

UNIVERSIDAD ESTATAL AMAZÓNICA



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA

CARRERA DE INGENIERIA AGROINDUSTRIAL

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO

PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TITULO DE

INGENIERO AGROINDUSTRIAL

TEMA

**MODELACIÓN MATEMÁTICA PARA LA MOLIENDA
DE LA BIOMASA DEL PIGÜE (*Piptocoma discolor*) CON
FINES ENERGÉTICOS EN LA PROVINCIA DE
PASTAZA.**

AUTORA

YOMIRA JAZMÍN VILLACIS PILA

DIRECTOR

MSC. JUAN ELÍAS GONZÁLEZ RIVERA

PUYO-ECUADOR

2018

DECLARACIÓN DE AUTORIA Y CESIÓN DE DERECHOS

Yo, Yomira Jazmín Villacis Pila, declaro que las actividades efectuadas para la elaboración y culminación del presente proyecto de investigación, con el tema **“MODELACIÓN MATEMÁTICA PARA LA MOLIENDA DE LA BIOMASA DEL PIGÜE (*Piptocoma discolor*) CON FINES ENERGÉTICOS EN LA PROVINCIA DE PASTAZA”** se fundamentó en la búsqueda de información fidedigna responsabilizándome en forma legal y académica como la autora del presente trabajo previo a la obtención del título como Ingeniero Agroindustrial.

Villacis Pila Yomira Jazmín

CI. 1600681157

CERTIFICACIÓN DE CULMINACIÓN DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

Certifico que el presente proyecto investigación y desarrollo sobre el tema **“MODELACIÓN MATEMÁTICA PARA LA MOLIENDA DE LA BIOMASA DEL PIGÜE (*Piptocoma discolor*) CON FINES ENERGÉTICOS EN LA PROVINCIA DE PASTAZA”**, previo a la obtención del título de ingeniero (a) Agroindustrial ha sido desarrollado por la Srta. Yomira Jazmín Villacis Pila bajo mi tutoría y dirección, cumplimiento con todos los requisitos y disponibilidades legales establecidos por la Universidad Estatal Amazónica “UEA”, por lo que autorizo su presentación.

Ing. Juan Elías González Rivera MSc.
DIRECTOR DEL PROYECTO

INFORME DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

Título: “Modelación matemática para la molienda de la biomasa del Pigüe (*Piptocoma discolor*) con fines energéticos en la Provincia de Pastaza”.

Autora: Yomira Jazmín Villacis Pila

Unidad de titulación: Ciencias de la Tierra

Director del proyecto: Ing. Juan Elías González Rivera MSc

Fecha: 28 de marzo del 2018

Introducción y contexto de la investigación:

Concuerta con la información para los objetivos propuestos con los fines del proyecto modelación matemática para la molienda de la biomasa del Pigüe. Sin embargo, debo considerar que si hay alguna sugerencia estamos dispuestos aceptarlo en este aspecto para sustentar.

Cumplimiento de objetivos

Según la revisión concuerda con los objetivos planteados para esta investigación de la modelación matemática para la molienda de la biomasa del Pigüe.

Principales resultados obtenidos

El tamaño de astilla adecuado para el proceso de la molienda es de 8cm x 2cm² de acuerdo al diseño y características del molino, con un nivel de eficiencia del 98%, en base a los resultados obtenidos se desarrolló una modelación matemática para dicho proceso en función de la eficiencia y tiempo. La determinación del tamaño de partícula para fines energéticos es de 3000 µm con un 44% y 850 µm con un 33% de rendimiento, mismos que pueden ser utilizados para la aplicación de diferentes tecnologías como gasificación y elaboración de productos densificados.

La estudiante Yomira Jazmín Villacis Pila ha demostrado durante el desarrollo de la investigación una elevada dedicación y un alto grado de independencia, sirviendo como guía de los principales elementos a desarrollar en la investigación.

Se destacó la actividad curricular por su rendimiento académico, mostrando durante la investigación interés, motivación en el mismo, lo cual condujo a culminar de forma exitosa el trabajo, cumpliendo con las 400 horas establecidas en el Reglamento de Régimen Académico de la UEA.

La presentación final del trabajo cumple con las normas establecidas en la reglamentación institucional.

La redacción, ortografía, calidad de los gráficos, tablas y anexos es adecuada.

Sin otro particular.

Atentamente,

Ing. Juan Elías González Rivera MSc

Docente Titular de la UEA.

AVAL

Quien suscribe MSc. Juan Elías González, Docente de la Universidad Estatal Amazónica avala el Proyecto de investigación:

Título: “MODELACIÓN MATEMÁTICA PARA LA MOLIENDA DE LA BIOMASA DEL PIGÜE (*Piptocoma discolor*) CON FINES ENERGÉTICOS EN LA PROVINCIA DE PASTAZA”

Autor (a): Yomira Jazmín Villacis.

Certifico haber acompañado el proceso de elaboración del Proyecto de Investigación y considero cumple los lineamientos y orientaciones establecidas en la normativa vigente de la institución.

Por lo antes expuesto se avala el Proyecto de investigación para que sea presentado ante la Coordinación de la Carrera Ingeniería Agroindustrial como forma de titulación como Ingeniero en Agroindustrial, y que dicha instancia considere el mismo a fin de que tramite lo que corresponda.

Para que a si conste, firmo la presente a los 12 días del mes de junio del 2018.

Atentamente,

Ing. Juan Elías González Rivera MSc.

DIRECTOR DEL PROYECTO

Urkund Analysis Result

Analysed Document: PROYECTO DE INVESTIGACION JAZMIN VILLACIS.docx
(D35626960)
Submitted: 2/14/2018 11:22:00 PM
Submitted By: negra-jazz22@hotmail.com
Significance: 4 %

Sources included in the report:

Final VHLC URKUND.docx (D35231921)

Instances where selected sources appear:

5

**CERTIFICADO DEL REPORTE DE LA HERRAMIENTA DE
PREVENCIÓN DE COINCIDENCIA Y/O PLAGIO ACADÉMICO**



UNIVERSIDAD ESTATAL AMAZÓNICA
UNIDAD DE LA TECNOLOGÍA DE LA INFORMACIÓN



Puyo, 14 de febrero de 2018
Oficio No. 050-UTICS-UEA-2018

Señores
Secretaría Académica U.E.A.
Presente.-

Por medio del presente CERTIFICO que:

El informe del Proyecto de investigación correspondiente a la Srta. VILLACÍS PILA YOMIRA JAZMIN, con C.I. 1600681157 de la Carrera de Ingeniería Agroindustrial, con el Tema: "MODELACIÓN MATEMÁTICA PARA LA MOLIENDA DE LA BIOMASA DEL PIGUE (*Pollalesta discolor*) CON FINES ENERGÉTICOS EN LA PROVINCIA DE PASTAZA", Director de Proyecto Ing. Juan Elías Gonzalez, MsC., ha sido revisado mediante el sistema antiplagio URKUND, reportando una similitud del 04%. Informe generado por el Tutor de fecha 14 de febrero de 2018.

Particular que comunico a usted para los fines pertinentes.

Atentamente,



Ing. Efraim Jaclero Robalino MsC.
UNIDAD DE TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN DE LA UEA
ADMINISTRADOR DEL SISTEMA ANTIPLAGIO URKUND - UEA -

NOTA: Adjunto Informe generado el 14 de febrero de 2018.

CERTIFICADO DE APROBACIÓN POR TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

El Tribunal de sustentación del Proyecto de Investigación y Desarrollo aprueba el proyecto de investigación **“MODELACIÓN MATEMÁTICA PARA LA MOLIENDA DE LA BIOMASA DEL PIGÜE (*Piptocoma discolor*) CON FINES ENERGÉTICOS EN LA PROVINCIA DE PASTAZA”**

Dr Amaury Pérez, PhD
PRESIDENTE DEL TRIBUNAL

MSc. Paulina Ulloa
MIEMBRO DE TRIBUNAL

MSc. Paul Manobanda
MIEMBRO DE TRIBUNAL

AGRADECIMIENTO

*Agradezco primero a Dios por mantenerme con vida,
y salud, por bendecirme en cada paso que doy día a día;
en compañía de mis padres, hermanos y sobrinas
que han sido un pilar fundamental para tomar mis decisiones
y me han brindado aportes invaluable que
servirán para toda mi vida*

*A todas las personas que son parte de mi vida,
y han confiado en mí, brindándome su apoyo
ante cualquier circunstancia a pesar de muchas dificultades.*

*Agradezco a mis amigos, compañeros y profesores
con quienes he compartido momentos de alegría y de tristeza;
pero sobre todo he tenido la oportunidad de aprender
de cada uno de ellos algo nuevo que me ha servido
para crecer como persona.*

DEDICATORIA

El presente trabajo está dedicado para mis padres Marcia Pila y Moisés Villacis que se han desvivido por brindarme su apoyo incondicional y haber hecho lo posible para que alcanzara mis metas

A mis hermanos que me han brindado su apoyo, y han demostrado siempre preocupación por mí ante cualquier adversidad.

RESUMEN EJECUTIVO Y PALABRAS CLAVES

La presente investigación tuvo como objetivo desarrollar un modelo matemático del proceso de molienda de la biomasa del Pigüe (*Piptocoma discolor*), para fines energéticos, este estudio se basó en la utilización de un molino de cuchillas construido artesanalmente por el MSc. Juan Elías González. Para la ejecución de la experimentación se aplicaron tres tratamientos con astillas de (3 cm, 5 cm, 8 cm), con el fin de determinar el tamaño adecuado para el proceso en función de la eficiencia obtenida, el modelo matemático se desarrolló mediante esta variable y el tiempo empleado aplicando una función cuadrática en el programa estadístico Design Expert Versión 1.0, el ajuste del modelo tuvo un rango aceptable ya que los datos experimentales y los valores predichos presentan un margen de error mínimo. El mejor tratamiento en la etapa de la experimentación fue el T3 con un tamaño de astilla de 8 cm, el cual presentó una eficiencia en el proceso de 98%. Posteriormente se determinó el tamaño de partícula para fines energéticos mediante la utilización de un vibro tamiz según lo establece la normativa Internacional UNE-EN-15149-2 (2011), utilizando ocho tamices diferentes según el número de luz de malla (3000 μm ; 850 μm ; 425 μm ; 300 μm ; 212 μm ; 180 μm ; 150 μm ; 75 μm), para definir el tamaño de partícula se desarrolló un modelo con el fin de cuantificar el porcentaje de material retenido en cada tamiz; los cuales se presentaron que en el tamiz con luz de malla de 3000 μm retuvo 44% del material mismo que fue directamente obtenido de la molienda, pudiendo ser utilizado para tecnologías de gasificación para fines energéticos; el 33% fue retenido en el luz de malla de 850 μm , para la elaboración de productos densificados y tecnologías de gasificación.

Palabras claves: Molienda, Tamaño, Eficiencia, Partícula, Modelo.

ABSTRACT AND KEYWORDS

The objective of this research was to develop a mathematical model of the process of grinding the biomass of Pigüe (*Piptocoma discolor*), for energy purposes, this study was based on the use of a knife mill built by hand by the MSc. Juan Elías González. For the execution of the experiment three treatments were applied with chips of (3 cm, 5 cm, 8 cm), in order to determine the appropriate size for the process depending on the efficiency obtained, the mathematical model was developed by this variable and the time spent applying a quadratic function in the Design Expert Version 1.0 statistical program, the adjustment of the model had an acceptable range since the experimental data and the predicted values present a minimum margin of error. The best treatment in the experimentation stage was T3 with a splinter size of 8 cm, which presented an efficiency in the process of 98%. Subsequently the particle size was determined for energy purposes by using a vibro sieve according to the International Standard UNE-EN-15149-2 (2011), using eight different sieves according to the mesh number (3000 μm 850 μm 425 μm , 300 μm , 212 μm , 180 μm , 150 μm , 75 μm), to define the particle size a model was developed in order to quantify the percentage of material retained in each sieve; which were presented that in the sieve with mesh light of 3000 μm retained 44% of the same material that was directly obtained from the milling, can be used for gasification technologies for energy purposes; 33% was retained in the 850 μm mesh light, for the elaboration of densified products and gasification technologies.

Keywords: grinding, size, efficiency, particle, model.

TABLA DE CONTENIDO

CAPITULO I	2
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN Y SU JUSTIFICACIÓN.	3
1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.	4
1.3. OBJETIVOS.	4
1.3.1. OBJETIVO GENERAL.	4
1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.	5
CAPÍTULO II	6
FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA DE LA INVESTIGACIÓN	6
2.1. ANTECEDENTES.....	6
2.1.1. HISTORIA DE LA MOLIENDA.....	6
2.1.2. DISTRIBUCIÓN DEL PIGÜE (PIPTOCOMA DISCOLOR).	6
2.2. BASES TEÓRICAS	9
2.2.1. REDUCCIÓN GRANULOMÉTRICA.	9
2.2.2. TECNOLOGÍA DE MOLINOS.....	11
2.2.3. DISTRIBUCIÓN GRANULOMÉTRICA.....	13
2.2.4. PRINCIPALES USOS TECNOLÓGICOS DE LA BIOMASA.	16
2.2.5. MODELACIÓN MATEMÁTICA.	17
CAPÍTULO III	19
METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.....	19
3.1.LOCALIZACIÓN.....	19
3.2. TIPO DE INVESTIGACIÓN.....	20
3.3. MÉTODOS DE INVESTIGACIÓN.	20
3.4. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN.	20
3.4.1. DISEÑO EXPERIMENTAL DE LA MOLIENDA DEL PIGÜE.....	20
3.4.2. ANÁLISIS DE DATOS.	23
3.4.3. TRATAMIENTO DE LOS DATOS.	24
3.4.4. DIAGRAMA DE BLOQUE DE LA MOLIENDA DE LA BIOMASA DEL PIGÜE PARA FINES ENERGÉTICOS.	25
3.4.5. DETERMINACIÓN DEL TAMAÑO DE PARTICULA.....	26
3.5. RECURSOS HUMANOS Y MATERIALES.	27

CAPÍTULO IV	28
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	28
4.1. DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA DEL PROCESO DE MOLIENDA SEGÚN EL TAMAÑO DE ASTILLA.....	28
4.2. EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DEL PROCESO DE MOLIENDA DE ACUERDO AL TAMAÑO DE LA ASTILLA.....	29
4.3. MODELACIÓN MATEMÁTICA	31
4.4. DETERMINACIÓN DEL TAMAÑO DE PARTÍCULA SEGÚN LA NORMA UNE- EN-15149-2 (2011) PARA USOS ENERGÉTICOS.....	37
CAPÍTULO V	39
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	39
CAPITULO IV	41
BIBLIOGRAFIA.....	41
CAPITULO VII	44
ANEXOS.....	44

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Principales especies autorizadas para el aprovechamiento a nivel nacional.	7
Tabla 2. Tamaño de partícula para diferentes tipos de gasificador.	15
Tabla 3. Condiciones meteorológicas de Puyo- Pastaza	19
Tabla 4. Determinación del tamaño de astilla.	21
Tabla 5. Diseño factorial de 3^k	21
Tabla 6. Determinación del tamaño de partícula.	22
Tabla 7.: Diseño completamente al AZAR.	23
Tabla 8. Datos Técnicos del equipo Marca: THOMAS-Wiley	26
Tabla 9. Tabla de equipos utilizados.	27
Tabla 10. Valores de eficiencia calculada.	28
Tabla 11 . Análisis de la varianza de la eficiencia del proceso de molienda.....	29
Tabla 12. Porcentaje de eficiencia.	30
Tabla 13. Análisis de la varianza del tiempo (s) empleado.	30
Tabla 14. Tiempo empleado	31
Tabla 15. Valores de eficiencia Actual- Predicho.	32
Tabla 16. Estadística descriptiva para los datos	34
Tabla 17. Valores del tiempo Actual- Predicho.	35
Tabla 18. Estadística descriptiva para los datos	37
Tabla 19. Análisis de la varianza del tamaño de partícula.	37
Tabla 20. Tukey: Tamaño de partícula.	38

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Molino de martillos	12
Figura 2. Molino de cuchillas	13
Figura 3. Diagrama de flujo del proceso demolienda de biomasa.....	27
Figura 4. Probabilidad normal del modelo de eficiencia.....	33
Figura 5. Probabilidad normal del modelo del tiempo empleado.....	36

CÓDIGO DUBLIN

Título	Modelación Matemática de la molienda del Pigüe (<i>Piptocoma discolor</i>) con fines energéticos en la Provincia de Pastaza.				
Autor	Villacis Pila Yomira Jazmín				
Palabras Claves:	molienda	tamaño	eficiencia	partícula	modelo
Fecha de publicación:	27 – marzo -2018				
Editorial	Puyo: UEA, 2018				
Resumen	<p>La presente investigación tuvo como objetivo desarrollar un modelo matemático del proceso de molienda de la biomasa del Pigüe (<i>Piptocoma discolor</i>), para fines energéticos, este estudio se basó en la utilización de un molino de cuchillas construido artesanalmente por el MSc. Juan Elías González. Para la ejecución de la experimentación se aplicaron tres tratamientos con astillas de (3 cm, 5 cm, 8 cm), con el fin de determinar el tamaño adecuado para el proceso en función de la eficiencia obtenida, el modelo matemático se desarrolló mediante esta variable y el tiempo empleado aplicando una función cuadrática en el programa estadístico Design Expert Versión 1.0, el ajuste del modelo tuvo un rango aceptable ya que los datos experimentales y los valores predichos presentan un margen de error mínimo. El mejor tratamiento en la etapa de la experimentación fue el T3 con un tamaño de astilla de 8 cm, el cual presentó una eficiencia en el proceso de 98%. Posteriormente se determinó el tamaño de partícula para fines energéticos mediante la utilización de un vibro tamiz según lo establece la normativa Internacional UNE-EN-15149-2 (2011), utilizando ocho tamices diferentes según el número de luz de malla (3000 μm; 850 μm; 425 μm; 300 μm; 212 μm; 180 μm; 150 μm; 75 μm), para definir el tamaño de partícula se desarrolló un modelo con el fin de cuantificar el porcentaje de material retenido en cada tamiz; los cuales se presentaron que en el tamiz con luz de malla de 3000 μm retuvo 44% del material mismo que fue directamente obtenido de la molienda, pudiendo ser utilizado para tecnologías de gasificación para fines energéticos; el 33% fue retenido en el luz de malla de 850 μm, para la elaboración de productos densificados y tecnologías de gasificación.</p>				
Descripción:	60 hojas dimensiones 29 x 21				
URI:					

CAPITULO I

INTRODUCCIÓN

El observador de la naturaleza Leonardo da Vinci descifró las leyes de la biodiversidad de la naturaleza, conllevó a explorar la cinemática, la mecánica, la hidrodinámica y la óptica entre otras áreas de la física. Si bien no desarrolló teorías matemáticas y experiencias que apoyaran sus investigaciones, su visión objetiva y analítica de la naturaleza los sitúa como un pionero del pensamiento científico moderno para el desarrollo industrial.(Tomasini, 2012).

Los modelos matemáticos en la actualidad se han convertido en las herramientas para el desarrollo tecnológico agroindustrial, que permiten describir los comportamientos de las etapas en cada proceso productivo, comprendiendo mejor su funcionalidad y aplicación para la producción industrial. Donde permiten incluir el control, optimización, diseño y evaluación de los costos de producción.(Rodriguez, 2012). El interés del modelo parte de una dinámica basada en ecuaciones que permita transportar la pulpa a través del molino para obtener un gránulo o partícula de tamaños que considere el proceso industrial.(Magne, Améstica, Barria, & Menacho, 1995).

En la época medieval considerada como “revolución preindustrial”, el molino ha sido una invención antigua a inicios del siglo XII y XIII diversos tipos de molinos se instalan en operaciones industriales de fabricación de papel, pólvora y trituración de diversos productos para uso en las manufactureras. El proceso de molienda conlleva una función de características como material, forma, tamaño, humedad, resistencia de fractura y compresión, valores tecnológicos de la máquina, entre otros. Para la reducción de tamaño del material existen dos teorías, la de espacio (volumen) y la de superficie.(Duran & Pulido, 2007).

La reducción de la granulometría o tamaño de la partícula depende de la eficiencia del sistema de molienda, siendo un pre tratamiento imprescindible que permite homogeneizar las propiedades físicas del material e incrementar la densidad calorífica del mismo para fines energéticos y fabricación de elementos densificados. La diversidad del tamaño de la partícula que puede presentar la biomasa se basa en función del origen y tipo, desde astillas de 20 cm,

virutas o serrín que llegan hasta tamaños de partículas de $\leq 0.2\text{mm}$. La granulometría que adoptan estos tipos de biomasa pueden limitar las aplicaciones energéticas posibles a menos que se dé lugar a una transformación física como el triturado o astillado previo a la molienda.(Solar, 2013a) Para el proceso de molienda se puede utilizar diferentes tipos de molinos que cumplan con las especificaciones requeridas; entre los tipos de molinos se tiene el molino de disco, molino de martillos, molino de rodillos y molino de bolas (Arpi y Calderón, 2010, p.142).

En la investigación que realizó (Peredo, 1993) analizó la factibilidad de utilizar biomasa forestal de *Pinus silvestris* como materia prima para la fabricación de tableros, en su ensayo fabricó astillas mediante un molino de martillos tipo Pallman HPR. El proceso de molienda lo realizó con un astillador de cuchillas circulares, el tamaño del material astillado correspondió a fracciones de 1,0; 2,0 y 3,1 mm² calificadas como astillas de buena calidad, el porcentaje de astillas gruesas (3,1 mm²) y finas (1,0 mm²) correspondió a un 10 y 12,5% respectivamente.

En la actualidad, el deficiente estudio de la molienda de la biomasa forestal del Pigüe (*Piptocoma discolor*) hace que tome importancia para este proyecto de investigación, con el fin de desarrollar un modelo matemático que permita evaluar el proceso de molienda más eficiente como, determinando el tamaño apropiado de astilla y el de partícula óptimo para usos industriales, tecnologías de gasificación y productos densificados en la Provincia de Pastaza.

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN Y SU JUSTIFICACIÓN.

La carencia de un sistema para el proceso de aprovechamiento de la biomasa del Pigüe, ha limitado el desarrollo de las fuentes renovables en energías alternativas a las comunidades vulnerables con el fin de dar funcionamiento a plantas agroindustriales de difícil acceso a la red eléctrica; la contaminación de la biodiversidad y la baja productividad agraria; esto ha ocasionado muchas pérdidas de la biomasa forestal sin dar valor agregado para el desarrollo sostenible energético de las familias campesinas de la provincia de Pastaza.

En la actualidad no se cuenta con un modelo matemático aplicable para la molienda que garantice el aprovechamiento de la biomasa del Pigüe. Hoy en día se cuenta con estudios de la caracterización botánica, del potencial de biomasa y de las características físicas de la especie

antes mencionada. Considerando el Plan Nacional de desarrollo (2017-2021) de acuerdo al Eje 2: Economía al servicio de la sociedad Objetivo 5: Impulsar la productividad y competitividad para el crecimiento económico sostenible de manera redistributiva y solidaria y al Eje 1 Objetivo 3: Garantizar los derechos de la naturaleza para las actuales y futuras generaciones. (Plan Nacional del Buen Vivir, 2017-2021).

El desconocimiento de los parámetros físicos ha influido en el aprovechamiento para los procesos de secado y molienda donde se realizará el astillado en forma manual, la determinación del tamaño de partícula para la molienda y definición del tamaño de partícula para usos industriales.

La producción actual de biomasa del Pigüe es capaz de entregar 46,7 millones de toneladas de biomasa anualmente en los 4 cantones de la provincia de Pastaza para ser usada en el aprovechamiento agroindustrial y su potencial energético en la región. En la actualidad se cuenta con una producción de 100.987,00 ha de Pigüe en la provincia de Pastaza. (Proyecto de investigación ejecutado por el Ing. Juan Elías González Rivera, 2015). Por esta razón se ha visto la necesidad de desarrollar un sistema de aprovechamiento de este potencial, mismo que permitirá el desarrollo agro productivo y energético para la población local y de la Amazonia Ecuatoriana.

1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.

La carencia de un modelo matemático para el proceso de molienda de la biomasa del Pigüe, ha limitado el aprovechamiento de las fuentes renovables en energías alternativas a las comunidades vulnerables y para el funcionamiento de plantas agroindustriales de difícil acceso a la red eléctrica.

1.3. OBJETIVOS.

1.3.1. OBJETIVO GENERAL.

Desarrollar el modelo matemático aplicable al proceso de molienda de biomasa del Pigüe con fines energéticos para usos industriales.

1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

1. Evaluar la eficiencia del proceso de molienda de acuerdo al tamaño de la astilla.
2. Determinar el tamaño de partícula del serrín según la normativa Internacional UNE-EN-15149-2 (2011) para usos energéticos.
3. Realizar el modelo matemático del proceso de molienda del Pigüe con fines energéticos para usos industriales.

CAPÍTULO II

FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA DE LA INVESTIGACIÓN

2.1. ANTECEDENTES

2.1.1. HISTORIA DE LA MOLIENDA.

El resultado de la molienda comenzó a ingeniarse desde el siglo VIII, a través de movimientos de la piedra y como también los trapiches que fueron accionados por las fuerzas de los animales. Como es de conocimiento general el desarrollo tecnológico industrial de la molienda empezó con los granos, hoy en día han considerado la importancia de llevar un proceso de molienda industrial de la madera para su reducción granulométrica con el fin de ser aprovechado como fuente para la producción de energía por medio de la combustión; la biomasa está constituida principalmente por materiales lignocelulósicos de naturaleza fibrosa siendo parte de la pared celular que recubre las células vegetales, por su propia naturaleza, ésta es sometida a pretratamientos de la separación de sus componentes, con el único objetivo de aprovechar las fuentes renovables. (Leia, 2007).

2.1.2. DISTRIBUCIÓN DEL PIGÜE (*PIPTOCOMA DISCOLOR*).

El Pigüe (*Piptocoma discolor*) es una especie arbórea neo tropical que está distribuida desde el Sur de América Central hasta Perú y el norte de Brasil en bosques tropicales y vegetación secundaria desde 100-1600 msnm dicha especie se encuentra ampliamente en Colombia y gran parte de la Amazonia Ecuatoriana, es utilizado y comercializado a nivel nacional e internacional para la industria de la madera. (Blair & Madrigal, 2005)

2.1.2.1. EL PIGÜE, UN RECURSO FORESTAL EN LA AMAZONIA ECUATORIANA.

Ecuador posee una diversidad de riqueza natural por lo que es llamado un país “megadiverso”, se considera que el 52% del territorio ecuatoriano tiene un gran potencial forestal, de los cuales el 43% son bosques naturales, encontrándose con el 80% en la Amazonia. Los bosques naturales y varias especies arbóreas suministran bienes como leña, madera para procesos industriales primarios y secundarios para fines comerciales principalmente de especies como

el Pigüe, balsa, entre otras, convirtiéndose en fuentes de aprovechamiento para la industria de la madera. (Ambiente., 2007).

El uso forestal del Pigüe es considerado un árbol de madera blanda y suave comúnmente utilizada para la elaboración de puntales y cajas para el transporte de fruta, los agricultores de la zona producen el Pigüe mediante manejo de barbechos donde la especie crece de manera natural. (Merino Castillo, 2010)

En la tabla 1 se detallan las especies para el aprovechamiento forestal a nivel nacional, encontrándose la especie nativa Pigüe (*Piptocoma discolor*). (Grijalva & Checa, 2012)

Tabla 1. Principales especies autorizadas para el aprovechamiento a nivel nacional.

NOMBRE COMÚN	VOLÚMEN AUTORIZADO (m³)	PARTICIPACIÓN TOTAL (%)
Balsa	794 359,45	21,53
Eucalipto	619 243,35	16,79
Pino	470 493,80	12,75
Laurel	284 644,57	7,72
Pachaco	188 986,82	5,12
Teca	181 915,43	4,93
Pigüe	132 948,35	3,60
Sande	66 247,84	1,80
Pichango	61 772,54	1,67
Lechero	43 908,35	1,19
Otras Especies Autorizada A Nivel Nacional (348)	844 659,69	22,90

Fuente: (Grijalva & Checa, 2012)

2.1.2.2. CARACTERIZACIÓN DEL PIGÜE.

El Pigüe es un árbol de madera blanda y de rápido crecimiento, es una especie nativa que crece de forma natural, pueden alcanzar hasta un altura máxima de 30 m; el diámetro del

tronco es de aproximadamente 60 cm con forma cilíndrica; alcanza su madurez en periodos cortos de tiempo, es decir tienen cortos ciclos de vida para su aprovechamiento, (8-12 años aprox.).(Erazo, Izurieta, Cronkleton, Larson, & Putzel, 2013).

En general, la biomasa forestal en base a su peso, está compuesta de 20 – 40% de lignina, (sustancia que brinda dureza y resistencia) y 30 – 50% de celulosa, (biomolécula orgánica utilizada para la fabricación de papel, tejidos, entre otros), 9 – 28% de pentosas y 0.2 – 20% de extractivos entre coníferas y latifoliadas, respectivamente. (Lima, 2013)

2.1.2.3. DISTRIBUCIÓN DE LA ESPECIE EN LA AMAZONIA, PROVINCIA DE PASTAZA.

Se encuentra distribuida en toda la región amazónica, misma que ha permitido la formación de extensos bosques secundarios, encontrándose en el centro de mayor densidad El Puyo, considerada como la mejor zona para el Pigüe. Se encuentra desde los 500 hasta los 1500 m.s.n.m. en normal estado de desarrollo. Sin embargo su mayor desarrollo se encuentra entre los 900 y 100 m.s.n.m y a temperatura media de 20°C.(Merino Castillo, 2010).

2.1.2.4. USOS DEL PIGÜE EN LA PROVINCIA DE PASTAZA.

Los agricultores de la Provincia poseen grandes cantidades de bosques de Pigüe, mismos que han logrado establecerse por regeneración natural en áreas abandonadas, para la cosecha de la especie generalmente se seleccionan arboles entre 20 y 40 cm de diámetro siendo lo suficientemente grandes para moler para los previos procesos de transformación.

Los usos del Pigüe, se realiza mediante la comercialización en troza destinada a los aserraderos para procesos de transformación primaria destinada fundamentalmente a la construcción de casas pequeñas, ranchos, etc. También es comercializada en forma de latilla o tablilla para cajonería o transporte de fruta como la naranjilla, varias fábricas de elaboración de panela también usan el Pigüe como combustible. El manejo que realizan los productores al promover la regeneración natural de bosque secundario es con el fin de aportar materia orgánica y nutrientes al suelo para sus prácticas agrícolas luego de aprovechar el bosque.(Merino Castillo, 2010).

2.1.2.5. PROPIEDADES DE LA MADERA.

La madera del Pigüe es fácil de aserrar, pero moderadamente difícil de cepillar ya que depende de una serie de factores que incluyen su dureza, y otras propiedades físicas y mecánicas. Ofrece superficies lisas a favor del grano y debe trabajarse cuando ésta esté seca. La madera es liviana, presenta un peso específico de 0.46g/cm^3 considerada de menor densidad que la madera de esta misma especie en el sur ecuatoriano, la contracción volumétrica está entre las más bajas, posee una densidad de un 12% de humedad y 88% de materia seca. (Merino Castillo, 2010).

2.2. BASES TEÓRICAS

2.2.1. REDUCCIÓN GRANULOMÉTRICA.

Los procesos de reducción de tamaño son operaciones unitarias que se basan en requerimientos energéticos para el procesamiento de diversos materiales sólidos. La reducción granulométrica es un tratamiento que convierte la biomasa inicial de trozas a partículas (astillas, serrín y polvo) destinadas para aplicaciones diversas. La diferencia del tamaño final de la partícula depende de los pre- tratamientos aplicados en la molienda (triturado, astillado y pulverizado) mayor para el triturado y menor para el pulverizado, al igual que las tecnologías disponibles para realizarlo. (Noguès, García Galindo, & Rezeau, 2010).

La importancia de la reducción de tamaño o la ruptura de trozos, no radica solamente en la obtención de pedazos pequeños a partir de los grandes, sino que pretende conseguir un producto que posea un tamaño granular satisfactorio para una operación determinada, pero puede resultar inconveniente para otra operación. (Castellò & Barrera, 2013)

2.2.1.1. TRITURACIÓN.

El proceso de triturado es la primera fase reducción de granulometría que facilita el manejo y aumenta la densidad aparente, transforma las piezas de biomasa de gran magnitud (troncos, tocones, ramas, etc.) en piezas más pequeñas. El método empleado para este proceso y de la velocidad a la que se aplica es de alta velocidad; en este mecanismo actúa el impacto a alta velocidad de unas piezas metálicas que rompen la biomasa al golpearla, se trata de trituradoras de martillos también utilizado en astilladoras, su diferencia radica en el tamaño de salida

siendo mayor para las trituradoras (trozos medianos) que oscilan entre 12 a 18cm. (Noguès et al., 2010)

2.2.1.2. ASTILLADO.

El astillado consiste en sistemas de rotación rápida que transforman la biomasa triturada de tamaño intermedio en astillas de menor diámetro. Las astilladoras se componen de un sistema de alimentación, rodillos de sujeción y sistema de corte que depende de formas diferentes según el tamaño de la astilla que se quiera obtener. Según (Valter & Zuccoli, 2008) existen máquinas astilladoras que producen astillas de varios tamaños entre 0,3 – 4,5 cm en el caso de las astilladoras de cuchillas, las astilladoras de martillos se consideran máquinas más potentes ya que pueden procesar troncos y residuos de explotación forestal obteniendo astillas de 6 – 6,5 cm de longitud. Las astilladoras de tornillo sin fin son máquinas que procesan principalmente troncos enteros produciendo astillas más grandes de hasta 8 cm en comparación con las astilladoras de cuchillas y de martillos.

Desde hace muchos años las astillas, se han considerado como una alternativa para la industria de pulpa de papel. Este material proviene generalmente de varios aprovechamientos forestales y de la transformación de la madera siendo de trozos pequeños de forma irregular entre 5-100 mm de longitud, su calidad depende de la materia prima procedente y de la tecnología de astillado. Las astillas normalmente se someten a un pre triturado o primer astillado, donde se trocea a tamaños de 150-200 mm, y un post-triturado o segundo astillado, donde se reduce a tamaño 50-80 mm. (IDAE, 2009). De acuerdo a su procedencia y a su calidad se distinguen en dos tipos de astillas:

Astillas de clase 1: provienen de la industria de la madera de primera y segunda transformación, presentan una humedad inferior al 30%. Utilizadas generalmente para todo tipo de instalaciones.

Astillas de clase 2: son procedentes de tratamientos agrícolas y forestales, contienen un 45% de humedad. Utilizadas en instalaciones de alta potencia y redes de calefacción. (Navarra, 2015).

2.2.1.3. MOLIENDA.

La molienda es una operación unitaria que reduce el volumen promedio de partículas sólidas, en la que implica solo una transformación física; misma que debe conservar sus características iniciales. Pueden emplearse diversos tipos de molinos que aplican fuerzas de impacto, cizalla o una combinación de ambas, la forma en que se aplica la fuerza depende de la velocidad, magnitud y dirección, produciendo la deformación en la estructura del material hasta que la partícula presente un tamaño menor a la inicial obteniéndose distribuciones de tamaño de partículas gruesas, medianas y finas. (Noguès et al., 2010).

Los productos que se obtienen por molienda presentan tamaños inferiores a 2.54 mm siendo un grado de desintegración mayor que el triturado. (Cortazar Figueroa, Meléndez Perez, & Oliver Hernandez, 2008). Con respecto a la granulometría que puede presentar la biomasa forestal se basa en función del origen y tipo, desde astillas, virutas o serrín con tamaños de partículas de = 0.2mm.(Solar, 2013b). Esta fase es necesaria cuando se quiere conseguir productos densificados o únicamente una combustión pulverizada en la que se introduce neumáticamente en la caldera. Los molinos se alimentan de biomasa astillada, a través de tolvas con sistema vibratorio que permiten el paso de las astillas para el proceso de pulverizado u obtención de serrín con tamaños de partículas que oscilan entre 1mm a 3mm. (Noguès et al., 2010).

La granulometría de la biomasa forestal depende del tipo o sistema de molienda que se aplique como por ejemplo la utilización de un molino de disco, molino de martillos, molino de rodillos y molino de bolas.

2.2.2. TECNOLOGÍA DE MOLINOS.

Los equipos empleados para efectuar la reducción de tamaño de la biomasa dependen de varios factores como el tipo de material a astillar o triturar y la granulometría requerida. Para desarrollar el proceso de molienda se utilizan equipos como molinos de martillos, molinos de tambor y de discos, entre otros; suponen un mayor costo de inversión pero su gasto de electricidad no supera al 20%; también se emplean molinos de cuchillas para biomásas más húmedas.(Carrasco Garcia, 2008). Existen diversas formas de lograr la reducción de tamaño de un material siendo éstos por compresión, impacto, cizalla y corte.

2.2.2.1. MOLINO DE MARTILLOS.

Logra con eficiencia la reducción de tamaño de la biomasa al golpear repetidamente los residuos forestales con martillos fijados en un rotor, el material que no logra el tamaño aceptado se mantiene en la cámara de trituración entre el rotor y la criba en la que sigue siendo golpeado hasta obtener el tamaño deseado de la partícula. Este equipo se considera más productivo ya que puede triturar troncos o árboles enteros de madera blanda, la granulometría de la biomasa obtenida por este equipo es mayor que el astillado. (De la cerda Larroucau, 2014).

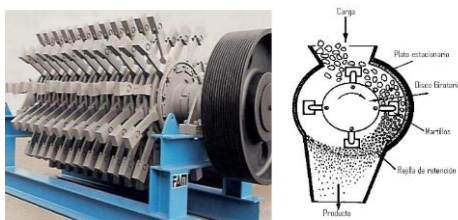


Figura 1. Molino de martillos

Fuente: (De la cerda Larroucau, 2014)

2.2.2.2. MOLINO DE CUCHILLAS.

Son máquinas rotativas que constan de 3 o más de cuchillas montadas sobre el rotor. Las cuchillas del rotor y caja pasan apenas con unos décimos de milímetro de separación, al pasar el material entre éstas cuchillas por acción de la gravedad (alimentación forzada), el material inmediatamente es cortado; este ciclo es repetido varias veces hasta que se obtenga el tamaño adecuado para pasar a través de una criba, misma que cubre la parte de descarga del molino y finalmente el producto es acumulado en un embudo recolector. (Càrdenas Leon, Shomar García, & Solorio Ramos, 2012).

La mecánica de los molinos de cuchillas para reducir el tamaño de partículas de la semilla y cascaras de curcas que procesaron 115kg/h para reducir el tamaño de la partícula que permita la selección de la tecnología para la obtención de energía eléctrica a través de un gasificador de flujo descendente (*Downdraft*). (Suàrez, Sotolongo, & Rodriguez, 2011).

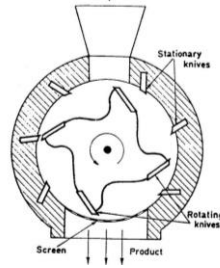


Figura 2. Molino de cuchillas

Fuente: (Càrdenas Leon et al., 2012)

En el estudio que realizaron (Saldaña & Gutierrez, 2012), evaluaron la eficiencia de troceado de hojas y trozas de la especie *Pinus sylvestris L*, utilizando un molino de cuchillas articuladas tipo “Y”. Los factores que se estudiaron fueron: posición angular del sistema de alimentación de las trozas en relación al eje del molino: 45 y 90° y velocidad angular del rotor a 1500 y 2000 rpm lo que corresponde a 75 y 100 cortes por segundo. Los valores que se obtuvieron expresan que la posición de las trizas no influye en la eficiencia del troceado, mientras que los valores de la eficiencia en base a las velocidades de 1500 y 2000 rpm fueron de 91,25 y 94,25, expresando una diferencia estadísticamente significativa. Para la eficiencia del troceado de la especie se estudió el factor de la velocidad a 1500 y 2000 rpm aplicando la prueba de Tukey bajo muestras aleatorias, mostrando una eficiencia muy superior para 2000 rpm.

2.2.3. DISTRIBUCIÓN GRANULOMÉTRICA.

El método estándar para determinar la distribución del tamaño de partícula fue desarrollado por la Sociedad de Ingenieros Agrícolas y Biológicos (ASABE), definiendo como mecánica de tamizado, siendo esta el porcentaje obtenido en masa de partículas retenidas en cada tamiz en función de su ancho, mientras que la longitud de las partículas se ignora en dicho proceso. (Rezaei & Jim, 2016)

La distribución de partículas consiste en separar fracciones con dimensiones específicas, con la utilización de vibro-tamices, según lo establece la norma europea UNE-EN-15149-2 (2011): *Determinación de la distribución de tamaño de partícula. Método del tamiz Vibrante*, (Aenor, 2011) con luces de malla comprendidas generalmente entre ≤ 0.850 mm hasta con tamaños de ≤ 0.150 mm, es importante conocer el método que se va a emplear para definir la granulometría y el origen del material a analizar; el método de vibro-tamices proporciona el diámetro de luz de malla máximo de cada uno de los tamices, pero la naturaleza fibrosa de los

materiales biomásicos en varios casos la longitud de las partículas suelen ser el doble de la anchura.

La aplicación diferenciada de la distribución de las partículas puede favorecer a mejorar la calidad de la biomasa como fuente de energía de materiales químicos y compuestos, es fundamental conocer las dimensiones y la distribución granulométrica de las partículas en los subproductos maderables antes de iniciar procesos como de densificación ya que influyen en su calidad como es la durabilidad con tamaños de partícula de $< 1\text{mm}$. La inclusión de las partículas grandes puede generar grietas o rompimientos en varios productos densificados.(Rutiaga & Carrillo, 2014).

2.2.3.1. TAMAÑO DE PARTÍCULAS PARA LECHO FIJO (UPDRAFT) Y (DOWNDRAFT) TIPO GASIFICADOR.

El movimiento relativo de la corriente gaseosa y del combustible a través del reactor, los gasificadores de lecho fijo se clasifican en: de corriente ascendente o contracorriente (*Updraft*) y de corriente descendente o concorrente (*Downdraft*). (Rincòn Martinez & Silva Lora, 2014)

Para el lecho fijo (*Updraft*) y (*Downdraft*) el tamaño de la biomasa, la humedad y el contenido de cenizas son variables importantes de analizar para la aplicación de dichas tecnologías; el tamaño de la biomasa para el lecho fijo (*Updraft*) oscila entre 5 – 200mm, si se trata de una biomasa forestal de característica fina $< 30\%$ del peso, el tamaño debe ser $\leq 5\text{mm}$. Para la tecnología de lecho fijo (*Downdraft*) el tamaño de la biomasa esta entre 20 – 200 mm, para biomasa forestal de característica fina $< 15\%$ del peso, el tamaño debe ser $\leq 5\text{mm}$. (Bilbao Duñabeitia, 2009) Los tamaños de partículas inferiores a 2 mm deben evitarse en los gasificadores de lecho fijo en equicorriente ensayados ya que pueden provocar elevadas pérdidas de carga reduciendo la calidad de gas pobre obtenido a la vez la un elevado contenido de alquitranes en el gas. (Perez, Borgue, & Agudelo, 2010).

Según (Arteaga & Casas, 2014), mencionan que los reactores de lecho fijo/móvil, la biomasa se mueve lentamente según su dirección de flujo, estos reactores son de flujo ascendente o descendente que se pueden tratar con tamaños de partículas que oscilan desde 1 hasta 100 mm. A continuación, se muestra en la tabla 2 el tamaño de partícula que se emplea para cada tipo de gasificador.

Tabla 2. Tamaño de partícula para diferentes tipos de gasificador.

Parámetro	Lecho fijo/móvil	Lecho fluidizado	Arrastre
Tamaño de partícula	<51mm	<6mm	<0.15mm

Fuente: (Arteaga & Casas, 2014).

2.2.3.2. TAMAÑO DE PARTÍCULAS PARA GASIFICADORES DE ARRASTRE.

La alimentación de la biomasa a los reactores de gasificación es importante porque determina el comportamiento de la biomasa dentro del gasificador, cuando el tamaño de partícula no cumple con los límites establecidos suele ser una dificultad ya que puede generar problemas en la detención del rotor.

Los gasificadores de arrastre trabajan con material pulverizado (0,08 mm) que al mezclarse con agua se alimentan junto al agente oxidante dentro de la cámara de reactor. (Arteaga & Casas, 2014).

2.2.3.3. TAMAÑO DE PARTÍCULA PARA PRODUCTOS DENSIFICADOS.

Es importante conocer las dimensiones y la granulometría de las partículas en los subproductos maderables antes de elaborar productos densificados, la forma y tamaño de las partículas son factores importante ya que influyen en la durabilidad mecánica de los pellets; las partículas de un tamaño <1mm muestran mayor durabilidad, es decir resistencia desmoronarse y capacidad de adsorción de agua, a diferencia de las partículas de mayor tamaño > 1mm que pueden generar grietas o fisuras y posteriores rompimientos en los pellets.(Rutiaga & Carrillo, 2014).

Turner, 1995 señala que los pellets de buena calidad se pueden elaborar con partículas de 0,6 a 0,8 mm, el intervalo mencionado por (Franke y Rey, 2006) los pellets de mayor duración son de 0,5 a 0,7 mm. Dichos autores determinan que las partículas mayores a 1mm provocan rompimiento en los pellets. Cabe mencionar que una mezcla de partículas de diferentes tamaños ayuda a formar una unión entre partículas y no permite espacios.

Para la elaboración de briquetas se deben utilizar partículas entre 5 y 10mm ya que para este tipo de producción se integran partículas de un tamaño superior. Según la teoría (Tripathi, 2010) es posible utilizar partículas de 6.5 y 8 mm.

2.2.4. PRINCIPALES USOS TECNOLÓGICOS DE LA BIOMASA.

2.2.4.1 GASIFICACIÓN.

El objetivo de un reactor de gasificación, es crear condiciones para que la biomasa se reduzca a carbón + volátiles y luego el carbón reaccionando con productos de la pirolisis y el agente oxidante para obtener un contenido mínimo de impurezas. Una de las tecnologías propuestas son los reactores de lecho fijo que según el movimiento relativo de la corriente del gas y del combustible a través del reactor se dividen en una corriente ascendente (*Updraft*), y una corriente descendente (*Downdraft*). (Rincón Martínez & Silva Lora, 2014)

2.2.4.2. CORRIENTE ASCENDENTE O CONTRACORRIENTE (*UPDRAFT*).

En el gasificador con flujo ascendente *Updraft* la corriente del gas generado fluye en dirección opuesta a la alimentación de biomasa que se realiza por la parte superior del reactor; se caracteriza por una elevada eficiencia térmica del proceso, pero los gases generados tienen un elevado contenido de alquitrán debido a que no ocurre un craqueamiento térmico de los mismos. (Rincón Martínez & Silva Lora, 2014)

En el gasificador *Downdraft* el combustible se suministra por la parte superior y el agente de gasificación se mueve en sentido descendente, una de las ventajas de este tipo de gasificador de gas es la eficiencia que posee en la conversión del carbono, además produce un gas con bajo contenido de alquitrán y ceniza pero posee una limitante en cuanto a la humedad de la biomasa (Rincón Martínez & Silva Lora, 2014).

2.2.4.3. CALDERAS DE COMBUSTIÓN.

Este tipo de tecnología se emplea en el proceso de transformación denominado combustión directa, definida como la reacción química entre un combustible y el aire con la finalidad de producir energía calorífica. La energía generada se emplea para calentar, cocinar, o bien en procesos industriales, el proceso se realiza a altas temperaturas (800°C-1000°C), utilizando el aire como un agente oxidante e involucra una etapa inicial de pirolisis y gasificación de la biomasa previas a la de combustión propiamente dicha. (Poggi Varaldo, Martínez Reyes, & Pineda Cruz, 2009).

2.2.4.4. PIRÓLISIS.

Es un proceso de transformación básica que consiste en la degradación térmica de la biomasa en ausencia de un agente oxidante, posible de obtener productos sólidos, líquidos, gaseosos o forma de gas y por otro lado también constituye una etapa preliminar del proceso de gasificación y combustión de la biomasa. Este proceso de oxidación parcial y controlada a temperaturas elevadas (550°C) permite obtener una combustión variable de combustibles sólidos. (Poggi Varaldo et al., 2009).

2.2.5. MODELACIÓN MATEMÁTICA.

Los modelos y la realidad se relacionan por medio de dos procesos: la abstracción y la interpretación. El primero de ellos se basa en encontrar cuales son los elementos más importantes del problema y cuáles son sus accesorios. Para saber si un elemento es o no importante se tiene que ver su efecto relativo en la evolución del sistema, en cuanto a la interpretación se debe entender en como los componentes del modelo (parámetros, variables) y su comportamiento pueden estar relacionados con el sistema real que se quiere modelar. En ese sentido, un modelo es la representación de un sistema, sobre el cual se aplican técnicas analíticas estadísticas y /o matemáticas, con valores que explican y pronostican el comportamiento futuro. (Ortiz, 2016)

Según (Mesa & Villa, 2011) en su investigación sobre La Modelación Matemática con conceptos de función cuadrática mencionan que Biembengut y Hein (2007) definen a la modelación matemática como un proceso que se implica en la obtención de un modelo que tiene un carácter dinámico y que no solo se usa para la obtención del modelo sino también para su validación, dichos autores menciona que la modelación es una forma de abstracción de realidad, permitiendo generalizar, predecir y validar los saberes sobre ella misma por medio de situaciones reales con la finalidad de predicción de tendencias, el modelado consiste básicamente en el arte de transformar situaciones de la realidad en problemas matemáticos cuyas soluciones deben interpretarse en el lenguaje habitual.

El proceso de modelación consiste en la recolección de información, sistematización, validación, entre otros aspectos relevantes y que de acuerdo con Biembengut y Hein (2007) un proceso de modelación implica:

- Experimentación, en esta actividad se realizan observaciones, se obtienen datos y se disponen de herramientas para el estudio, pueden ser experimentos de variación cuadrática, logarítmicas, lineales, entre otras.
- Abstracción, se lleva a cabo la formulación de los modelos matemáticos, en el que se busca establecer: selección de variables.
- Resolución, referida a la transportación del lenguaje natural al modelo matemático.
- Validación, referido a la aceptación o no del modelo propuesto por las actividades anteriores, en la que se confrontan datos empíricos, predicciones, valores en relación con los valores de la realidad. Los residuos son verificados por el estadístico de Durban Watson valores que se encuentran por encima de 4. (Gonzalez, 2010)

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1. LOCALIZACIÓN.

La presente investigación se realizó en el laboratorio de Agroindustria perteneciente a la Universidad Estatal Amazónica (UEA), localizada en la Provincia de Pastaza Km 2½, vía Napo (paso lateral). **Ver tabla 3.**

Tabla 3. Condiciones meteorológicas de Puyo- Pastaza

Cantón	Pastaza
Provincia	Pastaza
Parroquia	Puyo
Sitio	Laboratorio de la UEA
Altitud	960 msnm
Latitud	0° 59' 1" S
Longitud	77° 49' 0" W
Humedad Relativa Promedio	91 %
Pluviosidad	4800mm/año
Temperatura media	22°C

Fuente: (INAMHI, 2015)

Para su efecto se contó con un molino de cuchillas para biomasa forestal fabricado artesanalmente por el MSc. Juan Elías González. Permitiendo desarrollar el modelo matemático.

Previo a la molienda de la biomasa del Pigüe (*Piptocoma discolor*), el astillado se realizó en forma manual utilizando una sierra eléctrica, en tamaños de astilla de 3 cm, 5 cm y 8 cm, posterior a ello se llevó a cabo un proceso de secado, permitiendo de esta manera llevar al proceso de molienda para la obtención de partículas de tamaños de acuerdo a la norma

Internacional UNE-EN 14961-2:2011 (Aenor, 2011) para usos industriales como, los procesos de gasificación, elaboración de productos densificados, entre otros.

3.2. TIPO DE INVESTIGACIÓN.

El carácter de la investigación es cualitativo y cuantitativo, por cuanto todas las unidades a estudiar son (tamaño de astilla, y partícula, eficiencia, tiempo, capacidad de molienda vs biomasa seca). Son variables que están consideradas para este propósito.

3.3. MÉTODOS DE INVESTIGACIÓN.

El método de investigación es de tipo experimental y analítico, ya que se parte de una hipótesis acerca del desarrollo de la modelación matemática para la molienda de la biomasa del Pigüe que se fundamenta a través de la experimentación con parámetros físicos.

3.4. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN.

El presente trabajo investigativo fue ejecutado con un diseño factorial de 3^k , es decir con dos factores y tres niveles cada uno y con una repetición. El factor A correspondiente al tamaño de astilla se dividió en tres niveles de significancia siendo 3 cm, 5 cm y 8 cm, el factor B fue el peso de cada astilla y sus niveles fueron 323 g, 334 g y 343 g. Para comprobar la eficiencia, y el tiempo empleado que permitió determinar el tamaño de la astilla óptimo en el proceso de molienda, así como base inicial y la parte secundaria fue el tamizado para determinar el tamaño de partícula a través de 8 tamices con diferentes usos de Luz de Malla, para los diferentes usos industriales, sin embargo, fue importante definir la modelación matemática del proceso de molienda, la aplicación de cálculos matemáticos, y de estadísticas inferencial.

3.4.1. DISEÑO EXPERIMENTAL DE LA MOLIENDA DEL PIGÜE.

3.4.1.1. EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DEL PROCESO DE MOLIENDA DE ACUERDO AL TAMAÑO DE LA ASTILLA.

El diseño del experimento fue un diseño factorial de 3^k , los niveles de cada factor se los definió con códigos de -1, 0 y 1. El factor A es el tamaño de la astilla con 3 niveles (-1: 3 cm, 0: 5 cm y 1: 8 cm), el factor B es el peso inicial con 3 niveles (-1: 323g, 0: 334g. y 1: 343g) y 1 repetición, dando un total de 9 unidades experimentales. **Ver tabla 4.**

Tabla 4. Determinación del tamaño de astilla.

Tratamientos	T1	T2	T3	TOTAL
Factor A	3 cm	5 cm	8 cm	3
Factor B	323g.	334g.	343g	3
R	1	1	1	3
Total de unidades experimentales				9

Fuente: Elaboración propia.

Dónde:

Factor A es Tamaño de astilla

Factor B es Peso inicial

R es repeticiones

En la **tabla 5** se muestra el diseño del experimento utilizando números aleatorios reemplazados por códigos de -1, 0 y 1 para A (tamaño de astilla) y B (peso inicial).

Tabla 5. Diseño factorial de 3^k

A: tamaño de astilla	B: peso
1	1
-1	1
1	-1
-1	-1
1	0
-1	0
0	1
0	-1
0	0

Fuente: Elaboración propia.

3.4.1.2. DETERMINACIÓN DEL TAMAÑO DE PARTICULA MEDIANTE EL TAMIZAJE.

Para la determinación del tamaño de partícula se utilizó un vibro tamiz según lo establece la norma UNE-EN-15149-2 (2011), con ocho números de tamices para cuantificar el porcentaje de retención del material en cada uno de ellos. Se aplicó un diseño completamente al AZAR, con número de tratamientos 3, y muestras 1 dando un total de 24 unidades experimentales. Ver **tabla 6**.

Tabla 6. Determinación del tamaño de partícula.

Tratamientos	T1 (3cm)	T2 (5cm)	T3 (8cm)	TOTAL
Tamices	8	8	8	24
Muestras	1	1	1	1
Total de unidades experimentales				24

Fuente: Elaboración propia.

En la **tabla 7** se muestra el diseño del experimento, para cada uno de los tratamientos se utilizó ochos tamices con diferente luz de malla.

Tabla 7.: Diseño completamente al AZAR.

tratamientos tamices	T1 (3cm)	T2 (5cm)	T3 (8cm)
Luz de malla	3000 µm	3000 µm	3000 µm
Luz de malla	850 µm	850 µm	850 µm
Luz de malla	425 µm	425 µm	425 µm
Luz de malla	300 µm	300 µm	300 µm
Luz de malla	212 µm	212 µm	212 µm
Luz de malla	180 µm	180 µm	180 µm
Luz de malla	150 µm	150 µm	150 µm
Luz de malla	75 µm	75 µm	75 µm
Observaciones	1	1	1
Total	8	8	8

Fuente: Elaboración propia.

VARIABLES QUE SE EVALUARON PARA LA DETERMINACIÓN DEL TAMAÑO DE PARTÍCULA.

Numero de luz de malla de cada tamiz.

Cantidad retenida en cada tamiz

3.4.2. ANÁLISIS DE DATOS.

Posterior a la obtención de los datos alcanzados de cada diseño experimental: proceso de molienda y tamizaje se procedió a la utilización de las siguientes fórmulas matemáticas.

EFICIENCIA DE LA MOLIENDA.

La eficiencia del proceso de molienda es calculada con la siguiente ecuación propuesta por (Ares & Accoroni, 2017), quienes utilizaron en su investigación un molino de cuchillas y de martillos.

$$n_i^{\%} = \frac{P_i}{P_{T0}} \times 100 \quad (1)$$

Dónde:

$n_i^{\%}$ = Eficiencia porcentual de cada fracción

P_i = Peso total obtenido

P_{T0} = Peso total del material inicial a moler

DISTRIBUCION GRANULOMETRICA.

RETENIDO PORCENTUAL POR CADA TAMIZ.

El producto descargado por el molino es sometido a una separación por tamaños mediante tamizado para cuantificar la cantidad retenida en diferente luz de malla, así lo expresa (Ares & Accoroni, 2017) , mediante la siguiente ecuación.

$$R_i^{\%} = \frac{m_i}{\sum_i^n m_i} \times 100 \quad (2)$$

Donde:

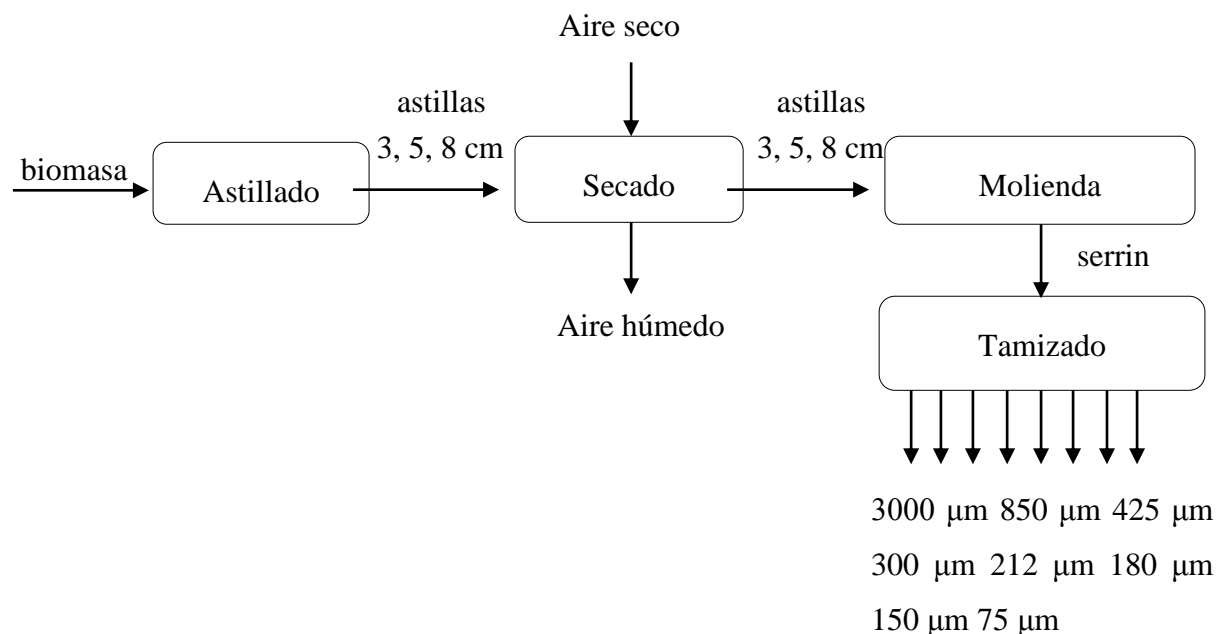
m_i = fracción retenida en la i -ésima malla

$\sum_i^n m_i$ = Sumatoria de las masas retenidas en todos los tamices.

3.4.3. TRATAMIENTO DE LOS DATOS.

Los datos obtenidos de eficiencia de molienda y tiempo empleado en el proceso, fueron registrados y pre procesados en una hoja de cálculo de Microsoft Excel, la elaboración del diagrama de flujo del proceso de molienda se lo realizó en el programa simulador SuperPro Design versión 8.2; para el análisis cuantitativo y determinación de diferencias significativas de los tratamientos se utilizó el programa estadístico Design Expert, versión 7.1 mismo que ayudó a la elaboración del modelo matemático y análisis.

3.4.4. DIAGRAMA DE BLOQUE DE LA MOLIENDA DE LA BIOMASA DEL PIGÜE PARA FINES ENERGÉTICOS.



Fuente: Elaboración propia.

3.4.4.1. OBTENCIÓN DE ASTILLAS.

Para el proceso de astillado de Pigüe (*Piptocoma discolor*) se realizó a través de la utilización de una sierra eléctrica, obteniendo tres diferentes tamaños de astillas 3 cm, 5 cm y 8 cm con un espesor de 2 cm, mismo que permitió realizar posteriormente el secado en un horno industrial.

3.4.4.2. SECADO.

El proceso lo realizó la compañera Vanessa Andi, quien ejecutó el proyecto de investigación denominado “Cinética de secado de la biomasa del Pigüe (*Piptocoma discolor*) para fines energéticos en la Provincia de Pastaza” con la utilización del horno industrial realizando un control de las variables, tiempo, temperatura y humedad.

3.4.4.3. MOLIENDA.

Se llevó a cabo en el molino construido artesanalmente por el MSc. Juan Elías González, el equipo consta de 3 cuchillas con ángulos de 45°, una tolva de forma cilíndrica ubicada

paralelamente en 90°, malla de 3 mm y un motor de 2 HP a 3800 rpm. A continuación, se presenta en la **tabla 8** los datos técnicos del equipo.

Tabla 8. Datos Técnicos del equipo Marca: THOMAS-Wiley

Características de la cuchilla del molino.

Cuchillas	largo (cm)	altura (cm)	espesor (cm)	volumen (cm ³)	masa (g)
3	10	3	1.4	42	329.7

Fuente: Elaboración propia.

Características del molino

diámetro de la malla (mm)	volumen del eje (cm ³)	volumen del rotor (cm ³)	velocidad (RPM)	potencia (Kw/h)
3	263.89	477.13	3800	1.5

Fuente: Elaboración propia.

3.4.5. DETERMINACIÓN DEL TAMAÑO DE PARTICULA.

Una vez terminado el proceso de molienda, la determinación del tamaño de partícula mediante el tamizado fue realizado de forma manual en el laboratorio de Bromatología de la (UEA), se utilizó ocho diferentes tamices, según lo establece la norma Internacional UNE-EN-15149-2 (2011): *Determinación de la distribución de tamaño de partícula. Método del tamiz Vibrante.*(Aenor, 2011) los tamices utilizados en esta experimentación retuvieron partículas de los siguientes tamaños, 3000 µm 850 µm; 425 µm; 300 µm; 212 µm; 180 µm; 150 µm; 75 µm. La valoración del tamaño de partícula para usos industriales se lo determinó en base al retenido porcentual en cada tamiz aplicando una fórmula matemática **Ver Ec. 2**, posterior a ello se realizó un balance total de la distribución granulométrica que permitió valorar las cantidades retenidas en cada tamiz según luz de malla, para posteriores usos industriales.

3.4.6. DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO DE MOLIENDA DE BIOMASA.

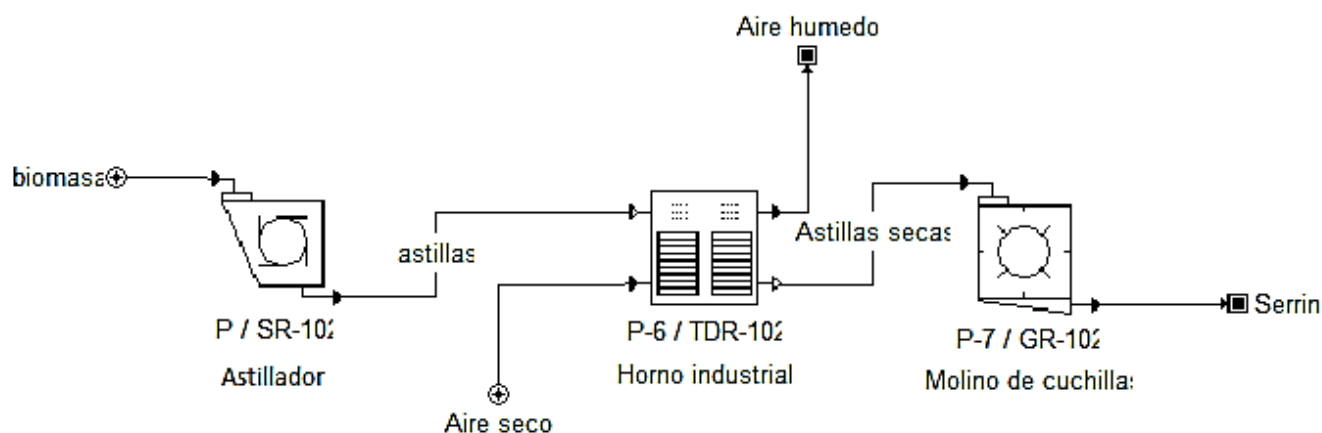


Figura 3. Proceso de molienda de biomasa

Fuente: SuperPro Designer.

3.5. RECURSOS HUMANOS Y MATERIALES.

El trabajo de investigación y desarrollo para su inicio se realizará en los laboratorios de la Universidad en colaboración con cada una de las personas encargadas, Tutor principal del presente proyecto de investigación, Ing. Juan Elías González, MSc ejecutor del proyecto y docente de la UEA; y Yomira Jazmín Villacis Pila, egresada de la Universidad Estatal Amazónica.

3.5.1. EQUIPOS Y MATERIALES

Tabla 9. Tabla de equipos utilizados.

PROCESO	EQUIPOS Y MATERIALES
Astillado	- sierra eléctrica - balanza analítica
Molienda	- Molino de cuchillas
Determinación de tamaño de partícula	- Vibro- tamices

Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A través de las ecuaciones matemáticas aplicadas (**ec.1**, **ec.2** y **ec.3**), análisis estadísticos de los resultados obtenidos de acuerdo a los diseños experimentales aplicados: molienda y tamizaje se obtuvieron los siguientes resultados.

4.1. DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA DEL PROCESO DE MOLIENDA SEGÚN EL TAMAÑO DE ASTILLA.

Los resultados de eficiencia que se muestran en la **tabla 10**, fueron obtenidos aplicando la ecuación 1, planteada por (Ares & Accoroni, 2017) quienes expresan la relación entre el peso total obtenido y el peso inicial a moler.

Tabla 10. Valores de eficiencia calculada.

Tamaño de astilla (cm)	Peso inicial a moler (g)	Peso final obtenido (g)	Eficiencia (%)
T1: 3	323	228	71
	334	275	82
	343	289	84
T2: 5	323	282	87
	334	291	87
	343	302	88
T3: 8	323	318	98
	334	325	97
	343	335	98

Fuente: Elaboración propia.

En la siguiente tabla se observa el valor de eficiencia obtenida de acuerdo al tamaño de astilla (3 cm, 5 cm y 8 cm), el peso total de la masa inicial de cada tratamiento fue de 1000 g, dividido en tres pesos distintos 323 g, 334 g y 343 g, los pesos finales que se obtuvieron según el tamaño de astilla posterior al proceso presentaron una diferencia significativa; el T1 correspondiente al tamaño de astilla de 8 cm presentó una eficiencia alta de 97 - 98 %, el 87-88 % correspondió al T2 (astilla de 5 cm) , en el caso del T3 (astilla de 3 cm) presentó un nivel

de eficiencia bajo con un rango de 71 - 84% ,debido a la estructura del equipo por su atascamiento del material en las cuchillas y en el sistema de alimentación, impidiendo el flujo continuo del material provocando pérdidas de masa y tiempo esto hace que los valores de salida del material sean menores a los de entrada, disminuyendo la eficiencia del proceso. El nivel de eficiencia que presentó el T3 (astilla de 8 cm) calificado como el mejor tratamiento se asemejan con los valores que menciona (Saldaña & Gutierrez, 2012) en su investigación con niveles de eficiencia de 91.25 y 94.25 %.

4.2. EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DEL PROCESO DE MOLIENDA DE ACUERDO AL TAMAÑO DE LA ASTILLA.

Con los datos que se reportan en el **anexo 1**, se realizó el análisis de varianza de la eficiencia obtenida en el proceso de molienda en relación al peso del material que ingresa al sistema. Ver **tabla 11**.

Tabla 11 . Análisis de la varianza de la eficiencia del proceso de molienda.

Fuente de variación	SC	gl	CM	F	Prob > F
Modelo	597.58	3	199.19	37.70	0.0007
A – tamaño de astilla	522.67	1	522.67	98.93	0.0002
B - peso	32.67	1	32.67	6.18	0.0754
AB	42.25	1	42.25	8.00	0.0568
error	26.42	5	5.28		
total	624.00	8			

Fuente: Design-Expert.

En el análisis de la varianza se observa que existen diferencias altamente significativas para A - tamaño de astilla, en relación a B - peso, el nivel de significancia es menor al igual que su interacción. El valor F modelo de 37.70 implica que el modelo es significativo. Los valores de "Prob> F" inferiores a 0.05 indican que los términos del modelo son significativos. En este caso, A, AB son términos significativos del modelo, el coeficiente de variación para la variable eficiencia es de 2.61 y todos los tratamientos tienen una media de 88 % de eficiencia siendo un rango alto.

Tabla 12. Porcentaje de eficiencia.

Tratamientos (Tamaño de astilla cm)	Medias %	Rango
8	97,67	A
5	87,33	B
3	79,00	B

Letras desiguales difieren significativamente para la prueba de Tukey al 95% de confiabilidad.

Fuente: Elaboración propia.

El análisis obtenido por la prueba de Tukey al 5%, como se muestra en la **tabla 12** indica que el tamaño de astilla de 8 cm tiene una media del 97,67 % de eficiencia, ocupando el primer rango **A**, mientras que las astillas de 3 y 5 cm no son estadísticamente significativas ocupando el segundo rango **B**, presentando un nivel de eficiencia relativamente bajo.

4.2.1. TIEMPO EMPLEADO EN EL PROCESO DE MOLIENDA.

Con los datos que se reportan en el **anexo 1**, se realizó el análisis de varianza del tiempo empleado en el proceso de molienda para cada tamaño de astilla, como se muestra en la **tabla 13**.

Tabla 13. Análisis de la varianza del tiempo (s) empleado.

Fuente de variación	SC	gl	CM	F	Prob > F
Modelo	3248.78	3	1082.93	160.29	0.0001
A – tamaño de astilla	2983.74	1	2983.74	441.64	0.0001
B - Peso	0.54	1	0.54	0.080	0.7887
A ²	264.50	1	264.50	39.15	0.0015
error	33.78	5	6.76		
total	3282.56	8			

Fuente: Design-Expert.

El análisis de la varianza que se observa en la tabla muestra que, existen diferencias altamente significativas para A - tamaño de astilla. El valor F modelo de 160.29 implica que el modelo es significativo. Los valores de "Prob> F" inferiores a 0.0500 indican que los términos del modelo son significativos. En este caso, A, A² son términos significativos del modelo, el

coeficiente de variación para la variable eficiencia es de 2.65 y todos los tratamientos tienen una media de 98.07 % de eficiencia siendo un rango alto. Los valores superiores a 0.1000 indican que los términos del modelo no son significativos, por lo tanto, no son significantes el término B – Peso.

Tabla 14. Tiempo empleado

Tratamientos (Tamaño de astilla cm)	Medias	Rango
8	79,87	A
5	90.40	B
3	124.20	C

Letras desiguales difieren significativamente para la prueba de Tukey al 95% de confiabilidad.

Fuente: Elaboración propia.

El análisis obtenido por la prueba de Tukey al 5%, ver **tabla 14** se observa que el tamaño de astilla de 8 cm consumió menor tiempo con una media de 79.87 s ocupando el primer rango **A**, el segundo rango **B** lo ocupa el segundo tratamiento, astilla de 5 cm con una media de 90.40 s, y el tercer rango **C** lo ocupa el tratamiento uno con una media de 124.20 s.

4.3. MODELACIÓN MATEMÁTICA

Con los datos que se reportan en el **anexo 2** se realizó el modelo matemático para la eficiencia y tiempo empleado en el proceso de molienda aplicando una función cuadrática. A continuación, se presenta el modelo de la eficiencia en el que se analizan dos factores de estudio como es **A**: tamaño de astilla (-1: 3 cm, 0: 5 cm y 1: 8 cm) y **B**: peso inicial (-1: 323g, 0: 334g. y 1: 343g) y su interacción. Ver **Modelo 1**.

MODELO 1.

$$\text{Eficiencia} = 88.00 + 9.33 * A + 2.33 * B - 3.25 * A * B$$

Fuente: Design-Expert

Se observa que existe un comportamiento positivo en el modelo con los coeficientes del factor A (tamaño de astilla) y B (peso inicial), por el contrario, el comportamiento negativo del modelo influye sobre el coeficiente con interacción de A * B.

Al reemplazar cada uno de los valores de A y B representados por -1, 0 y 1 se obtienen los valores predichos por el modelo. Seguidamente, se presenta la aplicación del modelo, al igual que los valores actuales o experimentales, valores Predichos y el residual. Ver **tabla 15**.

A: (1:8 cm); **B** (0: 334g)

$$\text{Eficiencia} = 88.00 + 9.33 * 1 + 2.33 * 0 - 3.25 * 1 * 0$$

$$\text{Eficiencia Valor Predicho} = 97.33$$

$$\text{Eficiencia Valor Actual} = 97.00$$

$$\text{Residual} = - 0.33$$

Tabla 15. Valores de eficiencia Actual- Predicho.

Orden Estandar	Valor Actual	Valor Predicho	Residual
1	71.00	73.08	-2.08
2	98.00	98.25	-0.25
3	84.00	84.25	-0.25
4	98.00	96.42	1.58
5	82.00	78.67	3.33
6	97.00	97.33	-0.33
7	87.00	85.67	1.33
8	88.00	90.33	-2.33
9	87.00	88.00	-1.00

Fuente: Design-Expert

La tabla 15 muestra el ajuste que posee el modelo en relación al valor experimental o actual de la eficiencia obtenida y el valor Predicho propuesto por el modelo, se puede apreciar que el valor del residual representa la distancia que separa al valor Actual del valor Predicho, por lo tanto, mientras más bajo sea el residuo mejor será descrita la respuesta por el modelo.

Al interpolar dichas codificaciones de **-1; 0; 1** para tamaños de astillas 4 cm, 6 cm y 7 cm y pesos de 328 g; 337 g; 340 g se obtienen los siguientes valores para el desarrollo del modelo.

A: tamaño de astilla (-0.5:4 cm, 0.3: 5 cm y 0.6: 7 cm) y **B:** peso inicial (-0.5: 328g, 0.3: 337g. y 0.6: 340g)

La probabilidad normal del modelo de eficiencia que muestra la **figura 4** indica el ajuste que posee en base a los datos experimentales y Predichos.

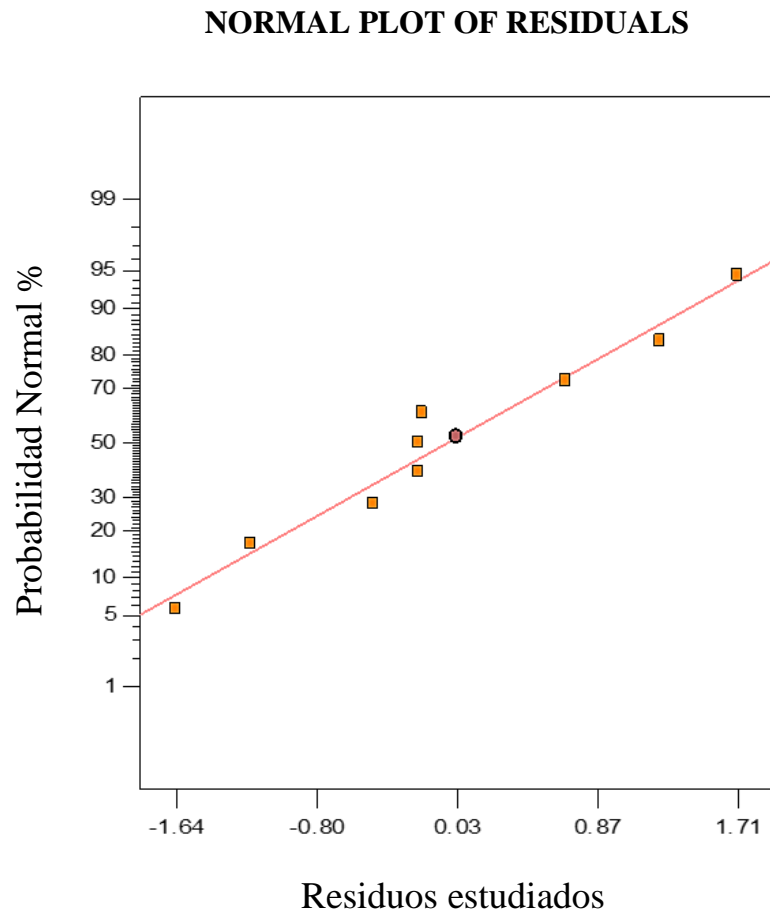


Figura 4. Probabilidad normal del modelo de eficiencia.

Fuente: Design-Expert

La probabilidad normal (*NORMAL PLOT OF RESIDUALS*) que muestra la figura indica el ajuste del modelo de eficiencia, la línea que se observa revela los valores predichos por el modelo, mientras que los puntos son las mediciones reales de la experimentación; al analizar en la gráfica la distancia en la que se encuentran estos valores se corrobora la aceptabilidad del modelo.

Tabla 16. Estadística descriptiva para los datos

Eficiencia	Datos
Desviación estándar	2.30
R ²	0.9577
R ² ajustado	0.9323
R ² predicha	0.8216
Precisión adecuada	16.423

Fuente: Design-Expert.

El análisis obtenido por la estadística descriptiva como se muestra en la **tabla 16** prueba que el valor de R² también llamado coeficiente de determinación refleja la bondad del ajuste del modelo. La R² predicha de 0.8216 es aproximadamente igual al valor Ajustado de R² de 0.9323. El valor de la precisión Adecuada de 16.42, mayor que 4, significa que el modelo es adecuado. Según lo menciona (González, 2010)

Con los datos que se reportan en el **anexo 2** para el desarrollo del modelo matemático del tiempo empleado en el proceso, se analizaron los mismos factores de estudio como es **A:** tamaño de astilla (-1:3 cm, 0: 5 cm y 1: 8 cm) y **B:** peso inicial (-1: 323g, 0: 334g. y 1: 343g).

MODELO 2

$$\text{Tiempo} = 90.40 - 22.33*A + 0.30*B + 11.50*A^2$$

Se observa que existe un comportamiento positivo en el modelo con los coeficientes del factor A² (tamaño de astilla) y B (peso inicial), por el contrario, el comportamiento negativo del modelo influye sobre el coeficiente del factor A.

Al reemplazar cada uno de los valores de A y B representados por -1, 0 y 1 se obtiene el valor del tiempo predicho por el modelo desarrollado. Seguidamente, se presenta la aplicación del modelo, al igual que los valores actuales o experimentales, valores Predichos y el residual. Ver **tabla 17**.

A: (1:8 cm); **B** (0: 334g)

$$\text{Tiempo} = 90.40 - 22.33 \cdot 1 + 0.300 + 11.50 \cdot 1^2$$

$$\text{Tiempo Valor Predicho} = 79.60$$

$$\text{Tiempo Valor Actual} = 81.00$$

$$\text{Residual} = -1.40$$

Tabla 17. Valores del tiempo Actual- Predicho.

Orden Estándar	Valor Actual	Valor Predicho	Residual
1	124.80	123.90	0.90
2	77.40	79.30	-1.90
3	120.60	124.50	-3.90
4	80.40	79.90	0.50
5	127.20	124.20	3.00
6	81.00	79.60	1.40
7	88.80	90.10	-1.30
8	91.80	90.70	1.10
9	90.60	90.40	0.20

Fuente: Design-Expert

La tabla muestra el ajuste que posee el modelo en relación al valor experimental o actual del tiempo empleado y el valor Predicho propuesto por el modelo, se puede apreciar que el valor del residual representa la distancia que separa a los valores de los datos de los valores ajustados, mientras más bajo sea dicho valor mejor será descrita la respuesta por el modelo.

La probabilidad normal del modelo del tiempo empleado que muestra la **figura 5** indica el ajuste que posee en base a los datos experimentales y Predichos.

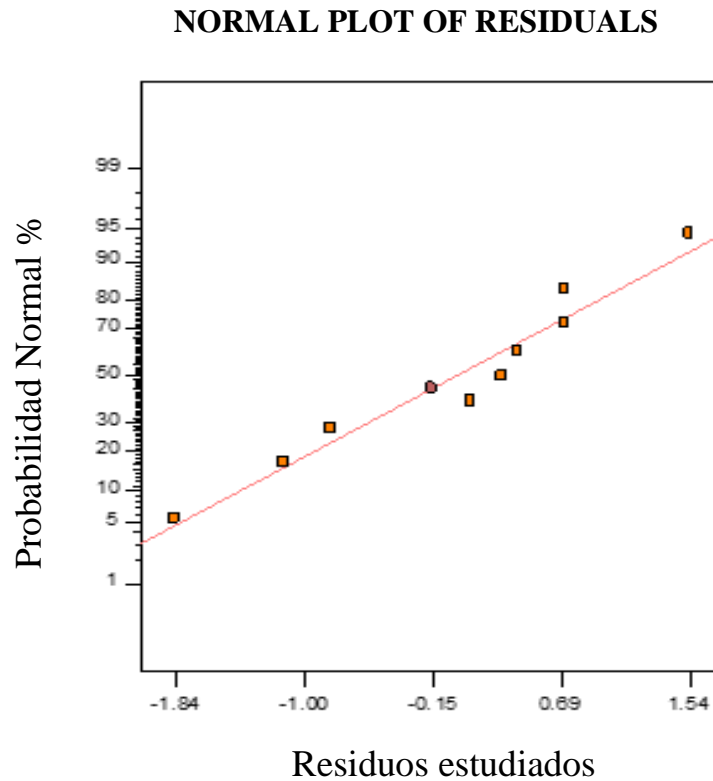


Figura 5. Probabilidad normal del modelo del tiempo empleado.

Fuente: Design-Expert

La probabilidad normal (*NORMAL PLOT OF RESIDUALS*) que muestra la figura indica el ajuste del modelo del tiempo empleado, la línea que se observa revela los valores predichos por el modelo, mientras que los puntos son las mediciones reales de la experimentación; al analizar en la gráfica la distancia en la que se encuentran estos valores se corrobora la aceptabilidad del modelo.

Tabla 18. Estadística descriptiva para los datos

Eficiencia	Datos
Desviación estándar	2.60
R ²	0.9897
R ² ajustado	0.9835
R ² predicha	0.9647
Precisión adecuada	26.085

Fuente: Design-Expert.

El análisis obtenido por la estadística descriptiva ver **tabla 18** prueba que el valor de R² también llamado coeficiente de determinación refleja la bondad del ajuste del modelo. La R² predicha de 0.9647 es aproximadamente igual al valor Ajustado de R² de 0.9835. El valor de la precisión Adecuada de 26.085, mayor que 4, significa que el modelo es adecuado. Según lo menciona (González , 2010).

4.4. DETERMINACIÓN DEL TAMAÑO DE PARTÍCULA SEGÚN LA NORMA UNE-EN-15149-2 (2011) PARA USOS ENERGÉTICOS.

La determinación del tamaño de partícula para usos industriales se lo realizó utilizando un vibro tamiz con luz de malla de 3000 μm 850 μm ; 425 μm ; 300 μm ; 212 μm ; 180 μm ; 150 μm ; 75 μm , se realizó un promedio total de los tratamientos tomando en consideración el retenido porcentual por cada tamiz. Con los datos que se reportan **ver anexo 3** se realizó el análisis de la varianza del tamaño de partícula. Ver **tabla 19**

Tabla 19. Análisis de la varianza del tamaño de partícula.

Fuente de variación	SC	gl	CM	F	Prob > F
Modelo	0,57	7	0,08	699,10	<0,0001
Tratamientos	0,57	7	0,08	699,10	<0,005
Error	1,90E-03	16	1,20E-04	CV= 8,61	
Total	0,57	23			

Fuente: Elaboración propia.

Según los resultados obtenidos del análisis de la varianza del tamaño de partícula existen diferencias significativas en el porcentaje de retención en los diferentes tamices con una

prueba estadística Fisher de 699,10 y con una probabilidad de ocurrencia menor al 0,01%, el coeficiente de variación de 8,61% permite tener una aceptable confiabilidad.

Tabla 20. Tukey: Tamaño de partícula.

Luz de malla	Porcentaje total	Rango
3000	44	A
850	33	B
425	10	C
300	7	C
212	3	D
180	2	D
150	1	D
75	1	D

Fuente: Elaboración propia.

El análisis obtenido por la prueba de Tukey al 5% como se muestra en la **tabla 20** el 44% corresponde al total de material retenido en luz de malla de 3000 μm y que ocupa el primer rango, siendo este el producto obtenido de la molienda, el 33% de retenido en luz de malla de 850 μm ocupando el segundo rango, mientras que los valores totales retenidos en los demás tamices con diferente luz de malla ocupan el tercer rango. El tamaño de partícula de 3000 μm correspondiente a 3mm se puede aplicar para tecnologías de gasificación como lo manifiesta (Perez et al., 2010) y (Arteaga & Casas, 2014), para los tamaños de partícula de 850 μm correspondiente a 0.8 mm pueden aplicarse para elaboración de productos densificados como indica (Rutiaga & Carrillo, 2014) y para tecnologías de gasificadores de arrastre según (Rutiaga & Carrillo, 2014).

En base diseño estadístico aplicado se determinó el porcentaje de retención en diferente luz de malla según lo establece la Norma Internacional: UNE-EN-15149-2 (2011) para la determinación del tamaño de partícula obteniendo porcentajes de (3000 μm = 44 %); (850 μm = 33 %); (425 μm = 10 %); (300 μm = 7 %); (212 μm = 3 %); (180 μm = 2 %); (150 μm = 1 %); y (75 μm = 1 %).

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES.

- En base a la experimentación y resultados obtenidos se evaluó la eficiencia de molienda de cada tratamiento, demostrando ser el mejor el T3 correspondiente al tamaño de astilla de 8 cm, con una eficiencia del 97.67%, los tratamientos T1 (79%) y T2 (87.33%) presentaron un nivel relativamente bajo, debido al atascamiento de las astillas en las cuchillas y en el sistema de alimentación del equipo, por ende hubo una pérdida de tiempo en el proceso, es por ello que el tamaño de astilla óptimo para el proceso de molienda debe ser superior a 8 cm.
- Se determinó los tamaños de partícula obtenidos mediante el tamizaje como lo indica la norma Internacional UNE-EN-15149-2 (2011) para usos energéticos, mostrando que el mayor retenido de material en los tamices con luz de malla de 3000 μm fue el 44% y en luz de malla de 850 μm el 33%, la partícula de 3000 μm correspondiente a 3 mm fue obtenida directamente del proceso de molienda, misma que puede ser utilizada para tecnologías de gasificación, el tamaño de partícula de 850 μm correspondiente a 0.8 mm se utiliza para la elaboración de productos densificados y tecnologías de gasificación.
- Se desarrollaron dos modelos matemáticos de eficiencia y tiempo empleado que contribuirán al proceso de molienda de la biomasa del Pigüe, ya que el ajuste que optaron dichos modelos representan entre el 95–98 % de confiabilidad para ser aplicados en el sistema.

5.2. RECOMENDACIONES.

- Implementar un sistema de astillado en el equipo que permita obtener directamente el tamaño de astilla óptimo de manera eficiente para el proceso de molienda, para evitar así la generación de pérdidas y optimización de tiempo.
- Rediseñar el sistema de alimentación del equipo (tolva) y el ángulo de las cuchillas para evitar pérdidas de biomasa y atascamientos del material a moler, para obtener una eficiencia del proceso.
- Implementar un tamiz en el equipo con luz de malla de 850 μm , para la distribución granulométrica directa del material obtenido en la molienda y su posterior uso en tecnologías de elaboración de productos densificados con fines energéticos.

CAPITULO IV

BIBLIOGRAFIA

- Aenor. (2011). Biocombustibles solidos, especificaciones y clases de combustibles. Madrid-España Retrieved from
- Ambiente., M. d. (2007). Planificacion Estrategica Bosques Nativos en el Ecuador
- Ares, C., & Accoroni, C. (2017). Analisis de la molienda de expeller de soja evaluando la performance de diferentes tipos de molinos. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 16 No.2, 1-11.
- Arteaga, L., & Casas, Y. (2014). Gasificación de biomasa para la producción sostenible de energía. Revisión de las tecnologías y barreras para su aplicación. 1-8.
- Bilbao Duñabeitia, R. (2009). Aprovechamiento termoquímico de la biomasa. Universidad de Zaragoza
- Blair, S., & Madrigal, B. (2005). Plantas antimaláricas de Tumaco.
- Cárdenas Leon, D., Shomar García, B. S., & Solorio Ramos, A. (2012). Analisis de cuchillas de molino para termoplastos mod.2650 y diseño para una mayor duracion. . Instituto Politècnico Nacional, Mexico,D.F.
- Carrasco Garcia, J. E. (2008). Combustion directa de la biomasa
- Castellò, M., & Barrera, C. (2013). Reducción del tamaño de partículas y tamizado de sólidos Universidad Politecnica de Valencia, Valencia. Retrieved from <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/82132/Castell%C3%B3Barrera%3B%3BP%C3%A9rez%20-%20Reducci%C3%B3n%20del%20tama%C3%B1o%20de%20part%C3%ADcula%20y%20tamizado%20de%20part%C3%ADculas.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Cortazar Figueroa, L. M., Meléndez Perez, R., & Oliver Hernandez, D. M. (2008). Consumo de energía y distribución de tamaño de partícula en la molienda de canela (*Cinnamomum zeylanicum*) y pimienta negra (*Pipernigrum L*) *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, Vol. 7, No. 2 1-8.
- De la cerda Larroucau, N. P. (2014). Diseño, implementación y post-evaluación de un servicio de triturado de biomasa a partir de desechos forestales Universidad de Chile Santiago de Chile
- Duran, H. M., & Pulido, J. L. (2007). Análisis de la Molienda en el Proceso de Elaboración de Mezcal. 18 N° 1, 47-52.
- Erazo, G., Izurieta, J. C., Cronkleton, P., Larson, A., & Putzel, L. (2013). The use of pigüe (*Piptocoma discolor*) by smallholders in Napo, Ecuador. 1-6.
- Gonzalez, P. (2010). Modelo matemático para evaluar el efecto de los fenómenos atmosféricos en enlaces de radio microondas de 2.4 ghz. 1-24.

- Grijalva, O., & Checa, X. (2012). Situación de los recursos genéticos forestales en Ecuador. Quito Retrieved from http://www.iniap.gob.ec/nsite/images/stories/descargas/informe_pas_rgf_ecuado_final_.pdf.
- IDAE. (2009). Guía técnica de instalaciones de biomasa térmica en edificios. Madrid, España Retrieved from http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_10920_Instalaciones_Biomasa_Term_edificios_2009_b6fe691f.pdf.
- INAMHI. (2015). Boletín Climatológico Anual Boletín de vigilancia climática del Ecuador. Quito-Ecuador Retrieved from http://www.serviciometeorologico.gob.ec/meteorologia/boletines/bol_anu.pdf.
- Lima, L. (2013). Evaluación de la composición química y propiedades físicas de madera y corteza de cuatro coníferas para la producción de bioenergía., Universidad autónoma de nuevo león facultad de ciencias forestales. Retrieved from <http://eprints.uanl.mx/3530/1/1080256594.pdf>
- Magne, L., Améstica, R., Barrià, J., & Menacho, J. (1995). Modelización dinámica de molienda semiautogena basada en un modelo fenomenológico simplificado. 1-9.
- Merino Castillo, J. P. (2010). Estudio económico de dos formas de aprovechamiento forestal del pigue (pollalesta discolor) en el cantón mera, provincia de Pastaza. escuela superior politecnica de Chimborazo, Riobamba-Ecuador
- Mesa, Y., & Villa, J. (2011). Modelación Matemática en la Historia de las Matemáticas. Una mirada al concepto de Función Cuadrática., 1-10. doi: 10.13140/RG.2.1.3942.056
- Navarra, P. E. d. (2015). Combustibles de biomasa Tipos y características Retrieved from <https://www.navarra.es/NR/rdonlyres/45C7C274-B3F4-4C91-B8B9-23259B8F5B39/0/201501Combustiblesdebiomasa.pdf>.
- Noguès, F. S., García Galindo, D., & Rezeau, A. (2010). Energía de la biomasa (Vol. 1).
- Ortiz, J. (2016). El modelamiento matemático y la contabilidad analítica matricial, mecanismos de medición, representación interpretación contable.
- Peredo, M. (1993). Uso de hidrófobos en la fabricación de tableros de partículas con residuos de cosecha forestal 1-10.
- Perez, J., Borgue, & Agudelo, J. (2010). Proceso de gasificación de biomasa: una revisión de estudios teórico – experimentales. 1-13.
- Plan Nacional del Buen Vivir. (2017-2021). Ejes Estratégicos
- Poggi Varaldo, H. M., Martínez Reyes, A., & Pineda Cruz, J. A. (2009). Tecnologías Solar-Eólica-Hidrógeno-Pilas de Combustible como fuentes de energía México.
- Rezaei, H., & Jim, C. (2016). Size, shape and flow characterization of ground wood chip and ground wood pellet particles. *Podwer Technology*, 301, 737-746.
- Rincón Martínez, J. M., & Silva Lora, E. E. (2014). Bioenergía (Prmera ed.). Bogotá - Colombia.

- Rodríguez, J. A. (2012). Modelos matemático de una partícula de biomasa para el proceso de pirólisis (pp. 16). Nuevo Leon: Universidad Autónoma de Nuevo León. Facultad de Ciencias Químicas.
- Rutiaga, J., & Carrillo, A. (2014). Distribución granulométrica en subproductos de aserrío para su posible uso en pellets y briquetas. Scielo, 1-12.
- Saldaña, A., & Gutierrez, C. (2012). Estudio de la eficiencia de troceado de hojas y trozas empleando un molino con cuchillas articuladas. Vol. 21 1-18.
- Solar, D.A. (2013a). Metodología para la Optimización del Aprovechamiento Energético de los recursos de Biomasa. Aplicación a la Comunidad Valenciana .
- Solar, D. A. (2013b). Metodología para la Optimización del Aprovechamiento Energético de los Recursos de Biomasa. Aplicación a la Comunidad Valenciana Universitat politècnica de valència Instituto de ingeniería energética.
- Suárez, J., Sotolongo, J. A., & Rodríguez, E. (2011). Experiencias del proyecto BIOMAS-CUBA. Alternativas energéticas a partir de la biomasa en el medio rural cubano. 34, No. 4, 1-24.
- Tomasini, M. C. (2012). Las máquinas de Leonardo da Vinci. 27-36.
- Tripathi, A. (2010). Assessment and evaluation of PV based decentralized rural electrification: An overview. 1-13. doi:10.1016/j.rser.2010.04.005
- Valter, E., & Zuccoli, L. (2008). Manual de combustibles de madera producción requisitos de calidad comercialización. España.

CAPITULO VII

ANEXOS

Anexo 1. Datos para el procesamiento estadístico de eficiencia y tiempo empleado.

Tratamientos	Eficiencia (%)	Tiempo (s)
T1	71.00	124.80
T3	98.00	77.40
T1	84.00	120.60
T3	98.00	80.40
T1	82.00	127.20
T3	97.00	81.00
T2	87.00	88.80
T2	88.00	91.80
T2	87.00	90,6

Anexo 2. Datos para el desarrollo del modelo matemático.

A: tamaño de astilla	B: peso inicial
1	1
-1	1
1	-1
-1	-1
1	0
-1	0
0	1
0	-1
0	0

Anexo 3. Datos para el procesamiento estadístico del Tamizaje.

DISEÑO EXPERIMENTAL			ANALISIS
No. Trat	Luz de Malla µm.	No. Observ.	Retenido en luz de malla µm %
T1	3000	1	43
T2	3000	2	44
T3	3000	3	44
T1	850	1	32
T2	850	2	32
T3	850	3	33
T1	425	1	7
T2	425	2	11
T3	425	3	11
T1	300	1	6
T2	300	2	7
T3	300	3	7
T1	212	1	4
T2	212	2	3
T3	212	3	3
T1	180	1	2
T2	180	2	2
T3	180	3	1
T1	150	1	1
T2	150	2	1
T3	150	3	1
T1	75	1	1
T2	75	2	1
T3	75	3	1



Molino de cuchillas



Molienda de biomasa



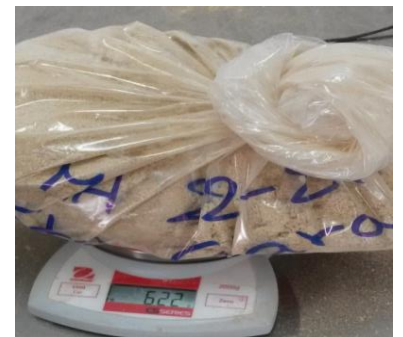
Cuchillas



Sistema de alimentación



Astillas



Peso de muestras



Serie de tamices



Tamaño de partícula de 300 µm



Tamaño de partícula de 425 µm