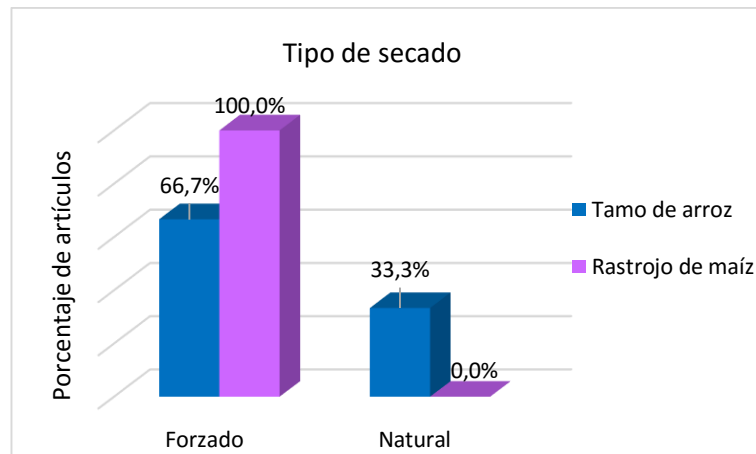
**4.2.1.2. Análisis teórico de la molienda de la biomasa:** En la figura 4 se recopila la información obtenida sobre los tipos de molinos utilizados en el proceso de densificación de tamo de arroz y rastrojo de maíz. Donde se evidencia que el molino más estudiado en el proceso de densificación para tamo de arroz (75%) y rastrojo de maíz (55,6%) es el molino de martillo, de acuerdo con la empresa BUEHLER este molino asegura mejor calidad y control en la trituración de los materiales, garantiza una pérdida de humedad casi nula, tiene una estructura simple y fácil de operar [30]; y según los estudios realizados por Juliette Arroyo *et al.* [31] el molino de cuchillas es poco usado porque no es adecuado para una molienda fina y tiene un considerable gasto energético.

**Figura 4.** Análisis de la molienda para el tamo de arroz y el rastrojo de maíz



**4.2.1.3. Análisis teórico del secado de la biomasa:** En la figura 5 se recopila la información obtenida sobre los tipos de secado utilizados en el proceso de densificación de tamo de arroz y rastrojo de maíz.

**Figura 5.** Análisis del secado para el tamo de arroz y el rastrojo de maíz



De acuerdo a la figura 5, se observa que el tipo de secado más estudiado para el tamo de arroz y el rastrojo de maíz es el secado forzado con un 66,7% y 100% respectivamente, a pesar de que con el contenido de humedad que presentan estas biomásas al ser recolectadas, lo conveniente sería el secado natural con el fin de reducir costos [12], sin embargo, el secado natural no alcanza de forma exacta la humedad necesaria para que el proceso de densificación sea eficiente ya que este está sujeto a las condiciones ambientales del lugar donde se realice.

#### 4.3. FACTORES QUE INCIDEN EN EL PROCESO DE DENSIFICACIÓN

La búsqueda de los factores incidentes se realizó en SCIENCE DIRECT utilizando las palabras clave “*Biomass, Densification, Agricultural waste*” arrojando 112 artículos; y en SCOPUS se empleó una ecuación de búsqueda (ver Anexo B).

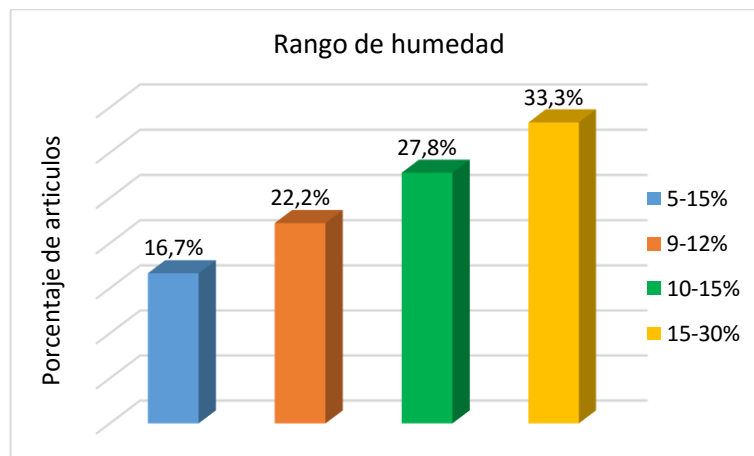
Se obtuvo un total de 174 artículos en los últimos 5 años; la mitad de estos incluyen la evaluación de dos o tres de los factores incidentes en el proceso de densificación. El factor más estudiado es la humedad estando presente en el 81% de los artículos recolectados; esto es debido a que este es considerado de gran importancia porque

la cantidad de vapor que se mezcla con el producto debe ser mínima para así tener mayor eficiencia en la transferencia de calor [32].

**4.3.1. Procesamiento y selección de rangos:** La información encontrada se organizó y dividió para analizar la humedad, tamaño de partícula y tipo de aglomerante (ver Anexo F), de la siguiente manera:

**4.3.1.1. Humedad:** En la figura 6 se recopila la información obtenida sobre los rangos de humedad para el tamo de arroz y el rastrojo de maíz.

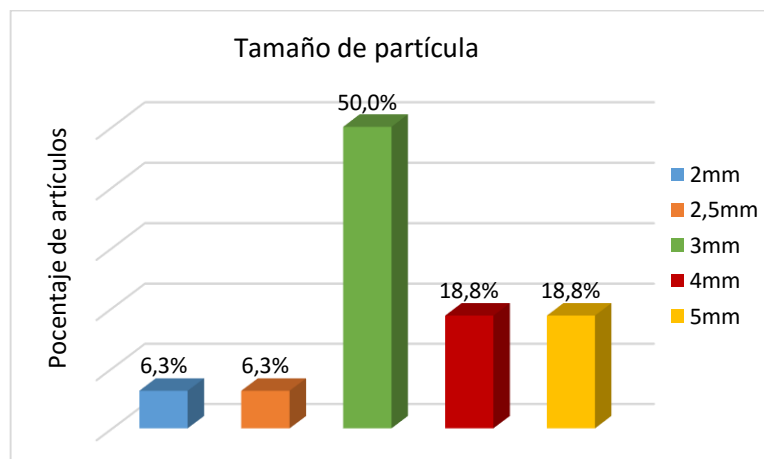
**Figura 6.** Análisis rango de humedad



De acuerdo a la figura 6, se observa que el rango de humedad estudiado mayormente está entre 15% y 30% con un 33,3%. Según Marcos Martín et. al. (2001), el Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (2009) y Madruga (2001), estos valores de humedad en la biomasa evitan daños en las matrices y rodillos del equipo de densificación, [33], [34], [35]. Esos valores están acorde a los estipulados por la norma UNE-CEN/TS 14961 EX.

**4.3.1.2. Tamaño de partícula:** En la figura 7 se recopila la información obtenida sobre el tamaño de partícula para la densificación de tamo de arroz y rastrojo de maíz.

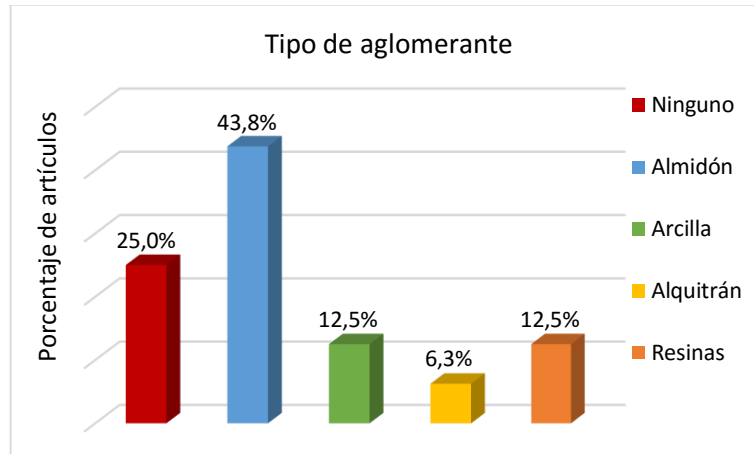
**Figura 7.** Análisis tamaño de partícula



De la figura 7 se infiere que el tamaño de partícula más estudiado para el proceso de densificación es de 3 mm con un 50%, ya que según Yank *et al.* [36] este provee un mejor aspecto de los pellets y briquetas y de esta forma se logra homogenizar la biomasa. Fonseca [22] y Blesa [37] afirman que este tamaño permite una adecuada ubicación entre los intersticios de la estructura, obteniéndose una mejor compactación y acabado.

**4.3.1.3. Aglomerante:** En la figura 8 se recopila la información obtenida sobre el tipo de aglomerante para la densificación de tamo de arroz y rastrojo de maíz.

**Figura 8.** Análisis tipo de aglomerante



La biomasa agrícola requiere la adición de aglomerante, debido a que ni el tamo de arroz ni el rastrojo de maíz poseen los componentes lignocelulósicos que actúen como ligante [15]. En la figura 8 se observa que el aglomerante más estudiado es el almidón con un 43,75%; esto se debe a que además de ser una sustancia proveniente de materiales vegetales, presenta muy buenas propiedades de adhesión y ligamento debido a las fuerzas de atracción que actúan entre sus átomos y moléculas [38]. Por otro lado, según Fonseca [22] y la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y los Alimentos [39] el alquitrán y sus derivados, son descartados debido a su composición química que puede llegar a afectar la naturaleza de la biomasa al reaccionar con esta. En cuanto a la cantidad de almidón Torres [15] y Fonseca [22] en sus estudios sobre producción de biocombustibles sólidos afirman que es necesario para la correcta compactación, entre el 5% y 8% en peso.

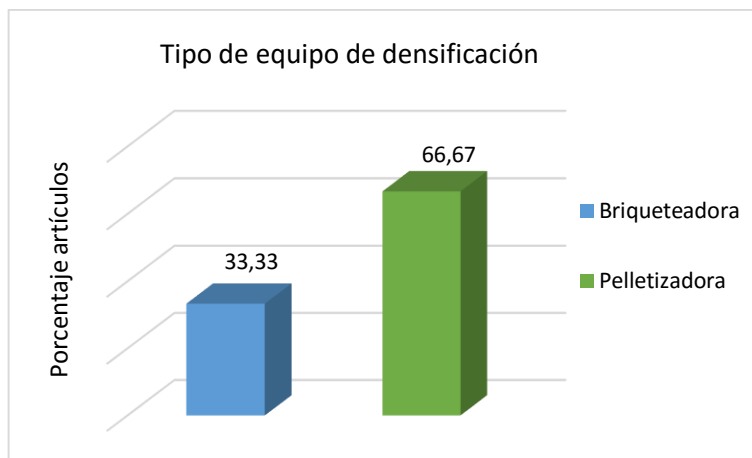
#### 4.4. EQUIPO DE DENSIFICACIÓN DE BIOMASA

Se realizó la búsqueda del equipo de densificación en la base de datos SCIENCE DIRECT empleando las palabras claves “*Pelletizer, briquetting, biomass, Densification*”. De esto, se obtuvo un total de 14 artículos referentes al briquetaje (5) y pelletización (9) de la biomasa, y en SCOPUS, la búsqueda realizada arrojó un total de 9 artículos, implementando una ecuación de búsqueda (ver Anexo B).

Esta información, junto con la recopilada por las empresas fabricantes de equipos de densificación, se organizó y dividió para analizar el tipo equipo de densificación adecuado para tamo de arroz y rastrojo de maíz.

**4.4.1. Procesamiento de datos:** En la figura 9 se recopila la información obtenida sobre los tipos de equipos de densificación el tamo de arroz y el rastrojo de maíz.

**Figura 9.** Tipo de equipo de densificación



En la figura 9 se observa que el tipo de densificación más estudiado son los pellets con 66,67%. Esto se debe a su construcción y diseño simplificado en comparación a la briqueteador como lo explica Lestander (2012) en su estudio sobre pellets y briquetas. Una briqueteadora tiene una línea de flujo más complicada, presenta almacenaje, sistema de transporte, picadora, mezcladora, secadero, criba, prensa briqueteadora, enfriado, cortadora, envasadora [40]; mientras que una pelletizadora tiene secado, sistema de alimentación, prensa pelletizadora, enfriado y envasadora. Acorde a esto y según Fonseca (2011) con su estudio de producción de pellets, esta línea de flujo hace el diseño e implementación de una maquina pelletizadora más conveniente gracias a su bajo costo y facilidad de construcción con respecto a la maquina briqueteadora [22].

**4.4.1.1. Selección del equipo de densificación:** En la tabla 6 se recopila la información obtenida de empresas fabricantes de equipos para densificación.

**Tabla 6.** Tipos de equipos de densificación

TIPO DE EQUIPO	DESCRIPCIÓN	MATERIA PRIMA	EMPRESA
Briqueteadoras de pistón	El funcionamiento se basa en el golpeteo de un pistón por medio de un volante de inercia sobre la biomasa, la presión de compactación alcanzada es de 50 a 100 MPa, con grados de humedad de la mezcla de hasta 15 y 17% en base húmeda	Biomasa forestal	INVEPAR S.A.S ( <a href="http://www.inepar.com">www.inepar.com</a> )
Briqueteadoras extrusión por tornillo	Es un sistema basado en la presión ejercida sobre la biomasa por un tornillo sin fin, que gira con velocidad variable, haciendo avanzar el producto hasta una cámara que se estrecha en forma cónica para regular la temperatura	Biomasa forestal y agrícola	LIPPEL ( <a href="http://www.lippel.com.br">http://www.lippel.com.br</a> )
Briqueteadoras hidráulicas y neumáticas	La presión en estas máquinas es a través de varios pistones de 1, 2, ó 3, que son accionados mediante sistemas hidráulicos o neumáticos	Residuos sólidos de baja calidad	Agico Group ( <a href="http://www.briquetadoras.es">www.briquetadoras.es</a> )

Briqueteadoras de rodillos	Son máquinas que disponen de 2 rodillos que tienen una serie de rebajes donde se aloja el producto a ser compactado, quedando densificado por el rodillo.	Biomasa forestal	LIPPEL (www.lippel.com.br)
Pelletizadora tipo dado	Son máquinas en las que es el dado plano el que gira mientras que los rodillos se mantienen en una posición fija presionando el material por las perforaciones de la matriz.	Residuos de harinas de cereales como soya, arroz, trigo	MaquinPRO de Colombia S.A.S (www.maquinpro.com)
Pelletizadora tipo rodillo	Corresponde a una pelletizadora cuya matriz se mantiene fija mientras que los rodillos giran, presionando el material por las perforaciones del dado, logrando así un pellet de alta calidad y densidad	Tamo de arroz, bagazo de caña, rastrojo de maíz	MaquinPRO (www.maquinpro.com) GEMCO ENERGY (www.peletizadoras.com)

Fuente: Autores a partir de catálogos de empresas

Se seleccionó la pelletizadora tipo rodillo, ya que se utiliza para la elaboración a pequeña escala de pellets de biomasa para biocombustibles para calderas y hornos [41], garantizando una menor contaminación, mayor capacidad calorífica respecto a la leña y a la producida por las briquetas ; además, su enfoque está en procesar materias primas como lo son cascarilla de café, bagazo de caña, rastrojo de maíz, tamo de arroz, siendo estas últimas dos el caso de estudio; este equipo consta de un sistema de alimentación, matriz y rodillos, engranaje y carcasa.

En la tabla 7 se muestra la selección del tipo de matriz granuladora elegida de acuerdo a los valores 0 y 1, utilizando 0 para el incumplimiento del parámetro evaluado y 1 para su cumplimiento; el criterio para asignar valor de decisión presentados en la tabla, fue asignado teniendo en cuenta la descripción de matrices planas y anulares encontradas en la búsqueda bibliográfica y las disponibles en el comercio de pelletizadoras [24], [42], [43], [44].

**Tabla 7.** Parámetros prensa granuladora

PARÁMETROS DE DECISIÓN	MATRIZ PLANA	MATRIZ ANULAR
Producción a gran escala	0	1
Producción a pequeña y mediana escala	1	0
Costo	1	1
Residuos agrícolas	0	1
Facilidad de montaje	1	0
Facilidad de construcción	1	0
Facilidad de mantenimiento	1	0
Sistema de alimentación	1	0
Vida útil	1	0
<b>TOTAL</b>	<b>7</b>	<b>3</b>

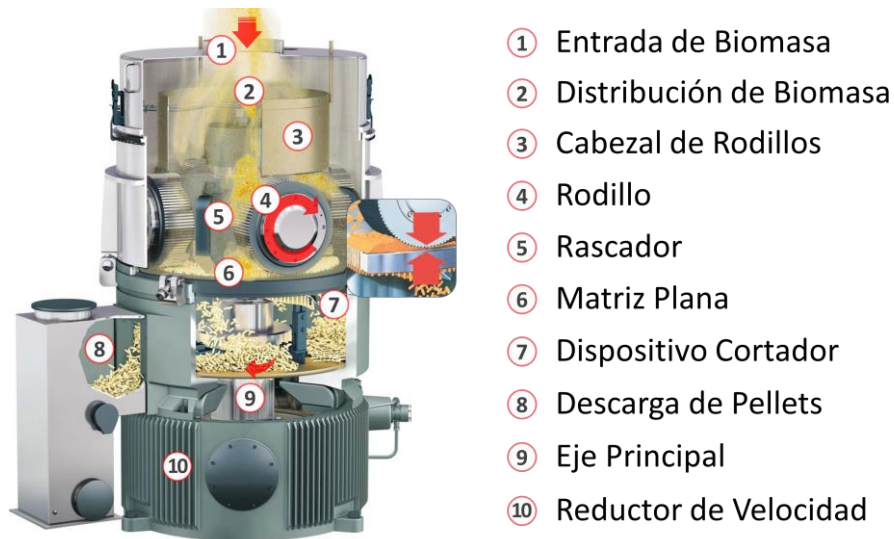
Con base a los resultados de la tabla de decisión, se escogió el diseño de una prensa granuladora de matriz plana, ya que presenta mayores ventajas sobre la prensa granuladora de matriz anular como muestra la tabla.

**4.4.2. Diseño del equipo de densificación:** El diseño de la peletizadora de rodillos con matriz granuladora plana se realizó a escala laboratorio, identificando 4 partes principales de esta, las cuales son:

- Sistema de alimentación: tornillo que vierte la biomasa a la matriz.
- Matrices y rodillos de presión: Matriz con diámetro de 10 a 40cm [44] y rodillo de dimensiones entre 5 y 15 cm de diámetro [45] y longitud con relación 4 a 1,[22] [44].
- Engrane reductor: Reductor sin fin corona para garantizar máximo 700rpm.
- Carcasa: hierro [46].

La figura 10 muestra un esquema de la estructura interna de la pelletizadora de rodillos con matriz plana que fue ajustada a escala laboratorio.

**Figura 10.** Máquina Pelletizadora con Matriz Plana.



Fuente: Amandus Kahl GmbH & Co. KG

El desarrollo del diseño de la máquina pelletizadora (ver Anexo G), fue hecho de forma preliminar y conceptual teniendo en cuenta las normativas de densificación de biomasa y por la experiencia de autores, como Grecia Salas y Carlos Román, que afirman que las dimensiones de construcción a escala laboratorio para longitud, altura y ancho de la pelletizadora depender de la capacidad de producción del equipo, y esta es similar en los casos presentados para esta escala .[47] [45]. Se establecen los siguientes parámetros iniciales:

**Tabla 8.** Parámetros iniciales

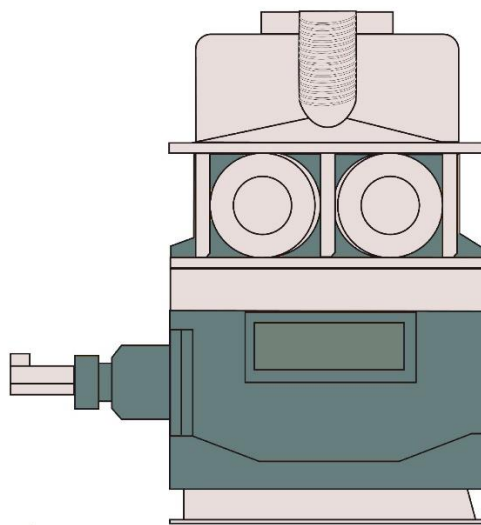
CONDICIONES INICIALES	UNIDADES	VALOR
Volumen de biomasa supuesto	m <sup>3</sup>	2,5
Diámetro pellet	m	0,006
Longitud pellet	m	0,003
Ángulo del dado	°	55
Diámetro rodillo	m	0,05
Distancia entre matriz y rodillo	m	2,00E-04
Longitud	m	1,45
Altura	m	1,25
Ancho	m	0,50

El ángulo del dado entre 55 - 60° para garantizar un avellanado cónico con la suficiente profundidad sin generar riesgo de atascamiento de la matriz. [48]

**Tabla 9.** Parámetros de la pelletizadora

PARÁMETRO	UNIDADES	VALOR
Presión de compactación	MPa	30
Fuerza de compactación del rodillo	N	848,23
Presión en el dado	MPa	0,67
Masa del rodillo	kg	3,11
Velocidad del rodillo	m/s	4,40
Fuerza total de los rodillos	N	869,58
Número de rodillos	-	4
Ángulo desplazamiento de rodillos	rad	0,60
Tiempo de salida de pellets	s	0,03
Capacidad de producción de biomasa	kg/s	15,62
Velocidad angular de matriz	rpm	168,12
Desplazamiento angular	m	0,05
Número de agujeros en la matriz	-	43
Potencia requerida para compactar	w	2969,62

**Figura 11.** Esquema de la pelletizadora diseñada



El material entra por el sistema de alimentación, que consiste en una tolva inclinada 35° [45], luego la biomasa pasa por un tornillo giratorio que la distribuye en la matriz granuladora, conformada por rodillos que comprimen y dados que dan la fuerza para esta compresión. Para mantener la velocidad de la matriz, es empleado un engrane reductor, el cual consta de un tornillo sin fin corona de acero con diámetro de 64mm [41]. Luego de la extrusión del pellet, 4 cuchillas de acero cortan el material a 168 rpm. Finalmente, los pellets son arrojados al lugar de almacenaje para su posterior envasado y utilización.

## 5. CONCLUSIONES

Los valores de exergía química del tamo de arroz (22.556,72 KJ/kg) y el rastrojo de maíz (16.995,1KJ/kg) según revisión bibliografica como trabajo útil en un proceso termoquímico pueden ser complementados por los combustibles derivados del petróleo e incluso suplirlos si se tiene la disponibilidad de biomasa necesaria.

El molino de martillos una buena alternativa para la molienda de la biomasa por su mejor control en el triturado del material y para el caso del secado se debe realizar un secado forzado para así conseguir el contenido de humedad requerido.

Los pellets son una buena opción a la hora de escoger la forma de densificación del tamo de arroz y rastrojo de maíz, gracias a su fácil manejo y almacenaje, entre otras ventajas.

La densificación adecuada del tamo de arroz y el rastrojo de maíz, se realiza con una humedad entre 15% y 30%, un tamaño de partícula de 3mm y con adición de almidón como aglomerante.

La pelletizadora de rodillos y matriz granuladora plana es un equipo adecuado para la densificación de tamo de arroz y rastrojo de maíz en pellets por sus ventajas de facilidad de construcción, montaje y mantenimiento. Este diseño es adecuado, ya que sus dimensiones son acordes a escala laboratorio y su potencia suficiente para soportar la carga propuesta.

## 6. RECOMENDACIONES

Se recomienda realizar la construcción del prototipo equipo de densificación diseñado.

Se recomienda evaluar los pellets de forma experimental aplicados a algún proceso termoquímico, teniendo en cuenta los parámetros obtenidos de este estudio, como humedad, tamaño de partícula, dimensiones, con fin estimar su potencial como biocombustibles sólidos.

## 7. REFERENCIAS

- [1] Universidad Pontificia Bolivariana, Gobernación de Córdoba, SENA Montería, Universidad del Norte, y Corpoica, «Desarrollo de integración tecnológica de recursos energéticos renovables en sistemas productivos agrícolas y agroindustriales del departamento de Córdoba». 2012 pp. 1-40.
- [2] PRIAS O, «Programa de Uso Racional y Eficiente de Energía y Fuentes No Convencionales – PROURE Plan de acción al 2015 con visión al 2025». 2010. pp. 1-151.
- [3] Congreso de la República de Colombia, «Ley 855 de 2003», *Diario Oficial No. 45.405, de 18 de diciembre de 2003*. pp. 1-2.
- [4] Instituto de planificación y Promoción de Soluciones Energéticas para las Zonas No Interconectadas, «Soluciones energéticas para las zonas no interconectadas de Colombia IPSE», *Minist. Minas y Energía*, 2014 pp. 1-57.
- [5] FRANCO C., DYNER I. y HOYOS S. «Contribución De La Energía Al Desarrollo De Comunidades Aisladas No Interconectadas : Un Contribution of the Energy At Development of Islated Communities in Not Interconnected Zones : a Case of Application of the Systems Dynamics and Sustainable Livelihood», *Dyna*, 2008 vol. 75, n.º 154, pp. 199-214.
- [6] FLOREZ J., TOBÓN D., y CASTILLO G. «¿Ha sido efectiva la promoción de

soluciones energéticas en las zonas no interconectadas (ZNI) en Colombia?: un análisis de la estructura institucional», *Cuad. administración*, 2009 vol. 22, n.º 38, pp. 219-245.

[7] ZHANG L., XU C., y CHAMAGNE P. «Overview of recent advances in thermo-chemical conversion of biomass», *Energy Convers. Manag.*, 2010, vol. 51, n.º 5, pp. 969-982.

[8] VASSILEV S. *et al*, «An overview of the chemical composition of biomass», *Fuel*, 2010, vol. 89, n.º 5, pp. 913-933.

[9] RODRÍGUEZ L., «Evaluación de la disponibilidad de biomasa residual agrícola y su potencial energético en ZNI de Colombia: Caso de estudio», Universidad Industrial de Santander, 2016.

[10] HAKEEM K., JAWAID M., y RASHID U. «Biomass and bioenergy: Applications», en *Biomass and Bioenergy: Applications*, 2015, pp. 1-397.

[11] TUMULURU J. *et al*, «A Riview on Biomass Densification Technologies for Energy Application», *Statew. Agric. L. Use Baseline 2015*, 2010, pp. 1-59.

[12] Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, «Biomasa: Maquinaria Agrícola y forestal». Ministerio de Industria, Turismo y Comercio España, 2007, pp. 1-36.

- [13] ORTIZ L. *et al*, «Aprovechamiento de la Biomasa Forestal producida por la Cadena Monte-Industria», *Rev. CIS-Madera*, 2003, pp. 17-32.
- [14] ROMERO J., POVEDO M., y LÓPEZ J. «Central térmica de biomas de 5Mw de potencia». 2002, pp. 80-92.
- [15] TORRES L. «Producción de Biocombustibles sólidos de alta densidad en España», *Univ. Vigo*, 2008 pp. 107-123.
- [16] CHEN W., PENG J., y BI, X. «A state of the art review of biomass torrefaction, densification and applications», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 2015, vol. 44, pp. 847-866.
- [17] FERNÁNDEZ J. «Energía de la biomasa», *Energías renovables para todos*, Madrid, 1999, p. 135.
- [18] BISSEN D. «Biomass Densification Document of Evaluations», *Zachry Eng. Corp. Minneap.*, 2009, pp. 1-33.
- [19] RHÉN C. «Effects of raw material moisture content, densification pressure and temperature on some properties of Norway spruce pellets», *Fuel Process. Technol.*, 2005, vol. 87, n.º 1, pp. 11-16.

- [20] MANI S., TABIL L., y SOKHANSANJ S. «Effects of compressive force, particle size and moisture content on mechanical properties of biomass pellets from grasses», *Biomass and Bioenergy*, 2006, vol. 30, n.º 7, pp. 648-654.
- [21] KALIYAN N., y MOREY R., «Factors affecting strength and durability of densified biomass products», *Biomass and Bioenergy*, 2009, vol. 33, n.º 3, pp. 337-359.
- [22] FONSECA E., y TIERRA L. «Desarrollo De Un Proceso Tecnológico Para La Obtención De Briquetas De Aserrín De Madera Y Cascarilla De Arroz, Y Pruebas De Producción De Gas Pobre», Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, 2011.
- [23] OJEDA K. «Aplicación de análisis exergético para la evaluación de procesos de producción de bioetanol de segunda generación», Universidad Industrial de Santander, 2011.
- [24] PTASINSKI K. «Exergetic evaluation of biomass gasification», *Energy*, 2007, vol. 32, n.º 4, pp. 568-574.
- [25] ROSEN M., DINCER I., y KANOGLU M. «Role of exergy in increasing efficiency and sustainability and reducing environmental impact», *Energy Policy*, 2008, vol. 36, n.º 1, pp. 128-137.

- [26] HEPBASLI A., UTLU Z., y AKDENIZ C. «Energetic and exergetic aspects of cotton stalk production in establishing energy policies», *Energy Policy*, 2007, vol. 35, n.º 5, pp. 3015-3024.
- [27] SZARGUT, «International progress in second law analysis», *Energy*, 1980 vol. 5, n.º 8-9, pp. 709-718.
- [28] MARTÍN M. «Pélets y briquetas», *Rev. AITIM 171*, pp. 54-62, 1995.
- [29] ENCISO E., *et al.*, «Guía para el uso y aprovechamiento de la biomasa en el sector forestal. Año 2007», p. 40.
- [30] BÜHLER, «Molino de Martillos», *Bühler*, 2016. [En línea]. Disponible en: <http://www.buhlergroup.com/europe/es/productos/molino-de-martillos-dfzc.htm#.WKu7TDt97IU>.
- [31] ARROYO J. *et al.* «Molienda». 2013, pp. 1-10.
- [32] LARSSON S. *et al.*, «Effects of moisture content, torrefaction temperature, and die temperature in pilot scale pelletizing of torrefied Norway spruce», *Appl. Energy*, 2013, vol. 102, pp. 827-832.
- [33] Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, «Guía técnica

Instalaciones de biomasa térmica en edificios». Madrid, 2009 pp. 7-55.

[34] MARCOS M. *et al* «Caracterización de biocompostibles solidos forestales», en *III Congreso Forestal Español*, 2001, pp. 1-7.

[35] MADRUGA E. «Combustibles sólidos de baja densidad», *Energía y Tú*, 2001. [En línea]. Disponible en: <http://www.cubasolar.cu/biblioteca/energia/Energia13/HTML/articulo03.htm>. [Accedido: 18-ene-2017].

[36] YANCK M., NGADI M., Y KOK R «Physical properties of rice husk and bran briquettes under low pressure densification for rural applications», *Biomass and Bioenergy*, 2016, vol. 84, pp. 22-30.

[37] BLESA M. «Briqueteado de lignitos con aditivos. Seguimiento fisico-quimico del proceso». 2002 pp. 4-250.

[38] GAMBONI J, «Estudio de las fuerzas de adhesión de películas de almidón sobre diferentes soportes», en *VIII Congreso Argentino de Ingeniería Química*, 2015, pp. 1-11.

[39] Food and Agriculture Organization of United Nations, «Enfoques: Propiedades funcionales de los almidones», 1998. [En línea]. Disponible en: <http://www.fao.org/ag/esp/revista/9809/spot3.htm>. [Accedido: 18-ene-2017].

[40] LESTANDER Y. «Chapter 13 Pellet and briquette production», 2012, pp. 345-355.

[41] GUERRA S. «Diseño y simulación de una prensa granuladora de madera automatizada de hasta 200 kg/hr para la empresa reciclajes MYS S.A». 2013, pp. 2-174,

[42] Gemco Energy, «Peletizadoras de Matriz Anular», *Gemco Energy*, 2009. [En línea]. Disponible en: <http://www.peletizadoras.com/Fabricas-de-pellet-con-matriz-de-anillo.html>.

[43] GUERRA S. «Diseño y simulación de una prensa granuladora de madera automatizada de hasta 200 kg/hr para la empresa Reciclajes MyS S.A». pp. 2-174, 2013.

[44] AMANDUS KAHL, «Prensas granuladoras de KAHL para piensos compuestos, forraje verde seco, pulpa seca, paja y otras materias primas reproducibles». 2012, pp. 1-8.

[45] GONZÁLEZ M., «Diseño de una máquina peletizadora para laboratorio». Escuela Superior Politécnica del Litoral, 2003, pp. 1-9.

[46] KAHL, «Prensas granuladoras de KAHL para piensos compuestos». pp. 1-8, 2012.

[47] SALAS G., «Diseño del mecanismo de extrusión de máquina peletizadora para el aprovechamiento del subproducto forestal.», I.U.P Santiago Mariño, 2015.

[48] ARPI J.y CALDERON C. «Diseño De Una Maquina Pelletizadora En Base a La Disponibilidad De Residuos Madereros De La Ciudad De Cuenca Para Su Aprovechamiento Energético». pp. 28-361, 2010.

## BIBLIOGRAFIA

AMANDUS KAHL, «Prensas granuladoras de KAHL para piensos compuestos, forraje verde seco, pulpa seca, paja y otras materias primas reproducibles». 2012, pp. 1-8.

ARPI J.y CALDERON C. «Diseño De Una Maquina Pelletizadora En Base a La Disponibilidad De Residuos Madereros De La Ciudad De Cuenca Para Su Aprovechamiento Energético». pp. 28-361, 2010.

BISSEN D. «Biomass Densification Document of Evaluations», Zachry Eng. Corp. Minneap., 2009, pp. 1-33.

BLESA M. «Briqueteado de lignitos con aditivos. Seguimiento fisico-quimico del proceso».2002 pp. 4-250.

BÜHLER, «Molino de Martillos», Bühler, 2016. [En línea]. Disponible en: <http://www.buhlergroup.com/europe/es/productos/molino-de-martillos-dfzc.htm#.WKu7TDt97IU>.

CHEN W., PENG J., y BI, X. «A state of the art review of biomass torrefaction, densification and applications», Renew. Sustain. Energy Rev., 2015, vol. 44, pp. 847-866.

Congreso de la República de Colombia, «Ley 855 de 2003», Diario Oficial No. 45.405, de 18 de diciembre de 2003. pp. 1-2.

ENCISO E., et al., «Guía para el uso y aprovechamiento de la biomasa en el sector forestal. Año 2007», p. 40.

FERNÁNDEZ J. «Energía de la biomasa», Energías renovables para todos, Madrid, 1999, p. 135.

FLOREZ J., TOBÓN D., y CASTILLO G. «¿Ha sido efectiva la promoción de soluciones energéticas en las zonas no interconectadas (ZNI) en Colombia?: un análisis de la estructura institucional», Cuad. administración, 2009 vol. 22, n.o 38, pp. 219-245.

FONSECA E., y TIERRA L. «Desarrollo De Un Proceso Tecnológico Para La Obtención De Briquetas De Aserrín De Madera Y Cascarilla De Arroz, Y Pruebas De Producción De Gas Pobre», Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, 2011.

Food and Agriculture Organization of United Nations, «Enfoques: Propiedades funcionales de los almidones», 1998. [En línea]. Disponible en: <http://www.fao.org/ag/esp/revista/9809/spot3.htm>. [Accedido: 18-ene-2017].

FRANCO C., DYNER I. y HOYOS S. «Contribución De La Energía Al Desarrollo De

Comunidades Aisladas No Interconectadas : Un Contribution of the Energy At Development of Islated Communities in Not Interconnected Zones : a Case of Application of the Systems Dynamics and Sustainable Livelihood», Dyna, 2008 vol. 75, n.o 154, pp. 199-214.

GAMBONI J, «Estudio de las fuerzas de adhesión de películas de almidón sobre diferentes soportes», en VIII Congreso Argentino de Ingeniería Química, 2015, pp. 1-11.

Gemco Energy, «Peletizadoras de Matriz Anular», Gemco Energy, 2009. [En línea]. Disponible en: <http://www.peletizadoras.com/Fabricas-de-pellet-con-matriz-de-anillo.html>.

GONZÁLEZ M., «Diseño de una máquina peletizadora para laboratorio». Escuela Superior Politécnica del Litoral, 2003, pp. 1-9.

GUERRA S. «Diseño y simulación de una prensa granuladora de madera automatizada de hasta 200 kg/hr para la empresa Reciclajes MyS S.A». pp. 2-174, 2013.

GUERRA S. «Diseño y simulación de una prensa granuladora de madera automatizada de hasta 200 kg/hr para la empresa reciclajes MYS S.A». 2013, pp. 2-174,

HAKHEEM K., JAWAID M., y RASHID U. «Biomass and bioenergy: Applications», en

Biomass and Bioenergy: Applications, 2015, pp. 1-397.

HEPBASLI A., UTLU Z., y AKDENIZ C. «Energetic and exergetic aspects of cotton stalk production in establishing energy policies», Energy Policy, 2007, vol. 35, n.o 5, pp. 3015-3024.

Instituto de planificación y Promoción de Soluciones Energéticas para las Zonas No Interconectadas, «Soluciones energéticas para las zonas no interconectadas de Colombia IPSE», Minist. Minas y Energía, 2014 pp. 1-57.

Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, «Biomasa: Maquinaria Agrícola y forestal». Ministerio de Industria, Turismo y Comercio España, 2007, pp. 1-36.

Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, «Guía técnica Instalaciones de biomasa térmica en edificios». Madrid, 2009 pp. 7-55.

KAHL, «Prensas granuladoras de KAHl para piensos compuestos». pp. 1-8, 2012.  
KALIYAN N., y MOREY R., «Factors affecting strength and durability of densified biomass products», Biomass and Bioenergy, 2009, vol. 33, n.o 3, pp. 337-359.

LARSSON S. et al, «Effects of moisture content, torrefaction temperature, and die temperature in pilot scale pelletizing of torrefied Norway spruce», Appl. Energy, 2013, vol. 102, pp. 827-832.

LESTANDER Y. «Chapter 13 Pellet and briquette production», 2012, pp. 345-355.

MADRUGA E. «Combustibles sólidos de baja densidad», Energía y Tú, 2001. [En línea]. Disponible en: <http://www.cubasolar.cu/biblioteca/energia/Energia13/HTML/articulo03.htm>. [Accedido: 18-ene-2017].

MANI S., TABIL L., y SOKHANSANJ S. «Effects of compressive force, particle size and moisture content on mechanical properties of biomass pellets from grasses», Biomass and Bioenergy, 2006, vol. 30, n.o 7, pp. 648-654.

MARCOS M. et al «Caracterización de biocomostibles solidos forestales», en III Congreso Forestal Español, 2001, pp. 1-7.

OJEDA K. «Aplicación de análisis exergético para la evaluación de procesos de producción de bioetanol de segunda generación», Universidad Industrial de Santander, 2011.

ORTIZ L. et al, «Aprovechamiento de la Biomasa Forestal producida por la Cadena Monte-Industria», Rev. CIS-Madera, 2003, pp. 17-32.

PRIAS O, «Programa de Uso Racional y Eficiente de Energía y Fuentes No

Convencionales – PROURE Plan de acción al 2015 con visión al 2025». 2010. pp. 1-151.

PTASINSKI K. «Exergetic evaluation of biomass gasification», Energy, 2007, vol. 32, n.o 4, pp. 568-574.

RHÉN C. «Effects of raw material moisture content, densification pressure and temperature on some properties of Norway spruce pellets», Fuel Process. Technol., 2005, vol. 87, n.o 1, pp. 11-16.

RODRÍGUEZ L., «Evaluación de la disponibilidad de biomasa residual agrícola y su potencial energético en ZNI de Colombia: Caso de estudio», Universidad Industrial de Santander, 2016.

ROMERO J., POVEDO M., y LÓPEZ J. «Central térmica de biomas de 5Mw de potencia». 2002, pp. 80-92.

ROSEN M., DINCER I., y KANOGLU M. «Role of exergy in increasing efficiency and sustainability and reducing environmental impact», Energy Policy, 2008, vol. 36, n.o 1, pp. 128-137.

SALAS G., «Diseño del mecanismo de extrusión de máquina peletizadora para el aprovechamiento del subproducto forestal.», I.U.P Santiago Mariño, 2015.

SZARGUT, «International progress in second law analysis», Energy, 1980 vol. 5,

n.o 8-9, pp. 709-718.

TUMULURU J. et al, «A Riview on Biomass Densification Technologies for Energy Application», Statew. Agric. L. Use Baseline 2015, 2010, pp. 1-59.

Universidad Pontificia Bolivariana, Gobernación de Córdoba, SENA Montería, Universidad del Norte, y Corpoica, «Desarrollo de integración tecnológica de recursos energéticos renovables en sistemas productivos agrícolas y agroindustriales del departamento de Córdoba». 2012 pp. 1-40.

VASSILEV S. et al, «An overview of the chemical composition of biomass», Fuel, 2010, vol. 89, n.o 5, pp. 913-933.

YANCK M.,NGADI M., Y KOK R «Physical properties of rice husk and bran briquettes under low pressure densification for rural applications», Biomass and Bioenergy, 2016, vol. 84, pp. 22-30.

ZHANG L., XU C., y CHAMAGNE P. «Overview of recent advances in thermo-chemical conversion of biomass», Energy Convers. Manag., 2010, vol. 51, n.o 5, pp. 969-982.

## ANEXOS

### Anexo A. Resultados de los análisis fisicoquímicos de la biomasa residual

Residuo agrícola de cosecha	Ab.	A. básico [%p seco]		Análisis elemental [% peso seco]					Análisis próximo [% peso seco]			Análisis estructural [% peso seco]			Contenido Energético PCI (kJ/kg)	
		Hu.	ST	C	H	O	N	S	SV	CF	Cenizas	Celu.	Hemi.	Lign.		
<b>Caquetá</b>																
Hojas plátano	HP	77,17	21,04	35,74	4,67	35,42	2,24	0,14	71,32	16,54	12,14	22,75	26,96	13,37	12.430,61	
Vástago plátano	VP	94,37	5,5	36,46	4,76	36,13	0,48	0,15	73,51	14,81	11,68	26,08	24,43	3,46	12.677,63	
Rastrojo maíz	RM	70,6	28,21	40,86	5,45	41,93	0,88	0,11	78,77	17,11	4,12	14,61	33,54	10,12	14.122,08	
Rastrojo yuca	RY	72,38	26,99	38,74	5,16	39,76	1,44	0,19	77,62	19,14	3,24	34,87	32,86	18,11	13.389,39	
Hojas y cogollos de caña	HC	77,75	20,62	36,91	4,82	36,58	1,12	0,25	75,29	19,94	4,77	16,03	34,76	12,35	12.845,10	
<b>Chocó</b>																
Hojas plátano	HP	80,5	19,5	34,8	4,57	34,79	3,28	0,47	74,45	13,61	11,94	----	----	----	12.120,79	
Vástago plátano	VP	93,74	6,23	31,39	4,12	31,38	0,48	0,28	75,43	10,44	14,13	----	----	----	10.914,99	
Hojas banano	HB	83,39	16,61	32,76	4,35	33,33	2	0,36	----	----	----	----	----	----	11.371,35	
Vástago banano	VB	95,83	4,17	33,62	4,46	34,2	0,64	0,31	74,13	12,7	13,17	----	----	----	11.660,24	
Podas borojó	PB	43,56	56,44	36,69	4,82	36,68	0,72	0,21	74,90	20,36	4,74	32,23	15,7	24,25	12.748,81	
<b>Meta</b>																
Rastrojo maíz	RM	48,69	51,31	39,9	5,24	39,89	0,8	0,15	73,72	22,17	4,11	47,39	37,81	12,7	13.854,12	
Tamo arroz	TM	81,9	18,1	37,13	4,88	37,12	2,16	0,2	67,16	16,44	16,4	----	----	----	12.903,72	
<b>Putumayo</b>																
Hojas plátano	HP	79,98	18,84	30,4	4,12	32,03	1,92	0,16	----	----	----	----	----	----	10.467,47	
Vástago plátano	VP	95,6	4,23	31,31	4,11	31,31	1,04	0,14	----	----	----	----	----	----	10.871,12	
Hojas palmito	HPm	73,27	26,11	34,18	4,32	31,88	1,12	0,16	----	----	----	45,28	13,9	11,65	12.014,99	
Tallo palmito	TPm	83,41	16,24	35,83	4,42	31,99	0,64	0,17	----	----	----	26,21	20,81	15,5	12.680,32	

Fuente: [9]

## Anexo B. Ecuaciones de búsqueda.

- **PELLETS Y BRIQUETAS:** TITLE-ABS-KEY("biomass" AND "properties" AND "pellets" AND "briquettes") AND(LIMIT-TO (PUBYEAR, 2016) OR LIMIT-TO (PUBYEAR, 2015) OR LIMIT-TO (PUBYEAR, 2014) OR LIMIT-TO (PUBYEAR, 2013) OR LIMIT-TO (PUBYEAR, 2012) OR LIMIT-TO (PUBYEAR, 2011) OR LIMIT-TO (PUBYEAR, 2010) OR LIMIT-TO (PUBYEAR, 2009) OR LIMIT TO (PUBYEAR, 2008) OR LIMIT-TO (PUBYEAR, 2007)) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE, "ar")) AND (LIMIT-TO (SUBJAREA, "AGRI") OR LIMIT TO (SUBJAREA, "CENG"))
- **MOLIENDA:** TITLE-ABS-KEY("MILL"AND"BIOMASS"AND"DENSIFICATION") AND (LIMIT TO (PUBYEAR,2017) OR LIMIT-TO(PUBYEAR,2016) OR LIMIT-TO(PUBYEAR,2015) OR LIMIT-TO(PUBYEAR,2014) OR LIMIT-TO(PUBYEAR,2013)) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE,"ar")) AND (LIMIT-TO(SUBJAREA,"AGRI") OR LIMIT-TO (SUBJAREA,"CENG")) AND (LIMIT-TO(EXACTKEYWORD,"Biomass") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD,"Pelletizing") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD ,"Densification") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD,"Moisture") OR LIMIT-TO(EXACTKEYWORD,"Densification Process") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD ,"Pelletization" ) OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD ,"Agriculture" ) OR LIMIT-TO(EXACTKEYWORD,"Briquets" ) OR LIMIT-TO(EXACTKEYWORD,"Corn Stover" ) OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD,"Pelleting" ) OR LIMIT-TO(EXACTKEYWORD,"Briquette" ) OR LIMIT-TO(EXACTKEYWORD,"Briquetting" ) OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD,"Compaction" ) )
- **SECADO:** TITLE-ABS-KEY("BIOMASS" AND "DRYING" AND "AGRICULTURAL" AND "DENSIFICATION" AND (LIMIT-TO(PUBYEAR,2017) OR LIMIT-TO (PUBYEAR,2016 ) OR LIMIT-TO(PUBYEAR,2015 ) ) OR LIMIT-TO(PUBYEAR,2014 ) ) OR LIMIT-TO(PUBYEAR,2013)) AND (LIMIT-TO(DOCTYPE,"ar")) AND (LIMIT-TO (SUBJAREA,"AGRI") OR LIMIT-TO (SUBJAREA,"CENG")) AND (LIMIT-TO (EXACTKEYWORD,"Biomass " ) OR LIMIT-TO(EXACTKEYWORD,"Pelletizing " ) OR LIMIT-TO(EXACTKEYWORD,"Densification") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD ,"Moisture " ) OR LIMIT-TO(EXACTKEYWORD,"Pellets " ) OR LIMIT-TO(EXACTKEYWORD,"Drying " ) OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD ,"Briquetting " ) OR LIMIT-TO(EXACTKEYWORD,"Briquets " ) OR LIMIT-TO(EXACTKEYWORD,"Agriculture")) AND (LIMIT-TO(SRCTYPE"j"))
- **FACTORES QUE INCIDEN EN EL ROCESO DE DENSIFICACION:** TITLE-ABS-KEY("Biomass" AND "Densification" AND "agricultural waste") AND ( LIMIT-TO (AU-ID,"Bhattacharya, Sribas Chandra" 7404284866) OR LIMIT-TO(AU-ID,"Adapa, Phani K." 7801582671) OR LIMIT-TO(AU-ID,"Chen, Longjian" 12807860000) OR LIMIT-TO (AU-ID,"Altynbekov, Rustem Feliksovich" 54681559300) OR LIMIT-TO(AU-ID,"Bhatia, R." 7202741619) OR LIMIT-TO(AU-ID,"Capareda, Sergio Canzana" 8656086100) OR LIMIT-TO(AU-ID,"Cardoen, Dennis" 56708700300) OR LIMIT-TO(AU-ID,"Catalão, João P S" 34976229600) OR LIMIT-TO(AU-ID,"Chantigny, Martin H." 6603601520) OR LIMIT-TO (AU-ID,"Chen, Hanping" 8581957400) ) AND ( LIMIT-TO(PUBYEAR,2016) OR LIMIT-TO (PUBYEAR,2015) OR LIMIT-TO(PUBYEAR,2014) OR LIMIT-TO(PUBYEAR,2013) OR LIMIT-TO(PUBYEAR,2012) OR LIMIT-TO(PUBYEAR,2011) OR LIMIT-TO (PUBYEAR,2010) OR LIMIT-TO(PUBYEAR,2009) OR LIMIT-TO(PUBYEAR,2007) OR LIMIT-TO(PUBYEAR,2006) ) AND ( LIMIT-TO(DOCTYPE,"ar" ) OR LIMIT-TO (DOCTYPE,"cp" ) OR LIMIT-TO(DOCTYPE,"re" ) ) AND ( LIMIT-TO(SUBJAREA,"ENER" )

OR LIMIT-TO(SUBJAREA,"AGRI" ) OR LIMIT-TO(SUBJAREA,"ENGI" ) OR LIMIT-TO(SUBJAREA,"CENG" ) OR LIMIT-TO(SUBJAREA,"ENVI" ) ).

- **EQUIPO DE DENSIFICACION DE BIOMASA:** TITLE-ABS-KEY("equipment" AND "Densification" AND "Temperature" AND "Biomass") AND (EXCLUDE(DOCTYPE,"ch")) AND (EXCLUDE(SUBJAREA,"EART") OR EXCLUDE(SUBJAREA,"MEDI")).

## Anexo C. Resultados de la búsqueda de información acerca de pellets y briquetas

### – PELLETS

DIAMETRO	LONGITUD	HUMEDAD	CENIZAS	TITULO	AUTOR
D <= 6 mm + 0,5 mm	L <= 5 x Diámetro	≤ 10%	< 0,7%	Biocombustibles sólidos. Especificaciones y clases de combustibles.	UNE-CEN/TS 14961:2007 EX
D <= 8 mm + 0,5 mm	L <= 5 x Diámetro	≤ 10%	< 1,5%	Biocombustibles sólidos. Especificaciones y clases de combustibles	UNE-CEN/TS 14961:2007 EX
D <= 10 mm + 0,5 mm	L <= 4 x Diámetro	≤ 15%	< 3,0%	Biocombustibles sólidos. Especificaciones y clases de combustibles	UNE-CEN/TS 14961:2007 EX
D <= 12 mm + 1,0 mm	L <= 4 x Diámetro	≤ 15%	< 6,0%	Biocombustibles sólidos. Especificaciones y clases de combustibles	UNE-CEN/TS 14961:2007 EX
D <= 25 mm + 1,0 mm	L <= 4 x Diámetro	≤ 20%	> 6,0%	Biocombustibles sólidos. Especificaciones y clases de combustibles	UNE-CEN/TS 14961:2007 EX
6mm±0,5m m- 8mm±0,5m m	6mm±0,5m m- 8mm±0,5m m	≤ 10%	≤ 0,7%	Parámetros de calidad para pellets de biomasa	CTI R04/06
4 mm	5mm x D	≤ 10%	≤ 0,5%	Pellet certification	DIN PLUS
10mm	5mm x D	≤ 10%	≤ 0,5%	DIN 5173	DIN 5173
8 mm	20 mm	10%	No especifica do	Effect of Particle Size on Mechanical Properties of Pellets Made from Biomass Blends	<u>Noorfidza Y. Harun<sup>a</sup></u> , <u>Muhammad T. Afzal<sup>b</sup></u>

7mm	70mm	15%	No especificado	A comparative study of biomass pellet and biomass-sludge mixed pellet: Energy input and pellet properties	<u>Longbo Jiang</u> <sup>a, b</sup> , <u>Xingzhong Yuan</u> <sup>a, b, c</sup> , <u>Zhihua Xiao</u> <sup>c</sup> , <u>Jie Liang</u> <sup>a, b</sup> , <u>Hui Li</u> <sup>d, e</sup> , <u>Liang Cao</u> <sup>a, b</sup> , <u>Hou Wang</u> <sup>a, b</sup> , <u>Xiaohong Chen</u> <sup>e</sup> , <u>Guangming Zeng</u> <sup>a, b</sup>
8mm	3,15mm-25mm	8,5%	2,7%	Combustion of Plant Biomass Pellets on the Grate of a Low Power Boiler	<u>Artur Kraszkiewicz</u> <sup>e</sup> , <u>Artur Przywara</u> , <u>Magdalena Kachel-Jakubowska</u> , <u>Edmund Lorencowicz</u>
15mm	No especificado	8-14%	No especificado	Application of the X-ray densitometry in the evaluation of the quality and mechanical properties of biomass pellets	<u>Carolina Tenorio</u> <sup>a</sup> , <u>Roger Moya</u> <sup>b, c</sup> , <u>Mario Tomazello Filho</u> <sup>c</sup> , <u>Jorre Valaert</u> <sup>d</sup>
6mm	20mm-24mm	9%	1,43%	Factors affecting the quality of pellets made from residual biomass of olive trees	<u>A. Garcia-Maraver</u> <sup>a, c</sup> , <u>M.L. Rodriguez</u> <sup>b</sup> , <u>F. Serrano-Bernardo</u> , <u>L.F. Diaz</u> <sup>c</sup> , <u>M. Zamorano</u> <sup>a</sup>
6mm–10mm	10mm–13mm	7%–12%	2%	Review of sustainable biomass pellets production – A study for agricultural residues pellets' market in Greece	<u>V. Karkania</u> , <u>E. Fanara</u> , <u>A. Zabaniotou</u>

6mm	76mm	11,63%	No especificado	Evaluating the pelletization of “pure” and blended lignocellulosic biomass feedstocks	<u>Nathan C. Crawford<sup>a, ,</sup></u> , <u>Allison E. Ray<sup>b</sup></u> , <u>Neal A. Yancey<sup>b</sup></u> , <u>Nick Nagle<sup>a</sup></u>
4,8mm-19mm	12,7mm-25,4mm	10%-23%	No especificado	Factors affecting strength and durability of densified biomass products	<u>Nalladurai Kaliyan, R. Vance Morey</u>
9mm	30mm	11%-13%	No especificado	Effect of densification parameters on the properties of maize residue pellets	<u>Thanasit Wongsiriamnuay<sup>a, ,</sup></u> , <u>Nakorn Tippayawong<sup>b</sup></u>

– **BRIQUETAS**

DIAMETRO	LONGITUD	HUMEDAD	CENIZAS	TITULO	AUTOR
25 <= D <= 40	<= 50	<= 10%	< 0,7%	Biocombustibles sólidos. Especificaciones y clases de combustibles	UNE-CEN/TS 14961:2007 EX
<= 50	<= 50	<= 10%	< 0,7%	Biocombustibles sólidos. Especificaciones y clases de combustibles	UNE-CEN/TS 14961:2007 EX
<= 60	<= 100	<= 10%	< 1,5%	Biocombustibles sólidos. Especificaciones y clases de combustibles	UNE-CEN/TS 14961:2007 EX
<= 80	<= 200	<= 15%	< 3,0%	Biocombustibles sólidos. Especificaciones y clases de combustibles	UNE-CEN/TS 14961:2007 EX
<= 100	<= 300	<= 15%	< 3,0%	Biocombustibles sólidos. Especificaciones y clases de combustibles	UNE-CEN/TS 14961:2007 EX

<= 125	<= 400	<= 20%	< 6,0%	Biocombustibles sólidos. Especificaciones y clases de combustibles	UNE-CEN/TS 14961:2007 EX
<125	>= 400	<= 20%	< 10,0%	Biocombustibles sólidos. Especificaciones y clases de combustibles	UNE-CEN/TS 14961:2007 EX
750mm-900mm	5000mm-8000mm	8-10%	< 0,7%	Gestion forestal sostenible	Instituto Universitario de Investigación en Gestión Forestal Sostenible (iuFOR)
23mm-32mm	10mm-40mm	10%-20%	No especificado	Factors affecting strength and durability of densified biomass products	<input type="checkbox"/> <u>Nalladurai Kaliyan,</u> <input type="checkbox"/> <u>R. Vance Morey</u>
70mm-20mm	100mm-700mm	< 12%	No especificado	Gestion forestal sostenible	Instituto Universitario de Investigación en Gestión Forestal Sostenible (iuFOR)

**Anexo D. Resultados de la búsqueda de información acerca del tipo de molino para biomasa agrícola**

TIPO DE MOLINO	TIPO DE BIOMASA	TITULO	AUTOR
Martillo	Rastrojo de maiz	Techno-economic analysis (TEA) of low-moisture anhydrous ammonia (LMAA) pretreatment method for corn stover	<u>Minliang Yang<sup>a</sup></u> , <u>Kurt A. Rosentrater<sup>b</sup></u>
cuchillas	Tamo de arroz y rastrojo de maiz	Direct measures of mechanical energy for knife mill size reduction of switchgrass, wheat straw, and corn stover	Venkata S.P. Bitra a, Alvin R. Womaca,*, C. Igathinathane b, Petre I. Miu a, Yuechuan T. Yang a, David R. Smith a, Nehru Chevanan a, Shahab Sokhansanj c
Martillo	Tamo de arroz y rastrojo de maiz	Hammer mill operating and biomass physical conditions effects on particle size distribution of solid pulverized biofuels	Miguel Gil, Inmaculada Arauzo
Martillo	Tamo de arroz	Grinding energy and physical properties of chopped and hammer-milled barley, wheat, oat, and canola straws	J.S. Tumuluru a,*, L.G. Tabil b, Y. Song c, K.L. Iroba b, V. Meda b
Martillo	Tamo de arroz y rastrojo de maiz	Grinding energy and physical properties of chopped and hammer-milled barley, wheat, oat, and canola straws	J.S. Tumuluru a,*, L.G. Tabil b, Y. Song c, K.L. Iroba b, V. Meda b
Cuchillas	Rastrojo de maiz	Effects of biomass particle size on steam explosion pretreatment performance for improving the enzyme digestibility of corn stover	<u>Zhi-Hua Liu<sup>a</sup></u> , <u>Lei Qin<sup>a</sup></u> , <u>Feng Pang<sup>b</sup></u> , <u>Ming-Jie Jin<sup>c, d</sup></u> , <u>Bing-Zhi Li<sup>a, c</sup></u> , <u>Yong Kang<sup>b</sup></u> , <u>Bruce E. Dale<sup>c, d</sup></u> , Ying-Jin Yuan

Cuchillas	Tamo de arroz y rastrojo de maiz	Direct measures of mechanical energy for knife mill size reduction of switchgrass, wheat straw, and corn stover	Venkata S.P. Bitra a, Alvin R. Womaca,*, C. Igathinathane b, Petre I. Miu a, Yuechuan T. Yang a, David R. Smith a, Nehru Chevanan a, Shahab Sokhansanj c
Martillo	Rastrojo de maíz	Handling behavior of two milled biomass: SRF poplar and corn stover	Miguel Gil a,□, Dingena Schott b, Inmaculada Arauzo a, Enrique Teruel
Martillo	Tamo de arroz	Optimization of biological pretreatment to enhance the quality of wheat straw pellets	<u>Wei Gao</u> <sup>a, b</sup> , <u>Lope G. Tabil</u> <sup>b, c</sup> , <u>Tim Dumonceaux</u> <sup>c</sup> , <u>Sebastián Espinel Ríos</u> <sup>d</sup> , <u>Rongfei Zhao</u> <sup>e</sup>
Martillo	Rastrojo de maíz	Determining optimal size reduction and densification for biomass feedstock using the BioFeed optimization model	<u>Yogendra Shastri</u> , <u>Zewei Miao</u> , <u>Luis F. Rodríguez</u> , <u>K. C. Ting</u>
Cuchillas	Rastrojo de maíz	Determining optimal size reduction and densification for biomass feedstock using the BioFeed optimization model	<u>Yogendra Shastri</u> , <u>Zewei Miao</u> , <u>Luis F. Rodríguez</u> , <u>K. C. Ting</u>
Martillo	Tamo de arroz	Effect to glycerol on densification of agricultural biomass	Shahram Emami, Lope G Tabil, Phani Adapa
Martillo	Tamo de arroz	From a single pellet press to a bench scale pellet mill — Pelletizing six different biomass feedstocks	<u>Maria Puig-Arnavat</u> , <u>Lei Shang</u> , <u>Zsuzsa Sárossy</u> , <u>Jesper Ahrenfeldt</u> , <u>Ulrik B. Henriksen</u>

**Anexo E.** Resultado de la búsqueda a cerca del tipo de secado para biomasa agrícola

TIPO DE SECADO	TIPO DE BIOMASA	REFERENCIA	AUTOR
Forzado	Tamo de arroz y rastrojo de maiz	Influence of AFEX™ pretreated corn stover and switchgrass blending on the compaction characteristics and sugar yields of the pellets	<u>Vijay Sundaram</u> , <u>Kasiviswanathan Muthukumarappan</u>
Forzado	Rastrojo de maiz	Upgrading biomass fuels via wet torrefaction: A review and comparison with dry torrefaction	<u>Quang-Vu Bach</u> , <u>Øyvind Skreiberg</u>
Forzado	Tamo de arroz y rastrojo de maiz	Physical properties of pellets made from sorghum stalk, corn stover, wheat straw, and big bluestem	<u>K. Theerarattananoon<sup>a</sup></u> , <u>F. Xu<sup>a</sup></u> , <u>J. Wilson<sup>b</sup></u> , <u>R. Ballard<sup>c</sup></u> , <u>L. Mckinney<sup>b</sup></u> , <u>S. Staggenborg<sup>c</sup></u> , <u>P. Vadlani<sup>b</sup></u> , <u>Z.J. Pei<sup>d</sup></u> , <u>D. Wang<sup>a</sup></u>
Natural	Tamo de arroz	Optimization of biological pretreatment to enhance the quality of wheat straw pellets	<u>Wei Gao<sup>a, b</sup></u> , <u>Lope G. Tabil<sup>b, c</sup></u> , <u>Tim Dumonceaux<sup>c</sup></u> , <u>Sebastián Espinel Ríos<sup>d</sup></u> , <u>Rongfei Zhao<sup>e</sup></u>
Forzado	Tamo de arroz y rastrojo de maiz	Influence of moisture content, particle size and forming temperature on productivity and quality of rice straw pellets	<u>Kazuei Ishii</u> , <u>Toru Furuichi</u>
Forzado	Rastrojo de maiz	A comparative study of biomass pellet and biomass-sludge mixed pellet: Energy input and pellet properties	<u>Longbo Jiang<sup>a, b</sup></u> , <u>Xingzhong Yuan<sup>a, b, c</sup></u> , <u>Zhihua Xiao<sup>c</sup></u> , <u>Jie Liang<sup>a, b</sup></u> , <u>Hui Li<sup>d, e</sup></u> , <u>Liang Cao<sup>a, b</sup></u> , <u>Hou Wang<sup>a, b</sup></u> , <u>Xiaohong Chen<sup>e</sup></u> , <u>Guangming Zeng<sup>a</sup></u>

Forzado	Rastrojo de maiz	Factors affecting strength and durability of densified biomass products	<u>Nalladurai Kaliyan,</u> <u>R. Vance Morey</u>
Forzado	Tamo de arroz y rastrojo de maiz	Influence of moisture content, particle size and forming temperature on productivity and quality of rice straw pellets	<u>Kazuei Ishii</u> , <u>Toru Furuichi</u>
Natural	Tamo de arroz	Consideraciones para el enfardado de paja de arroz	DANILO BARTABURU, ESTEBAN MONTES, MARCELO, JOSÉ GAYO
Forzado	Rastrojo de maiz	RELACIÓN ENTRE EL PESO FRESCO Y EL PESO SECO DEL RASTROJO DE MAÍZ EN DIFERENTES ESTADOS FENOLÓGICOS DEL CULTIVO 1	M. Bänziger 2 , G.O. Edmeades 2 , J. Bolaños 3

**Anexo F.** Resultados de la búsqueda a cerca de los factores que influyen en el proceso de densificación

TÍTULO	AUTOR	PALABRAS CLAVE AUTOR	FACTOR	RANGO
tema: diseño y simulación de una prensa granuladora de madera automatizada de hasta 200 kg/hr para la empresa reciclajes mys s.a.	Santiago Raúl Guerra Ludeña SANGOLQUÍ, NOVIEMBRE 2013	Granuladora, aserrín, pellets, simulación, diseño	humedad	10-15%
			Aglutinante	Ninguno
tema: diseño y simulación de una prensa granuladora de madera automatizada de hasta 200 kg/hr para la empresa reciclajes mys s.a.	Ruth Irene Cabezaa Arevalo Ecuador,2009		Humedad	5-20%
			Aglutinante	Ninguno
biomass densification document of evaluation	David Bissen Minneapolis,2013		Humedad	9-12%
			Aglomerante	Ninguno
			Tamaño de partícula	0.5in-3/4in
a review on biomass as a fuel for boilers	R. Saidura,*, E.A. Abdelaziza, A. Demirbasb, M.S. Hossaina, S. Mekhilefc Malasya,2011	Boilers,Biomass,Combustion,Impact of biomass,Biomass problems and solutions	humedad	15-30%
			Tamaño de partícula	3mm
effects of raw material moisture content, densification pressure and temperature on some properties of pellets	Christofer Rhe´na,*, Rolf Gref a, Michael Sjo”stro”mb, Iwan Wa”sterlund a2005	Fuerza comprensiva, Acondicionamiento, Densidad, Captación de humedad, Peletización	humedad	9-12%
			Aglomerante	Ninguno
			Tamaño de partícula	4mm

effects of moisture content, torrefaction temperature, and die temperature in pilot scale pelletizing	Sylvia H. Larsson a,†, Magnus Rudolfsson a, Martin Nordwaeger b, Ingemar Olofsson b, Robert Samuelsson a 2012	Peletización, Biomasa torrefactada, Calidad de pellets, Consumo de energía, Densidad aparente, Durabilidad, Compactación	humedad	9-15%
a comparative study of quality properties of pelletized agricultural and forestry lopping residues	M. Zamorano a,*, V. Popov b, M.L. Rodríguez c, A. García-Maraver España, 2011	Agricultural waste, Lopping residues, Pellets, Quality, Properties, Norms	humedad	15-30%
			Tamaño de partícula	2.5mm
factors affecting strength and durability of densified biomass products	Nalladurai Kaliyan, R. Vance Morey USA, 2008	Biomass, Briquettes, Cubes, Densification, Durability, Feed, Pellets, Strength	humedad	15-30%
			Aglomerante	arcilla, melazas, almidones
			Tamaño de partícula	4mm
physicomechanical properties of rice husk pellets for energy generation	Bruna Missaglia,* Cinthya Guerrero, Satyanarayana Narra, Yiling Sun, Peter Ay, and Hans Joachim Krautz Alemania, 2011		humedad	10-15%
			Tamaño de partícula	2-4mm
			Aglomerante	Almidón
guía técnica de instalaciones de biomasa térmica en edificios	IDAE (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía)		Tamaño de partícula	3mm
			humedad	15-30%

“desarrollo de un proceso tecnológico para la obtención de briquetas de aserrín de madera y cascarilla de arroz, y pruebas de producción de gas pobre	FONSECA CUENCA EDISON GEOVANNY TIERRA TINGO LUIS FERNANDO		Aglutinante	Almidones de yuca, maíz, arroz, Resinas (cola blanca), Melaza, Arcillas
			Tamaño de partícula	3mm
producción de biocombustibles sólidos de alta densidad en españa	Luis Ortiz Vigo 2008		Aglomerante	resinas, almidones
			humedad	9-15%
			Tamaño de partícula	5mm
preparation and characterization of fuel pellets from woody biomass, agro-residues and their corresponding hydrochars	Zhengang Liu, Augustine Quek, R. Balasubramanian 2013	Pelletization, Tensile strength, Hydrochar pellet, Fuel quality	humedad	10-15%
			Aglomerante	vegetales(almidones)
influence of mill type on densified biomass comminution	Orla Williams , Gary Newbolt , Carol Eastwick , Sam Kingman , Donald Giddings UK,2016	Biomass, Stokes condition, Milling, Mill choking, Particle size, Particle shape	humedad	5-15%
			Tamaño de partícula	3.5mm
study of the influence of the composition of several biomass pellets on the drying process	J.F. González, B. Ledesma, A. Alkassir, J. González España,2010	Biomass drying, Drying tunnel, Combustion, Biomass pellets boiler	Tamaño de partícula	3.5mm
a review on biomass as a fuel for boilers	R. Saidura, E.A. Abdelaziza, A. Demirbasb Malasya,2011	Boilers, Biomass, Impact of biomass, Biomass problems and solutions	humedad	15-30%
			Tamaño de partícula	3mm

physical properties of rice husk and bran briquettes under low pressure densification for rural applications	A. Yank, M. Ngadi*, R. Kok Canadá,2013	Biomass,Briquette,Densification,Rice husk,Rice bran,Renewable energy	humedad	5-10%
			Aglomerante	vegetales(almidones)
			Tamaño de partícula	3mm
comparing pelletization and torrefaction depots: optimization of depot capacity and biomass moisture to determine the minimum production	Li Chai , Christopher M. Saffron USA,2015	Pelletization,Torrefaction,Depot scale,Biomass moisture	humedad	6-15%
			Aglomerante	Ninguno
			Tamaño de partícula	3mm
a comparative study of biomass pellet and biomass-sludge mixed pellet: energy input and pellet properties	Longbo Jiang , Xingzhong Yuan , Zihua Xiao , Jie Liang , Hui Li , Liang Cao , Hou Wanga, Xiaohong Chen, Guangming Zeng China,2016	Sewage sludge,Biomass,Pelletization,Energy consumption	Humedad	12-15%
			Aglomerante	lignina,almidón, proteína
a review on biomass densification technologies for energy application	Jaya Shankar Tumuluru,Christopher T. Wright,Kevin L. Kenny,J. Richard Hess 2010		Humedad	9-15%
			Aglomerante	lignina,almidón, proteína
			Tamaño de partícula	2-6mm

agricultural residues from crop harvesting and processing: a renewable source of bio-energy	M. Ahiduzzaman , A. K. M. Aminul Islam , Zahira Yaakob , Jaharah A. Ghani , and Nurina Anuar  India		Tamaño de partícula	5mm
			humedad	10-15%
agricultural wastes	Zhenyuan Zhang, Andrea M. Gonzalez, Evan G. R. Davies, Yang Liu*	reuse, recycle, waste treatment, waste management, characterization	Humedad	15-30%
			Tamaño de partícula	5mm
effects of operating variables on durability of fuel briquettes from rice husks and corn cobs	Rukayya I. Muazu □, Julia A. Stegemann  UK,2015	Fuel,Briquettes,Rice husks,Corn cobs,Density,Durabilit	Humedad	9-12%
			Tamaño de partícula	2mm
norma técnica europea une-cen/ts 14961 ex		Pellets	humedad	10-15%
norma técnica europea une-cen/ts 14961 ex		Briquetas	humedad	10-20%
norma italiana cti r04/06		Biomasa herbácea	Humedad	<10%

## Anexo G. Resultados del diseño del equipo de densificación

### Datos iniciales

Diámetro pellet (m)	0,006
Longitud del pellet (m)	0,03
Volumen pellet (mm <sup>3</sup> )	0,00
Volumen pellet (m <sup>3</sup> )	8,48E-16

### Compresión de la biomasa

Relación de compresión	5
Volumen biomasa necesaria (m <sup>3</sup> )	4,24E-15
Densidad biomasa (kg/m <sup>3</sup> )	250
Densidad pellet (kg/m <sup>3</sup> )	1250

- Presión de compactación

$$P_{rodillo} = \bar{Y}_f * \varepsilon_x$$

Deformación por extrusión:

$$\varepsilon_x = a + b * \ln(Rc)$$

Para un Angulo (50°- 60°)	
a	0,8 - 0,9
b	1,2 - 1,5

Constantes empíricas para el ángulo del dado

(Fuente: <http://www.fcyt.umss.edu.bo>)

$$\varepsilon_x = 0,9 + 1,5 * \ln(5) = 3,314$$

$$P_{rodillo} = 10 \text{ MPa} * 3,314 = 33 \text{ MPa} \approx 30 \text{ MPa}$$

Valor justificado ya que se encuentra dentro del intervalo de compresión de apta para pellets de buena calidad.

- Fuerza de compactación del rodillo (K)

$$K = P_{rodillo} * A_{dado}$$

$$K = 30 \text{ MPa} * \pi * (0,003 \text{ m})^2 = 848,23 \text{ N}$$

- Fuerza y presión en el dado (P<sub>f</sub>)

$$P_f = \bar{Y}_f * \frac{2h_f}{D}$$

Altura final e inicial del material antes y después de pasar por el área de trabajo

del rodillo.

$h_o$ (m)	0,035
$h_f$ (m)	0,0002

$$P_f = -10MPa * \frac{2 * (0,002m)}{0,006m} = 0,67MPa$$

- Presión en las paredes del dado ( $P_o$ )

$$P_o = \frac{P_f * D}{4 * \mu * h_f}$$

$$P_o = \frac{P_f * D}{4 * \mu * h_f} = \frac{0,67 * 0,006}{4 * 0,7 * 0,0002} = 7,14 MPa$$

- Dimensiones del rodillo

$r$ (m)	0,025
$d$ (m)	0,05
Ancho rodillo (m)	0,03

- Masa del rodillo

$$m_{rodillo} = V_{rodillo} * \rho_{acero}$$

$$\rho_{acero} = 7859 kg/m^3$$

$$m_{rodillo} = (\pi * 0,025^2 * 0,07) * 7850 = 3,11 kg$$

- Aceleración normal del rodillo ( $a_n$ )

$$a_{n_{rodillo}} = \frac{K - Fr}{m_{rodillo}}$$

$$a_{n_{rodillo}} = \frac{848,23}{3,11} = 272,76 m/s^2$$

- Velocidad del rodillo

$$v_{rodillo} = \sqrt{a_{n_{rodillo}} * r} = \sqrt{272,76 * 0,025} = 4,40 m/s$$

- Fuerza de fricción de los rodillos

$$F_{Frodillos} = m * g * \mu = 3,11 * 9,81 * 0,7 = 21,35 \text{ N}$$

- Fuerza total de los rodillos ( $F_t$ )

$$F_t = F_{Frodillos} + K = 869,58$$

- Velocidad angular de la matriz ( $\omega$ )

$$\omega = \frac{v}{R} = \frac{4,40}{0,25} = 17,61 \frac{\text{rad}}{\text{s}} = 167,12 \text{ rpm}$$

- Desplazamiento angular de la matriz ( $X$ )

$$X = \sqrt{r * (h_o - h_f)} = 0,05$$

- Angulo de desplazamiento rodillo ( $\theta$ )

$$\theta = \tan^{-1} \frac{X}{R} = 0,60 \text{ rad}$$

- Tiempo de salida de los pellets

$$t_{extrusión} = \frac{\theta}{\omega} = 0,03 \text{ s}$$

- Velocidad de extrusión de pellets

$$v_{extrusión} = v_o + a_{extrusión} * t_{extrusión}$$

$$v_{extrusión} = 4,66E - 03 \text{ m/s}$$

- Capacidad de producción de biomasa por hora (8h laborales)

Producción de biomasa por hora = 0,0625 m<sup>3</sup>/h

$$\dot{m}_{biomasa} = \text{Produccion de biomasa} * \text{densidad de biomasa} = 15,6 \text{ kg/h}$$

- Flujo volumétrico del peletizado ( $Q$ )

$$Q = \left( \frac{\dot{m}_{biomasa}}{\text{densidad de biomasa}} \right) * \frac{1}{3600} = 2,47E - 06 \text{ m}^3/\text{s}$$

- Número de agujeros en la matriz

$$Q = (\vartheta_{extrusión} * \# \text{ Rodillos}) * (A_{dado} * \# \text{ Agujeros})$$

El número de rodillos es 4, ya que la matriz plana trabaja con entre 1 y 6 rodillos

$$\# \text{ Agujeros} = 43$$

- Potencia requerida para compactar (P)

$$P = 2\pi * rpm_{matriz} * K * X = 2969,62 \text{ w} = 3,9 \text{ Hp}$$

