



Modelación y simulación computacional de una trituradora de biomasa forestal en Ecuador

Computational Modeling and Simulation of a Forest Biomass Crusher in Ecuador

  Juan Elías González¹;
 Édgar Gualberto Salazar-Álvarez²;
 Daniel Yáñez Orozco³;
 Erika Clara Casco Guerrero⁴;
 David Zambrano Vera⁵;
 Campo Elías Morillo Robles⁶;
 Thalía Janeth Enríquez Ujukam⁷

^{1,4,5}Universidad Estatal Amazónica, Pastaza – Ecuador
[fjgonzalez; ec.cascog; dzambrano@uea.edu.ec](mailto:fjgonzalez;ec.cascog;dzambrano@uea.edu.ec)

^{2,6}Escuela Superior Politécnica de Chimborazo,
Chimborazo - Ecuador
[edgar.salazar; campo.morillo@esepoch.edu.ec](mailto:edgar.salazar;campo.morillo@esepoch.edu.ec)

³Riobamba - Ecuador
danielv2482@yahoo.es

⁷Pastaza - Ecuador
thaliaenriquez7@gmail.com

Cómo citar / How to cite

J. E. González, É. G. Salazar-Álvarez, D. Yáñez Orozco, E. C. Casco Guerrero, D. Zambrano Vera, C. E. Morillo Robles, and T. J. Enríquez Ujukam, “Modelación y simulación computacional de una trituradora de biomasa forestal en Ecuador,” *Tecnológicas*, vol. 27, no. 61, e3244, 2024.
<https://doi.org/10.22430/22565337.3244>

Resumen

Actualmente, los diseños asistidos por ordenador (CAD, por sus siglas en inglés) permiten crear, diseñar, simular y analizar equipos mecánicos en el sector industrial. A pesar de estas tecnologías, faltan equipos para procesar biomasa forestales en los laboratorios de las universidades Ecuatorianas. Esta investigación tuvo como objetivo desarrollar un modelo de simulación digital usando herramientas informáticas para la obtención de un triturador de biomasa forestal para laboratorios. Para ello, se empleó la metodología del *software* Autodesk Inventor, integrando los datos del diseño mecánico, así como la modelación y simulación para el análisis computacional de la estructura. Los resultados mostraron que el factor de seguridad del rodamiento, las cuchillas cortantes en un ángulo de 45°, una tolva de 90° y una malla de 2 mm arrojaron 0.9 microlitros y 15 microlitros requeridos mínimo y máximo, respectivamente, para lubricar y evitar el endurecimiento de la masa del eje de trabajo de las cuchillas. Se obtuvieron partículas tipo serrín de 75-300 µm, alcanzando una eficiencia del 95 % del corte de rodamiento, con una elasticidad máxima del eje de 230.90 MPa y un voltaje de 1-3 V. En conclusión, el análisis computacional brinda una confiabilidad del 99 %, con variación del 6.59 %, obteniendo dos modelos matemáticos que analizan la eficiencia y el triturado de biomasa forestal con un rendimiento del 62 % y una producción de 240 g/min, asegurando que el equipo procese biomasa para la producción de energía renovable en la Amazonía ecuatoriana.

Palabras clave

Biomasa forestal, eficiencia productiva, modelación computacional, simulación computacional, triturador.

Abstract

Today, computer-aided design (CAD) allows to create, design, simulate, and analyze mechanical equipment in the industrial sector. Despite these technologies, there is a lack of equipment to process forest biomass in the laboratories of Ecuadorian Universities. This research aimed to develop a digital simulation model using computer tools to obtain a forest biomass crusher for laboratories. For this, Autodesk Inventor software methodology was used, integrating mechanical design data, as well as modeling and simulation for computational analysis of the structure. The results showed that the safety factor of the bearing, the cutting blades at an angle of 45°, a 90° hopper and a 2 mm mesh yielded 0.9 microliters and 15 microliters required minimum and maximum, respectively, to lubricate and prevent hardening of the mass of the working axis of the blades. It was obtained particles type sawdust of 75- 300 µm, reaching an efficiency of 95 % of the bearing cut, with maximum elasticity of the axis of 230.90 MPa and a voltage of 1-3 V. In conclusion, the computational analysis provides a reliability of 99 %, with a variation of 6.59 %, obtaining two mathematical models that analyze the efficiency and crushing of forest biomass with a performance of 62 % and a production of 240 g/min, ensuring that the equipment processes biomass to produce renewable energy in the Ecuadorian Amazon.

Keywords

Forest biomass, productive efficiency, computational modeling, computational simulation, shredding.

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente, la necesidad de aprovechar la biomasa forestal en los laboratorios de la instituciones públicas y privadas ha generado la necesidad de contar con equipos trituradores de estas biomásas, constituyéndose en un factor importante para usos industriales [1]. Es importante señalar que los molinos de los que disponen actualmente los laboratorios son importados solamente para pulverizar esa biomasa basada en serrín. Por tal razón, al no contar con un equipo eficiente para el proceso de triturado y obtener serrín de astillas para análisis físicos, químicos y térmicos en los laboratorios, dificulta la obtención de resultados útiles para el aprovechamiento de biomasa vegetal con fines industriales. Se prevé el diseño y el análisis de la estructura mediante la modelación y simulación computacional asistido por el ordenador (CAD).

Ecuador ha considerado aspectos industriales debido a la falta de equipos o molinos de martillo eficientes y confiables, especialmente en los laboratorios de las instituciones que estudian las propiedades de las biomásas que ayudan a disminuir los desechos forestales en forma de astillas a un tamaño de partícula de 2 mm [2], lo cual permite identificar las propiedades físicas, químicas y térmicas en los diferentes equipos de sus laboratorios. Tradicionalmente, la actividad se ha venido realizando de forma manual o mediante una sierra mecánica. Por tal motivo, esta investigación presenta un equipo moderno con una masa circular que, al aplicar la fuerza adecuada, tritura eficientemente la biomasa al molerla, gracias a una modelación y simulación computacional que optimiza su estructura y diseño. Esto garantiza un proceso seguro y efectivo, comparable al de pulverizadores importados, tipo cúbico.

Actualmente, en el campo internacional no se encuentran modelos de masa circular que cuenten con cuchillas cortantes incorporadas en su diseño, mientras que en los equipos importados con masa cúbica surge un problema al atascarse las astillas en la recta de la masa del cubo, impidiendo su correcto rodamiento, dado que en estos tipos de molinos solo permiten procesar la biomasa que ya fue triturada en forma de viruta o serrín, lista para ser pulverizada, esta es una deficiencia de los pulverizadores producido por Thomas T4723CE4 Model Wiley Mill, 15" Width x 33" Height x 12" Depth, 2+30 V, que solo sirven para realizar el refinado del procesado o convertido en partículas finas 0.5 mm a 1 mm de las biomásas forestales [3].

Esta investigación se centra en la construcción de un equipo de molienda utilizando herramientas informáticas que contribuyan a diseñar, modelar, analizar, abordar y a resolver problemas relacionados con la obstrucción de los chips de la biomasa forestal, proponiendo nuevas tecnologías informáticas de simulación y validación de diseños tecnológicos similares [4] y que sean sustituibles con otros diseños o con la creación de objetos previamente planificados [5].

Mediante el uso del diseño asistido por el ordenador (CAD), y los diseños bidimensionales (2D) y tridimensionales (3D), se ha facilitado la aplicación industrial, así como el diseño y la simulación computacional de los modelos mecánicos necesarios en los dispositivos para la creación de equipos trituradores de laboratorio, además de permitir el ensamblaje y ajuste de sus piezas para la construcción de la parte mecánica e industrial [6]. Este sistema se basa en el análisis y la resolución para minimizar los problemas de los quipos a través del uso de las herramientas informáticas y algorítmicas [7] que utilizan programas como SolidWorks S2021, el cual proporciona los medios computacionales para el diseño, modelado y simulación de las propiedades de los materiales a través de métodos numéricos y algoritmos, permitiendo resolver problemas de seguridad de los equipos [8]. Otra de las herramientas informáticas potentes en la validación de los datos fue el programa Ansys Fluent, con una eficiencia del 99.9 % para la construcción del equipo, que cuenta con una plataforma completa para estos fines industriales, con resultados óptimos del diseño mecánico tridimensional, y que facilita la

visualización de toda la gama de fenómenos físicos y mecánicos [9]. Las aplicaciones del CAD, basadas en la ciencia exacta y la investigación, que utilizan programación y simulación computacional, muestran, en diversos estudios, su optimización y validación, con ventajas para la construcción de avanzados equipos tecnológicos industriales.

El *software* CAD ha permitido el diseño, modelado y validación a través del ANSYS por su confiabilidad del 99.9 %, donde algunas investigaciones resaltan su amplia gama de aplicaciones, incluyendo la construcción de laboratorios y equipos industriales [10]. Estas nuevas alternativas del uso de la biomasa forestal para diseñar, simular y validar los prototipos o equipos de molinos trituradores de biomasa forestales en el Ecuador brindan un diseño con un modelado basado en tecnologías modernas para moler la biomasa en pequeñas partículas, viables para su análisis físico, químico y térmico en equipos e instrumentos de laboratorio de instituciones de educación superior [11].

Según estos antecedentes, la falta de un equipo de molienda para biomasa forestal ha impedido la realización de análisis físicos, químicos y térmicos que faciliten el trabajo en los laboratorios de diversas instituciones, tanto privadas como públicas [12]. Surge, entonces, la necesidad de crear y validar un nuevo diseño mediante la simulación y modelado de molinos de laboratorio, con capacidad para triturar diferentes tipos de biomasa forestales que permitan realizar los análisis para el aprovechamiento de las biomasa con fines energéticos e industriales [13]. Una vez superado este proceso, que se basa en la ingeniería mecánica e industrial de los organismos antes mencionados, se procede a desarrollar y construir los dispositivos tecnológicos [14], dado que, actualmente, resulta difícil realizar estudios de análisis de biomasa forestales en estos laboratorios [15]. Por su parte, las Instituciones de Educación Superior (IES) solo cuentan con equipos que tienen un diseño de eje y rotor, caja cuadrada con martillo cortador, polea y motor incorporado de 0.5 hp, que permite pulverizar el aserrín hasta convertirlo en polvo para luego realizar un análisis de las biomasa en los laboratorios de física, química y térmica, transformándose en un clon, lo que aumenta los costos a la hora de comprar equipo, así como mayores operaciones en los laboratorios de la IES.

La presente investigación permitió reducir estas actividades, contribuyendo a la realización de diferentes análisis de la biomasa forestal en laboratorio y facilitando su proceso de triturado para su análisis y del manejo adecuado de los recursos forestales para evitar graves consecuencias medioambientales [16]. En la actualidad, el equipamiento y la tecnología son los que promueven la sostenibilidad, preservando los sistemas forestales y su biodiversidad [17]. Como ya se explicó, el objetivo de este estudio fue desarrollar la modelación y simulación computacional mediante herramientas informáticas que permitieran un diseño mecánico industrial para la construcción de un equipo de laboratorio. Los datos obtenidos y los modelos matemáticos aplicados a la molienda fueron integrados al programa informático para su evaluación y validación, según los parámetros antes mencionados, y comparados con los factores de seguridad, lo que permitió diseñar la eficiencia de la operación, que trituró diferentes tipos biomasa forestales en tamaños de partículas determinadas, incluyendo un tipo específico de serrín, posibilitando análisis físicos, químicos y térmicos en los diferentes equipos de laboratorio con los que cuenta las IES del Ecuador. El diseño del equipo demostró que se pueden producir muestras de manera eficiente, con una operación y manejo amigable, facilitando el análisis de biomasa forestales con el fin de conservar del medio ambiente en la Amazonia ecuatoriana.

2. METODOLOGÍA

2.1 Área de estudio

La presente investigación se realizó en la Universidad Estatal Amazónica, ubicada en el cantón y provincia de Pastaza, Ecuador, partiendo del único equipo disponible en su laboratorio, el cual se usa para la trituración o pulverizado del serrín, pero no de astillas, pues solo sirve para obtener biomasa pulverizada lista para diversos análisis físicos, químicos y térmicos. A raíz de esta observación, se propuso brindar una nueva alternativa de prototipo a través del diseño, modelación y simulación computacional de un triturador de biomasa para su construcción en Ecuador y América latina mediante el uso de herramientas informáticas, como el CAD, para el diseño y modelado, y su validación en ANSYS, con un 99.9 % de confirmación y confiabilidad, beneficiando a todas las IES nacionales e internacionales.

En vista que no cuenta con equipos de triturado de biomasa forestal a pequeñas escalas de laboratorio, se prevé que este diseño y análisis de la modelación y simulación computacional, llevado a cabo en un taller mecánico de la parroquia de Puyo -cabecera cantonal de Pastaza- para la construcción del molino que servirá en la trituración de la biomasa forestal, sea exitoso, esto luego de realizar los ensayos y las correcciones mecánicas. Basados en aspectos normativos relacionados con los materiales y los métodos para su construcción, durante las pruebas el equipo funcionó correctamente. Lo anterior se logró gracias a la colaboración de un grupo de personas que contribuyó con el diseño tipo laboratorio, el cual servirá nacional e internacionalmente para investigaciones del sector industrial, como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Partes del prototipo triturador de la biomasa vegetal en materia seca. Fuente: elaboración propia.

No.	Propiedad	Característica	Norma	Referencia
1	Corriente base	Carga vertical correspondiente al peso de los diferentes componentes, como equipo fijo de servicio.	INEN 2001	[18]
2	Motor	Eficiencia energética en motores eléctricos.	INEN 2498	[19]
3	Placa de impacto	Posee un recubrimiento con una lámina de acero.	INEN 2397	[20]
4	Matrimonio del molino	Resistencia (transmisión por bandas-poleas-calidad terminados y balanceo) sin sufrir daños.	INEN-ISO 254	[21]
5	Eje	Elemento de unión incrustada en la perforación.	INEN 1132	[22]
6	Tolva	Espesor de no menos de cinco mediciones sobre una pieza.	INEN 2483	[23]
7	Cuchilla	Componente funcional para corte, gira en torno al eje vertical.	INEN 5718	[24]
8	Rodamiento	Brindar en el contorno exactitud y la seguridad del rodamiento.	INEN 8826-1	[25]
9	Malla	Mide 20 cm de largo x 10 cm de ancho, con espesor de 2 mm, mientras los orificios para el tamizaje son de 3 mm, ubicados en la parte inferior de la masa del molino.	INEN 154	[26]

2.2 Método de muestreo y ensayo del equipo

Se seleccionaron las muestras que fueron consideradas para la identificación de las piezas del prototipo de molino triturador de biomasa, según la capacidad del motor y procediendo a su

construcción. En uno de los talleres mecánicos de la zona se diseñó el prototipo y se llevó a cabo el trabajo mecánico, el cual disponía de torno para fabricar piezas y la armazón de la estructura completa del equipo con el acabado adecuado, según lo requerido; luego, se realizaron las pruebas de rectificado de las astillas secas trituradas para la obtención de una granulometría óptima, lo que permitió hacer los estudios en los equipos de laboratorio de los analizadores elemental e inmediato, obteniendo resultados favorables de la biomasa vegetal. Se ha demostrado la preferencia en cuanto al uso de materiales sólidos y secos derivados de la biomasa vegetal, de acuerdo al equipo y al tamaño de la partícula obtenida, lo cual se logra ubicando previamente una malla de alambre de 2 mm por 3 mm de espesor en la parte inferior del equipo, procediendo luego a la modelación y simulación computacional del diseño según el montaje del triturador de biomasa vegetal con el objetivo de evaluar los factores de seguridad del equipo y garantizar el cumplimiento de normas nacionales e internacionales.

2.2.1 Análisis de las características físicas de la biomasa para el triturado

Después de astillar y secar la biomasa obtenida de los cuatro cantones de la provincia de Pastaza, se determinó el contenido de humedad de equilibrio, obteniendo un promedio de 10 % a 12 % [27]. Seguidamente, la astilla fue cortada de acuerdo con el diseño del triturador o equipo, según las medidas de las cuchillas [28]. Las propiedades mecánicas de la biomasa determinaron el proceso de la molienda en el triturador, que contiene tres cuchillas con ángulos de 45°, una tolva de 25 cm de altura y un tubo alimentador de 3.8 cm de diámetro cilíndrico, ubicado paralelamente a 90° para permitir el ingreso de la biomasa, con malla de 3 mm y un motor de 2 HP a 3800 rpm, según la teoría de su construcción [6], prevenir las deformaciones de las cuchillas [29].

2.2.2 Propiedades físicas y de los materiales del equipo

En la Tabla 2 y la Tabla 3 se describen las características, dimensiones, especificaciones del equipo y funcionamiento del triturador con su respectivo motor, con base en las normas nacionales e internacionales. El equipo produciría 240 gramos de serrín por minuto. Sin embargo, la capacidad de producción del molino puede variar de acuerdo con el grado de humedad, peso específico, densidad y condiciones de trabajo.

Tabla 2. Especificaciones y dimensiones del motor. Fuente: elaboración propia.

Especificaciones motor		Dimensiones	
Detalle	Propiedad	Detalle	Dimensión
Norma	NEMA MG-1	Altura base molino	0.50 m
Frecuencia	50 Hz	Ancho base molino	38 m
Tensión	220 V	Largo base molino	0.76 m
Numero de polos	2	Altura tolva	0.50 m
Grado de protección	IP21	Ancho tolva	0.20 m
Rotación síncrona	3800 rpm	Largo tolva	0.15 m
Potencia	2 HP	Diámetro externo molino	0.16 m
Fijación	Con pies	Longitud exterior molino	0.13 m
Brida	Sin	Diámetro eje molino	0.04 m
Forma constructiva	F-1	Diámetro eje motor	0.14 m
Caja de conexión ¹	Sin caja de conexión		
Refrigeración	IC01 – ODP		

Tabla 3. Especificaciones características del equipo. Fuente: elaboración propia.

Cantidad	Elemento
1	Matrimonio conector molino motor poleas bandas
1	Base de molino construido en hierro con doble capa de pintura
1	Motor eléctrico 2 HP
1	Botonera on/off
1	Cuerpo de molino en acero
1	Juego de chuchillas tipo martillo acero

2.2.3 Tratamiento de los datos de la simulación del equipo

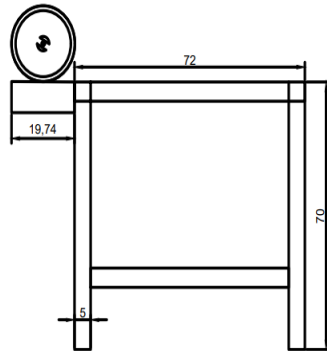
Se realizó un análisis completo y detallado de los datos presentados en las Tablas 1 a 5, considerando la seguridad mecánica del proceso del triturado de la biomasa [30], según su rendimiento y confiabilidad, logrando un diseño mediante una simulación de un molino triturador para biomasa vegetal [31]. La información de las Tablas 2 a la 3 incluye todas las propiedades de los componentes del equipo, que fueron fundamentales en el montaje y la construcción del prototipo para realizar las pruebas de la trituración de biomasa. A continuación, los resultados arrojados del equipo tipo laboratorio. Para esta investigación experimental, se diseñó y construyó un molino triturador con cuchillas horizontales que permitió obtener una molienda de la biomasa forestal, con tamaños de partículas tipo serrín que iban de 75 μm a 3000 μm , según las muestras que se probaron en los equipos de laboratorio para los análisis físicos, químicos y térmicos, sin enfrentar ninguna dificultad. Con toda esta información técnica se ha desarrollado un modelo matemático que evalúa la eficiencia en el proceso de molienda de una astilla de volumen promedio de 32 cm^3 . Sin embargo, se presentan otros estudios y diseños con modelos máquinas similares para triturar biomasa forestal.

El modelo BC625 de máquina astilladora pesa 780 kg, tiene una potencia de entre 15 kW y 19 kW, y una capacidad de 15 cm. Su sistema utiliza un disco con dos cuchillas. El modelo BC935 pesa 1660 kg, con una potencia de entre 26 kW y 37 kW y una capacidad de 23 cm, aunque no se especifica su sistema. La BC1000, con un peso de 1910 kg, cuenta con una potencia de 66 kW y una capacidad de 25 cm, utilizando un tambor con dos cuchillas. La máquina BC1230A pesa 2567 kg, tiene una potencia que varía entre 63 kW y 101 kW, una capacidad de 30 cm, y utiliza un disco con cuatro cuchillas. El modelo BC1250A, con un peso de 2873 kg, tiene una potencia de entre 63 kW y 84 kW y también una capacidad de 30 cm, pero su sistema no está especificado. La BC1600A pesa 2068 kg, tiene una potencia entre 63 kW y 94 kW, una capacidad de 15 cm, y usa un tambor con cuatro cuchillas. Por último, el modelo BC1800A pesa 3193.393 kg, con una potencia entre 82 kW y 127 kW y una capacidad de 46 cm, mientras que la BC2000 pesa 5715 kg, cuenta con 149 kW de potencia y una capacidad de 51 cm, sin especificar su sistema [32].

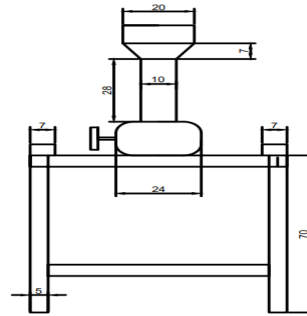
El molino rotatorio fue diseñado y construido completamente con todos sus partes para que funcione correctamente, el cual consta de matrimonio conector, motor con una potencia de 2 HP, una base de molino construido en hierro con doble capa de pintura, botonera on/off, el cuerpo del molino en acero con una polea, tres o más cuchillas horizontales montadas sobre el rotor, una caja cilíndrica que internamente cuenta con tres barras tipo martillo y su separación es de 3 mm entre las cuchillas. Esto facilitó la molienda de la biomasa, generando un impacto entre las cuchillas por acción de la gravedad y su alimentación al ciclo rotativo para la obtención de la molienda de la biomasa en el equipo que fue construido, logrando el tamaño de

granulometría deseado para los análisis físicos, químicos y térmicos de las biomásas, al igual que otros equipos de laboratorio mencionados por [18].

El programa Autodesk Inventor [31], simulador CAD, se evidencia en la modelación y simulación del diseño de las partes mostradas [33] en las imágenes (a-n) de la Figura 1, según las características del dimensionamiento y datos presentados en las Tablas 2, 3 y 4, como se establece en la norma NEMA MG-1, reseñada en la Tabla 1, lo que permitió crear las piezas 2D sobre el eje Z, dándole así su volumen y las revoluciones para la parte giratoria del eje, generando la superficie de cierre, como se evidencia a continuación.



(a) Matrimonio lateral derecho



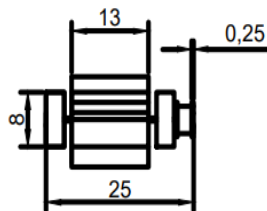
(b) Matrimonio frontal



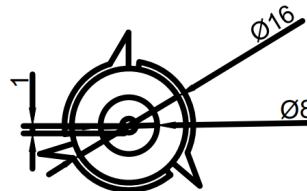
(c) Masa y cuchilla



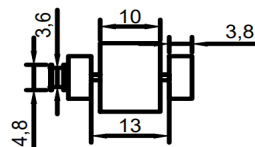
(d) Vista superior



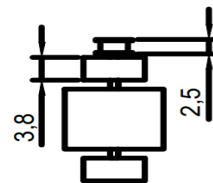
(e) Vista frontal de masa



(f) Vista cuchillas



(g) Vista superior horizontal de la masa



(h) Vista de vertical

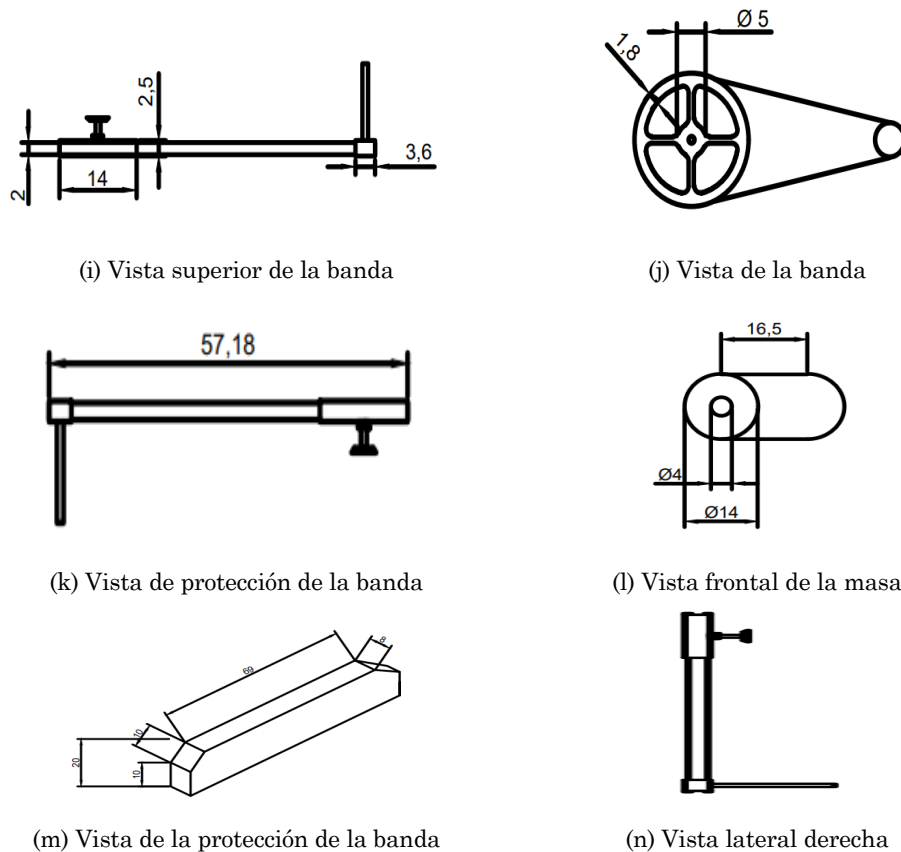


Figura 1. Diseño y simulación computacional del prototipo en Autodesk Inventor. Fuente: elaboración propia.

Este principio se basó en el dibujo 2D, que permite cambiar el sistema de coordenadas y hacer el plano XY del dibujo requerido, procurando que sus partes correspondientes estén en 2D antes de convertirse en 3D. El objetivo fue obtener en 3D el volumen y la masa del prototipo con forma circular [34].

A continuación, se analizó el diseño del dispositivo y se determinaron los siguientes parámetros: física (masa, área, volumen, centro de gravedad), estática (diseño, tipo de estudio, detección para eliminar los modos de cuerpo rígido, separación de las tensiones en las superficies de contacto y análisis de la carga de movimiento), configuración de la malla (tamaño promedio de elementos de malla curva, uso de medición basado en piezas para malla ensamblada), material (densidad grande, limite estático, resistencia máxima a la tracción, módulo de Young y relación del coeficiente de Poisson, módulo de corte, polea, eje, masa, acero dulce, densidad, elastómero en milímetros, resistencia máxima a la tracción y resistencia de los materiales, según el triturado de la biomasa DIN 6885-1 AA 8X7X18, DIN 6885-1 AA 14X9X70, DIN 471 30X1,5) y sus condiciones de operación (magnitud, vector X, Y, Z) [35]. Con base en lo anterior, se realizó el proceso del diseño y la simulación computacional [31], en el que fueron analizados, específicamente, los parámetros mecánicos [36].

2.2.4 Ensayo del proceso de molienda del equipo

La aplicación experimental aleatoria del diseño de bloques sirvió para determinar qué tan eficiente es el triturador de la biomasa en cada experimento, considerando el peso (g), el tiempo (s) y la pérdida generada. Considerando las características del molino con las especificaciones,

que cuenta con tres cuchillas de 10 cm de longitud, 3 cm de altura, 1.4 de espesor, 42 cm³ de volumen, una masa cilíndrica de 3297 g un diámetro de la malla 3 cm, un volumen del eje 263.89 cm³, volumen del rotor de 477.13 cm³ y potencia de 1.5 Kw/h. Lo anterior permitió probar y desarrollar un modelo matemático que mide la eficiencia del triturado de la biomasa vegetal seca en la planta [37].

El tamaño de la astilla utilizada fue de un espesor de 1.5 cm a 2.5 cm, y de 10 cm hasta 15 cm de largo para lograr el proceso de molienda de la biomasa, ajustado a las características del triturador [38], que consistió en reducir el tamaño de la partícula [39] de viruta a serrín, con tamaños de partículas de = 0.2 mm [28], y con una alimentación de tres tamaños de astillas de madera a través de una tolva manual, logrando obtener el serrín y el posterior tamizaje del aserrín, tal y como lo presenta [39]. El modelo lineal con estructura de parcelas en bloques al azar es como se presenta en (1):

$$Y_{ijk} = \mu + \gamma_k + \tau_i + (\gamma\tau)_{ki} + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk} \quad (1)$$

Y_{ijk} = obs. de unidad experimental.

γ_k = efecto de los bloques.

$(\gamma\tau)_{ki}$ = error de la parcela [E(a)].

$(\tau\beta)_{ij}$ = efecto de la interacción de los tratamientos de la parcela y subparcela.

ε_{ijk} = error de la subparcela [E(b)].

μ = media general del ensayo.

τ_i = efecto del tratamiento τ de la parcela.

β_j = efecto del tratamiento β de la subparcela.

Con este modelo matemático se determinó el valor total de la eficiencia del proceso de la molienda desarrollado en el equipo del triturado de la especie biomásica [40].

2.2.5 Modelo matemático de la eficiencia de la molienda

En (2) y (3) se presenta el modelo matemático desarrollado para medir la eficiencia de triturado de la biomasa seca a partir del procesamiento de los datos experimentales obtenidos, el cual es de fácil aplicación e incluye las pérdidas.

$$\varepsilon_T = \frac{\frac{\sum_{i=1}^n \frac{\varepsilon_i}{j_i}}{N}}{\frac{\frac{\varepsilon_{11} + \varepsilon_{12} + \varepsilon_{13}}{j_1} + \frac{\varepsilon_{21} + \varepsilon_{22} + \varepsilon_{23}}{j_2} + \frac{\varepsilon_{31} + \varepsilon_{32} + \varepsilon_{33}}{j_3} + \dots + \frac{\varepsilon_{n1} + \varepsilon_{n2} + \varepsilon_{n3}}{j_n}}{N}} \quad (2)$$

$$\%P = 1 - \varepsilon_T = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n \frac{\varepsilon_i}{j_i}}{N} \quad (3)$$

%P = porcentaje de pérdidas

j = número total de observaciones respecto al tiempo por minuto.

i = valor de cada observación desde 1, 2, 3, n...

N = número total de observaciones de los tratamientos por repeticiones.

n = número de observaciones.

De esta manera, se obtiene el siguiente modelo matemático para la especie.

2.2.6 Modelo del balance de masa de la molienda

Este modelo se determinó por balance de masas, el triturado de la biomasa o aserrín y sus pérdidas, según los tratamientos experimentales que se muestra en (4):

$$M_T = \sum_{i=1}^n x_i m_i + \sum_{j=1}^n y_j m_i \quad (4)$$

$$W_T = x_1 m_1 + x_2 m_2 + x_3 m_3 + y_1 m_1 + y_2 m_2 + y_3 m_3$$

wT = peso total inicial que entra al sistema.

xi = fracción de la eficiencia de la molienda.

yi = fracción de la cantidad de pérdida en el proceso de molienda.

mi = peso inicial que entra al sistema.

2.2.7 Modelo del balance de eficiencias según tamaño de astilla

Los datos obtenidos del proceso de trituración arrojaron valores efectivos en función del tamaño de la astilla para construir un nuevo modelo matemático propio de la especie, como se evidencia en (5):

$$\varepsilon_T = [\varepsilon_{TT}(m_i) + P_{TT}(m_i)] \quad (5)$$

ε_T = eficiencia total.

ε_{TT} = eficiencia total del tratamiento.

m_i = peso inicial que entra al sistema.

P_{TT} = pérdidas totales del tratamiento.

A continuación, se muestra un ejemplo de la eficiencia total en función del tamaño de la viruta que fue aplicado en el proceso de molienda.

2.2.8 Modelo del balance total desarrollado en el proceso de molienda

La ecuación que se determinó fue con base en el trabajo total realizado durante el proceso de molienda, según los tratamientos estudiados y del proceso total de sus fracciones, como se muestra en (6):

$$C_{TT} = [T_{PTA}(J_a) + T_{PP}(J_p)] \quad (6)$$

C_T = consumo total de trabajo.

T_{PTA} = trabajo promedio total aprovechado.

J_a = trabajo (joules) aprovechado.

T_{PP} = trabajo promedio perdido.

J_p = trabajo (joules) perdido.

En (7) se presenta la ecuación del balance total desarrollado en el proceso de molienda.

$$C_T = [0.33(J_a) + 0.67(J_p)] \quad (7)$$

2.2.9 Modelo de rendimiento del proceso de molienda

El modelo matemático desarrollado para evaluar la eficiencia de producción de un proceso de trituración [41], basado en la eficiencia del trabajo realizado por el triturador o molino, con el fin de seleccionar el método de procesamiento más adecuado, se muestra en (8):

$$\%R_p = \frac{m_i (\varepsilon_{PPT} - P_{PR}) + m_i (T_{PTA} - T_{PP})}{m_i} \times 100 \quad (8)$$

% RP = rendimiento del proceso de la molienda de biomasa.

m_i = peso inicial que entra al sistema.

ε_{PPT} = eficiencia de la producción promedio total.

P_{PR} = promedios de pérdidas del rendimiento.

T_{PTA} = trabajo promedio total aprovechado en el proceso de molienda.

T_{PP} = trabajo promedio de pérdida en el proceso de molienda.

2.3 Proceso de la simulación computacional

La simulación desarrollada en Ansys Fluent fue siguiendo los siguientes pasos: a) geometría (selección, parámetros, dominio, forma y tamaño); b) malla (estructura métrica y calidad); c) física (características de flujo, modelado matemático y condiciones de contorno); d) informe (parámetros calculados, verificación y validados); y e) posprocesamiento (figuras, vectores y trayectoria). Este método es considerado para evitar obstáculos en el proceso de molienda [42].

El modelo geométrico se desarrolló en la herramienta de dibujo llamada 3D, de Ansys-DesignModeler. A partir de esta geometría se importaron los datos de las figuras y del módulo geométrico del sólido en 2D y 3D. Según el procedimiento de la tecnología para el mallado se utilizó el *software* Autodesk Inventor [43], lo que permitió la creación de una cuadrícula: la malla en Ansys-Meshing, desarrollada para la fragmentación del sólido en pequeñas partículas llamadas volúmenes finitos, de tipo hexaédrico, prismático, tetraédrico y piramidal. El rendimiento de la geometría se ajustó a dichos factores y a la topología del dominio, obteniendo el modelo o diseño del prototipo deseado del triturador de la biomasa con el fin de contribuir al desarrollo industrial en la Amazonia ecuatoriana.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para la modelación y simulación computacional del equipo triturador de la biomasa forestal, se utilizó el Autodesk Inventor 2010, utilizando combinaciones de elementos finitos, formas, mallado, conductividad y dinámica basados en el programa de diseño y construcción de dispositivos a base de biomasa forestal de la Amazonia ecuatoriana, obteniendo las combinaciones y dinámicas en el arrastre del fluido de biomasa, garantizando mayor seguridad en el campo de la ingeniería mecánica, lo cuales fueron desarrollados en el programa CAD, similar al SolidWorks [41]. Ofrecer una alternativa tecnológica para laboratorios e industrias, abre la posibilidad de ser empleadas en diferentes empresas, ya sean públicas o privadas, dependiendo del tipo de trabajo y de las condiciones en la industria mecánica, pues lo que se busca es el aprovechamiento de la biomasa y la conservación del medio ambiente.

3.1 Análisis de la tensión

El análisis muestra que la simulación del triturador, realizado en Autodesk Inventor 2017, es un prototipo eficiente para la trituración de la biomasa forestal, que, según su número de piezas y su estado físico, es: masa (6.95 kg), área (119338 mm²), volumen (885901 mm³) y control de gravedad ($x = -3.37$ mm; $y = -2.96$ mm; $z = -103.06$ mm). También se llevó a cabo un análisis estático que se enfoca en un objetivo general y de diseño, basándose en la más reciente fecha de modificación del 21 de febrero de 2019 a las 11:15 a. m., cuyo propósito fue detectar los modos del cuerpo rígido y realizar esfuerzos individuales en las superficies de contacto (cero), así como los análisis de cargas de movimiento (cero).

Por otro lado, se evaluó la configuración de la malla, detallando sus diferentes características, como tamaño medio, tamaño mínimo (2 mm), factor de calificación (1.5 mm), ángulo máximo de torsión (60°), cuadrícula de elemento de curva hecha para uso (cero); además, se analizó la sección de la malla y el ensamblaje. Con respecto a los materiales, se hizo una evaluación similar al del mallado de la caldera, el cual fue validado con Ansys Fluent [44].

La Figura 2 muestra la densidad de la masa de (7.85 g/cm³), con un límite elástico (207 MPa), y una resistencia máxima a la tracción (345 MPa), el módulo de Young (210 GPa), el coeficiente de Poisson (0.3 μ L), así como el módulo de corte (80.76 GPa), que cuenta con una polea acanalada 1, eje de la masa en acero suave y un nuevo modelo de Young (220 MPa), que incluye la relación de Poisson (0.28 μ L), el módulo de corte (86.27 GPa) y el nombre de pieza: DIN 6885-1 AA8X7X18, DIN 6885-1 AA 14x9x70, DIN 471 30x1.5, respectivamente; igualmente, se presentan condiciones de operación: tipo de carga (magnitud: 196000.000 N mm, vector X: 0.000 N mm, vector Y: 0.000 N mm, vector Z: -196000.000 N mm). Basados en densidad, masa, módulo, resistencia, relación de Poisson, módulo de corte, estos materiales muestran su máxima elasticidad y resistencia a la tracción bajo el modelo de Young comparado con el modelo de Poisson [45].

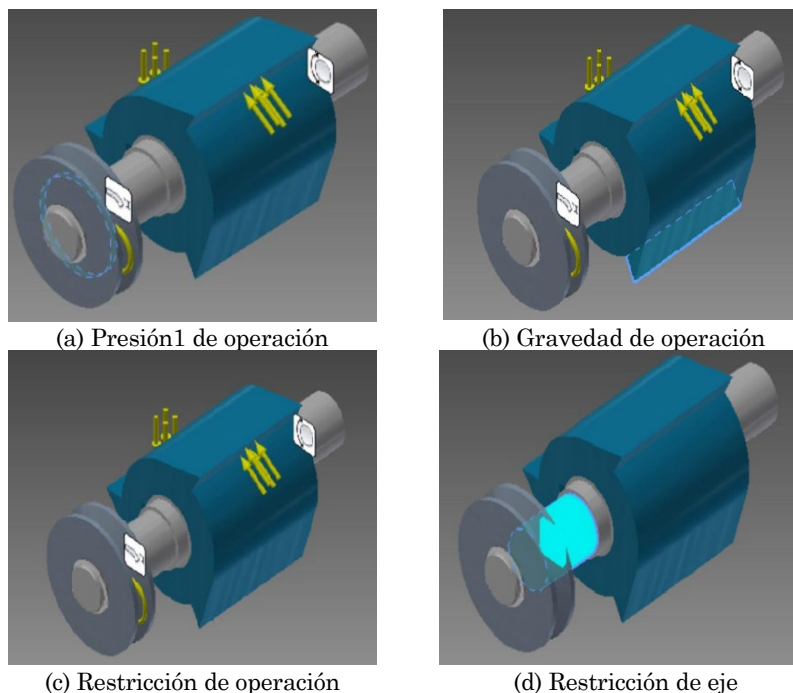


Figura 2. Análisis del diseño y simulación computacional del prototipo. Fuente: elaboración propia.

Se realizó el análisis de los ejes del prototipo y de cómo interactúan sus componentes en función de su movimiento, tal como se menciona en la Tabla 4.

Tabla 4. Análisis de contactos unidos del prototipo triturador de biomasa forestal. Fuente: elaboración propia.

Nombre	Eje	Din
Contacto: 1-3	1/eje:1/eje:1	6885-1 A A14X 9X70:1
Contacto: 4	Eje:1/eje:1/eje:1	Masa:1
Contacto: 5-6	Eje:1/eje:1/eje:1	6885-1 A A14X 9X70:1
Contacto: 7	Eje:1/eje:1/eje:1	471 30x1.5:1
Contacto: 8	Eje:1/eje:1/eje:1	471 30x1.5:1
Contacto: 9-13	Eje:1/eje:1/eje:1	6885-1 A A 8x7x18:1
Contacto: 14	Polea acanalada1:1	
	Eje:1/eje:1/eje:1	
Contacto: 15	Polea acanalada1:1	471 30x1.5:1
Contacto: 16-22	Polea acanalada1:1	6885-1 A A 8x7x18:1
Contacto: 23	Polea acanalada1:1	
	Eje:1/eje:1/eje:1	
Contacto: 24 – 26	Masa:1	6885-1 A A 14x9x70:1

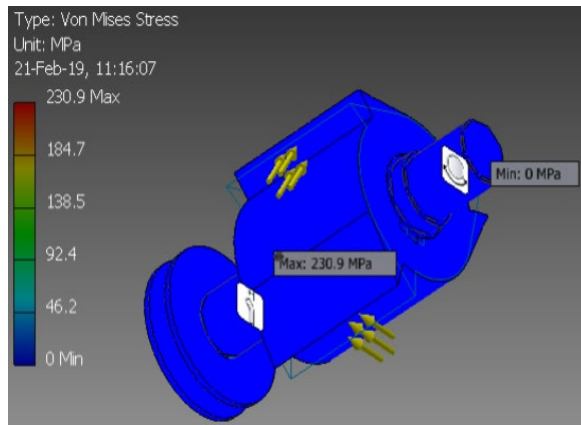
Según el análisis de las reacciones del motor y las fuerzas de magnitud aplicada a cada componente de los ejes, estos soportan el movimiento y el momento, tal como se menciona en la Tabla 5.

Tabla 5. Fuerza de reacción y momento de restricción. Fuente: elaboración propia.

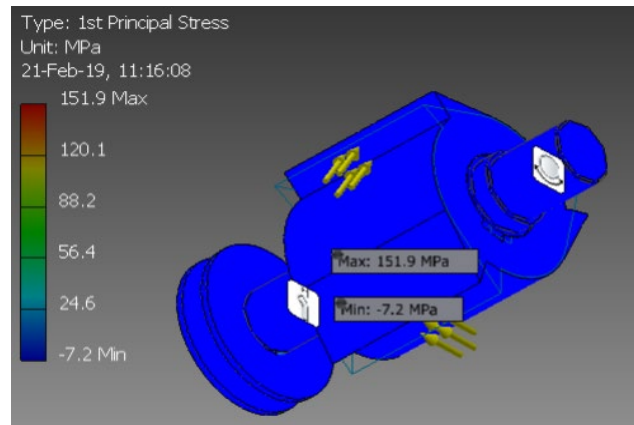
Nombre de restricción	Fuerza de reacción		Momento de reacción	
	Magnitud	Componente (x, y, z)	Magnitud	Componente (x, y, z)
Restricción fija: 1	170.55 N	0.00 N	843.40 Nm	-2.57 Nm
		0.00 N		0.00 Nm
		107.55 N		-843.40 N m
Pin Restricción:1	122.85 N	1.30 N	2.36 Nm	-2.33 Nm
		59.68 N		0.40 Nm
		-107.37 N		0.00 Nm

El análisis de la presión, gravedad y las restricciones de operación de la masa y del eje desarrollados en CAD son semejantes al análisis en Ansys Fluent [44], brindando seguridad al objeto mecánico, según el contacto con la gravedad y la tensión de los diferentes aspectos del triturador en el aprovechamiento de las biomásas forestales, similar a la de otros equipos utilizados en la molienda [46].

Los resultados del análisis de tensión de las magnitudes físicas sobre el eje principal, realizado por el *software* Autodesk Inventor, muestra que el diseño plástico del equipo para la molienda de la biomasa forestal es semejante al diseño del material flexible de la misma biomasa forestal [47]. Uno de los valores que se tiene en cuenta es la fuerza principal del eje 1, donde el plano normal muestra la traza cortante en 0 y el máximo de la elasticidad inducida en la pieza para las condiciones de carga es de 230.9 MPa, tal como se muestra en la Figura 3 (a). De acuerdo con lo anterior, el esfuerzo principal del eje o husillo muestra que la resistencia está entre -7.2-151.90 MPa, como se observa en la Figura 3 (b).



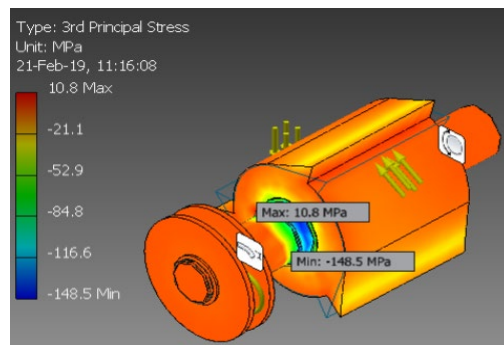
(a). Esfuerzo principal del eje.



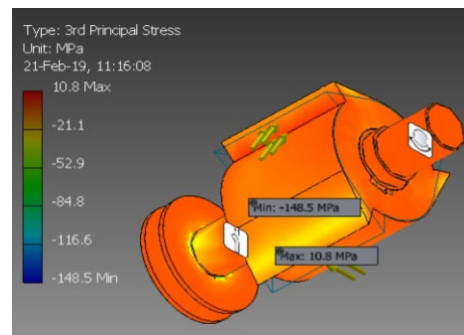
(b) Esfuerzo principal del eje.

Figura 3. Esfuerzo del eje principal del molino. Fuente: elaboración propia.

La principal restricción de las cantidades físicas del desplazamiento, realizado mediante el *software* Autodesk Inventor, indica que su desplazamiento y la resistencia del material plástico de la trituradora de la biomasa cuenta con un valor de carga máxima de 10.80 MPa, y un mínimo -148.50 MPa, según el diagrama ilustrado en la Figura 4 (a y b).



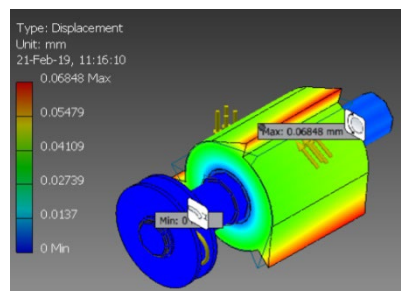
(a). Desplazamiento.



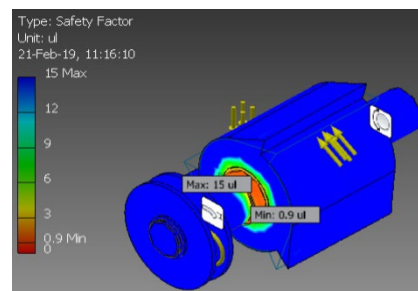
(b). Desplazamiento.

Figura 4. Desplazamiento del sistema para el molino. Fuente: elaboración propia.

El factor de seguridad del rodamiento, realizado con Autodesk Inventor, mostró que las medidas de las cuchillas cortantes del triturador de biomasa arrojaron un valor de 0.07 mm máximo, un mínimo de 0.90 μ L, y de máximo 15 μ L requeridos para la grasa, con el fin de evitar el endurecimiento de la masa del eje, según su trabajo de movimiento, lo cual se detalla en las Figura 5 (a y b).



(a). Factor de seguridad.



(b). Factor de seguridad.

Figura 5. Factor de seguridad del molino. Fuente: elaboración propia.

En la Tabla 6 se muestran los esfuerzos principales que soporta el equipo para producir el triturado de la biomasa forestal.

Tabla 6. Resumen de resultados. Fuente: elaboración propia.

Nombre	Mínimo	Máximo
Volumen (mm ³)	885901	
Masa (kg)	6.95	
Esfuerzo de Von Mises (MPa)	0.0005	230.91
Tensión principal 1(MPa)	-7.23	151.88
Tensión principal 3(MPa)	-148.48	10.75
Desplazamiento (mm)	0	0.07
Factor de seguridad	0.90 μ L	15 L

El estrés de las principales cantidades físicas y del árbol fue realizado mediante *software* Autodesk Inventor. El diseño del material flexible en el estudio realizado es semejante a la biomasa forestal [47], como se observa en las Figuras 4 y 5, donde se muestra que la elasticidad máxima inducida bajo la carga es parecida a la autenticación de la información [48], razón por la cual fue importante comparar el diseño y la resistencia del equipo con los mismos parámetros, dependiendo del eje de transmisión o de la masa de rodamiento del molino, similar al estudio [49]. El modelo propuesto fue con ángulo de 45° y una tolva vertical, logrando un 95 % de confianza y eficiencia del proceso, quedando pendiente solo el rediseño de la tolva para un proceso industrial con similitud aproximada al 91.23 % y al 94.95 %, lo que mejoraría el sistema de alimentación de la biomasa, mostrando una diferencia estadística altamente significativa [50], obteniendo, además, un equipo de laboratorio a pequeña escala que difiere de los otros, como se muestra en la Figura 6 (a y b).

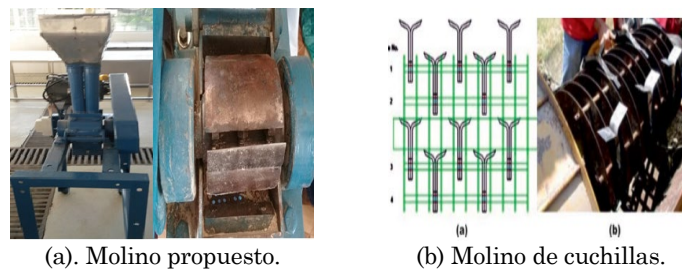


Figura 6. Comparación del diseño y construcción de prototipo de molino (a). Fuente: elaboración propia; (b) Fuente: [49].

Sin embargo, fue importante considerar la masa del eje y la resistencia del triturador debido al trabajo realizado y al contenido de humedad de la biomasa forestal que fue implementado para esta innovación tecnológica con mejor eficiencia en la trituración en masa seca, según el diseño propuesto para el proceso de molienda y el análisis de la modelación matemática que muestra una eficiencia del 99.99 %, y que tiene características similares a los datos obtenidos en investigación previas sobre otros prototipos de trituradores de biomasa [48].

3.2 Eficiencia de la molienda

Se realizó un análisis estadístico del diseño experimental utilizando parcelas divididas y bloques al azar, contando con veintisiete unidades experimentales, como se detalla en el análisis de varianza que se muestra la Tabla 7.

Tabla 7. Análisis de la varianza de valores totales de la eficiencia de la molienda. Fuente: elaboración propia.

F.V.	SC	Gl	CM	F	p-valor
Modelo	0.180169	2	0.0900846	84.6	0.00000
Residual	0.0256604	24	0.00106918	CV=	3.89 %
Total	0.2058294	26			

Se realizó un análisis de la varianza sobre la eficiencia de la molienda, presentado en la Tabla 8; las pérdidas de molienda se analizan en las Tablas 9 y 10, y el análisis relacionado con el tiempo empleado en este proceso, se observa en la Tabla 11.

Tabla 8. Tukey: valores totales de la eficiencia de molienda. Fuente: elaboración propia.

Tratamientos	Medias	Rango
T1	0.78	A
T2	0.88	B
T3	0.98	C

Tabla 9. Modelo matemático para la eficiencia. Fuente: elaboración propia.

Modelo	Estimación	Error estándar	Estadística T	p-valor
Constante	0.78829	0.0608707	12.9502	0.0000
tiempo ^2	-0.0379542	0.00880267	-4.31167	0.0002
Tiempo min *Volumen	0.00592055	0.00123094	4.80979	0.0001

Tabla 10. Indicaciones de parámetros para el modelo matemático. Fuente: elaboración propia.

R ²	R-Ajustado	Error estándar	Media absoluta (e)	Estadística Durbin-Watson	p-valor
87.5332	86.4943	0.0326984	0.022627	2.43072	0.0661
Autocorrelación residual			= 0.2929		

Tabla 11. Tukey: tiempo empleado (s). Fuente: elaboración propia.

Tratamientos	Medias	Rango
T1	122.13	A
T2	91.40	B
T3	80.27	C

Prueba: Tukey Alfa = 0.05 DMS = 7.59

Los análisis de la varianza se realizaron con el fin de conocer la relación de la eficiencia del molino entre la biomasa, tomando en cuenta las diferencias y las pérdidas por flujo de biomasa y por los cambios de humedad, las cuales se hicieron de forma manual; sin embargo, fueron significativas entre estos tres tratamientos (T1-T3) en la experimentación con astillas, con una eficiencia del proceso de molienda, arrojando un coeficiente de Fisher del 84.6 %, con una probabilidad de ocurrencia menor al 0.01 % y con un coeficiente de variación de 3.89 %, permitiendo obtener una alta confiabilidad, con prueba de Tukey al 5 % (ver Tabla 9). El valor total de las medias de tratamientos T1-T3 van de 0.78 % a 0.98 %, y las diferencias se deben a que el flujo de biomasa no es constante, esto en el mismo orden del análisis de Tukey en relación con el tiempo de 122.13-80.27 segundos. Lo anterior implica establecer parámetros que cumplan con las necesidades del prototipo y brindar esta alternativa de solución relacionada con el campo mecánico e industrial, basada en el modelo matemático obtenido [51].

Debido al desplazamiento y la resistencia de los materiales dúctiles del triturador de biomasa, son considerados los valores seguros de carga de la biomasa, los cuales comparten similitudes con otros estudios realizados sobre el diseño en máquinas móviles usando CAD como herramienta informática, según el modelo matemático [52].

3.3 Modelación matemática de la eficiencia y del prototipo de molino

Los datos reportados del análisis de varianza del trabajo realizado por el motor en el equipo triturador de biomasa se muestran en las Tablas 12 y 13.

Tabla 12. Análisis de la varianza del trabajo desarrollado por el motor. Fuente: elaboración propia.

F.V.	SC	Gl	CM	F	p-valor
Modelo	19043.82	2	9521.91	101.57	<0.0001
Tratamientos	19043.82	2	9521.91	101.57	<0.0001
Error	2250	24	93.75		
Total	21293.82	26			CV = 6.59

Tabla 13. Tukey: trabajo empleado por equipo. Fuente: elaboración propia

Tratamientos	Medias (J)	Rango
T1	183.20	A
T2	137.10	B
T3	120.40	C

Prueba: Tukey Alfa = 0.05 DMS = 11.39

Los resultados obtenidos del análisis de la varianza en el proceso de molienda fueron diferentes y significativos entre los tres tratamientos sugeridos en el experimento según el tamaño de la astilla de (3-5-8 cm), con una prueba estadística de Fisher de 101.57 y con una probabilidad de ocurrencia menor a 0.01 %, con confianza del 99 %, y un coeficiente de variación de 6.59 % con probabilidad aceptable. Este reconocimiento de confiabilidad se basa en la prueba de Tukey al 5 % de los valores de cada tratamiento indicado en el trabajo T1-T3, de 183.20120.40 J. Según se indica, el motor funciona de manera más eficiente en una astilla de 8 cm de largo, con un volumen de 16 cm³, como menciona [40]. Asimismo, la razón de la pérdida de energía es por el ruido que genera el equipo debido al impacto entre las cuchillas y el material triturado, y a la deficiencia del sistema de alimentación; el rendimiento del motor del equipo no presenta diferencias significativas entre los tratamientos, que fueron del 33.33 %, indicando que la efectividad y la productividad de la fuente de poder son inferiores al trabajo desarrollado. El único objetivo fue utilizar el 100 % de la biomasa en instalaciones con trituradores similares en hileras, como secadores de tipo tornillo con tecnologías modernas para la producción de energía [53]. Sin embargo, el análisis del *software* Autodesk Inventor muestra la importancia de la seguridad y la resistencia de las cuchillas cortantes de biomasa, teniendo en cuenta la medida de las partículas y la luz de malla de (75-300 µm), tal y como señala la norma internacional ASTM E11 [54]. De esta manera se ajusta el modelo matemático de la simulación, como se muestra en la ecuación (9): El modelo matemático de la eficiencia total de la molienda se muestra en (9).

$$\varepsilon_T = [(0.78829 - 0.0379542 * t^2) + (0.00592055 * t * v)] \quad (9)$$

De este modo se obtuvo un modelo matemático del proceso de trituración de biomasa basado en diferentes tamices de procesamiento y tipos de diseños desarrollados para estos fines energéticos [53], como se muestra en (10).

$$BT_T = 0.44(T_{T3000}) + 0.33(T_{T3000}) + 0.09(T_{T3000}) + 0.02(T_{T3000}) + 0.01(T_{T3000}) + 0.01(T_{T3000}) \quad (10)$$

Con esta ecuación se puede determinar el tamaño de la partícula y la cantidad necesaria para el aprovechamiento agroindustrial de la biomasa forestal. Sin embargo, según (9) y (10), la importancia radica en conocer las propiedades del equipo para diseñar el prototipo de la biomasa, lo cual afecta su eficiencia con una probabilidad de ocurrencia menor al 0.01 % y con un nivel de confianza del 99 %, con un coeficiente de variación de 6.59 %, lo que permitió contar con esta confiabilidad en el proceso de molienda de la biomasa forestal a escala de laboratorio, similar al modelo ajustado en unidades de nanómetros (nm) del sistema de cribado que se muestra en (11) [55].

$$n_m = 36.6676c - 0.6318471v + 0.0434345c^2 - 0.0170833cv + 0.0100234v^2 \quad (11)$$

Según un análisis de simulación y modelación realizado con el *software* Autodesk Inventor, el prototipo de triturador de biomasa forestal cuenta con un factor de seguridad de 0.8964 μ L con una masa de 6.9 kg y representa un desplazamiento de 0.0684822, según las propiedades similares al número de piezas [56] Donde nm (%) es la eficiencia de la trituración mecánica, v (r. p. m.) es la velocidad de rotación del molino y c (%) es la carga del objeto de trituración (bolas), obteniendo un 83.69 %, valor muy cercano al dado por el sistema molino-ciclón a las reglas de diseño y comparan las eficiencias energéticas semejante al índice dado por el sistema de molino-ciclón que cuenta con un equipo de molino para la trituración de biomasa forestal que beneficiará a la industria de energía renovable del Ecuador y América Latina.

4. CONCLUSIONES

Se llevó a cabo el diseño y análisis mediante la modelación y simulación del *software* Autodesk Inventor 2010, según los datos obtenidos de la molienda y la eficiencia, determinando la tensión de acuerdo con el número de piezas y su estado físico de gravedad, estática, eliminación de los modos del cuerpo rígido, así como la configuración de la malla, obteniendo las propiedades mecánicas necesarias para su construcción. Por otro lado, se evaluó la elasticidad y el diseño comparando su eficiencia del rendimiento, el cual estuvo entre el 91.23 % y el 94.95 %, basándose en el factor de seguridad, con relación al rodamiento y a toda la estructura del equipo, construido según las normas internacionales UNE-EN ISO 17827-2. De acuerdo con la estructura del equipo, se logró una eficiencia de confianza del 95 %, con una capacidad de molienda superior a 240 g/min al procesar biomasa forestales.

Al comparar con otros equipos el diseño y las propiedades físicas y mecánicas de la masa (6.95 kg), área (119338 mm²), volumen (885901 mm³) y control de gravedad (x=-3.37mm; y=-2.96 mm; z=-103.06 mm), su desplazamiento varía entre 0 mm y 0.07 mm, con un factor de seguridad mínimo y máximo de 0.89 μ L, lo que ofrece una excelente eficiencia en su rendimiento al triturar las diferentes biomasa forestales de la Amazonia ecuatoriana. Adicionalmente, se obtuvo un modelo matemático basado en la molienda de la biomasa con mayor eficiencia y una probabilidad de ocurrencia menor al 0.01 %, con un nivel de confianza del 99 % y un coeficiente de variación del 6.59 %, lo que permitió contar con una mayor confiabilidad en el proceso de molienda de biomasa forestal a escala de laboratorio, lo cual se

ratifica el haber logrado contar con un equipo diseñado y fabricado localmente para el aprovechable de biomasa en el campo industrial con fines energéticos en la región amazónica ecuatoriana.

5. AGRADECIMIENTO Y FINANCIACIÓN

Los autores agradecen a la Universidad Estatal Amazónica por haber aprobado el Proyecto de Investigación y las otras Universidades Ecuatorianas que forma parte de esta investigación, en lo referente a la esta contribución de culminar esta construcción del equipo para la molienda de la biomasa forestal en el Ecuador, este proyecto fue construido con los propios fondos de los investigadores.

CONFLICTOS DE INTERÉS

Todos los autores declaran que no tienen conflicto de interés con el contenido de esta investigación y tampoco con el equipo que actualmente presta servicios para la molienda de la biomasa forestal a diversos estudiantes universitarios del Ecuador.

CONTRIBUCIÓN DE AUTORÍA

Juan Elías González: dirección y estructura de investigación del equipo triturador de biomasa forestal hasta llegar al proceso de publicación de este artículo.

Édgar Gualberto Salazar-Álvarez y Erika Clara Casco: introducción y metodología, investigación, redacción y edición.

Daniel Yáñez, David Zambrano Vera y Morillo Robles Campo: diseño mecánico y estructural para la construcción del equipo.

Thalía Janeth Enríquez Ujukam: pruebas del equipo para evaluar la eficiencia y confiabilidad del equipo.

6. REFERENCIAS

- [1] V. Bustamante García, A. Carrillo Parra, J. A. Prieto Ruíz, J. J. Corral-Rivas, and J. C. Hernández Díaz, "Química de la biomasa vegetal y su efecto en el rendimiento durante la torrefacción: revisión," *Revista mexicana de ciencias forestales*, vol. 7, no. 38, pp. 5-24, Dec. 2016.
<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=63450027007>
- [2] R. D. Ledesma, R. Abreu-Naranjo, "Evaluación de residuos forestales de especies potenciales para la obtención del carbono como energía limpia de la Amazonía ecuatoriana," *Enfoque UTE*, vol. 14, no. 2, pp. 35-51, Jan. 2023. <https://www.redalyc.org/journal/5722/572274259003/html/>
- [3] Thomas Scientific. *Instruction Manual*, PA, USA, Accessed: Apr. 16, 2024. [Online]. Available: <https://cdn.thomassci.com/FetchFile.ashx?id=909bce7b-4dc1-454e-bc58-d249861e8d87>
- [4] J. E. González et al., "Modelación y simulación computacional de fluido del Piptocoma discolor (pigüe) para la optimización de la combustión en el Ecuador," *Enfoque UTE*, vol. 13, no. 2, pp. 48-67, Jun. 2022. http://scielo.senescyt.gob.ec/scielo.php?pid=S1390-65422022000200048&script=sci_arttext
- [5] FreeCodeCamp.org, San Francisco, CA, USA, *AutoCAD for Beginners - Full University Course*, (Jan. 24, 2022). Accessed: Apr. 16, 2024. [Online Video]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=VtLXKU1PpRU>

- [6] P. A. Valdés-Hernández, A. Laffita-Leyva, J. Borrego-Orta, and M. del C. Chuairey-Medina, "Simulación por dinámica de fluido computacional (CFD) de torre de descarga de picadora de forraje," *Rev. cienc. téc. agropecu.*, vol. 31, no. 2, pp. 1-8, Apr-Jun. 2022.
http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2071-00542022000200004&lng=es&tln=es
- [7] I. J. González-Hernández, and R. Granillo-Macías, "Competencias del ingeniero industrial en la Industria 4.0," *Revista electrónica de investigación educativa*, vol. 22, p. e30, pp. 1-14, Mar. 2020.
<https://doi.org/10.24320/redie.2020.22.e30.2750>
- [8] D. J. Erreyes Ordóñez, and S. G. Moreno Santos, "Diseño de una máquina industrial para el pelado y extracción de pulpa de banano maduro," Tesis de grado, Escuela Superior Politécnica del Litoral, Guayaquil, 2021. [Online]. Available: <http://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/52773>
- [9] Y. Cruz Gavilan, P. A. Valdés Hernández, A. Laffita Leyva, M. V. Gómez Águila, and C. M. Chuairey, "Computational Fluid Dynamics: Review and analysis of applications in engineering," *Rev. cienc. téc. agropecu.*, vol. 29, no. 4, 2020. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=93265444009>
- [10] C. A. Castaño Urrego, J. R. López Pérez, R. A. Forero Rubiano, and E. I. Tlapanco Ríos, "Método de comparación de resultados de modelado CAD-CAE contra probetas de ensayo destructivo," *Acta Univ.*, vol. 30, pp. 1-16, Jul. 2020. <https://doi.org/10.15174/au.2020.2668>
- [11] J. R. Hechavarría-Pérez, A. L. Coello-Velazquez, F. D. Robles-Proenza, and J. M. Menéndez-Aguado, "Energy efficiency in the zeolite impact crushing plant of San Andrés (Holguín, Cuba)," *Dyna*, vol. 82, no. 193, pp. 93-97, Jan. 2015. <http://dx.doi.org/10.15446/dyna.v82n193.46085>
- [12] M. Á. Madrigal Cardiel, S. Velázquez Roque, J. Maldonado Paleo, U. Z. Luna, and J. D. Hernández, "Diseño y simulación de un molino compacto para polietileno tereftalato: Design and simulation of a compact polyethylene terephthalate mil," *South Florida Journal of Development*, vol. 3, no. 1, pp. 232-244, Nov. 2022. <https://doi.org/10.46932/sfjdv3n1-018>
- [13] E. Ramos-Hernández, and J. L. Martínez Sánchez, "Almacenes de biomasa y carbono aéreo y radicular en pastizales de *Urochloa decumbens* y *Paspalum notatum* (Poaceae) en el sureste de México," *Rev. Biol. Trop.*, vol. 68, no. 2, Jun. 2020. <http://dx.doi.org/10.15517/rbt.v68i2.37395>
- [14] L. J. Velásquez, and M. D'Armas, "El ingeniero con conciencia social. Una posibilidad para el desarrollo sostenible," *Universidad, Ciencia y Tecnología*, vol. 19, no. 74, pp. 25-38, Mar. 2015. http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1316-48212015000100003&lng=es&tln=es
- [15] N. Ayala-Mendivil, and G. Sandoval, "Bioenergía a partir de residuos forestales y de madera," *Madera y Bosques*, vol. 24, no. Especial, p. e2401877, Dec. 2018. <https://doi.org/10.21829/myb.2018.2401877>
- [16] Y. García-Quintana, Y. Arteaga-Crespo, B. Torres-Navarrete, C. Bravo-Medina, and M. Robles-Morillo, "Biomasa aérea de familias botánicas en un bosque siempreverde piemontano sometido a grados de intervención," *Colomb. For.*, vol. 24, no. 1, pp. 45-59, Jan. 2021. <https://doi.org/10.14483/2256201x.15939>
- [17] J. L. Ramírez López, M. E. Córdova Perugachi, J. L. Imbaquingo Rosero, and E. J. Chagna Avila, "Modelos alométricos para estimar biomasa aérea en bosques secundarios montanos del noroccidente de Ecuador," *Caldasia*, vol. 44, no. 1, pp. 82-94, 2022. <https://doi.org/10.15446/caldasia.v44n1.88198>
- [18] *Código Ecuatoriano de la construcción. Requisitos Generales de Diseño: peligro sísmico, espectros de diseño y requisitos mínimos de cálculos para diseño sismo-resistente*, CPE INEN 5, Servicio Ecuatoriano de Normalización, Quito, Ecuador, 2001.
https://inmobiliariadja.wordpress.com/wp-content/uploads/2016/09/normas_disec3b1o_cpe_inen_5_parte_9-1_1992-mas-de-1000-hab.pdf
- [19] *Eficiencia energética en motores eléctricos*, NTE INEN 2498, Servicio Ecuatoriano de Normalización, Quito, Ecuador, 2009.
https://www.academia.edu/15997225/NTE_INEN_2498_Eficiencia_energ%C3%A9tica_en_motores_el%C3%A9ctricos_estacionarios_Requisitos
- [20] *Especificaciones técnicas que garantizan calidad en productos ANDEC placa colaborante de acero*, Servicio Ecuatoriano de Normalización, NTE INEN 2397, Quito, Ecuador, 2015. https://disensa.com.ec/wp-content/uploads/2023/07/91030243_REVIEW.pdf
- [21] *Transmisión por bandas, poleas, calidad, terminados y balanceo*, NTE INEN ISO 254, Servicio Ecuatoriano de Normalización, Quito, Ecuador, 2016. <https://www.studocu.com/ec/document/universidad-tecnologica-israel/nac-informatica/nte-inen-iso-4254-11extracto/67925454>
- [22] *Reglamento técnico ecuatoriano RTE INEN 175 "pasadores, clavijas y chavetas*, RTE INEN 175, Ministerio de industrias y productividad subsecretaría de la calidad, Quito, Ecuador, 1983.
<https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/reglamentos/RTE-132.pdf>
- [23] *Recubrimientos de zinc (galvanizado por inmersión en caliente) en productos de hierro y acero*, NTC 3320:2014, ICONTEC, Bogotá, Colombia, 2009. <https://tienda.icontec.org/gp-recubrimientos-de-zinc-galvanizado-por-inmersion-en-caliente-en-productos-de-hierro-y-acero-ntc3320-2014.html>

- [24] *Maquinaria de cosecha, Cuchillas para segadoras rotativas agrícolas*, NTE INEN ISO 5718, Asociación Española de Normalización y Certificación, Madrid, España, 2013. <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/iso?c=056182>
- [25] *Dibujos técnicos. Rodamientos. Parte 1: Representación simplificada general*, NTE INEN ISO 8826-1, Asociación Española de Normalización y Certificación, Madrid, España, 2014. <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0013791>
- [26] *Mallas y tamices para ensayo. Requisitos*, NTE INEN 154, Instituto Ecuatoriano de Normalización, Quito, Ecuador, 2013. <https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/reglamentos/RTE-154.pdf>
- [27] N. Pérez-Peña, L. Valenzuela, J. E. Díaz-Vaz, and R. A. Ananías, “Predicción del contenido de humedad de equilibrio de la madera en función del peso específico de la pared celular y variables ambientales,” *Maderas. Ciencia y tecnología*, vol. 13, no. 3, pp. 253-266, Jun. 2011. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-221X2011000300002>
- [28] D. Alfonso Solar, “Metodología para la Optimización del Aprovechamiento Energético de los Recursos de Biomasa. Aplicación a la Comunidad Valenciana,” Tesis doctoral, Universitat Politècnica de València, Valencia, España, 2013. [Online]. Available: <https://doi.org/10.4995/Thesis/10251/31636>
- [29] D. Cárdenas León, B. S. Shomar García, and A. Solorio Ramos, “Análisis de cuchillas de molino para termoplásticos Mod. 2650 y diseño para una mayor duración,” Tesis de grado, Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Instituto Politécnico Nacional, México, 2012. [Online]. Available: <https://www.studocu.com/es-ar/document/universidad-tecnologica-nacional/elementos-de-maquinas/tesis-cuchillas-molino-2650/38245842>
- [30] S. A. Gil P., and A. Espinosa B., “Evaluación de la potencia de un molino de martillos al procesar bagazo de caña de azúcar,” *Revista de Ciencias Agrícolas*, vol. 36, no. 1, pp. 93-108, Jun. 2019. <https://doi.org/10.22267/rcia.193601.101>
- [31] C. Contreras Hermosilla, *Manual Práctico De Autodesk Inventor*, 2016. Accessed: Apr. 16, 2024. [Online]. Available: https://freddyhervias.com/wp-content/uploads/2016/03/manual_practico_inventor.pdf
- [32] F. M. Martín, “Maquinaria para aprovechamientos energéticos forestales: motosierras, procesadoras, astilladoras, cosechadoras y empacadoras como máquinas principales,” *Vida Rural*, no. 187, pp. 62-66, Apr. 2004. https://www.mapa.gob.es/ministerio/pags/biblioteca/revistas/pdf_vrural%2FVrural_2004_187_62_66.pdf
- [33] M. Obregón Ramos, *Manual de Autodesk Inventor. Nivel II*, 2013, Universidad Nacional de Ingeniería. Accessed: Apr. 16, 2024. [Online]. <https://www.udocz.com/apuntes/20734/manual-inventor-nivel-2-laboratorio-uni>
- [34] J. Walker, and D. Drake. *Autodesk*. (2017.3). CA, USA. Accessed: Apr. 14, 2024, [Online]. Available: https://up.autodesk.com/2017/INVTOR/Inventor_2017_3.htm
- [35] R. L. Norton, *Diseño de maquinaria, Síntesis y análisis de máquinas y mecanismo*, 4ta ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 2004. <https://elsolucionario.net/diseño-de-maquinaria-robert-l-norton-4ta-edición/>
- [36] A. L. Coello Velázquez, and O. N. Tijinov, “Molienda de minerales multicomponentes: modelo íntegro-diferencial para la valoración de la energía,” *Minería y Geología*, vol. 18, no. 3-4, p.p. 49-53, Oct. 2001. https://www.researchgate.net/publication/275207369_Molienda_de_minerales_multicomponentes_modelo_integro-diferencial_para_la_valoracion_de_la_energia
- [37] G. Rosales Marín, J. Andrade Martínez, G. Alvarado Macías, E. Espinosa Serrano, and D. Nava Gómez, “Investigación experimental en el consumo de energía específica y reducción de tamaño en la molienda de bolas usando diferentes tipos de levantador,” *Ing. Investig. Tecnol.*, vol. 21, no. 2, pp. 1–8, Mar. 2020. <https://www.scielo.org.mx/pdf/iit/v21n2/1405-7743-iit-21-02-e1704.pdf>
- [38] L. M. Cortázar-Figueroa, R. Meléndez-Pérez, and D. M. Oliver-Hernández, “Consumo de energía y distribución de tamaño de partícula en la molienda de canela (*Cinnamomum zeylanicum*) y pimienta negra (*Piper nigrum* L),” *Rev. Mex. Ing. Quim.*, vol. 7, no. 2, pp. 123-130, Aug. 2008. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1665-27382008000200004&lng=es&nrm=iso&tlng=es
- [39] F. S. Nogués, D. García Galindo, and A. Rezeau, *Energía de la biomasa, volumen I (Serie Energías renovables)*, España: Prensas Universitarias de Zaragoza, 2010. <https://www.marcialpons.es/libros/energia-de-la-biomasa/9788492774913/>
- [40] M. A. Escobar Guachambala, J. S. Buñay Guaman, E. R. Pozo Safla, and S. M. Aquino Arroba, “Modelación matemática y simulación computacional para el diseño de un mecanismo agitador de pintura,” *Pol. Con.*, vol. 7, no. 7, pp. 1945-1970, Jul. 2022. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=9043012>
- [41] O. L. Naidiuk, and P. Torres Jara, *Introducción al análisis térmico y de fluidos mediante Ansys*, Ecuador: Editorial Universitaria Abya-Yala, 2018. <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/17052/1/Introduccion%20al%20analisis%20termico%20y%20de%20fluidos%20mediante%20Ansys.pdf>

- [42] Autodesk, *Manual de usuario Autodesk*. 2010. Accessed: Apr.16, 2024. [Online]. Available: https://images.autodesk.com/adsk/files/autocad_aca_user_guide_spanish.pdf
- [43] J. F. Maldonado Durazno, "Análisis matemático y simulación numérica del comportamiento de fluidos en un caldero pirotubular vertical," Tesis de maestría, Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, 2018. [Online]. Available: <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/15478>
- [44] D. Castro, I. Ortega, R. Jaimes, and M. Martínez, "Determinación de propiedades mecánicas de la corteza de la palma de lata por medio de ensayos de tracción y cortante," *Avances Investigación en Ingeniería*, vol. 15, no. 1, pp. 59-76, Dec. 2018. <https://doi.org/10.18041/1794-4953/avances.1.4733>
- [45] L. Iparraguirre, *Mecánica básica: fuerza y movimiento*, 1ª ed., Buenos aires, Argentina: Centro Nacional de Educación Tecnológica, 2009. <http://www.bnm.me.gov.ar/giga1/documentos/EL001845.pdf>
- [46] V. M. Molina-Guerra, M. Pando-Moreno, E. Alanís-Rodríguez, P. A. Canizales-Velázquez, H. González Rodríguez, and J. Jiménez-Pérez, "Composición y diversidad vegetal de dos sistemas de pastoreo en el matorral espinoso tamaulipeco del Noreste de México," *Rev. Mex. Cienc. Pecu.*, vol. 4, no. 3, pp. 361-371, Jul-Sep. 2013. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-11242013000300007&lng=es&nrm=iso&tlng=
- [47] L. A. García Villalba, C. Ponce Corral, E. J. Martínez López, and J. León Ordaz, "Diseño y prototipo de una máquina trituradora de PET," *Cult. Científ. y Tecnol.*, no. 54, pp. 63-71, Dec. 2016. <https://erevistas.uacj.mx/ojs/index.php/culcyt/article/view/866/818>
- [48] F. I. Lizana Fernández, and O. Durán Acevedo, "Diseño de un equipo triturador para reciclaje de madera," Tesis de grado, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Valparaíso, Chile, 2016. [Online]. Available: http://opac.pucv.cl/pucv_txt/txt-0500/UCC0865_01.pdf
- [49] A. Saldaña Robles *et al.*, "Estudio de la eficiencia de troceado de Agavetequilana Weber empleando un molino con cuchillas articuladas," *Rev. Mex. Cie. Agr.*, vol. 3, no. sped4, pp. 609-616, Dec. 2012. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-09342012000900001&lng=es&tlng=es
- [50] D. Sosa, J. C. Dusted, R. Boucourt, and Z. Rodriguez, "Validación de un modelo matemático desarrollado para el proceso de fermentación en estado sólido de la caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) con boniato (*Ipomoea batata* Lam)," *Cuban J. Agric. Sci.*, vol. 50, no. 1, pp. 25-38, Mar. 2016. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S2079-34802016000100005
- [51] T. C. Espino Rivadeneira, and L. F. Macías Pazmiño, "Diseño de un sistema móvil para triturar biomasa (hojarasca) en huertas de cacao," Tesis de grado, Escuela Superior Politécnica del Litoral, Guayaquil, 2021. [Online]. Available: <https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/54734/1/T-112192%20ESPINO%20RIVADENEIRA%2C%20TEDDY%20%26%20MACIAS%20PAZMIÑO%2C%20L-UIS.pdf>
- [52] R. Zelaya, "Aprovechamiento y valorización energética de biomasa y biogás," *Palmas*, vol. 37, no. Especial Tomo II, pp. 157-162, Jan. 2016. <https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/download/11931/11924/13399>
- [53] *Determinación de la distribución de tamaño de partícula para combustibles sin comprimir*, UNE-EN ISO 17827-2, Asociación Española de Normalización y Certificación, Madrid, España, 2016. <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma/?c=norma-une-en-15149-2-2011-n0047325>
- [54] C. C. Montoya Chuncho, "Calculo y diseño de un modelo molino de martillos para granos secos," Tesis de grado, Universidad Nacional de Loja, Loja, Ecuador, [Online]. Available: 2021. https://dspace.unl.edu.ec/jspui/bitstream/123456789/24129/1/ClaudiaCecilia_MontoyaChuncho.pdf
- [55] L. Royano Barroso, "Obtención de biocombustibles sólidos de calidad, a partir de la biomasa procedente de residuos agrícolas y cultivo herbáceo," Tesis doctoral, Universidad de Extremadura, Extremadura, España, 2022. [Online]. Available: https://dehesa.unex.es/bitstream/10662/15557/1/TDUEX_2022_Royano_Barroso.pdf
- [56] A. M. Osorio, J. M. Marín, and G. Restrepo, "Diseño y Evaluación Energética de dos Circuitos de Molienda y Clasificación para un Clinker de Cemento a Escala," *Inf. Tecnol.*, vol. 24, no. 2, pp. 99-108, Jan. 2013. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642013000200011>