

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA

CARRERA DE MECÁNICA

TRABAJO EXPERIMENTAL PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TITULO DE INGENIERO MECÁNICO

TEMA:

"ANÁLISIS DE PARÁMETROS DE FABRICACIÓN EN PELLETS DE ASERRÍN DE EUCALIPTO PARA MEJORAR SUS CARACTERÍSTICAS DE COMBUSTIÓN".

AUTOR: Felix Xavier Sanchez Castro

TUTOR: Ing. Santiago Paúl Cabrera Anda, Mg.

AMBATO – ECUADOR

Febrero – 2025

APROBACIÓN DEL TUTOR

En mi calidad de Tutor del Trabajo Experimental, previo a la obtención del Título de Ingeniero Mecánico, con el tema **"ANÁLISIS DE PARÁMETROS DE FABRICACIÓN EN PELLETS DE ASERRÍN DE EUCALIPTO PARA MEJORAR SUS CARACTERÍSTICAS DE COMBUSTIÓN"**, elaborado por el Sr. Felix Xavier Sanchez Castro, portador de la cédula de ciudadanía C.I. 1805438825, estudiante de la Carrera de Mecánica de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica.

Certifico que:

- El presente Trabajo Experimental es original de su autor.
- Ha sido revisado cada uno de sus capítulos componentes.
- Esta concluido en su totalidad.

Ambato, febrero 2025

.....

Ing. Santiago Paúl Cabrera Anda, Mg.

TUTOR

AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Felix Xavier Sanchez Castro, con C.I. 1805438825 declaro que todas las actividades y contenidos expuestos en el desarrollo del presente trabajo experimental con el tema: **"ANÁLISIS DE PARÁMETROS DE FABRICACIÓN EN PELLETS DE ASERRÍN DE EUCALIPTO PARA MEJORAR SUS CARACTERÍSTICAS DE COMBUSTIÓN"**, asi como tambien los analisis, proceso, tablas, conclusiones y recomendaciones son de mi exclusiva responsabilidad como autor del trabajo a excepción de las referencias bibliográficas citadas en el mismo.

Ambato, febrero 2025

.....Xavier Sánchez.....

Felix Xavier Sanchez Castro

C.I. 1805438825

AUTOR

DERECHOS DE AUTOR

Autorizo a la Universidad Técnica de Ambato, para que haga de este trabajo experimental o parte de él, un documento disponible para su lectura, consulta y proceso de investigación, según las normas de la Institución.

Cedo los derechos en linea patrimoniales de mi Trabajo Experimental. Con fines de difusión pública, ademas apruebo la reproducción de este documento dentro de las regulaciones de la Universidad, siempre y cuando esta reproducción no suponga una ganancia económica y se realice respetando mis derechos de autor.

Ambato, febrero 2025

.....

Felix Xavier Sanchez Castro

C.I. 1805438825

AUTOR

APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO

Los miembros del Tribunal de Grado aprueban el informe del Trabajo Experimental, realizado por el estudiante Felix Xavier Sanchez Castro de la Carrera de mecánica bajo el tema: **"ANÁLISIS DE PARÁMETROS DE FABRICACIÓN EN PELLETS DE ASERRÍN DE EUCALIPTO PARA MEJORAR SUS CARACTERÍSTICAS DE COMBUSTIÓN".**

Ambato, febrero 2025

Para constancia firman:

.....	.....
Ing. Luis Eduardo Escobar Luna, Mg.	**Ing. Diego Fernando Núñez Núñez, MSc.**
MIEMBRO CALIFICADOR	**MIEMBRO CALIFICADOR**

DEDICATORIA

El presente proyecto está dedicado primeramente a Dios, quien ha sido mi roca inquebrantable en cada desafío y mi guía constante a lo largo de mi formación académica. Agradezco profundamente su amor incondicional, que me ha fortalecido en las adversidades y ha iluminado mi camino hacia el conocimiento.

A mis amados padres Marlene y Giovanny, cuyo inquebrantable amor, esfuerzo y sacrifico constante han sido la base sólida sobre la cual he construido mi educación y mi vida. A ustedes que han sido ejemplo de respeto, humildad y trabajo, les dedico este trabajo con profunda gratitud y amor.

A mis queridas hermanas Pamela y Shirley, por su comprensión y aliento en cada etapa de este largo camino académico.

Sanchez Felix.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios, por brindarme vida y sabiduría, por ser mi guía en cada paso de este camino académico. A pesar de las dificultades tu presencia constante me dio fuerza para seguir adelante y no rendirme.

A mis padres por su amor incondicional, sacrificio infinito y apoyo constante. Gracias por creer en mí y por ser mi mayor inspiración, gracias por alentarme a perseguir mis sueños y por estar siempre en los momentos difíciles.

A mis amigos cercanos, quienes han estado en toda mi formación académica compartiendo triunfos y desafíos. Gracias por su apoyo incondicional y sus palabras de aliento en los momentos de duda y cansancio.

A la Universidad Técnica de Ambato y a los docentes de la carrera de mecánica por haber compartido sus conocimientos los mismo que han sido de mucha importancia para mi formación académica. En especial a mi tutor de tesis Ing. Santiago Cabrera a quien le expreso mi más profundo agradecimiento por su paciencia, gracias por compartir generosamente su conocimiento y experiencia.

Sanchez Felix

ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDOS

APROBACIÓN DEL TUTOR ii
AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN iii
DERECHOS DE AUTOR iv
APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO v
DEDICATORIA vi
AGRADECIMIENTO vii
ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDOS viii
ÍNDICE DE FIGURAS xiii
ÍNDICE DE TABLAS xv
RESUMEN EJECUTIVO xvi
ABSTRACT xvii
CAPÍTULO I 1
1. MARCO TEÓRICO 1
1.1 Antecedentes investigativos 1
1.2 Fundamentación teórica 3
1.2.1 Biomasa 3
1.2.2 Tipos de biomas 4
1.2.2.1 Biomasa natural 4
1.2.2.2 Biomasa residual 4
1.2.2.3 Residuos forestales 4
1.2.3 Cultivos energéticos 5
1.2.4 Eucalipto 6
1.2.5 Características energéticas del eucalipto 7
1.2.6 Aserrín 7
1.2.7 Pellet 7

1.2.8 Proceso de fabricación de pellets 8
1.2.8.1 Secado 8
1.2.8.2 Secado natural 9
1.2.8.3 Secado forzado 9
1.2.8.4 Humectación de la materia prima 9
1.2.8.5 Peletizado 10
1.2.8.6 Tamizado 10
1.2.8.7 Almacenamiento 11
1.2.8.8 Empaquetado 12
1.2.9 Aglutinante 12
1.2.10 Combustión de biomasa 13
1.2.11 Características de combustible 14
1.2.11.1 Tamaño y forma 14
1.2.11.2 Densidad 15
1.2.11.3 Humedad 15
1.2.11.4 Volátiles 16
1.2.11.5 Cenizas 17
1.2.11.6 Carbono fijo 18
1.2.12 Análisis elemental 19
1.2.12.1 Determinación del contenido total de carbono, hidrógeno y nitrógeno 19
1.2.13 Reacción estequiométrica para la oxidación completa de un combustible 20
1.2.13.1 Aire de combustión y exceso de aire 21
1.2.13.2 Medición de CO 21
1.2.14 Quemado de pellets 22
2.2.14.1 calor y vapor 23

1.2.15 Parámetros de llama 23
1.2.15.1 Forma y color de llama 24
1.2.15.2 Temperatura adiabática de llama 24
1.2.15.3 Tiempo de llama 25
1.2.16 Termografía 25
1.2.16.1 Emisividad 26
1.2.16.2 Temperatura reflejada 26
1.2.16.3 Transmisión 26
1.3 Objetivos 27
1.3.1 Objetivo General 27
1.3.2 Objetivos específicos 27
1.4 Hipótesis 27
1.5 Variables de hipótesis 27
1.5.1 Variables independientes: parámetros de fabricación 27
1.5.2 Variables dependientes: Parámetros de combustión 27
CAPÍTULO II 28
2. METODOLOGÍA 28
2.1 Materiales 28
2.2 Nivel o tipos de investigación 31
2.2.1 Exploratoria 31
2.2.2 Experimental 31
2.2.3 Correlacional 31
2.2.4 Descriptiva 31
2.3 Población y muestra 31
2.3.1 Población 31
2.3.2 Muestra 32
2.4 Operacionalización de variables 33

2.4.1 Variables independientes: temperatura de secado y tiempo de secado .. 33
2.4.2 Variables dependientes: Duración de llama, temperatura de llama y características geométricas de llama 34
2.5 Plan de recolección de información 35
2.6 Análisis de la información 35
2.6.1 Procedimiento para la elaboración de la matriz 35
2.6.1.1 Descripción del proceso 35
2.6.2 Procedimiento para fabricación de pellets para el respectivo análisis de combustión 37
CAPÍTULO III 45
3. ANÁLISIS DE RESULTADOS 45
3.1 Análisis y discusión 45
3.2 Parámetros de fabricación de pellets de aserrín 45
3.2.1 Análisis de fabricación de pellets 45
3.2.2 Análisis del proceso de secado de pellets de aserrín de eucalipto 46
3.2.3 Porcentaje de reducción de peso 49
3.2.4 Análisis de humedad por reducción de masa promedio 50
3.3 Análisis de combustión de pellets 51
3.3.2 Análisis de combustión del pellet secado a 105 °C por 4 h 52
3.3.3 Análisis de combustión del pellet secado 105 °C por 30 min 53
3.3.4 Análisis de combustión del pellet con secado natural 24 h 55
3.3.5 Análisis de combustión de las tres muestras 56
3.4 Análisis de cenizas 57
3.5 Análisis de volátiles 58
3.6 Contenido de carbono fijo 59
3.7 Reacción estequiométrica para la oxidación completa de un combustible 59
3.8 Temperatura y características geométricas de llama 62

3.9 Cantidad de CO 65
3.10 Verificación de Hipótesis 66
3.10.2 Hipótesis 66
3.10.3 Comprobación 66
CAPÍTULO IV 68
4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 68
4.1 Conclusiones 68
4.2 Recomendaciones 70
BIBLIOGRAFÍA 71
ANEXOS 77

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1.- El origen de la biomasa [9]. 3

Figura 1.2.- Pellets de madera [18]. 8

Figura 1.3.- Proceso de producción de pellets 8

Figura 1.4.- Matriz cilíndrica y plana para obtener pellets [8]. 10

Figura 1.5.- Tamizadora 11

Figura 1.6.- Silo para almacenar pellets de madera 12

Figura 1.7.- Empacadora de pellets 12

Figura 1.8.- Etapas de combustión de una partícula de biomasa [24]. 14

Figura 1.9.- Dimensiones de un pellet 15

Figura 1.10.- Analizador de gases de combustión 22

Figura 1.11.- Generación de energía con pellets de madera 23

Figura 1.12.- Elementos de la combustión 24

Figura 1.13.- Termografía 26

Figura 1.14.- Factores que intervienen en la termografía [42] 26

Figura 2.2.- Molde de matriz cilíndrica 36

Figura 2.3.- Especificaciones del material 36

Figura 2.4.- Obtención de la matriz cilíndrica 36

Figura 2.5.- Selección y tamizaje de aserrín de eucalipto 39

Figura 2.6.- Mezcla de aserrín con aglutinante y pesaje 39

Figura 2.7.- Procedimiento de compactación del aserrín 40

Figura 2.8.- Pellets obtenidos 40

Figura 2.9.- Lugar de combustión 41

Figura 2.10.- Combustión de pellets 41

Figura 2.11.- Medición de temperatura 42

Figura 2.12.- Análisis de gases 43

Figura 2.13.- Análisis de volátiles 43

Figura 3.1.- Comparación del porcentaje de reducción de peso 49

Figura 3.2.- Comparación reducción de masa..... 50

Figura 3.3.- Combustión de pellet secado a 105°C por 4 h 52

Figura 3.4.- Masa de pellet vs tiempo de combustión 53

Figura 3.5.- Combustión de pellet secado a 105°C por 30 minutos 53

Figura 3.6.- Reducción de masa de pellet vs tiempo de combustión 54

Figura 3.7.- Combustión de pellet secado a temperatura ambiente por 24 h 55

Figura 3.8.- Reducción de masa de pellet vs tiempo de combustión 56

Figura 3.9.- Comparación de combustión de pellets..... 56

Figura 3.10.- Imágenes termográficas tomadas de pellets con secados de 105°C por 4 horas 62

Figura 3.11.- Imágenes termográficas tomadas de pellets secados de 105°C por 30 minutos..... 62

Figura 3.12.- Imágenes termográficas tomadas de pellets con secado natural 63

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Clasificación de la biomasa residual 4

Tabla 1.2 Características físicas de la biomasa forestal 5

Tabla 1.3 Características energéticas del eucalipto. [6] 7

Tabla 1.4 Clasificación de aglutinantes orgánicos e inorgánicos [5]. 13

Tabla 1.5 Porcentajes de producción de CO_2 de diversos combustibles 21

Tabla 2.1 Materiales y equipos 28

Tabla 2.2 Tipo de residuos generados y sus características. [45] 32

Tabla 2.3 Especificaciones de los pellets 32

Tabla 2.4 Variables independientes 33

Tabla 2.5 Variables dependientes 34

Tabla 2.6 Configuración de cámara termográfica 42

Tabla 3.1 parámetros requeridos para la fabricación de pellets 45

Tabla 3.2 Datos de pellets secados a 105 °C por 4 horas 46

Tabla 3.3 Datos de pellets secados a 105 °C por 30 minutos 47

Tabla 3.4 Datos de pellets con secado natural 48

Tabla 3.5 Contenido de cenizas 57

Tabla 3.6 Contenido de volátiles 58

Tabla 3.7 Contenido de carbono fijo 59

Tabla 3.8 Análisis elemental del aserrín de eucalipto 60

Tabla 3.9 Comparación de las características de llama 63

Tabla 3.10 Cantidad de CO 65

Tabla 3.11 Verificación de hipótesis 66

RESUMEN EJECUTIVO

La fabricación de pellets de aserrín en los últimos años ha ganado popularidad aprovechando los residuos de la industria maderera. La calidad de los pellets puede variar significativamente según los procesos de fabricación empleados. Por ello, el presente trabajo se centró en mejorar la calidad final de los pellet añadiendo aglutinante para encontrar mejoras en la compactación y medir su calidad durante la combustión.

Se modificó el porcentaje de humedad del aserrín mediante un proceso de secado, en el cual varió tanto la temperatura como el tiempo. Para la elaboración de los pellets, se utilizó una matriz cilíndrica de compactación manual, aplicando una presión de 30 bares y almidón de yuca como aglutinante. Se llevaron a cabo tres condiciones de secado distintas: secado natural (temperatura ambiente) por 24 horas; secado a 105 grados centígrados por 30 minutos; secado a 105 grados centígrados por 4 horas.

Los resultados mostraron que, al emplear pellets de aserrín de eucalipto con un secado de 105 grados centígrados durante 4 horas, se lograron las mejores características de combustión ya que se ha obtenido áreas de llama de 3,93 centímetros cuadrados, con alturas de llama de 1,97 centímetros, las temperaturas alcanzaron los 580 grados centígrados durante 100 segundos lo que favorece a una combustión más eficiente. De igual manera se obtuvieron contenidos de volátiles de 76,34 por ciento, cenizas 0,25 por ciento, carbón fijo 23,40 por ciento y una concentración de CO de 207 ppm lo que indica una combustión más limpia.

Palabras claves: pellet cilíndrico, proceso de secado, contenido de humedad, proceso de combustión, temperatura de combustión.

ABSTRACT

The manufacture of sawdust pellets has gained popularity in recent years by taking advantage of waste from the wood industry. The quality of the pellets can vary significantly depending on the manufacturing processes used. Therefore, the present work focused on improving the final quality of the pellets by adding binder to find improvements in compaction and measure their quality during combustion.

The humidity percentage of the sawdust was modified through a drying process, in which both temperature and time were varied. For the production of the pellets, a cylindrical manual compaction matrix was used, applying a pressure of 30 bars and cassava starch as a binder. Three different drying conditions were carried out: natural drying (room temperature) for 24 hours; drying at 105 degrees Celsius for 30 minutes; drying at 105 degrees Celsius for 4 hours.

The results showed that, when using eucalyptus sawdust pellets dried at 105 degrees Celsius for 4 hours, the best combustion characteristics were achieved, since flame areas of 3,93 square centimeters were obtained, with flame heights of 1,97 centimeters, temperatures reached 580 degrees Celsius for 100 seconds, which favors a more efficient combustion. Likewise, volatile contents of 76,34 percent, ash 0,25 percent, fixed carbon 23,40 percent and a CO concentration of 207 ppm were obtained, which indicates a cleaner combustion.

Keywords: cylindrical pellet, drying process, moisture content, combustion process, combustion temperature.

CAPÍTULO I

1. MARCO TEÓRICO

1.1 Antecedentes investigativos

La revista madera y bosques, realizó el estudio de algunas especies de biomasa leñosa, en la cual se demuestra que la biomasa leñosa de eucalipto tiene un gran potencial energético para la producción de biocombustibles solidos en forma de pellets. Se centra también en el estudio de características físicas, químicas y energéticas de la biomasa logrando así demostrar si el eucalipto es apto para el uso energético como biocombustible sólido [1].

En el análisis realizado por [2], se describe el proceso de obtención de pellets entre estos procesos están: molienda, secado, prensado, enfriado, tamizado y almacenado. Realiza un análisis de la calidad del producto en el mercado tanto interno como externo concluyendo así que los pellets constituyen una alternativa de biocombustible más barata y económica con un alto poder calorífico. También presentó un análisis ambiental en el cual se detalla las emisiones de gases, los residuos sólidos y efluentes.

En el estudio realizado por [3], se determinó la conductividad térmica, el poder calorífico, la difusividad térmica y el calor especifico de los pellets para utilizarlos con fines energéticos; además experimento mediate el equipamiento adecuado el incremento o la disminución de las propiedades térmicas mencionadas anteriormente que dependen de los tratamientos térmicos, la distancia y el radio de los pellets. También realizo un estudio de las cenizas generadas por la quema de pellets según la norma CEN/TS 14775:2009 en el laboratorio de la Unidad de Recursos Forestales del Instituto de Investigaciones de la Universidad de Costa Rica. El estudio mencionado ayudara a determinar el periodo de quemado de pellets.

En el artículo [4], se describen y determinan las propiedades mecánicas y estructurales de los pellets, además realiza un análisis de combustión en donde se quemó de 100 g de pellets experimentando así el incremento de temperatura dependiendo de los procesos utilizados para la obtención de los pellets. Finalmente muestra mediante tablas un análisis fisicoquímico para evaluar el contenido de cenizas y humedad.

Según al estudio realizado por Portero [5] se determinó que la temperatura aplicada durante el proceso de paletización afecta en la obtención final de los pellets. Identificó que al elevar la temperatura del cilindro de compactación se obtiene un aumento en la friabilidad, además se pudo identificar que al aumentar la temperatura la densidad de los pellets tiende a aumentar dando valores de 1.32 g/cm^3 para el aserrín del eucalipto. Además, se comprobó que la lignina del eucalipto se activa al elevar la temperatura la misma que actúa como lubricante por lo tanto disminuye la energía para el peletizado.

Sailema [6], realizó un estudio en el cual se procede a secar la biomasa mediante el empleo de lámparas infrarrojas con una potencia nominal de 250 W, en su análisis realiza dos tipos de probetas una placa plana y otra cilíndrica y su periodo de secado es de 18 minutos y 24 minutos, gracias a esto se calcula el porcentaje de humedad que de la matriz cilíndrica es de 30% y de la probeta de placa plana 51,60% después del peletizado, mediante su método se redujo la humedad a 0% de las 2 probetas.

En el trabajo realizado por [7], se muestra cómo se obtienen las características de combustión de los pellets en la que se analiza el contenido de humedad, el contenido de cenizas, el contenido de volátiles y se realiza su respectivo análisis de gases para posteriormente calcular la ecuación de combustión de la biomasa y por ende su análisis térmico.

Esteban [8], caracterizó 8 tipos de muestras de pellets diferentes conseguidas en el mercado, pero para su análisis de combustión completo solo se pudieron utilizar 3 debido a que la mayoría de los proveedores de pellets se limitan en indicar el cumplimiento de especificaciones de calidad impuestas por las diversas normas reguladoras. En su análisis elemental y energético las diferentes muestras presentan una composición elemental media de 49,12% de carbono; 6,23% de hidrogeno; 0,112% de nitrógeno; 0,14% de azufre y 44,39% de oxígeno. Gracias a su análisis se ve reflejado que a pesar de que los pellets cumplan con los requisitos de calidad su comportamiento durante la combustión es variable.

1.2 Fundamentación teórica

1.2.1 Biomasa

La biomasa es considerada como cualquier tipo de materia orgánica que haya tenido su origen a consecuencia de los diversos procesos biológicos y abarca tanto productos vegetales como animales; Además la biomasa es utilizada principalmente para generar energía ya que la biomasa procede de la energía química acumulada en los enlaces atómicos intermoleculares de los compuestos que los constituyen, por lo que se puede decir que la biomasa es la última instancia del sol [9].

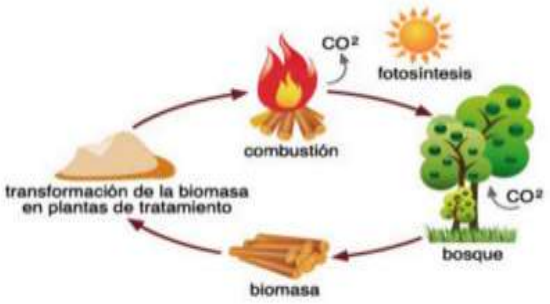


Figura 1.1.- El origen de la biomasa [9].

De acuerdo con la CEN/TS 14588 “la biomasa es todo material de origen biológico excluyendo aquellos que han sido englobados en formaciones geológicas sufriendo un proceso de mineralización” [10] . Los únicos materiales que no son considerados biomasa son: el petróleo, el carbón y el gas ya que son procedentes de formaciones geológicas cuya formación y composición de hace miles de años no es comparable con el balance neutro de la biomasa en cuanto a las emisiones de la biomasa.

La combustión de la biomasa no contribuye al crecimiento del efecto invernadero debido a que el carbono que se libera es similar a lo que absorben y liberan continuamente las plantas durante el crecimiento. Es por esto, que la biomasa contiene energía solar almacenada, que mediante la fotosíntesis se transforma en energía química [13].

1.2.2 Tipos de biomas

1.2.2.1 Biomasa natural

La biomasa natural es aquella que se genera de manera espontánea en la naturaleza, en ecosistemas no alterados por la actividad humana. En general, su explotación no resulta interesante desde el punto de vista económico debido a que la gestión de la adquisición y transporte de las materias primas al lugar de utilización carece de rentabilidad. Aunque así sea, en la actualidad es el principal recurso de energía para las pequeñas comunidades y los países en desarrollo [11].

1.2.2.2 Biomasa residual

Son residuos producidos a partir de la intervención del hombre estos residuos se obtiene de diversas actividades agrícolas, ganaderas e industriales, consisten en los restos de ramas, hojas y frutos [11].

Tabla 1.1 Clasificación de la biomasa residual

Categoría	*Actividad origen del recurso*	*Tipos*	*Residuos que genera*
Residuos forestales	Tratamientos selvícolas: cortas de mejora y cortas parciales Clareos, claras Podas	Principalmente en montes repoblados o en aquellos naturales con un cierto interés económico	Árboles de pequeño tamaño (pies menores) sin valor comercial Ramas de poda Biomasa del estrato arbustivo
	Tratamientos selvícolas: Cortas de regeneración	Objeto de extracción de madera del monte, tanto en masas naturales como en artificiales	Copas, ramas, raberones Pies secos sin interés
	Incendios forestales	En pinares por lo general	Árboles quemados de escaso interés comercial
	Apertura de caminos, cortafuegos, etc.	En todo tipo de monte	Copas, ramas, raberones Pies secos sin interés Árboles de pequeño tamaño (pies menores) sin valor comercial
Residuos agrícolas	Cultivo de especies herbáceas	Cereales, oleaginosas, algodón, etc.	Paja, zuros, bagazo, etc.
	Poda de especies leñosas	Olivo, vid, frutales	Ramas, pies secos y tocones
Industrias agroalimentarias	Industrias extractivas Industrias preparadoras	Extractivas de café, aceite, vinícolas Preparación de arroz, algodón, frutos secos, etc.	Alpechines, orujo de oliva, marro de café, cascarilla de arroz, desmotado de algodón
Industrias forestales	Primera transformación	Aserrado Fabricación de tableros Desenrollo y chapas Celulosas Industrias del corcho	Cortezas, costeros, serrines, virutas Cortezas y polvo de lijado Recortes de chapa, desenrollo Corteza y finos Restos de corcho y finos
	Segunda y posteriores transformaciones	Carpintería, muebles Embalajes de madera, palés Papel Derivados del corcho	Recortes, tacos, serrín, virutas, polvo de lijado Papel Recortes de corcho, polvo lijado, etc.

1.2.2.3 Residuos forestales

Para [12], los residuos forestales son aquellos que se generan a partir de restos de podas y limpiezas que se realizan en el campo, estos residuos suelen ser del resultado de

cortar árboles para realizar productos de madera como por ejemplo los muebles. Dentro de esta clasificación de residuos también se encuentran los residuos generados por las industrias de aserrado ya que se generan trozos de madera y ramas que no se utilizan en el proceso de obtención de productos además el aserrín que se genera también es considerado un residuo forestal.

Según el atlas energético ecuatoriano [13], los residuos forestales constituyen una importante fuente de biomasa, ya que en los estudios realizados se estima que por cada árbol utilizado para la producción de madera solo se aprovecha un 20% de cada árbol ya que el 80% se desperdicia en los diversos procesos de obtención de la madera, dejando con un 40% a las sobras del árbol como las ramas y raíces, y el otro 40% se desperdicia en los procesos de aserrado debido a que al realizar este proceso se generan desperdicios en forma de astillas, corteza y aserrín. Las principales especies implantadas en nuestro país son el eucalipto, el pino radiata y la teca.

Tabla 1.2 Características físicas de la biomasa forestal

FUENTE GENERADORA DE BIOMASA	TIPO DE RESIDUO	CARACTERÍSTICAS FÍSICAS
RESIDUOS FORESTALES	RESTOS DE ASERRÍO: CORTEZA, ASERRÍN, ASTILLAS	POLVO SÓLIDO, H 30-45%
	RESTOS DE EBANISTERÍA: ASERRÍN, TROZOS, ASTILLAS	SÓLIDO DE BAJA HUMEDAD
	RESTOS DE PLANTACIONES: RAMAS, CORTEZA, RAÍCES	SÓLIDO, H > 55%

1.2.3 Cultivos energéticos

Según [11], los cultivos energéticos son aquellas cosechas que van destinadas a la producción de energía mediante la formación de biomasa, estos cultivos deben poseer altos niveles de productividad con bajos costos de producción ya que deben ser viables

económicamente a comparación de los combustibles fósiles, además deben tener la posibilidad de desarrollarse en tierras que no son utilizadas para la producción de alimentos. La biomasa producida mediante estos cultivos debe ser adecuada para utilizarla como biocombustible sólido.

Los cultivos energéticos tienen la finalidad de producir biomasa transformable en combustible para generación térmica o eléctrica, estos cultivos pueden ser tradicionales o energéticos, herbáceos o leñosos, de secano o regadío, anuales o plurianuales [14].

Los cultivos energéticos producen electricidad mediante combustión, por lo que se debe tener en cuenta el poder calorífico de cada cultivo ya que es muy importante saber la composición química para que estos cultivos puedan ser utilizados como combustible. El desarrollo de estos cultivos es muy interesante para la industria energética debido a que se suponen nuevas fuentes de suministro de biomasa adicional a la biomasa residual [14].

1.2.4 Eucalipto

En el artículo guía de cultivos energéticos de Latinoamérica [15], define al eucalipto como un árbol perteneciente a la familia de las mirtáceas, son árboles perennes famosos por su gran altura y porte recto, pudiendo llegar a medir entre 50 y 60 metros cuando alcanzan la madurez. Se caracterizan por tener una corteza lisa de color verde-blancuzco, que se renueva constantemente y libera escamas que pueden causar manchas grises o marrones en el tronco. Tienen un color grisáceo característico y sus hojas son lanceoladas u ovaladas.

1.2.5 Características energéticas del eucalipto

Tabla 1.3 Características energéticas del eucalipto. [6]

Parámetros	Aserrín de eucalipto
Tamaño	El tamaño de las partículas por lo general son menores a tres milímetros
Densidad aparente	250 kg/m^3
Análisis ultimo (elemental)bh	Carbono: 29,59% Hidrogeno:4,14 Oxigeno:42.50% Nitrogeno:0,12%
Análisis inmediato (aproximado)bh	Humedad:23% Ceniza:0,65% Materiales volátiles:56% Carbono fijo:20,35%
Poder calorífico (en base al análisis último)	PCS_{BS}:16,837 MJ/kg PCI_{BS}:11,248 MJ/kg PCI_{BH}:10,031 MJ/kg

1.2.6 Aserrín

Según la investigación realizada por [16], define al aserrín como el conjunto de partículas o polvillo que se genera de la madera cuando esta es aserrada, está compuesto de minúsculas partículas producidas en el proceso y manejo de la madera, además del polvo que se genera en los diferentes procesos de aserrado se generan también virutas que son un fragmento de materiales restantes que suelen tener forma de lámina, curvada o espiral.

Los diversos procesos por los que pasa la madera generan cantidades considerables de desechos en forma de aserrín y pedazos de madera que son desechados, por lo que el aserrín se puede utilizar como un recurso energético renovable

1.2.7 Pellet

El pellet es un biocombustible sólido estandarizado producido a base de residuos de madera que se obtienen por medio de la industria forestal, su contextura es usualmente cilíndrica y se obtienen mediante el prensado de aserrín, virutas o polvo proveniente de la madera, se caracterizan principalmente por su bajo contenido de humedad y su alta densidad energética [17].

En el análisis realizado por [17], se describen algunas características del pellet descritos a continuación; Son sólidos que poseen diámetros que van desde los 7 mm a los 22 mm y longitudes de 3.5 a 6.5 cm, se fabrican a alta presión sin la necesidad de

utilizar adhesivos, su peso específico es aproximadamente 6 -700 kg/m^3, el poder calorífico que posee un pellet es de 4200 y 4500 kcal/kg y su densidad energética va desde 3000 a los 3400 KWh/m^3.



Figura 1.2.- Pellets de madera [18].

1.2.8 Proceso de fabricación de pellets

Los pellets se producen mediante procesos simples utilizando la maquinaria adecuada para lograr obtener un producto de calidad [19]. Los pasos para la fabricación según el instituto forestal de pellets son: abastecimiento; secado; humectación; peletizado; tamizado, almacenado y empaquetado.



Figura 1.3.- Proceso de producción de pellets

1.2.8.1 Secado

El proceso de secado es muy importante ya que se busca reducir la humedad para incrementar el poder calorífico, la biomasa debe tener un contenido de humedad menor al 10%.

1.2.8.2 Secado natural

Reduce el contenido de humedad sin la necesidad del aporte de recursos energéticos diferentes a las condiciones propias del medio ambiente, el secado natural se realiza gracias al aprovechamiento de la radiación solar y la acción propia del viento que se genera [11].

Es necesario tener en cuenta las condiciones del secado natural ya que son propias del ambiente, estas son fundamentalmente las que determinan la variación del estado de la humedad. Este proceso es favorable cuando todas las partículas están en contacto con el aire. El tiempo de secado depende de las condiciones del ambiente y los diversos factores que intervienen como: el tamaño del material; las dimensiones y formas, el grado de compactación y el volteo [2].

1.2.8.3 Secado forzado

Es aquel secado que consiste en la utilización de equipos de secado mediante el empleo de combustibles, en los últimos años también se ha tenido una tendencia a utilizar secadores solares, este secado se caracteriza por reducir el contenido de humedad por debajo de la humedad de equilibrio con el ambiente lo que permite reducir el tiempo de secado a comparación del secado natural [2].

La aplicación de este secado genera costes de operación considerablemente elevados a comparación el secado natural. Los equipos utilizados usualmente para el secado forzado se clasifican en secadores directos e indirectos. Los secadores directos son equipos habituales que se utilizan para reducir la humedad de los materiales como los biocombustibles en este secado la transferencia de calor entre el agente secante y solido tiene lugar por contacto directo entre ellos, por el contrario, los secadores indirectos son aquellos en los que un gas absorbe la humedad y no genera calor se utilizan generalmente para materias que no permiten el secado altas temperaturas [2].

1.2.8.4 Humectación de la materia prima

La biomasa que se va a utilizar para la fabricación de pellets debe ser humedecida levemente para obtener una mejor compactación y pegado de las fibras, usualmente la humectación se lo realiza con aglutinantes ya que esto mejora la calidad de los pellets en apariencia y propiedades [19].

1.2.8.5 Peletizado

Esteban [8], define al peletizado como el proceso en el cual se ejerce presión mediante una serie de rodillos que están situados generalmente sobre una matriz metálica dotada de orificios de un calibre variado, en este proceso la materia prima atraviesa la matriz comprimiéndose, debido la presión que se emplea. En el peletizado normalmente se utilizan prensas que tiene orificios en el fondo del cilindro, matrices planas o en paredes laterales, matrices cilíndricas o anulares, este proceso reduce la humedad hasta de un 3% ya que se trabaja a temperaturas relativamente altas que van desde los 90°C a los 150 °C.

Este proceso también es conocido como compactación el mismo que puede ser natural debido a la lignina que posee la materia prima y se puede trabajar la lignina como aglomerante o a su vez se puede hacer la compactación mediante la adquisición de elementos químicos y aditivos no contaminantes [8].

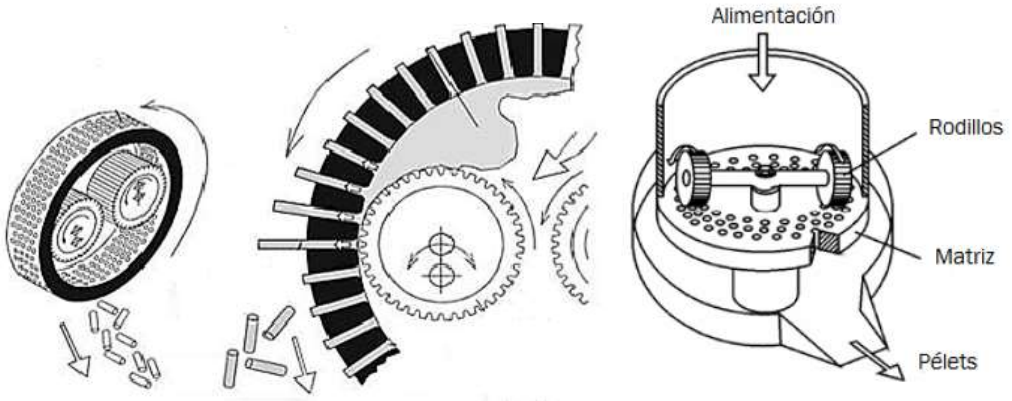


Figura 1.4.- Matriz cilíndrica y plana para obtener pellets [8].

1.2.8.6 Tamizado

El proceso de tamizado consiste en separar las fracciones de materia prima que no se ha podido compactar, separando así los residuos que no cumplen con la granulometría del producto que se desea obtener.

Consiste en hacer pasar los pellets por un sistema de cibras, en el cual se separan los restos de la materia prima sin compactar y algunos trozos de pellets que se han desintegrado durante los procesos anteriores, estos residuos de materia deben ser introducidos en el proceso de prensado para su respectiva reutilización evitando desperdiciar la materia prima [20].

En este proceso se utiliza un tamizador vibratorio que posee un sistema de vibración que asegura la homogeneidad del producto, reduciendo así problemas de manejo y traslado del producto para alcanzar la calidad en cuanto al contenido de finos [21].



Figura 1.5.- Tamizadora

1.2.8.7 Almacenamiento

Los pellets deben ser almacenados en silos ya que se debe mantener los pellets a una temperatura y ventilación adecuada para evitar que la adsorción de la humedad, además en los silos se pueden proteger de la lluvia y las condiciones atmosféricas que desfavorecen al producto final. Debido a que los pellets son muy sensibles al desgaste físico estos deben ser manejados con precaución minimizando los transportes y movimientos dentro del lugar de almacenamiento que puedan generar caídas ya que esto aumenta el contenido de materiales finos [2].

El empleo de silos es una práctica común de las fábricas y plantas industriales de peletización ya que son muy importantes para el almacenamiento de los pellets de madera, estos silos deben ser estrictamente cerrados y deben poseer una gran capacidad de almacenaje. Las superficies interiores de los silos están cubiertas de cemento vidriado, **resinas** sintéticas o una mezcla donde el material principal sea el vidrio soluble ya que las paredes de estos silos deben ser lo más lisas posibles [2].

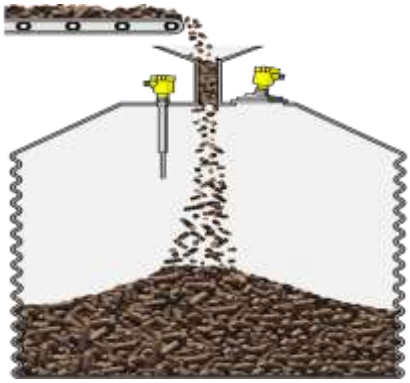


Figura 1.6.- Silo para almacenar pellets de madera

1.2.8.8 Empaquetado

Después del almacenamiento de los pellets en los silos se procede a empaquetar los pellets en diversas presentaciones y pesos para ser distribuidos a diversos lugares



Figura 1.7.- Empacadora de pellets

1.2.9 Aglutinante

Para [22], los aglutinantes son sustancias que tienen la capacidad de generar fuerzas lo cual ayuda a unir fragmentos de una o varias sustancias o a su vez de materiales, los aglutinantes tienen la función de dar cohesión mediante métodos físicos, químicos o térmicos. Se emplean generalmente en las industrias de aeronáutica, en las construcciones y principalmente en la fabricación de briquetas a base de biomasa como la cascarilla de arroz, aserrín, entre otras biomasas.

Los aglutinantes son definidos como sustancias pegajosas que poseen la capacidad de entrelazar partículas mediante fuerzas aplicadas, ayudando así dar unión mediante métodos tanto físicos como térmicos y químicos [5], su clasificación se presenta en la tabla.

Tabla 1.4 Clasificación de aglutinantes orgánicos e inorgánicos [5].

Orgánicos	Inorgánicos
Albuminatos, alcoholes, almidones, breas, alquitranes, azucares, caseínas, cola, dextrina, gelatinas, humatos, melazas, papel, ligninas-lignosulfonatos, aserrín, resinas y turba.	Alumbre, arcillas, bentonita, borato de sodio, cal y cal hidratada, cemento, cloruro de magnesio, escayola, silicato de sodio, sílice y yeso.

Según Rodríguez [23], durante el proceso de fabricación de pellets y briquetas es necesario adicionar algún tipo de aglutinante orgánico con la finalidad de incrementar la resistencia a la tracción y lograr una homogeneidad en los pellets y briquetas. En este trabajo experimental se utiliza almidón de maíz como agente aglutinante ya que junto a la lignina que se encuentra en el mismo aserrín de eucalipto mejoran las propiedades en la obtención final del pellet, gracias a la adición del aglutinante se obtiene mejoras en las propiedades como la densidad y el poder calorífico ya que estas propiedades ayudan en el diseño de los biocombustibles solidos para la generación de energía.

1.2.10 Combustión de biomasa

Según el atlas ecuatoriano [13], la combustión directa es una forma antigua de aprovechar la energía de la biomasa. La combustión directa es aplicada principalmente para generar calor, por lo tanto, puede ser utilizada para la calefacción, cocción de alimentos o para el secado de productos agrícolas. El calor generado por la combustión se puede aprovechar en la generación de vapor para procesos industriales y eléctricos. Actualmente las tecnologías donde se puede realizar la combustión van desde estufas, hornos y calderas.

La biomasa es considerada como un combustible sólido, por lo tanto, se puede realizar la misma ruta de combustión que sigue el carbón entonces se puede identificar las diferentes etapas de combustión entre las que están el secado, la devolatilización, gasificación, combustión y la oxidación de la fase gaseosa que posee la biomasa transformada en biocombustible sólido. El intervalo entre los cambios de etapas varía

según el tamaño y las características del combustible, además dependerá de la temperatura y las condiciones que se realiza la combustión de la biomasa [24].

La quema de la biomasa necesita de un agente oxidante en este caso el oxidante mayormente utilizado es el oxígeno que está presente en el aire. El proceso de combustión empieza con el secado de la biomasa que consiste en evaporar la humedad que esta posee, y sigue con la volatilización que es la etapa en la cual se liberan una gran cantidad de productos gaseosos que son parte de la composición del biocombustible. Los gases desprendidos son hidrocarburos que igualmente son quemados. Luego de la devolatilización el carbón que se encuentra en la biomasa es quemado logrando así liberar el calor hasta que se reduzca a ceniza, la misma que está compuesta por minerales que están presentes en la biomasa [24].



Figura 1.8.- Etapas de combustión de una partícula de biomasa [24].

1.2.11 Características de combustible

1.2.11.1 Tamaño y forma

El tamaño y la forma se realiza mediante las dimensiones adecuadas según las normas respectivas para cumplir así los estándares de fabricación de pellets de aserrín. Para el tamaño y la forma de los pellets se determina por medida de la longitud y el diámetro de la muestra.

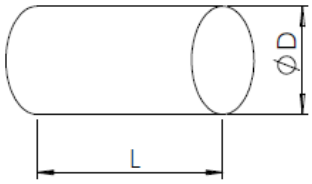


Figura 1.9.- Dimensiones de un pellet

1.2.11.2 Densidad

En cuanto a los pellets de aserrín de eucalipto la densidad se refiere a la cantidad de masa por unidad de volumen [25]. Esta propiedad es muy importante ya que afecta directamente en el comportamiento del pellet al ser sometido a la combustión, el transporte y almacenamiento. A mayor densidad que contengan los pellets mayores será la eficiencia energética debido a que contienen más energía por cada unidad de masa.

Por lo tanto, la densidad se calcula mediante la siguiente formula.

$$\text{Densidad} = \frac{\text{masa (g)}}{\text{volumen (cm}^3\text{)}} \qquad \text{(Ec. 1)}$$

1.2.11.3 Humedad

Se define al contenido de humedad como la cantidad de agua que se encuentra presente en la biomasa, se expresa como un porcentaje de peso. En la combustión de la biomasa, la humedad es un factor muy importante, debido a que se determina la energía que se puede obtener por medio de la combustión. Para la quema de la biomasa se debe primero evaporar el agua, antes de que el calor esté disponible ya que si no se realiza un proceso de secado el poder calorífico disminuirá debido al alto contenido de humedad [26].

En la norma UNE EN 14774 citada por Esteban [8], se establece un método de ensayo que consiste en secar la biomasa en una estufa, en la cual se somete las muestras a una temperatura de 105 °C hasta lograr reducir el contenido de humedad.

La cantidad de humedad se calcula a partir de la pérdida de masa de la muestra y se expresa en base húmeda y en ocasiones se hace en base seca. Para calcular el porcentaje de humedad en la muestra de la biomasa se utiliza la ecuación 1.1 para base húmeda y la ecuación 1.2 para seca [8].

$$M_{bh} = \frac{m_{om} - m_{ms}}{m_{om}} * 100 \quad \text{(Ec.1.1)}$$

$$M_{bs} = \frac{m_{om} - m_{ms}}{m_{ms}} * 100 \quad \text{(Ec.1.2)}$$

Donde

M_{bh}: humedad en base húmeda (%)

M_{bs}: humedad en base seca (%)

m_{0m}: masa inicial de la muestra (g)

m_{ms}: masa de la mestra seca (g)

Realizar este análisis es de gran importancia debido a que la influencia de la humedad es un aspecto importante para el aprovechamiento energético [8].

1.2.11.4 Volátiles

De acuerdo con la norma UNE EN 15148 citada por Esteban [8], el contenido del material volátil se puede determinar a partir del residuo que queda en un crisol cerrado, en donde las muestras se introducen en una mufla que está a 900 °C por siete minutos. El contenido de materia volátil se expresa como porcentaje de masa en base seca y se calcula mediante la siguiente ecuación.

$$V_{bs} = \left[\frac{m_{mc} * 100}{m_{0m}} - M_{bs}\right] * \left(\frac{100}{100 - M_{bs}}\right) \quad \text{(Ec.1.3)}$$

Donde

V_{bs}: material volátil de la muestra en base seca (%)

m_{0m}: masa inicial de la muestra (g)

m_{mc}: masa de la muestra calentada (g)

M_{bs}: contenido de humedad en base seca (%)

La materia volátil forma parte de la biomasa que fácilmente se puede arder en combinación con el oxígeno. La biomasa con un reducido contenido de materia volátil presenta menor poder calorífico y problemas de inquemados, es por ello que se suele necesitar una temperatura mayor para el proceso de combustión [27].

1.2.11.5 Cenizas

La ceniza es un residuo sólido procedente de la combustión de los biocombustibles, las cenizas generadas son claves para determinar la calidad del biocombustible, en condiciones óptimas el porcentaje de cenizas sobre la masa total de los pellets suele ser usualmente inferior al 0.7%. Para conseguir un porcentaje de ceniza inferior es necesario obtener la materia prima de buena calidad, es por ello que se debe evitar las cortezas y las ramas pequeñas [28].

La norma UNE EN 14775 citado por [8], define un procedimiento para determinar el contenido de cenizas, en el cual se calienta la muestra del biocombustible bajo estrictas condiciones controladas de tiempo y peso a una temperatura de 550 °C, por lo que se produce una pérdida de masa a partir de la cual se comienza a contabilizar el contenido de cenizas.

El contenido de cenizas se determina mediante la siguiente ecuación [8]:

$$A_{bs} = \frac{m_c}{m_{0m}} * 100 * \frac{100}{100 - M_{bs}} \qquad \text{(E.c.1.4)}$$

Donde

A_{bs}: $contenido\ de\ cenizas\ en\ base\ seca$

m_c: $masa\ de\ la\ ceniza\ (g)$

m_{0m}: $masa\ inicial\ de\ la\ muestra\ (g)$

M_{bs}: $contenido\ de\ humedad\ en\ base\ seca\ (\%)$

El contenido de cenizas en los biocombustibles provoca una reducción de la energía disponible, debido a que si hay una cantidad considerable de cenizas el aprovechamiento energético es menor, además, a mayor cantidad de cenizas empeora la calidad de los biocombustibles [8].

Según ecoinventos [29], las cenizas se originan de la combustión de pellets generados a base de residuos madereros como el aserrín, gracias a estos residuos se confiere una riqueza adicional en microorganismos. Las cenizas generadas obtienen una riqueza mineral, conllevan a utilizarlas como materia orgánica en el suelo, además estas

cenizas son recomendadas para cultivos de vegetales de raíz, frutos y flores en los diferentes huertos.

1.2.11.6 Carbono fijo

Para [30], el contenido de carbono fijo se mide como el carbono que queda después de que los componentes volátiles se liberan del proceso de combustión, el carbono fijo actúa como generador de calor principal durante la combustión, por lo tanto, contribuyen al poder calorífico contenido en los biocombustibles sólidos (pellets).

El carbono fijo es la fracción residual del combustible que resta una vez se ha pirolizado el material volátil durante la combustión y habiendo descontado las cenizas, por lo tanto, la cuantificación se obtiene mediante la siguiente ecuación [8].

$$C_{F,bs} = 100 - V_{bs} - A_{bs} \quad \text{(Ec.1.5)}$$

Donde

$C_{F,bs}$: $contenido\ de\ carbono\ fijo\ en\ base\ seca$ (%)

V_{bs}: $contenido\ de\ material\ volatil\ en\ base\ seca$ (%)

A_{bs}: $contenido\ de\ cenizas\ en\ base\ seca$ (%)

En el caso de que los valores estén referidos en base húmeda se emplea la siguiente ecuación [8].

$$C_{F,bh} = 100 - M_{bh} - V_{bh} - A_{bh} \quad \text{(Ec.1.6)}$$

Donde

$C_{F,bh}$: $contenido\ de\ carbono\ fijo\ en\ base\ humeda$ (%)

M_{bh}: $humeda\ en\ dase\ humeda$ (%)

V_{bs}: $contenido\ de\ material\ volatil\ en\ base\ humeda$ (%)

A_{bs}: $contenido\ de\ cenizas\ en\ base\ humeda$ (%)

Para el estudio realizado por [15], es importante la determinación de carbono, hidrogeno y nitrógeno ya que los resultados se pueden usar como parámetros de entrada para los cálculos aplicados a la combustión de los biocombustibles sólidos.

1.2.12 Análisis elemental

El análisis elemental es un método que sirve para determinar la cantidad de carbono, hidrogeno, nitrógeno y azufre que están presentes en la biomasa, independientemente del origen y estado de esta. Los elementos mencionados anteriormente son muy importantes ya que de estos dependerá la calidad del combustible y su respectivo potencial energético. En el proceso de combustión el carbono y el hidrogeno se oxidan, esto influye en el poder calorífico mediante la formación de CO2 y agua. La presencia de nitrógeno en la biomasa causa problemas ambientales ya que este elemento puede generar emisiones que son dañinas de dióxido de nitrógeno [8].

1.2.12.1 Determinación del contenido total de carbono, hidrógeno y nitrógeno

El contenido de carbono, hidrogeno, nitrógeno se puede determinar de acuerdo con la norma UNE-EN ISO 16948, para determinar la cantidad de cada uno de estos elementos se debe pesar la cantidad de muestra de ensayo según los requerimientos que los instrumentos que se vayan a utilizar para la medición del contenido total. En el análisis elemental se debe someter una cantidad preestablecida de la muestra a una combustión en presencia de oxígeno y un gas portador ya que con este proceso se da origen a la formación de los gases que incluyen el dióxido de carbono, vapor de agua, nitrógeno elemental y óxidos de nitrógeno, como también óxidos y haluros de azufre e hidrogeno [8].

Para la expresión de resultados de los contenidos totales de carbono, hidrogeno y nitrógeno, según la información encontrada se debe registrar como un porcentaje de masa y se calculan mediante las siguientes ecuaciones [8].

- Contenido de carbono:

$$Cx = Cp * \frac{100}{100-u} \quad \text{(Ec.1.7)}$$

- Contenido de nitrógeno:

$$Nx = Np * \frac{100}{100-u} \quad \text{(Ec.1.8)}$$

- Contenido de hidrogeno:

$$Hx = \left(Hp - \frac{u}{8.937}\right) * \frac{100}{100-u} \quad \text{(Ec.1.9)}$$

Donde:

x: $base\ anhidra$

p: $segun\ se\ ha\ determinado$

u: $contenido\ de\ humedad\ de\ la\ muestra$

El factor constante 8.937 se utiliza para calcular la concentración de hidrogeno en el agua que se encuentra presente en la muestra. Este factor se obtiene mediante la fórmula de la masa molar del agua (H_2O) y con los pesos atómicos del hidrogeno (1.008) y oxigeno (15.9994).

1.2.13 Reacción estequiométrica para la oxidación completa de un combustible

De acuerdo con el libro "Fundamentals of air pollution engineering" citado por [7], se describe la relación estequiométrica por oxidación completa, como se muestra en la siguiente ecuación:

$$C_nH_m + \left(n + \frac{m}{4}\right)(O_2 + 3.76N_2) \rightarrow nCO_2 + \frac{m}{2}H_2O + 3.76\left(n + \frac{m}{4}\right)N_2$$

En la ecuación anterior se incluye al nitrógeno como especie inerte ya que el aire se compone en su mayoría del nitrógeno y oxígeno [8].

Según el libro "Tecnología de la madera" citado por [31] , se define que la composición de la madera de sus diferentes especies posee una composición similar, es por ello que su composición química es de: carbono 50%; hidrógeno 6%; nitrógeno 1%; y oxígeno 43%.

Durante la combustión se crea una reacción química de oxidación en la que el carbono (C) y el hidrógeno (H) se combinan con el oxígeno (O), llevando a cabo el desprendimiento de energía en forma de luz y calor. Los procesos de combustión de combustibles como el carbón, el petróleo y la madera se realizan a temperaturas elevadas de hasta 1000 °C. Luego de la combustión se obtienen ciertas cantidades de residuos sólidos como los inquemados, las cenizas y el hollín. La madera al ser considerado como un combustible sólido contiene esencialmente elementos como el carbono (C), el hidrógeno (H), el oxígeno (O) y pequeñas cantidades de azufre (S), nitrógeno (N_2) y agua (H_2O) [32].

Durante las combustiones completas de diferentes combustibles el porcentaje máximo de CO_2 se representa en la siguiente tabla [33].

Tabla 1.5 Porcentajes de producción de CO_2 de diversos combustibles

Combustible	CO_2 máximo	CO_2 máximo teórico
Gas Natural	9-10 %	12,1 %
Gas Propano	10-11 %	13,9 %
Butano	10-11 %	14,1 %
Gasóleo	12,5-13 %	15,6 %
Fuelóleo	12 – 12,5 %	15,8 %
Combustibles sólidos	-	Del 18 al 21 %

1.2.13.1 Aire de combustión y exceso de aire

En las reacciones de combustión se utiliza el atmosférico ya que ni el nitrógeno ni los gases inertes presentes en el aire reaccionan durante el proceso de combustión, por lo tanto, se considera que el aire está compuesto del 21% de oxígeno y 79% de nitrógeno. Para asegurar un correcta y completa combustión se debe mantener un adecuado flujo de aire. Se debe suministrar más volumen de oxígeno que el estequiométrico en un proceso real ya que en este tipo de proceso el volumen ideal de oxígeno no es suficiente para un proceso de quemado completo debido a que no hay una correcta mezcla de combustible y oxígeno, este suministro de oxígeno se lo conoce como exceso de aire [32].

La cantidad de aire suministrado durante la combustión es de gran importancia debido a que si existe un exceso de aire las temperaturas de combustión se reducirán provocando pérdidas de energía. Con un reducido exceso de aire durante la combustión algunos elementos del combustible no llegan a reaccionar es decir que no se queman completamente generando un aumento de contaminación al emitir monóxido de carbono generado a partir de la emisión de inquemados gaseosos a la atmosfera [32].

1.2.13.2 Medición de CO

El monóxido de carbono es un gas incoloro, inodoro y toxico, este elemento se forma durante la combustión incompleta del carbono. El monóxido de carbono al aire libre no es muy peligroso ya que reacciona con el oxígeno y se forma CO_2, pero en espacios cerrados este gas es muy peligroso ya que en concentraciones de 700 ppm en el aire

que respira el ser humano puede producir la muerte. El monóxido de carbono como no reacciona correctamente con el aire representa pérdidas de energía por ende disminuye la liberación de calor y temperatura dentro del lugar de combustión. Los valores típicos de CO para los combustible solidos van desde los 220 ppm hasta los 1000 ppm [32].

El CO se mide en los humos de la combustión, usualmente este gas está presente en los combustibles gaseosos ya que a simple vista no se puede detectar como ocurre en los combustible líquidos y solidos donde la presencia de inquemados es totalmente visible debido a la generación de humos negros. En los combustibles gaseosos la presencia de CO es visible de acuerdo con la tonalidad de la llama sin embargo la tonalidad de la llama es un criterio nada fiable. Para medir la concentración de CO en una combustión existen tecnologías analizadoras de gases que miden la cantidad de gases liberados mediante el paso del humo por una chimenea, los analizadores de gases que se emplean para dicha medición poseen sondas acopladas a elementos electrónicos capaces de medir la concentración de cada gas presente en los humos y la temperatura de estos [34].



Figura 1.10.- Analizador de gases de combustión

1.2.14 Quemado de pellets

Los pellets de madera generalmente se queman para la obtención de calor, sin embargo, también se queman para generar vapor y electricidad. La quema de pellets usualmente se realiza en estufas que pueden variar desde grandes calderas comerciales hasta calentadores residenciales, muchos de estos sistema de combustión están compuestas de tolvas y sinfines controlados termostáticamente. Los lugares de combustión de pellets deben cargarse con menos frecuencia en comparación con la

leña tradicional. Una vez quemados los pellets se obtiene cenizas restantes por lo que se debe eliminar periódicamente de las estufas. La generación de cenizas de los pellets es relativamente baja a comparación con la leña tradicional. La quema de pellets son una forma limpia y cómoda de calentar en comparación con los combustibles tradicionales de madera [35].

2.2.14.1 calor y vapor

Según [36], la combustión de biomasa se utiliza para la generación de calor y vapor, debido a que el calor generado puede ser utilizado para el uso en la calefacción domestica e industrial además se puede utilizar para la generación de electricidad en centrales combinadas de calor y energía. El vapor generado durante la combustión se puede utilizar para accionar turbinas de vapor para la producción de electricidad y utilización para mantener flujos de agua caliente.

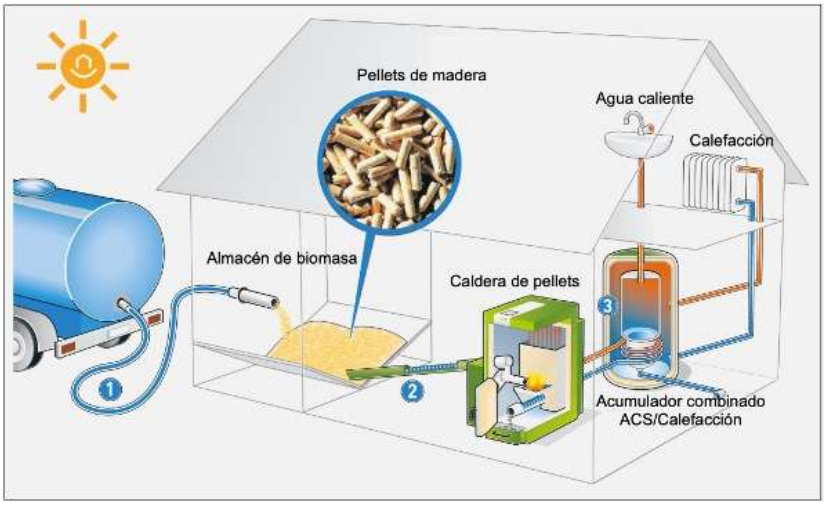


Figura 1.11.- Generación de energía con pellets de madera

1.2.15 Parámetros de llama

Para [37] una llama se define como una zona de reacción química acompañada de liberación de calor que se propaga por medio de un combustible. La zona de la llama en estado estable se considera como una región de temperatura y composición que varían rápidamente.

La llama es considerada como un medio gaseoso en el cual se encuentran mezclados el combustible y el carburante gracias a esta mezcla se desarrollan las reacciones de

combustión. La llama puede tener diferentes formas dependiendo del medio técnico, el combustible y las características de la cámara de combustión [38].



Figura 1.12.- Elementos de la combustión

1.2.15.1 Forma y color de llama

La llama presenta diferentes formas y color dependiendo del medio técnico en que se queme el combustible a continuación, se describe la forma y color de llama de la combustión de pellets en estufas.

En una combustión con exceso de aire la forma de la llama es similar a la de un soplete, el tamaño de la llama es reducido y presenta un color de llama amarillo intenso [39].

La combustión con defecto de aire provoca la aparición de inquemados, excesivo humo, pérdidas en la eficiencia de la combustión y mayor producción de cantidad de CO. La llama presenta una forma indefinida ya que se asemeja a una llama de combustión de leña, el color de la llama en esta combustión es naranja-negro [39].

Una combustión completa presenta una llama viva con forma uniforme y su color de llama es amarillo-blanco [39].

1.2.15.2 Temperatura adiabática de llama

Es la temperatura final alcanzada durante la combustión, se alcanza cuando el calor producido por el combustible es utilizado para calentar los productos de la combustión sin la transferencia de calor de fuentes externas. Se puede determinar mediante el equilibrio del calor de la combustión, el calor de disociación y la entalpia total de los productos de combustión [40].

Para [41], la temperatura de llama adiabática es aquella que se produce cuando la cámara de combustión está aislada correctamente y no posee pérdidas de calor. A medida que el porcentaje de aire de combustión aumenta nos desviamos de las condiciones estequiométricas ya que parte del calor generado se utiliza para calentar el exceso de aire obteniendo que la temperatura de la llama descienda.

1.2.15.3 Tiempo de llama

Se refiere a la duración de combustión activa o con llama. Un largo tiempo de llama indica una combustión eficiente ya que existe un adecuado porcentaje de humedad y hay suficiente oxígeno. Si el tiempo de combustión con llama es corto indica que no existe una combustión completa lo que genera inquemados y generaría más contaminantes de carbono.

1.2.16 Termografía

La termografía es una técnica de medición que permite visualizar la temperatura de diversos objetos mediante imágenes termográficas que muestran la respectiva distribución de temperatura en diversas superficies de objetos [42]. Es considerada una tecnología que no necesita de ningún contacto, esta tecnología se basa en la medición de la temperatura mediante ondas infrarrojas que permiten tomar medidas de la temperatura a distancias seguras [43].

Esta técnica de medición se realiza mediante una cámara termográfica que capta y almacena datos a partir de una onda de radiación infrarroja recibida, a partir de la cual calcula la temperatura de los diversos objetos, en el resultado de la temperatura tomada por la cámara termográfica se debe tener en cuenta la emisividad que tiene el objeto y la compensación de la temperatura reflejada debido a que estos parámetros son diferentes dependiendo del tipo de material [42].



Figura 1.13.- Termografía

1.2.16.1 Emisividad

Es la medida de la capacidad que tienen los materiales para emitir o propagar radiación infrarroja, varía dependiendo del tipo de material, las propiedades de la superficie y en algunos casos la temperatura. Las sustancias orgánicas poseen una elevada emisividad ya que el rango infrarrojo no depende de la temperatura por este motivo su valor de emisividad va desde los 0.8 a 0.95 [42].

1.2.16.2 Temperatura reflejada

Es la medida de la capacidad que posee un objeto de reflejar la radiación infrarroja este factor al igual que la emisividad depende de las propiedades de la superficie, el tipo de material y la temperatura [42].

1.2.16.3 Transmisión

Es la capacidad de transmitir o permitir el paso de la radiación infrarroja de un material, la transmisión depende del tipo y el grosor del material analizado [42].

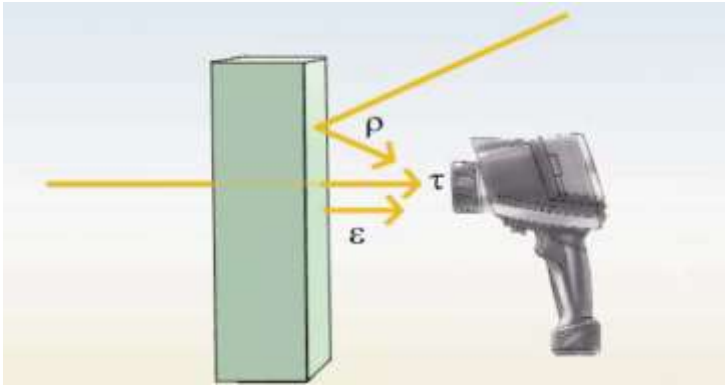


Figura 1.14.- Factores que intervienen en la termografía [42].

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Analizar los parámetros de fabricación en pellets de aserrín de eucalipto para mejorar sus características de combustión.

1.3.2 Objetivos específicos

- Establecer los diversos parámetros requeridos para la fabricación de pellets de aserrín de eucalipto.
- Determinar características técnicas de combustión de pellets de aserrín.
- Evaluar experimentalmente el comportamiento de pellets de aserrín en su combustión.

1.4 Hipótesis

En la fabricación de pellets a partir del aserrín de eucalipto la temperatura y el tiempo de secado mejorara la duración de llama, la temperatura de llama y las características geométricas de llama.

1.5 Variables de hipótesis

1.5.1 Variables independientes: parámetros de fabricación

Temperatura de secado.

Tiempo de secado.

1.5.2 Variables dependientes: Parámetros de combustión

Duración de llama

Temperatura de llama

Características geométricas de llama.

CAPÍTULO II

2. METODOLOGÍA

2.1 Materiales

En la tabla 2.1, se identifica cada uno de los materiales y equipos utilizados para la fabricación y combustión de los pellets de aserrín de eucalipto.

Tabla 2.1 Materiales y equipos

Materiales/Equipos	Descripción	Ilustración
Aserrín de eucalipto	Partículas menores a 3 mm.	
Tamizadora	Separador de particulas y desechos no deseados para la compactación.	
Matriz de pellets cilíndrico	Eleborado mediante procesos de mecanizado: torneado y taladrado a base de acero AISI 4340	

Prensa hidráulica	Utilizada para ejercer presión en la matriz y obtener los pellets. Marca SOMAR capacidad 30 toneladas.	
Balanza	Balanza digital capacidad 200 gramos con 2 decimales, utilizada para la correcta medición de pesos	
Horno secador	Utilizado para el secado de pellets, cálculo de volátiles. Capacidad 1200 °C	
Mechero	Mechero a base de gas GLP, utilizado para la combustión de pellets.	

Base para quemar pellets	Utilizado para la quema de pellets, contiene una malla de 3x3 mm.	
Cámara termográfica	Utlizada para medir la temperatura de la llama.	
Analizador de gases	Analizador Bacharach modelo Intech, utilizado para determinar la cantidad de CO en los productos de combustión.	

Fuente: Autor

2.2 Nivel o tipos de investigación

2.2.1 Exploratoria

El presente proyecto de investigación utiliza el método exploratorio ya que permitió determinar los procesos de fabricación de los pellets de aserrín y los parámetros de combustión que intervienen en la quema de los pellets.

2.2.2 Experimental

Por medio de este método se analizaron diversos pellets para determinar el efecto de los diferentes parámetros de fabricación que influyen en la combustión. En este caso se manipulan las variables independientes para observar los efectos en las variables dependientes, además esta investigación permitió realizar experimentos mediante diversas pruebas de laboratorio.

2.2.3 Correlacional

Mediante este método se pudo analizar la relación que existe entre los diferentes parámetros de fabricación (presión, temperatura, porcentaje de humedad y tamaño de partícula) y las características de combustión (emisiones de humo, contenido de cenizas y volátiles)

2.2.4 Descriptiva

De acuerdo con este método se determinaron los parámetros de fabricación de pellets de aserrín de eucalipto y sus características de combustión mediante la recolección de datos y el respectivo análisis de las diferentes muestras de pellets.

2.3 Población y muestra

2.3.1 Población

Como población se tomaron los residuos forestales generados en los aserraderos del cantón Ambato, según estudios realizados por [44] y [45], en el cantón Ambato hay un total de 19 aserraderos que al mes se estima un porcentaje de desechos de aserrín de 42,86%, desechos de virutas de 57,14%. En la ciudad de Ambato se genera un total de 50,625 toneladas de aserrín y un 67,5 toneladas de viruta al mes. La generación de

residuos se forma a partir de diversos procesos de producción mobiliaria en los que resalta el corte, cepillado, fresado, lijado, taladrado, torneado y acabado.

Tabla 2.2 Tipo de residuos generados y sus características. [45]

RESIDUO	CANTIDAD	TAMAÑO	FORMA	TEXTURA	GROSOR
Viruta	30 a 35%	Varios tamaños Entre 2 a 7 cm	Bolas, bastones, alargadas	Lisa y rugosa	1 mm
Aserrín	30 a 35%	Varios tamaños Entre 0,5 a 1 cm	Bolas, bastones, alargadas	Lisa y rugosa	1 mm
Polvo	20%	0,1mm	Apenas se lo puede tocar	Apenas se lo puede tocar	0,01
Trozos de madera	10 a 15%	Varios tamaños Entre 10 a 30 cm	Cuadradas y rectangulares	Lisa y rugosa	Varios tamaños Entre 1 a 3 cm

2.3.2 Muestra

Para analizar las características de combustión se consideraron 30 pellets cilíndricos, con el mismo volumen, pero con diferentes parámetros de fabricación. Estos pellets están fabricados a una presión de 30 bares usando almidón como aglutinante.

Tabla 2.3 Especificaciones de los pellets

Pellets cilíndricos	
Diámetro	9,5 mm
Longitud	23 - 25 mm
Peso promedio	1,5 gramos aprox.
Cantidad	10 pellets por cada condición de secado

Fuente: Autor

2.4 Operacionalización de variables

2.4.1 Variables independientes: temperatura de secado y tiempo de secado

Tabla 2.4 Variables independientes

Conceptualización	Dimensiones	Indicadores	Ítems	Técnicas e instrumentos
La **temperatura de secado** es el nivel de calor que se aplica durante el proceso de eliminación de la humedad del aserrín de eucalipto. El secado afecta directamente las propiedades físicas y químicas del pellet, influyendo en el poder calorífico y su eficiencia de combustión.	Reducir la humedad del aserrín	Temperatura recomendada	105 °C ± 2	Horno de secado
		Temperatura ambiente	23.3 °C	
El **tiempo de secado** se refiere a la duración del proceso durante el cual el aserrín de eucalipto se somete a condiciones específicas de secado con el fin de reducir su contenido de humedad a un nivel óptimo para la producción de pellets.	Reducir la humedad del aserrín	Tiempo de secado	30 minutos	Cronometro Reloj
			4 horas	
			24 horas	

Fuente: Autor

2.4.2 Variables dependientes: Duración de llama, temperatura de llama y características geométricas de llama

Tabla 2.5 Variables dependientes

Conceptualización	Dimensiones	Indicadores	Ítems	Técnicas e instrumentos
La **duración de llama** es el período durante el cual se mantiene la combustión visible y sostenida de un pellet de aserrín de eucalipto bajo condiciones controladas. Es fundamental para evaluar la eficiencia de combustión y la calidad del pellet.	Tiempo de combustión	Duración de la combustión con llama	Tiempo de combustión	Análisis de video Cámara de video Cronometro
La **temperatura de llama** durante la combustión de pellets de aserrín se refiere a la temperatura máxima que alcanzan los gases emitidos, esta temperatura es muy importante ya que de esta depende la determinación de la calidad de combustión	Distribución de temperaturas en la llama de combustión del pellet	Temperaturas a diferentes tiempos de combustión	Temperatura máxima alcanzada	Cámara termográfica
Las **características geométricas de llama** se refieren a los parámetros dimensionales, observables y medibles de la llama producida durante la combustión de los pellets de aserrín de eucalipto.	Características de la llama durante la combustión	Altura de la llama Área de llama	Altura y área de la llama	Observación directa Cámara de video

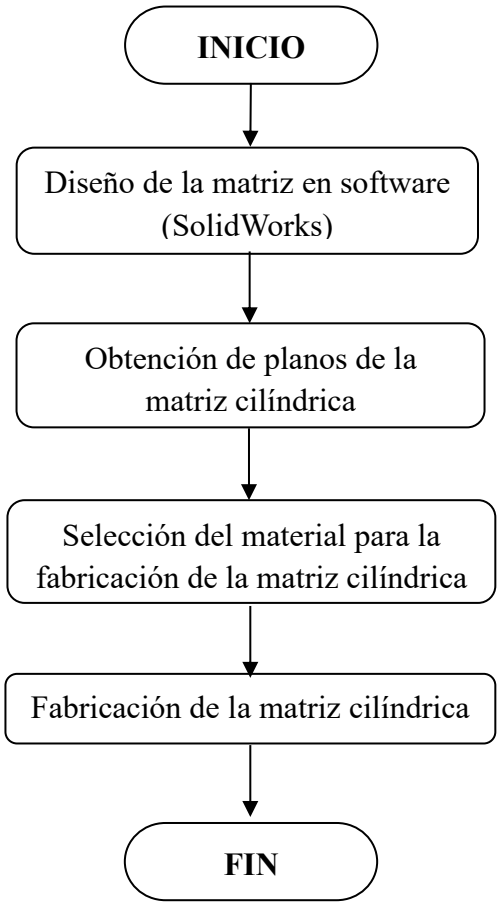
Fuente: Autor

2.5 Plan de recolección de información

Se inicia con la recolección de información a partir de la información encontrada en libros, artículos, revistas y páginas web, esta fundamentación tiene el objetivo de analizar los procesos de fabricación de pellets y como estos influyen en la combustión final de los mismos

2.6 Análisis de la información

2.6.1 Procedimiento para la elaboración de la matriz



2.6.1.1 Descripción del proceso

Diseño de matriz

Se realizó una matriz parecida a la mencionada por [5], la cual consta de tres partes un pistón, un cilindro hueco y una tapa trasero con esta matriz se pudo obtener los pellets para el respectivo análisis. Se diseño la matriz cilíndrica mediante el software

SolidWorks, posteriormente se generaron los respectivos planos para la respectiva elaboración de la matriz.

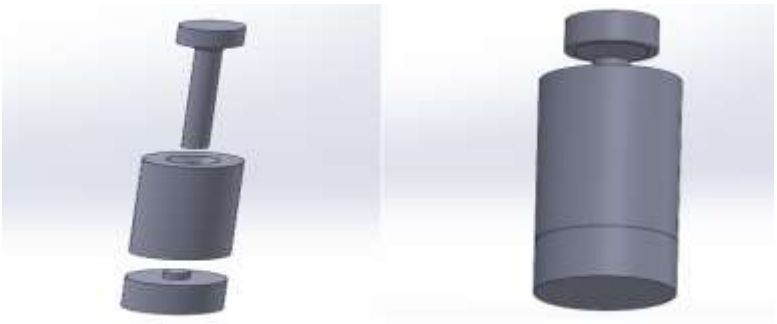


Figura 2.1.- Molde de matriz cilíndrica
Fuente: Autor

Selección del material

Se utilizó un acero AISI 4340, ya que es un material que soporta presiones elevadas sin deformarse, posee una buena dureza, tenacidad, maquinabilidad y resistencia a la fatiga, gracias a estas propiedades se puede compactar los pellets sin que se deforme, se desgaste o se fracture la matriz cilíndrica.



Figura 2.2.- Especificaciones del material

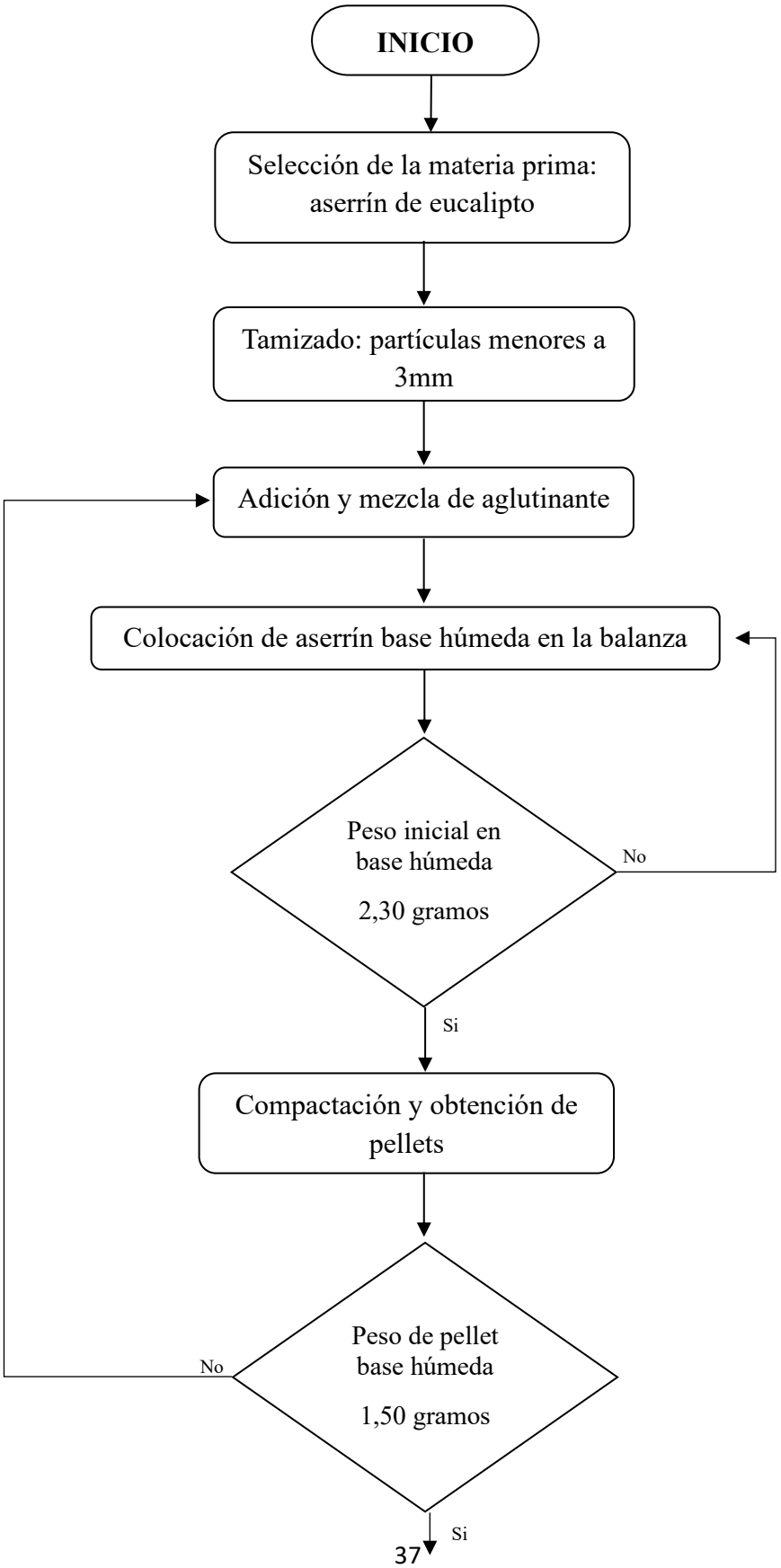
Elaboración y obtención de la matriz

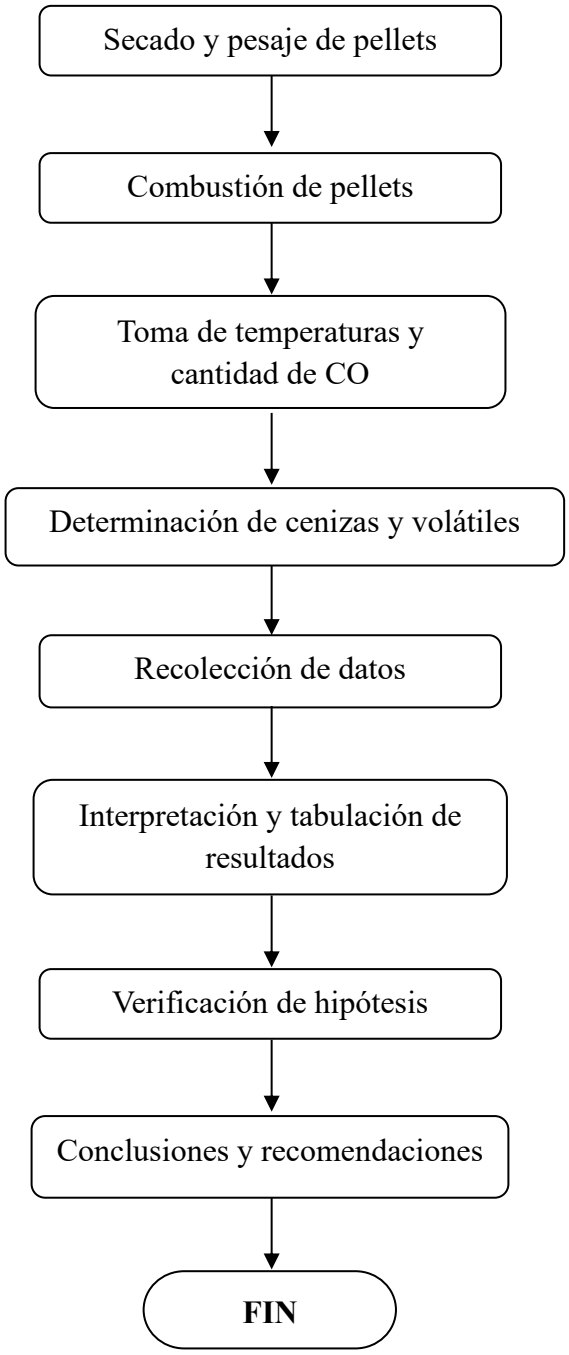
Con la ayuda de los planos generados en el software se procede a maquinar la matriz mediante el desbastado y taladrado del material elegido. Se obtuvo la matriz con la ayuda de torno manual, inserto 4340, broca 9.5 mm y lija.



Figura 2.3.- Obtención de la matriz cilíndrica
Fuente: Autor

2.6.2 Procedimiento para fabricación de pellets para el respectivo análisis de combustión





2.6.2.1 Descripción del proceso

Selección de la materia prima y tamizado.

Se recolectó el aserrín de eucalipto de una maderera ubicada en la ciudad de Ambato en el kilómetro 8. Se lo tamizó mediante una malla de 3 mm. El tamizado del aserrín

es muy importante ya que sirve para retirar las impurezas que contiene la materia prima seleccionada y para obtener dimensiones de 3 mm o inferiores ya que con estas dimensiones se obtiene mejores resultados al momento de la compactación.



Figura 2.4.- Selección y tamizaje de aserrín de eucalipto
Fuente: Autor

Mezcla de aglutinante y peso de masa húmeda

Para obtener una buena cohesión de las partículas del aserrín de eucalipto se agregó una porción de almidón natural, gracias al aglutinante elegido se logró mejorar la manipulación de los pellets evitando que se desintegren. Para el presente análisis se realizaron pellets con un contenido de 2.30 gramos de aserrín mezclados con aglutinante.



Figura 2.5.- Mezcla de aserrín con aglutinante y pesaje
Fuente: Autor

Compactación y obtención de pellets

Luego del respectivo pesaje del aserrín se introdujo con cuidado la mezcla al molde cilíndrico para evitar reducciones en el peso inicial, seguidamente se colocó el molde en la prensa hidráulica para la respectiva compactación.

Los pellets se obtuvieron con un procedimiento igual al mencionado por [46] en el cual se trata de compactar la biomasa mediante la presión de la matriz obtenida, como se puede observar en la figura 2.1 se debe colocar el aserrín dentro del cilindro de la matriz, luego se debe colocar el pistón dentro de la matriz para posteriormente aplicar presión con la ayuda de una prensa hidráulica, la presión aplicada es de 30 bares. Luego de aplicar la presión con el aserrín adentro, se procede a retirar la tapa posterior para expulsar los pellets.

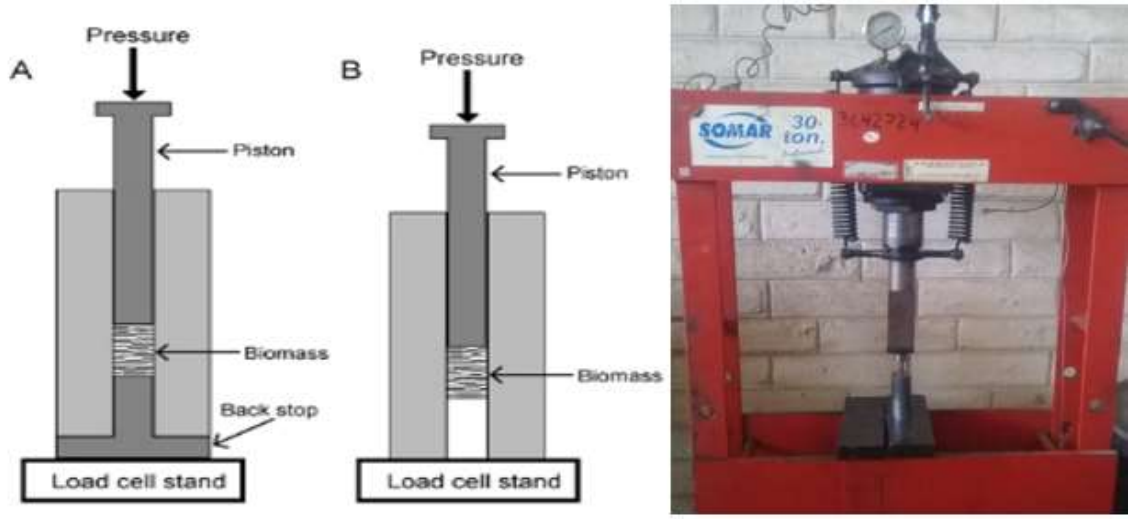


Figura 2.6.- Procedimiento de compactación del aserrín
Fuente: Autor

Secado y pesaje de pellets

Una vez obtenidas los pellets se realizó el respectivo pesaje, una vez controlado el peso se procede a trasladar los pellets en una bandeja a un horno a temperaturas de 105°C por diversos tiempos de secado. Finalmente, una vez obtenido el tiempo de secado se comprueba el peso final de los pellets.



Figura 2.7.- Pellets obtenidos
Fuente: Autor

Combustión de pellets

Para realizar el análisis de la combustión de los pellets se empleó un montaje similar al utilizado por [47], en la cual se utilizó un mechero alimentado con gas, como se puede observar en la imagen. además, se empleó una cámara fotográfica para tomar videos del proceso de combustión de los pellets para posteriormente realizar las respectivas comparaciones de los pellets analizados y observar la incidencia de los parámetros de fabricación en la combustión. El análisis de combustión se realizó a partir de una evaluación visual.



Figura 2.8.- Lugar de combustión
Fuente: Autor

Análisis de combustión

Se realizó el análisis de combustión en el cual se midieron la temperatura mediante una cámara termográfica y con la ayuda del analizador de gases se tomó los diversos resultados generados por la combustión. Además, se realizó el respectivo análisis de cenizas y volátiles en un horno, según los procesos descritos en el capítulo 1.



Figura 2.9.- Combustión de pellets
Fuente: Autor

Toma de temperatura y cantidad de CO

Con la ayuda de la termografía se realizó el análisis de temperatura mediante la recolección de imágenes térmicas generadas por la cámara termográfica.

Tabla 2.6 Configuración de cámara termográfica

Emisividad	0.80
Temperatura reflejada	40 °C
Distancia	1 metro



Figura 2.10.- Medición de temperatura
Fuente: Autor

Cantidad de CO

Con la ayuda de un analizador de gases modelo Intech, se realizó la recolección de la cantidad de CO en los productos de combustión. Para la determinación correcta de CO se simuló una chimea mediante tubos PVC y se quemaron 2 pellets de cada condición de secado.



Figura 2.11.- Análisis de gases
Fuente: Autor

Determinación de cenizas y volátiles

El contenido de cenizas se realizó con los residuos de la combustión realizada en la toma de las temperaturas. Por otro lado, el contenido de volátiles se obtuvo mediante la aplicación de la norma UNE EN 15148 mencionada por [8], la misma que describe que se debe colocar la masa inicial en un crisol tapado a 900 °C por 7 minutos. La masa inicial para determinar el contenido de volátiles fue de 2 gramos por cada condición de secado esta masa fue triturada previamente.



Figura 2.12.- Análisis de volátiles
Fuente: Autor

Cálculos

Densidad

Intervalo de longitud 23 mm a 25 mm

$v = \pi(4{,}75)^2(23)$ $v = \pi(4{,}75)^2(24)$ $v = \pi(4{,}75)^2(25)$

$v = 1{,}63\ cm^3$ $v = 1{,}70\ cm^3$ $v = 1{,}77\ cm^3$

Volumen promedio $v_{prom} = 1{,}70\ cm^3$; masa después de la compactación $1{,}50\ g$.

$$densidad = \frac{1{,}50\ g}{1{,}70\ cm^3}$$

$$\boldsymbol{densidad = 0{,}882\ g/cm^3}$$

Determinación de fuerza de compactación

Presión (P)	30 bares
Diámetro (Ø)	9,5 milímetros

$$A = \frac{\pi(D)^2}{4}$$

$$A = \frac{\pi(9{,}5\ mm)^2}{4}$$

$$A = 70{,}88\ mm^2 = 70{,}88x10^{-6}m^2$$

$$P = \frac{F}{A}$$

$$F = P * A$$

$$P = 30\ bares * \left|\frac{100\ 000\ Pa}{1\ bar}\right| = 3\ 000\ 000\ Pa$$

$$F = 3\ 000\ 000\ Pa * 70{,}88x10^{-6}\ m^2$$

$$\boldsymbol{F = 212{,}64\ N}$$

CAPÍTULO III

3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1 Análisis y discusión

En este apartado se presenta los datos obtenidos mediante tablas y diagramas del análisis de parámetros de fabricación de pellets de aserrín de eucalipto para comprobar su respectiva influencia en las características de combustión.

3.2 Parámetros de fabricación de pellets de aserrín

3.2.1 Análisis de fabricación de pellets

Se obtuvieron 30 pellets de aserrín compactados en la matriz cilíndrica con una presión de 30 bares, para los cuales se describen los parámetros generales en la tabla 3.1.

Tabla 3.1 parámetros requeridos para la fabricación de pellets

Número total de pellets	30
Número de pellets por condición de secado	10
Masa inicial *(g)*	2,30
Masa final *(g)*	1,50
Pérdida de masa *(gramos)*	0,80
Diámetro *(milímetros)*	9,5
Longitud *(milímetros)*	23 - 25

Fuente: Autor

Análisis

La masa antes de la compactación fue de 2,30 gramos y la masa final de 1,50 lo cual da como resultado una pérdida de masa de 0,80 gramos lo que quiere decir que la masa pérdida es considerada como agua debido a la mezcla del aserrín con aglutinante. La masa final de 1,50 gramos no ha perdido completamente la humedad por lo cual se somete a diversos procesos de secado.

3.2.2 Análisis del proceso de secado de pellets de aserrín de eucalipto

Los 30 pellets se dividieron en tres grupos de 10 pellets cada grupo. Se dividieron los pellets para realizar el análisis correspondiente del tiempo y temperatura de secado. Los pellets se dejaron secar por 24 horas a temperatura ambiente, por 30 minutos a una temperatura de 105 grados centígrados y por 4 horas a una temperatura de 105 grados centígrados respectivamente, consiguiendo así reducir el porcentaje de humedad.

a) Pellets secados a 105 °C por 4 horas

Tabla 3.2 Datos de pellets secados a 105 °C por 4 horas

Pellet	Masa inicial (g)	Masa final (g)	Radio (mm)	Longitud (mm)	Volumen (cm^3)	Densidad (g/cm^3)	Reducción de peso (%)	Humedad inicial (%)	Humedad final (%)
1	1,50	0,79	4,75	25	1,77	0,446	47,33	48	0,67
2	1,50	0,78	4,75	25	1,77	0,440	48,00	48	0,00
3	1,50	0,78	4,75	25	1,77	0,440	47,33	48	0,67
4	1,50	0,79	4,75	25	1,77	0,446	47,33	48	0,67
5	1,50	0,78	4,75	24	1,70	0,459	48,00	48	0,00
6	1,50	0,78	4,75	25	1,77	0,440	48,00	48	0,00
7	1,50	0,79	4,75	25	1,77	0,446	47,33	48	0,67
8	1,50	0,78	4,75	24	1,70	0,459	48,00	48	0,00
9	1,50	0,78	4,75	25	1,77	0,440	48,00	48	0,00
10	1,50	0,78	4,75	24	1,70	0,449	47,33	48	0,67

Promedio		**Máximo**	**Aspecto**	**Máximo**		**Máximo**
0,79	4,75	24 mm		48,00 %		0,00 %
Diámetro		**Mínimo**	Color marrón	**Mínimo**		**Mínimo**
9,5 mm		25 mm		47,33 %		0,67 %
Promedio		**24,7 mm**	**Promedio**	**47,67 %**	**Promedio**	**0,33 %**

Fuente: Autor

Análisis

Se obtuvo una reducción de peso máximo de 48% y una mínima reducción de peso de 47,33%. La reducción de peso máximo se consideró como humedad inicial para determinar la humedad final obteniendo un promedio de 0,33% de humedad final. Se han obtenido pellets de entre 24 y 25 milímetros además se observó que los pellets presentan un color marrón debido al tiempo y temperatura de secado. La masa final de estos pellets después del tipo de secado va desde los 0,78 y 0,79 gramos.

b) Pellets secados a 105 °C por 30 minutos

Tabla 3.3 Datos de pellets secados a 105 °C por 30 minutos

Pellet	Masa inicial (g)	Masa final (g)	Radio (mm)	Longitud (mm)	Volumen (cm^3)	Densidad (g/cm^3)	Reducción de peso (%)	Humedad inicial (%)	Humedad final (%)
1	1,50	0,90	4,75	25	1,77	0,508	40,00	48	8,00
2	1,50	0,91	4,75	25	1,77	0,514	39,33	48	8,67
3	1,50	0,90	4,75	24	1,70	0,529	40,00	48	8,00
4	1,50	0,91	4,75	23	1,63	0,558	39,33	48	8,67
5	1,50	0,90	4,75	23	1,63	0,552	40,00	48	8,00
6	1,50	0,90	4,75	25	1,77	0,508	40,00	48	8,00
7	1,50	0,91	4,75	24	1,70	0,535	39,33	48	8,67
8	1,50	0,91	4,75	24	1,70	0,535	39,33	48	8,67
9	1,50	0,90	4,75	25	1,77	0,508	40,00	48	8,00
10	1,50	0,91	4,75	23	1,63	0,558	39,33	48	8,67

Promedio		**Máximo**	**Aspecto:**	**Máximo**		**Máximo**
0.91	4,75	25 mm		40,00 %		8,00 %
Diámetro		**Mínimo**	Café pálido	**Mínimo**		**Mínimo**
9,5 mm		23 mm		39,33 %		8,67 %
Promedio		**24,1 mm**	**Promedio**	**39,67 %**	**Promedio**	**8,33**

Fuente: Autor

Análisis

Con un secado a 105 °C por 30 minutos la reducción de peso máxima es de 40% y la reducción mínima es de 39,33% obteniendo un promedio de 39,67%. Gracias a la reducción de peso se ha obtenido porcentajes de humedad de entre el 8% y 8,67%. Debido a que la reducción de peso es alta se ha obtenido un promedio de masa final de 0,91 gramos. En esta sección se pudo observar que los pellets presentan un color café pálido debido al proceso de secado.

c) Pellets con secado natural

Tabla 3.4 Datos de pellets con secado natural

Pellet	Masa inicial (g)	Masa final (g)	Radio (mm)	Longitud (mm)	Volumen (cm^3)	Densidad (g/cm^3)	Reducción de peso (%)	Humedad inicial (%)	Humedad final (%)
1	1,50	1,01	4,75	25	1,77	0,570	32,67	48	15,33
2	1,50	1,01	4,75	23	1,63	0,620	32,67	48	15,33
3	1,50	1,01	4,75	25	1,77	0,570	32,67	48	15,33
4	1,50	1,02	4,75	24	1,70	0,600	32,00	48	16,00
5	1,50	1,01	4,75	25	1,77	0,570	32,67	48	15,33
6	1,50	1,00	4,75	23	1,63	0,613	33,33	48	14,67
7	1,50	1,02	4,75	24	1,70	0,600	32,00	48	16,00
8	1,50	1,01	4,75	25	1,77	0,570	32,67	48	15,33
9	1,50	1,00	4,75	24	1,70	0,588	33,33	48	14,67
10	1,50	1,02	4,75	25	1,77	0,576	32,00	48	16,00

Promedio		**Máximo**	**Aspecto:**	**Máximo**		**Máximo**
1,01	**4,75**	23 mm		33,33%		16,00%
Diámetro		**Mínimo**	Amarillo con tonalidades suaves	**Mínimo**		**Mínimo**
9,5 mm		25 mm		32,00%		14,67%
Promedio		**24,30 mm**	**Promedio**	**32,60%**	**Promedio**	**15,40%**

Fuente: Autor

Análisis

Como resultado de un secado natural a temperatura ambiente se obtuvo un promedio de masa final de 1,01 gramos y longitudes que van desde los 23 mm hasta los 25 mm. En esta sección de pellets la reducción máxima de peso es de 33,33% y la reducción mínima de 32% por lo tanto el contenido de humedad promedio para esta sección es de 15,40%, en la cual la humedad máxima es de 16% y su humedad mínima de 14,67%. Se observó un color amarillo con tonalidades suaves en los pellets después del proceso de secado.

3.2.3 Porcentaje de reducción de peso

La figura 3.1 representa la comparación de los porcentaje de reducción de peso de cada una de las condiciones de secado, que han sido sometidos los pellets.

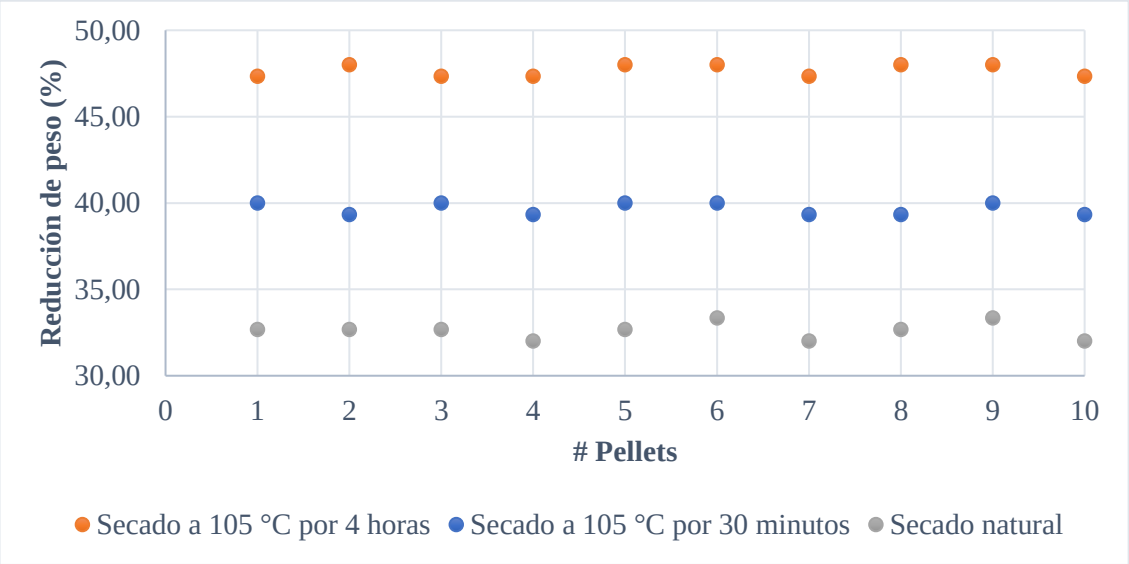


Figura 3.1.- Comparación del porcentaje de reducción de peso

Análisis

Después de la compactación del aserrín de eucalipto en la matriz se obtuvieron los pellets de 1,50 gramos de peso en base húmeda, debido al alto contenido de humedad se ha realizado el respectivo proceso de secado obteniendo que con un adecuado proceso de secado se puede reducir hasta un 48% del peso respecto de la masa inicial. Con un secado natural la reducción de peso promedio es de 32,60% y con un secado a 105 °C durante 30 minutos 39,67%. La reducción de peso notable de los pellets se

debe a la condición de secado utilizado ya que con un secado de 105 °C por 4 horas se ha logrado eliminar la humedad ya que se ha evaporado por completo el agua presente en los pellets fabricados por otro lado, con un secado natural no se logra eliminar el agua presente en los pellets lo que hace que su humedad sea más alta.

3.2.4 Análisis de humedad por reducción de masa promedio

La figura 3.2 representa la reducción de las masas de acuerdo con la temperatura y el tiempo de secado, se realizó un promedio de los 10 pellets de cada una de las condiciones de secado para realizar el respectivo análisis de la humedad por reducción de masa.

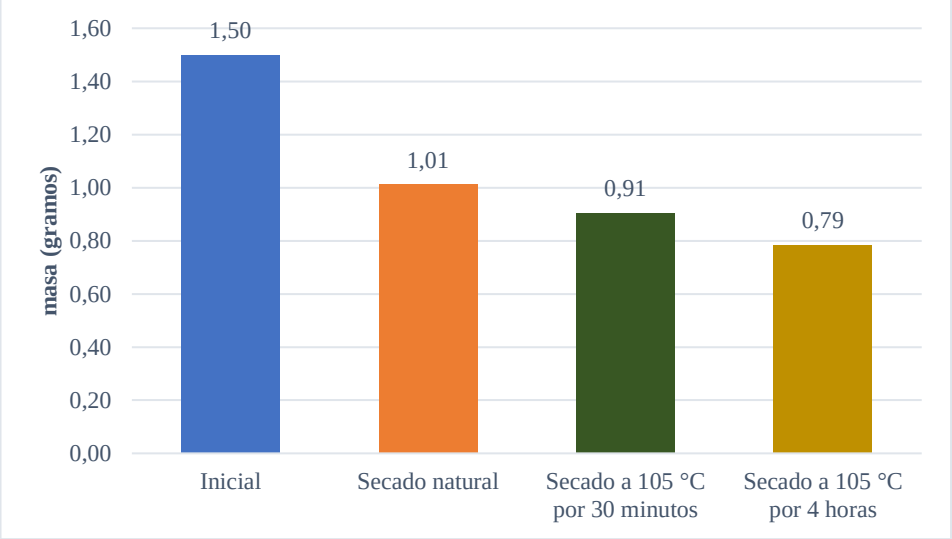


Figura 3.2.- Comparación reducción de masa

Análisis

Se pudo notar que las masas disminuyen notablemente según el tiempo y temperatura de secado. En la gráfica se puede observar que los pellets secados a 105 °C por 4 horas reducen su masa notablemente en comparación con los pellets con un secado natural a temperatura ambiente, por lo tanto, el proceso de secado mencionado por la norma UNE EN 14774, es eficiente ya que la norma detalla que se seque la biomasa hasta que su peso no varie.

La masa se reduce de 1,5 gramos iniciales a un máximo de 0,79 gramos lo cual es muy importante ya que de esto depende el contenido de humedad. Los pelles secados a temperatura de 105°C por 4 horas contienen un contenido de humedad menor ya que se toma como referencia que todas los pellets tienen un porcentaje de humedad inicial

del 48%, mezclado el aserrín y el aglutinante. Se toma el 48% ya que la masa final después del mayor tiempo y temperatura de secado no varía por ende se calcula la humedad inicial con la masa de 1.5 gramos y la humedad final con 0.79 gramos.

El contenido de humedad presente en los pellets es muy importante ya que de este depende la temperatura generada, duración de llama, porcentaje de ceniza durante su combustión. Con un contenido de humedad alto como se ha mostrado en los pellets con un secado natural a temperatura ambiente por 24 horas se pierden las características de combustión que estos presentan. De acuerdo con la información encontrada en la web con un porcentaje de humedad inferior al 10% se logran aprovechar de manera eficiente las características de combustión de los pellets de madera. Con el proceso de secado de 105 °C por 30 minutos y 4 horas se ha obtenido porcentajes de humedad de 8,33% y 0,33% porcentajes que están dentro de lo establecido por normas con estos porcentajes se ha obtenido mejores características de combustión que se presentan a continuación.

3.3 Análisis de combustión de pellets

Se presenta el análisis de los cambios dinámicos de la estructura y la estabilidad de la llama de los pellets al ser sometidos al proceso de combustión, para el respectivo análisis se realizó un video individual del proceso de combustión de cada uno de los pellets en este caso se realizaron tres videos para analizar la influencia del tiempo de secado y temperatura de secado al ser quemados. La combustión de los pellets se caracterizó en dos regímenes: combustión con llama y conversión de carbón (carbonización).

La combustión con llama se consideró desde el momento en que se insertó el pellet en el lugar donde fue quemado hasta el momento en que desapareció la llama alrededor del pellet. Por lo tanto, en realidad incluye calentamiento, secado y combustión con llama. La carbonización se consideró desde el momento en que la llama de alrededor del pellet desapareció hasta el momento en que el carbón dejó de brillar. Se muestra un historial típico de pérdida de masa de una solo pellet junto con la apariencia visual en cada régimen. Además, la partícula de carbón que brilló durante la combustión muestra que estaba produciendo una combustión en la partícula de carbón.

3.3.2 Análisis de combustión del pellet secado a 105 °C por 4 h

La figura 3.3 representa el proceso de combustión del pellet de aserrín secado a una temperatura de 105 °C durante 4 horas.

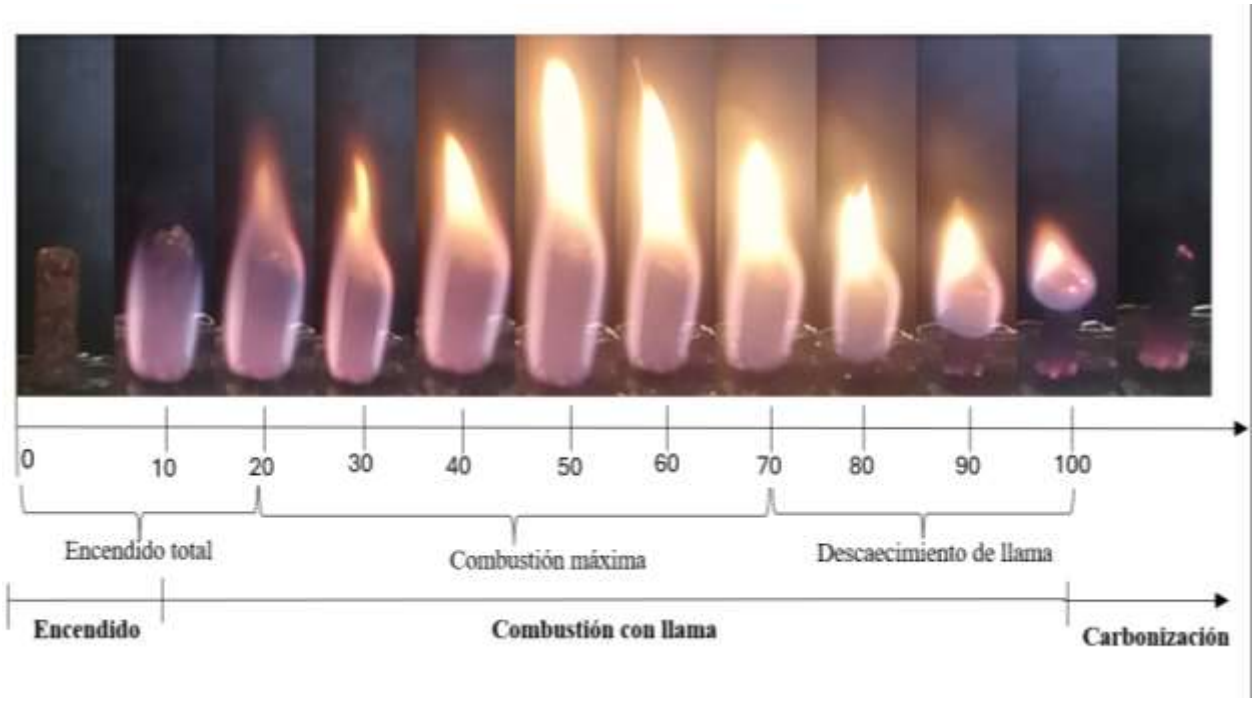


Figura 3.3.- Combustión de pellet secado a 105°C por 4 h

Análisis

Se pudo observar que la llama para esta condición de secado es alta pero su contenido de masa se reduce en menor tiempo debido a que su combustión es óptima y eficiente, el tiempo del punto más alto de la llama se mantuvo por 30 segundos, además se pudo observar que el encendido de esta pellet es rápido y su combustión es total. Gracias a la condición de secado de este pellet se ha obtenido una combustión con llama de mayor tiempo por ende la temperatura generada será superior.

La figura 3.4 representa la reducción de peso del pellet secado a 105 °C por 4 horas respecto del tiempo de combustión total. El peso inicial de este pellet es de 0,79 gramos por ende el tiempo para este valor 0 segundos debido a que la combustión aun no inicia.

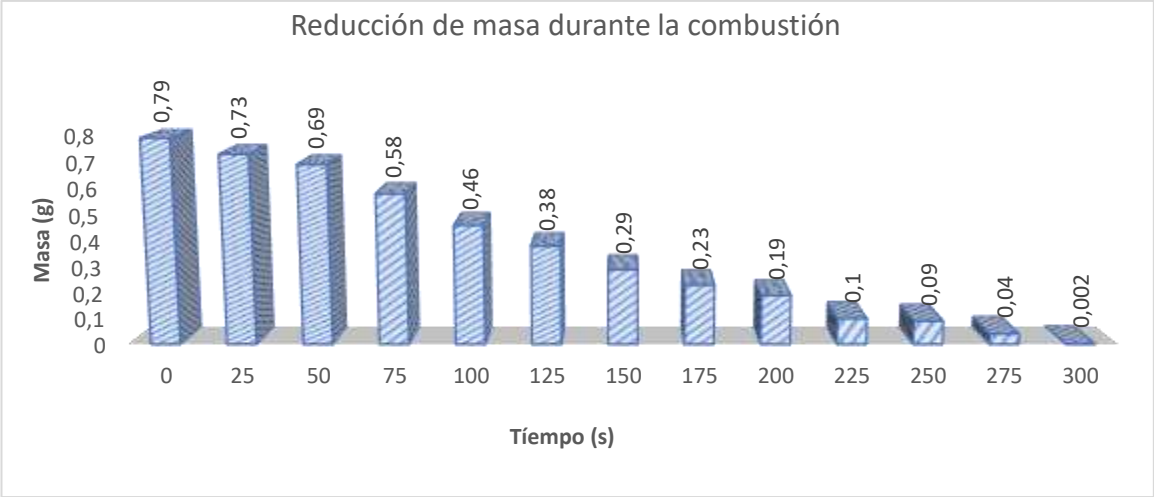


Figura 3.4.- Masa de pellet vs tiempo de combustión

Análisis

La combustión con llama fue de 100 segundos y la combustión sin llama conocida como carbonización fue de 200 segundos hasta obtener solo ceniza lo que quiere decir que este pellet en su combustión total dura aproximadamente 300 segundos. La mayor parte de la masa se liberó durante la combustión con llama y el inicio de la carbonización obteniendo una reducción de masa de 0,79 gramos a 0,38 gramos. Después de la combustión completa se obtiene un valor de 0.002 gramos, este valor representa el contenido de ceniza.

3.3.3 Análisis de combustión del pellet secado 105 °C por 30 min

En la figura 3.5 se puede observar el proceso de combustión del pellet secado por 30 minutos a una temperatura de 105 °C.



Figura 3.5.- Combustión de pellet secado a 105°C por 30 minutos

Análisis

Esta combustión fue parecida a la anterior pero la altura de llama fue menor y no se mantuvo por mucho tiempo en su punto máximo. Se observó poca cantidad de humo al finalizar su llama, a pesar de su combustión casi completa genera pérdida de calor debido a que no se termina de quemar en forma de llama por lo que el calor disminuye notablemente. El encendido completo del pellet es de 20 segundos, en este pellet como su combustión con llama es de 80 segundos el calor total generado será menor a comparación del pellet secado a 105°C por 4 horas por lo tanto las temperaturas que generarían serán menores ya que a partir de la carbonización se obtienen temperaturas bajas debido a la no presencia de la llama.

En la figura 3.6 se puede notar la reducción de peso durante la combustión del pellet respecto al tiempo. El peso de la masa inicial para este análisis es de 0.91 gramos que corresponde a los pellets secados a 105 grados por 30 minutos

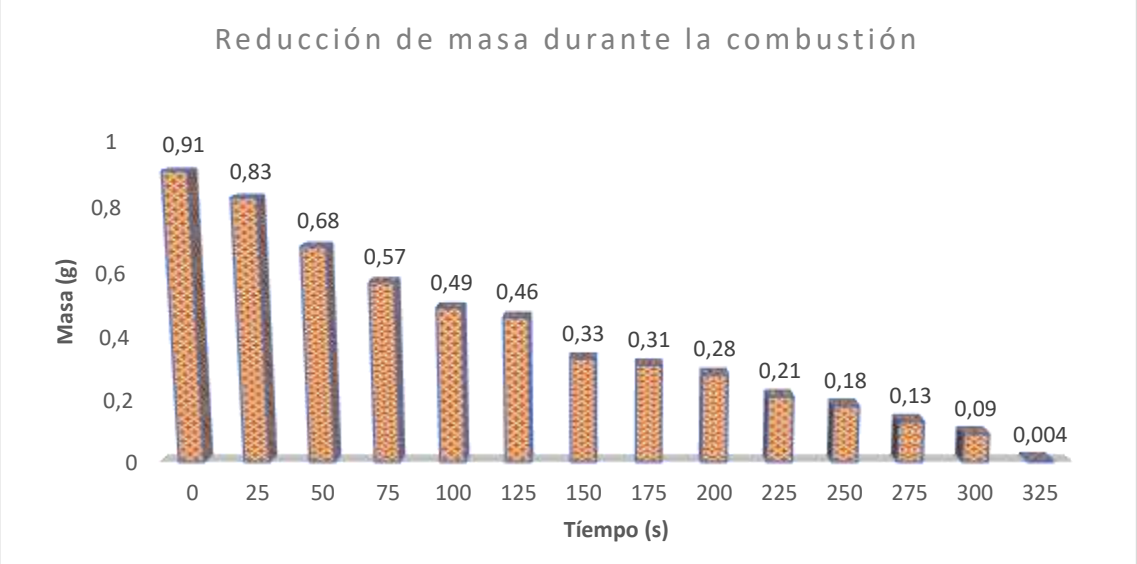


Figura 3.6.- Reducción de masa de pellet vs tiempo de combustión

Análisis

La combustión con llama fue de 80 segundos y la combustión sin llama conocida como carbonización fue de 245 segundos hasta obtener solo ceniza lo que quiere decir que este pellet en su combustión total dura aproximadamente 325 segundos. A diferencia del pellet secado a 105 °C por 4 horas en este pellet el tiempo de combustión con llama

se redujo debido al contenido de humedad. Después de la combustión total se obtiene un contenido final de ceniza de 0.004 gramos.

3.3.4 Análisis de combustión del pellet con secado natural 24 h

La figura 3.7 representa el proceso de combustión de un pellet de aserrín secado a temperatura ambiente por 24 horas, en la cual se puede observar que la llama del pellet es de baja intensidad debido a que el contenido de humedad es muy alto.



Figura 3.7.- Combustión de pellet secado a temperatura ambiente por 24 h

Análisis

Durante la combustión del pellet se pudo observar una generación de humo superior a los demás pellets analizadas con anterioridad, a pesar de que su combustión es casi completa debido al calor generado por el pellet su combustión no es óptima, además de presentar un encendido lento y complicado, la masa inicial del pellet disminuye lentamente debido a su mala combustión. Como se logra observar en la imagen su combustión no genera llama, sino que mantiene el pellet en combustión por carbonización debido a que en el centro del pellet todavía existe humedad.

En la figura 3.8 se puede notar la reducción de peso durante la combustión del pellet respecto al tiempo. El peso de la masa inicial para este análisis es de 1,02 gramos que corresponde a los pellets secados a temperatura ambiente por 24 horas denominado secado natural.

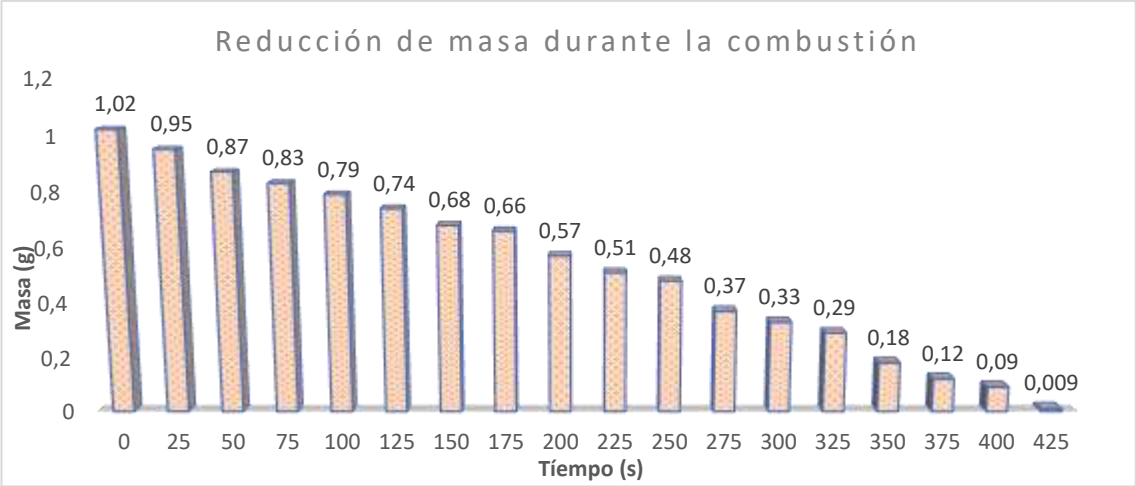


Figura 3.8.- Reducción de masa de pellet vs tiempo de combustión

En el pellet con secado natural la combustión fue deficiente iniciando desde su difícil encendido ya que para encender se necesitó más tiempo, como ya se mencionó anteriormente no generó mucha llama, entonces su proceso de combustión total se realizó en 425 segundos, obteniendo como combustión con llama de 40 segundos el resto del tiempo se mantuvo al rojo vivo realizando carbonización y generando humo. Debido a su mala combustión en este pellet existen inquemados razón por la cual su masa final es de 0.009.

3.3.5 Análisis de combustión de las tres muestras

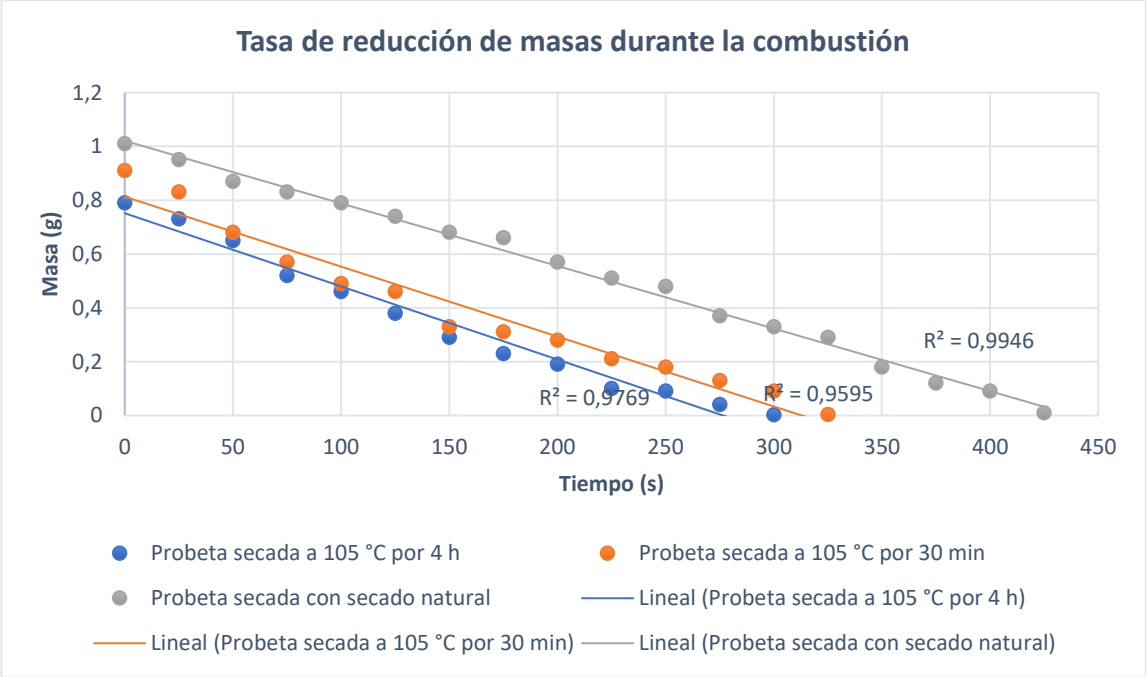


Figura 3.9.- Comparación de combustión de pellets

Análisis

Caso I. La combustión del pellet secado a 105 °C por 4 horas es la de mayor tiempo con llama y mayor pérdida de masa como se muestra en la figura 3.9, su combustión es total presentando una llama más alargada por ende temperaturas más altas y de larga duración, debido a que este pellet posee un contenido de humedad adecuado. Se logró una combustión total de la masa inicial lo cual reduce el contenido de ceniza y la generación de humo evitando así que la eficiencia de quemado del pellet se reduzca.

Caso II. En el pellet secado a 105°C por 30 minutos su tiempo de combustión total es mayor a la del caso I, sin embargo, la llama de este pellet es menor y la duración de la llama es inferior ya que su combustión con llama es de 80 segundos es decir que se redujo 20 segundos en comparación con el caso I. Su combustión es mayor pero la generación de calor menor ya que se consumió el pellet más en carbonización

Caso III. El pellet con secado natural a temperatura ambiente es la que mayor tiempo de combustión en comparación a la combustión de los otros pellets. La reducción de peso en masa a comparación con las otras condiciones de secado es baja, sin embargo, este pellet al presentar un contenido de humedad alto su combustión no es la adecuada ya que se genera humo en exceso debido a la cantidad de agua presente en el pellet. A pesar de que su combustión es la que más tiempo duro la temperatura generada es menor a diferencia de los otros casos. La mayoría del tiempo permaneció realizando una combustión por oxidación de carbón, por lo tanto, su contenido de ceniza y humo fueron mayores lo que genera pérdidas en la eficiencia del pellet.

3.4 Análisis de cenizas

Tabla 3.5 Contenido de cenizas

Condición de secado	Masa inicial (g)	Masa final (g)	Humedad (%)	Ceniza (%)
150 °C por 4 h	0,79	0,002	0,67	0,25
150 °C por 30 min	0,91	0,004	8,67	0,48
Secado natural	1,02	0,009	16,00	1,05

Fuente: Autor

La tabla 3.11 representa el contenido de ceniza obtenido después de la combustión de cada una de los pellet con diferentes condiciones de secado. Para calcular el porcentaje de cenizas se utilizó la masa inicial, la masa final y la humedad incógnitas encontradas anteriormente.

Análisis

Los pellets con secado a 105 °C por 4 horas tuvieron una pérdida de masa casi total esto se debe a que su contenido de humedad es de 0,67%, como su combustión fue más completa y eficiente su contenido de ceniza es de 0,25%. El mayor contenido de ceniza es de 1.05% que corresponde al pellet con secado natural a temperatura ambiente su alto porcentaje se debe a la presencia de inquemados debido a su mala combustión y presencia de inquemados. En general el contenido de humedad se relaciona con el contenido de cenizas ya que con un proceso de secado adecuado el contenido de ceniza se reduce notablemente.

3.5 Análisis de volátiles

Tabla 3.6 Contenido de volátiles

Condición de secado	Masa inicial (g)	Masa final (g)	Humedad (%)	volátiles (%)
150 °C por 4 h	2	1,53	0,67	76,34
150 °C por 30 min	2	1,56	8,67	75,91
Secado natural	2	1,58	16,00	75,00

Fuente: Autor

La tabla 3.12 indica los valores de los 3 pellet en la que se describe el proceso de obtención del contenido de volátiles para lo cual se tomó pellets trituradas con una masa inicial de 2 gramos. La masa inicial fue introducida en un crisol a un horno para someterse a 900 °C por 7 minutos.

Análisis

Los pellets con un porcentaje de humedad de 0,67% y una reducción de masa de 0, 47 gramos es la que mayor contenido de volátiles tiene con un porcentaje de 76,34%, lo que refiere a que existe una combustión eficiente y rápida. Aquellos pellets con un porcentaje de volátiles de 75,91% sugiere que su combustión también es menos eficiente a comparación de los pellets con secado de 105°C por 4 horas. Los pellets con secado natural son los que menor contenido de volátiles presentan con un porcentaje de 75% lo que significa que su combustión es inadecuada debido su contenido de humedad alto lo que significa que todavía existía presencia de agua en el pellet.

3.6 Contenido de carbono fijo

Tabla 3.7 Contenido de carbono fijo

Condición de secado	Cenizas (%)	Volátiles (%)	Carbono fijo (%)
150 °C por 4 h	0,25	76,34	23,40
150 °C por 30 min	0,48	75,91	23,61
Secado natural	1,05	75,00	23,95

Fuente: Autor

El contenido de carbono fijo del pellet 3 de 23,95% nos indica que su encendido es más lento a comparación de los otros pellets, generando una llama de menor intensidad, los otros 2 pellets generan mayor llama y poca duración. Sin embargo, los porcentajes de carbono fijo de los tres pellets son muy similares como se observa en la tabla, solo hay una pequeña variación en sus resultados, esta pequeña variación nos indica que los pellets tienen un mismo proceso de fabricación, pero con diferentes porcentajes de humedad. Entonces los pellets tienen la capacidad de liberar energía de manera sostenida lo que conlleva a obtener una eficiencia energética buena debido a las propiedades de combustión que el aserrín de eucalipto ofrece.

3.7 Reacción estequiométrica para la oxidación completa de un combustible

$$C_nH_m + \left(n + \frac{m}{4}\right)(O_2 + 3{,}76N_2) \rightarrow nCO_2 + \frac{m}{2}H_2O + 3{,}76\left(n + \frac{m}{4}\right)N_2$$

Masa atómica de atómica de los elementos para 100g de pellets

Tabla 3.8 Análisis elemental del aserrín de eucalipto

Elemento	% masa	Mol/100g pellets	mol/mol C
Carbono	50,00	4,17	1,00
Hidrógeno	6,00	6,00	1,44
Oxígeno	43,00	2,68	0,64
Nitrógeno	1,00	0,071	0,017

La fórmula para describir el pellet de aserrín de madera

$$CH_{1,44}N_{0,017}O_{0.64}$$

Reacción sin exceso de aire

$$CH_{1,44}N_{0,017}O_{0.64} + a(O_2 + 3{,}76N_2) \rightarrow CO_2 + \frac{1.44}{2}H_2O + 3{,}76a\ N_2 + b\ NO$$

$$CH_{1,44}N_{0,017}O_{0.64} + a(O_2 + 3{,}76N_2) \rightarrow CO_2 + 0{,}72H_2O + 3{,}76a\ N_2 + b\ NO$$

$$O = 0{,}64 + 2a \rightarrow 2 + 0.72 + b$$

$$N = 0{,}017 + 7{,}52a \rightarrow 7.52a + b$$

$$0{,}017 \rightarrow b$$

$$b = 0{,}017$$

$$O = 0{,}64 + 2a \rightarrow 2 + 0.72 + 0{,}017$$

$$2a \rightarrow 2 + 0.72 + 0{,}017 - 0{,}64$$

$$2a \rightarrow 2{,}097$$

$$a \rightarrow \frac{2{,}097}{2}$$

$$a = 1{,}048$$

$$CH_{1,44}N_{0,017}O_{0.64} + 1{,}048(O_2 + 3{,}76N_2) \rightarrow CO_2 + 0{,}72\ H_2O + 3{,}76(1{,}048)\ N_2 + 0{,}017NO$$

$$CH_{1,44}N_{0,017}O_{0.64} + 1{,}048(O_2 + 3{,}76N_2) \rightarrow CO_2 + 0{,}72\ H_2O + 3{,}94\ N_2 + 0{,}017NO$$

Reacción con exceso de aire

$$CH_{1,44}N_{0,017}O_{0.64} + a(O_2 + 3{,}76N_2) \rightarrow CO_2 + \frac{1.44}{2}H_2O + 3{,}76a\ N_2 + b\ NO + c\ O_2$$

$$CH_{1,44}N_{0,017}O_{0.64} + a(O_2 + 3{,}76N_2) \rightarrow CO_2 + 0{,}72\ H_2O + 3{,}76a\ N_2 + b\ NO + c\ O_2$$

Donde:

$$a = \left(n + \frac{m}{4}\right) = \left(1 + \frac{1{,}44}{4}\right) = 1{,}36$$

$$b = N = 0.017$$

$$c = \frac{0{,}64}{2} = 0{,}32$$

Relación estequiométrica de los pellets de madera de eucalipto con exceso de aire.

$$CH_{1,44}N_{0,017}O_{0.64} + 1{,}36(O_2 + 3{,}76N_2) \rightarrow CO_2 + 0{,}72\ H_2O + 3{,}76(1{,}36)\ N_2 + 0{,}017NO + 0{,}32\ O_2$$

$$CH_{1,44}N_{0,017}O_{0.64} + 1{,}36(O_2 + 3{,}76N_2) \rightarrow CO_2 + 0{,}72\ H_2O + 5{,}114\ N_2 + 0{,}017NO + 0{,}32\ O_2$$

Masa de pellet

$$m_{pellet} = 12 + 1.44(1) + 0.64(12) + 0.017(14)$$

$$\boldsymbol{m_{pellet} = 21{,}36\ \frac{kg}{kmol}}$$

Relación aire - combustible

$$AC = \frac{masa\ de\ aire\ (aire\ atmosférico)}{masa\ combustible(pellet)}$$

$$m_{aire} = 1.36\big((16 * 2) + (3.76 * 14 * 2)\big)$$

$$AC = \frac{1{,}36(32 + 3{,}76 * 28)}{1\ \ (21{,}36)}$$

$$AC = \frac{186{,}70}{21{,}36}$$

$$\boldsymbol{AC = 8{,}74}$$

Porcentaje CO_2 producido

$$V_{TOT} = 7{,}17$$

$$\%\, CO_2 = \frac{1}{7{,}17}$$

$$\%\, \boldsymbol{CO_2 = 13{,}95}\ \%$$

De acuerdo con la composición del aserrín del eucalipto se ha obtenido la siguiente forma química $CH_{1,44}N_{0,017}O_{0.64}$ que representa a los pellets elaborados. Se obtuvo una relación aire combustible de 8,74 y un porcentaje de $\%\, CO_2$ de 13,95%.

3.8 Temperatura y características geométricas de llama

Se presenta las imágenes termográficas por cada condición de secado.

Secado a 105 °C por 4 horas



$t = 10$ $t = 20$ $t = 40$ $t = 60$

Figura 3.10.- Imágenes termográficas tomadas de pellets con secados de 105°C por 4 horas

Secado a 105 °C por 30 minutos



$t = 10$ $t = 20$ $t = 40$ $t = 60$

Figura 3.11.- Imágenes termográficas tomadas de pellets secados de 105°C por 30 minutos

Secado natural (temperatura ambiente) por 24 horas



$t = 10$ $t = 20$ $t = 40$

Figura 3.12.- Imágenes termográficas tomadas de pellets con secado natural

En la tabla 3.1 compara las características geométricas (área y altura) y temperatura de la llama a tiempos determinados, durante la combustión con llama de las tres muestras (pellet con secado natural, pellet secado a 105 °C por 30 minutos y pellet secado a 105°C por 4 horas.

Tabla 3.9 Comparación de las características de llama

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL Y MECÁNICA
INGENIERIA MECÁNICA

FICHA DE RECOLECCIÓN DE DATOS

Características geométricas de llama

Realizado por:	Sanchez Castro Felix Xavier	**Fecha de ejecución**	09/09/2024
Lugar:	Laboratorio FCIM (Universidad técnica de Ambato)		
Equipo:	Cámara termográfica	**Software:**	Digimizer

RESULTADOS

T (s)	Secado natural (24h)		Secado a 105 °C (30min)		Secado a 105 °C (4h)	
	Geometría	**Datos**	**Geometría**	**Datos**	**Geometría**	**Datos**
10		**Área**		**Área**		**Área**
		0.31 cm^2		0.73 cm^2		0.76 cm^2
		Altura		**Altura**		**Altura**
		1.41 cm		2.24 cm		3.32 cm
		Temperatura		**Temperatura**		**Temperatura**
		515 °C		468 °C		516 °C
20		**Área**		**Área**		**Área**
		0.54 cm^2		1.17 cm^2		1.30 cm^2
		Altura		**Altura**		**Altura**

		2.63 cm **Temperatura** 546 °C		3.38 cm **Temperatura** 525 °C		3.73 cm **Temperatura** 528 °C
40		**Área** 0.69 cm^2 **Altura** 2.67 cm **Temperatura** > 580 °C		**Área** 1.31 cm^2 **Altura** 3.32 cm **Temperatura** 560 °C		**Área** 1.87 cm^2 **Altura** 3.93 cm **Temperatura** 549 °C
60		No presenta llama		**Área** 1.11 cm^2 **Altura** 2.45 cm **Temperatura** > 580 °C		**Área** 1.69 cm^2 **Altura** 3.41 cm **Temperatura** > 580 °C

Fuente: Autor

Análisis

Los pellets con secado natural generan una llama pequeña, por ende, una área y altura reducida. Debido a la presencia de agua, parte de la energía presente en el pellet es utilizada para evaporar el agua presente, por lo que la altura y el área de estos pellets son limitados. El área de los pellets secados a 105 °C por 30 minutos llega a un máximo de 1.31 cm^2 y un mínimo de 0.73 cm^2, por otro lado, el área de los pellets a 105 °C por 4 horas va desde los 0.76 cm^2 hasta 1.87 cm^2. En cuanto a las alturas de las muestra sus valores máximos son 3.38 cm y 3.93 cm respectivamente. La duración de la llama de los pellets secados a 105°C es mayor a la muestra con secado natural y presentan temperaturas duraderas alcanzando los 580 °C en los 60 segundos de haber iniciado su combustión. Se puede afirmar que hay más tiempo de duración de la llama los pellets con secado a 105 °C, debido a que su combustión es más eficiente y el calor generado es considerado como generación de energía totalmente ya que en estos pellets el calor no se utiliza para terminar de evaporar el agua. Los pellets con secado natural generaron una llama pequeña y área reducidas, por ende, en estos pellets hay una combustión menos eficiente debido al alto contenido de humedad, el tiempo de

duración de llama alcanza los 40 segundos. La mayor parte de su calcinación se da por carbonización es decir sin presencia de llama, en esta muestra se observó mayor contenido de inquemados.

3.9 Cantidad de CO

Tabla 3.10 Cantidad de CO

Condición de secado	CO (ppm)
150 °C por 4 h	207
150 °C por 30 min	225
Secado natural	272

Fuente: Autor

El contenido de CO de los pellets secados a 150 °C por 4 horas es de 207 ppm indican que su combustión es más eficiente lo que sugiere una mejor combustión. Por otro lado, los pellets con secado natural contienen un contenido de CO de 272 ppm indicando una combustión menos completa lo que conlleva a obtener menor liberación de calor durante su combustión debido a la presencia de inquemados y humos que generan una mayor producción de contaminantes, este valor se debe al alto contenido de humedad factor que incrementa la producción de CO como se puede observar en los valores obtenidos a menor contenido de humedad menor contenido de CO y a mayor contenido de humedad mayor contenido de CO.

3.10 Verificación de Hipótesis

3.10.2 Hipótesis

En la fabricación de pellets a partir del aserrín de eucalipto la temperatura y el tiempo de secado mejorara la duración de llama, la temperatura de llama y las características geométricas de llama.

3.10.3 Comprobación

El estudio realizado en el presente proyecto compara como los parámetros de fabricación de pellets de aserrín de eucalipto intervienen en su combustión, se ha comprobado que el porcentaje de humedad es muy importante ya que de este porcentaje depende una correcta combustión. Se trabajó con partículas de aserrín menores a 3mm para obtener pellets de 9,5 mm de diámetro y una longitud de entre 23 y 25 mm.

Para el caso de la temperatura y tiempo de secado las características de combustión cambian notablemente ya que como se pudo observar los pellets secado a una temperatura de 105 °C por 4 horas son los que mejores características de combustión posee debido a que presenta una llama prolongada y uniforme generando así una temperaturas mayores a 580 °C, un contenido de ceniza de 0.24%, contenido de volátiles 76,34%, y un reducido contenido de CO.

De acuerdo con los resultados obtenidos se puede afirmar que a mayor temperatura y tiempo de secado se obtiene mejoras en la duración de llama, temperatura de la llama y las características geométricas de llama, como se detalla en el contenido de la tabla 3.11

Tabla 3.11 Verificación de hipótesis

Condiciones de secado de pellets					
Secado con temperatura ambiente por 24 horas		Secado a 105 °C por 30 minutos		Secado a 105 °C por 4 horas	
Duración de llama					
Tiempo:	40 segundos	**Tiempo:**	80 segundos	**Tiempo:**	100 segundos

Temperatura máxima de llama					
>580 °C en 40 segundos		>580 °C en 60 segundos		>580 °C en 60 segundos	
Características geométricas de llama					
Área:	0.69 cm^2	**Área:**	1.31 cm^2	**Área:**	1.87 cm^2
Longitud:	2,67 cm	**Longitud:**	3,32 cm	**Longitud:**	3,93 cm

Así se valida la hipótesis planteada de que: En la fabricación de pellets a partir del aserrín de eucalipto la temperatura y el tiempo de secado mejorara la duración de llama, la temperatura de llama y las características geométricas de llama.

CAPÍTULO IV

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

- En la industria de peletizado de residuos de madera existen sistemas de peletizados manuales y semiautomáticos. Los sistemas manuales de peletizado consisten en la compactación del aserrín mediante la aplicación de presión sobre matrices obtenidas previamente, este sistema es considerado manual debido al empleo del hombre durante el proceso de producción de pellets. En los sistemas semiautomáticos se ejerce presión mediante rodillos que están situados sobre matrices metálicas con orificios de tamaños determinados, este proceso se realiza mediante el empleo de motores eléctricos, lo cual hace girar los rodillos a diferentes velocidades generando así temperaturas altas que compactan el aserrín de manera automática produciendo así los pellets.
- Los parámetros de fabricación con los que se trabajó en el análisis de este trabajo experimental fueron la temperatura y tiempo de secado de los pellets de aserrín de eucalipto, se elaboraron pellets con partículas de aserrín menores a 3mm y una presión de compactación de 30 bares. El porcentaje de humedad juega un rol importante durante el proceso combustión de los pellets, se calculó el porcentaje de humedad en relación a la disminución del peso, obteniendo que una masa inicial de 1,5 gramos tiene un contenido de humedad inicial de 48%, después de las condiciones de secado aplicadas se obtuvo que con un tiempo de secado de 24 horas al aire libre se obtiene un porcentaje de humedad del 16%, y con una temperatura de 105 °C por 30 minuto y 4 horas se ha obtenido porcentajes de humedad de 8,67% y 0,67% respectivamente.
- Mediante un análisis visual y medición termográfica no invasiva se realizó un seguimiento al comportamiento de combustión de los pellets obteniendo que con un secado de 105 °C por 4 horas se genera un área de llama máxima de 1,87 cm^2 que a comparación con el área del pellet con secado natural 0,69 cm^2 es mucho más optima. No solo el área es la óptima en el pellet secado a 105 °C también la temperatura en este pellet alcanza los 580°C en los 60 segundos concluyendo que la combustión es óptima para este pellet debido a que la temperatura del pellet con secado natural alcanza los 580 °C en 40 segundos lo

que lo hace una combustión deficiente debido a la rápida desaparición de la llama.

- El contenido de volátiles que se determino va desde 75% hasta 76,34%, este análisis es muy importante ya que de este depende las características de la llama. El porcentaje de cenizas del pellet con secado natural es de 1.05%, este porcentaje es el más alto a comparación de los pellets secados a 105 °C por 4 horas y 30 minutos ya que sus porcentajes de cenizas son de 0,25% y 0,48% respectivamente. Con las características de combustión mencionadas se concluye que con un proceso de secado de 105°C por 4 horas y 30 minutos se puede obtener energía de manera más eficiente ya que se reducen las emisiones que se generan durante la combustión. La forma de representar a los pellets de aserrín de eucalipto es $CH_{1,44}N_{0,017}O_{0.64}$, la relación aire-combustible para la combustión de pellets es de 8,33, el porcentaje de CO_2 producido durante la combustión es de 13% indicando una adecuada liberación de energía.
- Durante la combustión total de los pellets se consideraron las siguientes etapas: el encendido, la combustión con llama y la carbonización. Los pellets que con un secado de 105°C por 4 horas presentan un encendido total de 20 segundos, una combustión máxima de 50 segundos, un descaecimiento de llama de 30 segundos. Por otro lado, los pellets con un secado de 105°C por 30 minutos presentaron una combustión máxima durante 40 un descaecimiento de llama de 20 segundos. Debido a la presencia alta de humedad en los pellets secados naturalmente su tiempo de combustión con llama es de 40 segundos sin embargo su tiempo de carbonización es mayor en comparación con las demás condiciones de secado de pellets. Se concluye que con un adecuado proceso secado se obtiene un liberación de energía más eficiente logrando reducir la generación de inquemados que provocan el incremento de contaminantes por ende la disminución de la eficiencia de la combustión.

4.2 Recomendaciones

- Para una adecuada construcción del sistema de compactación manual es muy importante tener los respectivos planos de fabricación para evitar errores en el proceso de mecanizado, además se debe considerar la elección del material para la elaboración de la matriz para obtener las respectivas herramientas de mecanizado ya que si no se sigue las recomendaciones mencionadas conlleva a obtener pérdidas económicas.
- Se debe seleccionar previamente la materia prima ya que el aserrín debe ser de buena calidad, por ello se recomienda realizar el respectivo tamizaje para eliminar las partículas indeseables.
- La adición de aglutinantes durante el proceso de fabricación de pellets de aserrín de eucalipto permite una buena adición de las partículas evitando así la desintegración de los pellets durante los procesos de manipulación y transporte.
- Se recomienda seguir investigando los diversos procesos de obtención de combustible sólido para seguir buscando mejoras de la eficiencia energética de los pellets ya que esto ayudara a reducir las emisiones durante la combustión.
- Se recomienda realizar nuevas exploraciones con nuevos tipos de biomasa y aglutinantes que puedan mejorar aún más las propiedades de los pellets a base de aserrín de eucalipto.
- Se debe desarrollar nuevos experimentos que simulen las condiciones reales de la combustión de pellets, como calderas y estufas.

BIBLIOGRAFÍA

[1] H. Fernández-Puratich, V. Oliver-Villanueva, M. Valiente, S. Verdú, and N. Albert, "Desarrollo de pellets Pellets development from three woody species under Mediterranean conditions," *Madera y Bosques*, vol. 20, no. 3, pp. 1–16, 2014, doi: 97-111.

[2] Aguinalde González Garry and Rodríguez Bosque Pucciarelli, "Producción de Pellet de madera a base de residuos y subproductos de la industria forestal," Univeridad Tecnologica Nacional, Argentina, 2019.

[3] P. Casanova Treto, "Propiedades térmicas y fisicoquímicas de pellets con fines energéticos elaborados a partir de residuos de aserradero Thermal and physiochemical properties of pellets with power aims made of sawmill residual product," 2017. Accessed: Jan. 13, 2024. [Online]. Available: https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/ingenieria/article/download/25852/28825/81047

[4] M. A. Romero-Mendoza, K. Y. Palacios-Vallejos, E. Rosero-Delgado, and G. Latorre-Castro, "Optimización de las propiedades mecánicas y estructurales de biocombustibles sólidos a partir de biomasa lignocelulósica," *Revista Científica INGENIAR: Ingeniería, Tecnología e Investigación*, vol. 4, no. 8, pp. 144–156, Jul. 2021, doi: 10.46296/ig.v4i8.0032.

[5] A. Portero, "ANÁLISIS TÉRMICO DEL PROCESO DE PELETIZADO DEL ASERRÍN DE MADERA DE EUCALIPTO (EUCALIPTUS GLOBULUS LABILL) Y COPAL (DACRYODES OLIVIFERA CUATRECASAS) Y SU INFLUENCIA SOBRE LA FRIABILIDAD DE LOS PELLETS," Universidad Técnica de Ambato, 2014.

[6] W. Sailema, "ANÁLISIS DEL PROCESO DE SECADO DE ASERRÍN DE MADERA DE EUCALIPTO CON LÁMPARAS INFRARROJAS PARA REDUCIR EL GRADO DE HUMEDAD," Universidad Técnica de Ambato, 2021.

[7] J. Candela and L. Lozano, "CARACTERIZACIÓN DE UN SISTEMA DE COMBUSTIÓN A BASE DE PELLETS DE BORRA DE CAFÉ PARA LA OPERACIÓN DE LA CALDERA PIROTUBULAR DIDÁCTICA DE LA

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA," Fundación Universidad de América , 2022.

[8] I. Esteban, "Análisis y caracterización de la combustión de pélets en una caldera Solarfocus TII30 de llama invertida," Universidad de Valladolid, 2014.

[9] La Cal José, *Energía de la biomasa y el agua*, Primera. Elearning S.L., 2020.

[10] Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, *MANUAL DE ENERGÍAS RENOVABLES 2. Energia de la biomasa*, IDAE. Madrid, España, 2007. Accessed: Apr. 24, 2024. [Online]. Available: https://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_10374_Energia_de_la_biomasa_07_28e17c9c.pdf

[11] F. S. Nogués, A. Rezeau, and F. S. Nogués, "Energía de la biomasa. Vol. I," pp. 10–27, 2010, Accessed: Apr. 08, 2024. [Online]. Available: https://elibro.net/es/lc/ucc/titulos/44858

[12] "Residuos agrícolas y forestales - Ambientum." Accessed: Apr. 27, 2024. [Online]. Available: https://www.ambientum.com/enciclopedia_medioambiental/articulos-energia/residuos_agricolas_y_forestales.asp

[13] R. E. Guzmán, E. Albornoz Vintimilla, E. Santiago, and M. Palacios, "ATLAS BIOENERGÉTICO DEL ECUADOR," 2014.

[14] A. LÓPEZ and Ó. LUMBRERAS, "Biomasa y cultivos energéticos." Accessed: May 25, 2024. [Online]. Available: https://www.upa.es/_clt/lt_cuadernos_9/pag_032-035_mendiburu.pdf

[15] B. Velázquez-Martí *et al.*, "Eucalipto en Ecuador," *Guía de cultivos energéticos en latinoamérica*, pp. 4–13, 2020, Accessed: Apr. 08, 2024. [Online]. Available: https://iberomasacyted.blogs.upv.es/files/2020/01/Gu%C3%ADa-de-Cultivos-Energ%C3%A9ticos-en-Latinoam%C3%A9rica-en-proceso.pdf

[16] N. Serret-Guasch, G. Giralt-Ortega, and M. Quintero-Ríos, "Caracterización de aserrín de diferentes maderas," *Tecnología Química*, vol. 36, no. 3, pp. 395–405, 2016, Accessed: Apr. 08, 2024. [Online]. Available:

http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2224-61852016000300012&lng=es&nrm=iso&tlng=es

[17] J. Goche, P. Domínguez, E. Montiel, and C. Palacios, “Biocmbustibles sólidos, una opción sustentable para la producción de energía,” in *BIOCOMBUSTIBLES SÓLIDOS*, Monterrey: Universidad Autónoma de Nuevo León, 2020, pp. 23–26. Accessed: Apr. 08, 2024. [Online]. Available: www.uanl.mxwww.fcf.uanl.mxwww.umich.mxwww.fitecma.umich.mx

[18] “Calefacción de pellets: ventajas y características.” Accessed: Apr. 08, 2024. [Online]. Available: https://ecoforest.com/es/blog/calefaccion-de-pellets-ventajas-y-caracteristicas/

[19] J. Pinilla, K. Luengo, M. Navarrete, and F. Navarrete, *El pellet de madera en Chile su producción, su uso y su mercado*. Instituto Forestal, 2020. Accessed: Apr. 08, 2024. [Online]. Available: https://bibliotecadigital.infor.cl/bitstream/handle/20.500.12220/30473/30473.pdf?sequence=1&isAllowed=y

[20] F. Correa-Méndez *et al.*, “Granulometric distribution in timber byproducts for potential use in pellets and briquettes,” *Rev Mex Cienc For*, vol. 5, 2014.

[21] “Análisis por tamizado Calidad hasta el último grano,” 2016. Accessed: Jun. 25, 2024. [Online]. Available: http://www.alquimialab.com/web/catalogos/retsch/catalogo-general.pdf

[22] O. Ordóñez, “EVALUACIÓN DE LA INFLUENCIA DE LA FORMULACIÓN DE COMBUSTIBLES SÓLIDOS DENSIFICADOS DE ASERRÍN DE PINO BLANCO (Pinus pseudostrobus Lindl), RECICLADO DE CARBÓN ACTIVADO Y ALMIDÓN DE YUCA (Manihot esculenta), SOBRE LAS PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS Y FISICOMECÁNICAS DE LOS COMBUSTIBLES SÓLIDOS DENSIFICADOS EN GENERAL,” Universidad de San Carlos de Guatemala , 2015.

[23] D. Rodríguez, “Vista de Pellets y briquetas a partir de biomasa generada en las plantas de beneficio del fruto de la palma de aceite,” *Boletín El Palmicultor, (504 Febrer)*, vol. 504, no. febraro, pp. 26–27, 2015, Accessed: Jun. 24, 2024.

[Online]. Available: https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmicultor/article/view/11171/11172

[24] C. : Barrera, “Combustión de biomasa: conceptos, tecnologías y aplicaciones en la agroindustria de la palma de aceite,” *Revista Palmas. Bogotá (Colombia) vol*, vol. 39, no. 4, pp. 24–44, 2018.

[25] R. Moya-Roque, A. Rodríguez-Zúñiga, C. Tenorio, J. Valdez, and J. Valaert, “Evaluación de la combustión de comprimidos cilíndricos fabricados con cultivos forestales y agrícolas en Costa Rica utilizando un quemador doméstico,” *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, vol. 13, no. 30, p. 33, Dec. 2015, doi: 10.18845/rfmk.v13i30.2458.

[26] X. Hidalgo, “La humedad en la biomasa: herramientas de medida y control,” Fundación Universidad de América, Bogotá, Colombia, 2021.

[27] J. Mata Sánchez, “OPTIMIZACIÓN DE METODOLOGÍAS PARA LA CARACTERIZACIÓN DE BIOCOMBUSTIBLES SÓLIDOS PROCEDENTES DE LA INDUSTRIA DEL OLIVAR TESIS DOCTORAL,” 2015. [Online]. Available: www.uco.es/publicaciones

[28] F. Hernández, “Cómo podemos medir la calidad del pellet de madera - Apropellets.” Accessed: Apr. 28, 2024. [Online]. Available: https://www.apropellets.com/como-podemos-medir-la-calidad-del-pellet-de-madera/

[29] EcoInventos, “Cenizas De Pellets: ¿son Buenas Para El Jardín?” Accessed: Apr. 28, 2024. [Online]. Available: https://ecoinventos.com/cenizas-de-pellets-son-buenas-para-el-jardin/

[30] I. Beltrón, H. Palacios, and E. Rosero, “Evaluación energética de biocombustibles sólidos elaborados a partir de mezclas de biomasa lignocelulósica,” *REVISTA RIEMAT*, vol. 5, pp. 33–37, 2019.

[31] J. Sebastián Arroyo-Vinueza and W. Salvatore Reina-Guzmán, “Aprovechamiento del recurso biomasa a partir de los desechos de madera para una caldera de vapor,” 2016, doi: 10.17163/ings.n16.2016.03.

[32] M. Muñoz, “CONCENTRACIÓN ÓPTIMA DE OXÍGENO EN GASES DE COMBUSTIÓN DE UNA CALDERA QUE UTILIZA BAGAZO COMO COMBUSTIBLE,” *CENCIGAÑA*, pp. 501–5013, 2013, Accessed: Nov. 03, 2024. [Online]. Available: https://cengicana.org/files/20150828053622276.pdf

[33] J. Ponce, “Valores Óptimos Combustión.” Accessed: Oct. 24, 2024. [Online]. Available: http://javiponce-formatec.blogspot.com/2016/11/valores-optimos-combustion.html

[34] M. Sanz and P. María, *Manual práctico del OPERADOR DE CALDERAS INDUSTRIALES*. Madrid, España: Paraninfo, S.A, 2014.

[35] D. Jones, D. Harper, and A. Taylor, “Wood Pellets - An introduction to their production and use,” 2007. Accessed: Oct. 24, 2024. [Online]. Available: https://utia.tennessee.edu/publications/wp-content/uploads/sites/269/2023/10/W214.pdf

[36] Afinidad electrica, “La biomasa resuelve el dilema de alimentos o combustibles – Afinidad Eléctrica.” Accessed: Oct. 24, 2024. [Online]. Available: https://afinidadelectrica.com/2020/05/19/la-biomasa-resuelve-el-dilema-de-alimentos-o-combustibles/

[37] J. F. Wehner, “Flame Processes-Theoretical and Experimental,” *Advances in Chemical Engineering*, vol. 5, no. C, pp. 1–36, Jan. 1964, doi: 10.1016/S0065-2377(08)60005-8.

[38] “Teoría de la llama | Textos Científicos.” Accessed: Nov. 09, 2024. [Online]. Available: http://www.textoscientificos.com/energia/combustibles/teoria-llama

[39] A. Núñez, “La combustión en una estufa de pellets,” PelletCalor. Accessed: Oct. 17, 2024. [Online]. Available: https://pelletcalor.es/la-combustion-en-una-estufa-de-pellets/#google_vignette

[40] S.-L. Chang and C. Q. Zhou, “Combustion and Thermochemistry,” *Encyclopedia of Energy*, pp. 595–603, Jan. 2004, doi: 10.1016/B0-12-176480-X/00087-5.

[41] A. A. Boateng, “Combustion and Flame,” *Rotary Kilns*, pp. 107–143, Jan. 2016, doi: 10.1016/B978-0-12-803780-5.00006-X.

[42] Testo AG, “Termografía, guía de bolsillo Teoría-Aplicación Práctica-Consejos y Trucos,” TESTO. Accessed: Sep. 27, 2024. [Online]. Available: http://www.ait-orsenor.com/testo_guia.pdf

[43] Palacios J, “ANÁLISIS TERMOGRÁFICO. HERRAMIENTA DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO.” Accessed: Sep. 26, 2024. [Online]. Available: https://www.juanpalacios.es/wp-content/uploads/2015/12/servicio-analisis-termografico.pdf

[44] F. Silva, “Desarrollo de biomateriales con base en los desechos de madera en la ciudad de Ambato: Caso de estudio micelio de hongos.,” Universidad Técnica de Ambato, 2024.

[45] K. Molina, M. Jordán, A. Álvarez, and R. Méndez, “GESTIÓN DE RESIDUOS DE MADERA EN TALLERES ARTESANALES DE LA ZONA CENTRO ANDINA DE ECUADOR: ESTUDIO PRELIMINAR.,” *Qualitas*, pp. 23–36, Jun. 2018. Accessed: May 20, 2024. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/336576591_GESTION_DE_RESIDUOS_DE_MADERA_EN_TALLERES_ARTESANALES_DE_LA_ZONA_CENTRO_ANDINA_DE_ECUADOR_ESTUDIO_PRELIMINAR

[46] J. Holm, U. Henriksen, K. wand, J. Hustad, and D. possel, “Experimental Verification of Novel Pellet Model Using a Single Pelleter Unit. ,” pp. 2446–2449, 2007, Accessed: Jun. 23, 2024. [Online]. Available: https://sci-hub.se/https://doi.org/10.1021/ef070156l

[47] L. Hernández, “Análisis de la incidencia del cambio de parámetros de fabricación en las propiedades mecánicas, físicas, químicas y de combustión de pellets de biomasa fabricados a partir de mezclas de aserrín de pino y carbón,” Universidad Nacional de Colombia, 2020.

ANEXOS

Pellets secados a temperatura ambiente por 24 horas



Fuente: Autor

Pellets secados a 105 °C por 30 minutos



Fuente: Autor

Pellets secados a 105 °C por 4 horas



Fuente: Autor

Medicación de pellets



Fuente: Autor

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL Y MECÁNICA
INGENIERIA MECÁNICA

FICHA DE RECOLECCIÓN DE DATOS

CONTENIDO DE VOLÁTILES

Realizado por:	Sanchez Castro Felix Xavier	**Fecha de ejecución**	12/06/2024
Lugar:	Laboratorio FCIM (Universidad técnica de Ambato)		

RESULTADOS

Horno	Especificaciones	Crisol	
	**Temperatura** 900 °C **Tiempo** 7 minutos		
secada a 105 °C por 4 horas			
	Peso masa inicial: 2 gramos		Peso masa final: 1,53 gramos
secada a 105 °C por 30 minutos			
	Peso masa inicial: 2 gramos		Peso masa final: 1,56 gramos
Secado natural			
	Peso masa inicial: 2 gramos		Peso masa final: 1,58 gramos

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL Y MECÁNICA
INGENIERIA MECÁNICA

FICHA DE RECOLECCIÓN DE DATOS			
Características geométricas de llama			
Realizado por:	Sanchez Castro Felix Xavier	**Fecha de ejecución**	09/09/2024
Lugar:	Laboratorio FCIM (Universidad técnica de Ambato)		
Equipo:	Cámara termográfica	**Software:**	Digimizer
Hora:	10:30 am.	**Temperatura ambiente:**	13 °C

RESULTADOS

PELLETS SECADOS A TEMPERATURA AMBIENTE

Tiempo	**Geometría**	**Datos**	
10		**Área de llama**	**Altura de llama**
		0.31 cm^2	1.41 cm
		Temperatura de llama	
		515 °C	
20		**Área de llama**	**Altura de llama**
		0.64 cm^2	2.63 cm
		Temperatura de llama	
		546 °C	
40		**Área de llama**	**Altura de llama**
		0.69 cm^2	2.67 cm
		Temperatura de llama	
		> 580 °C	

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL Y MECÁNICA
INGENIERIA MECÁNICA

FICHA DE RECOLECCIÓN DE DATOS

Características geométricas de llama

Realizado por:	Sanchez Castro Felix Xavier	**Fecha de ejecución**	09/09/2024
Lugar:	Laboratorio FCIM (Universidad técnica de Ambato)		
Equipo:	Cámara termográfica	**Software:**	Digimizer
Hora:	11:15 am.	**Temperatura ambiente:**	13 °C

RESULTADOS

PELLETS SECADOS A 105 °C POR 30 MINUTOS

Tiempo	Geometría	Datos	
10		**Área de llama**	**Altura de llama**
		0.73 cm^2	2.24 cm
		Temperatura de llama	
		468 °C	
20		**Área de llama**	**Altura de llama**
		1.17 cm^2	3.38 cm
		Temperatura de llama	
		525 °C	
40		**Área de llama**	**Altura de llama**
		1.31 cm^2	3.32 cm
		Temperatura de llama	
		560 °C	
60		**Área de llama**	**Altura de llama**
		1.11 cm^2	2.45 cm
		Temperatura de llama	
		> 580 °C	

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL Y MECÁNICA
INGENIERIA MECÁNICA

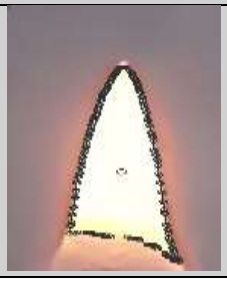
FICHA DE RECOLECCIÓN DE DATOS

Características geométricas de llama

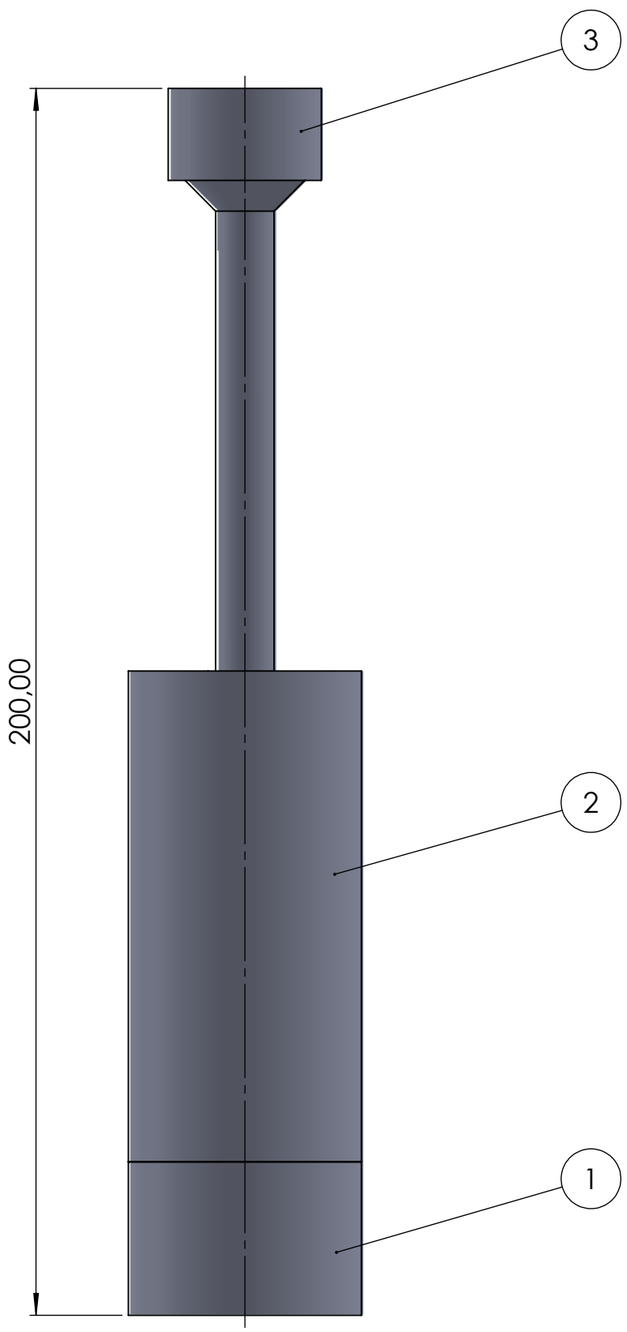
Realizado por:	Sanchez Castro Felix Xavier	**Fecha de ejecución**	09/09/2024
Lugar:	Laboratorio FCIM (Universidad técnica de Ambato)		
Equipo:	Cámara termográfica	**Software:**	Digimizer
Hora:	11:30 am.	**Temperatura ambiente:**	13 °C

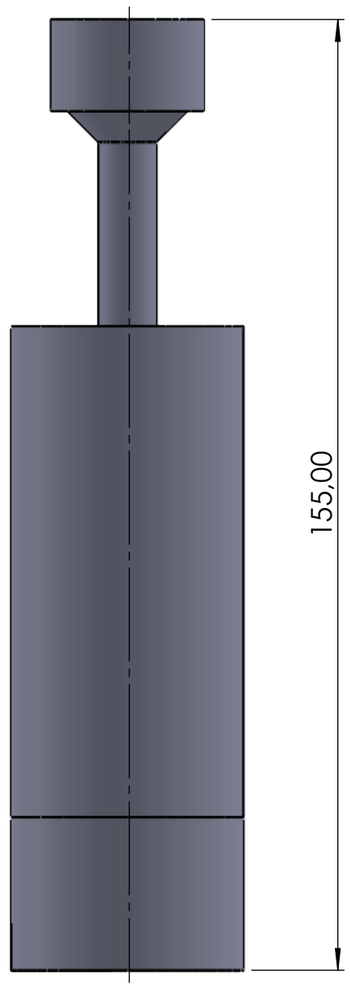
RESULTADOS

PELLETS SECADOS A 105 °C POR 4 HORAS

Tiempo	Geometría	Datos	
10		**Área de llama**	**Altura de llama**
		0.76 cm^2	3.32 cm
		Temperatura de llama	
		516 °C	
20		**Área de llama**	**Altura de llama**
		1.30 cm^2	3.73 cm
		Temperatura de llama	
		528 °C	
40		**Área de llama**	**Altura de llama**
		1.87 cm^2	3.93 cm
		Temperatura de llama	
		577 °C	
60		**Área de llama**	**Altura de llama**
		1.69 cm^2	3.41 cm
		Temperatura de llama	
		> 580 °C	

PLANOS





N° de elemento	Pieza	Material	observación	Cantidad
1	Tapa posterior	Acero AISI 4340	Mecanizado	1
2	Cilindro de compresión	Acero AISI 4340	Mecanizado	1
3	Punzón de compresión	Acero AISI 4340	Mecanizado	1

Presión de trabajo	30 bares
Altura máxima	200 mm
Altura mínima	155 mm
Altura de pellets	23-25 mm

Edic.	Modifi.	Fecha	Nom.

Tolerancia: ±1 mm
Peso: 0.923 kg
Materiales: Acero AISI

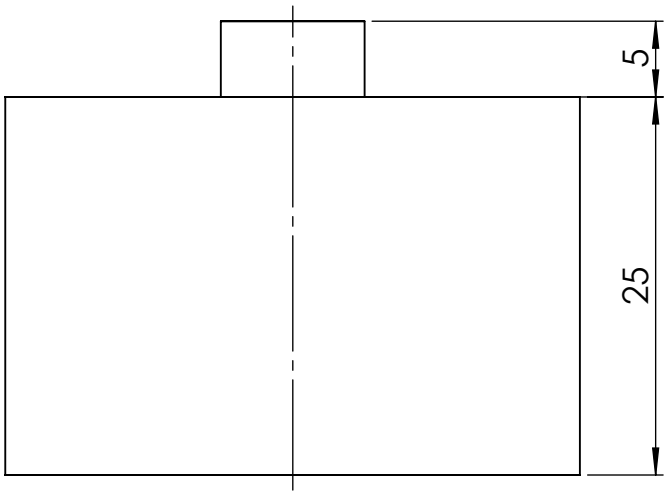
	Fecha	Nombre
Dib.	17/04//2024	Sanchez F.
Rev.	26/06/2024	Ing. Cabrera S.
Apro.	26/06/2024	Ing. Cabrera S.

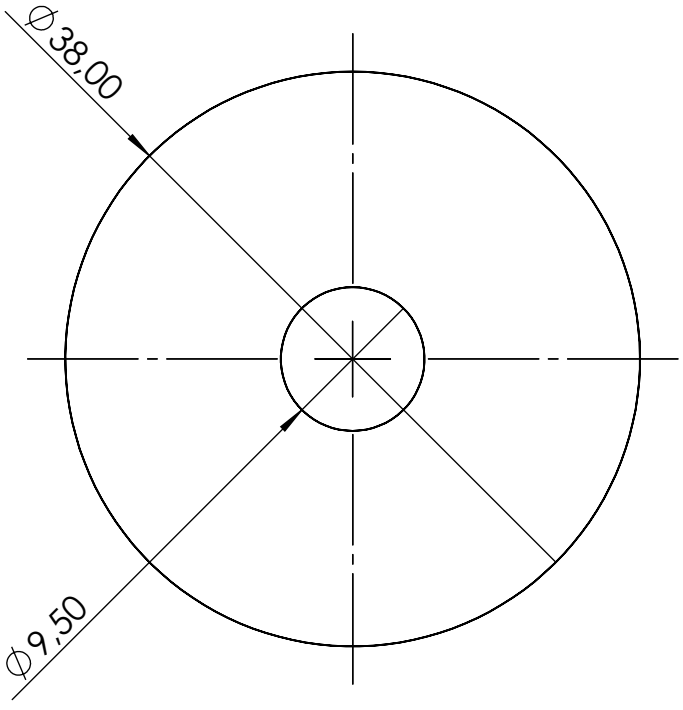
UTA
Organizacion

Denominacion: Sistema de compactación manual
Escala: 1:1
Numero de dibujo: 01 de 04
Registro
Sustitucion: SUSTITUCION

Torneado

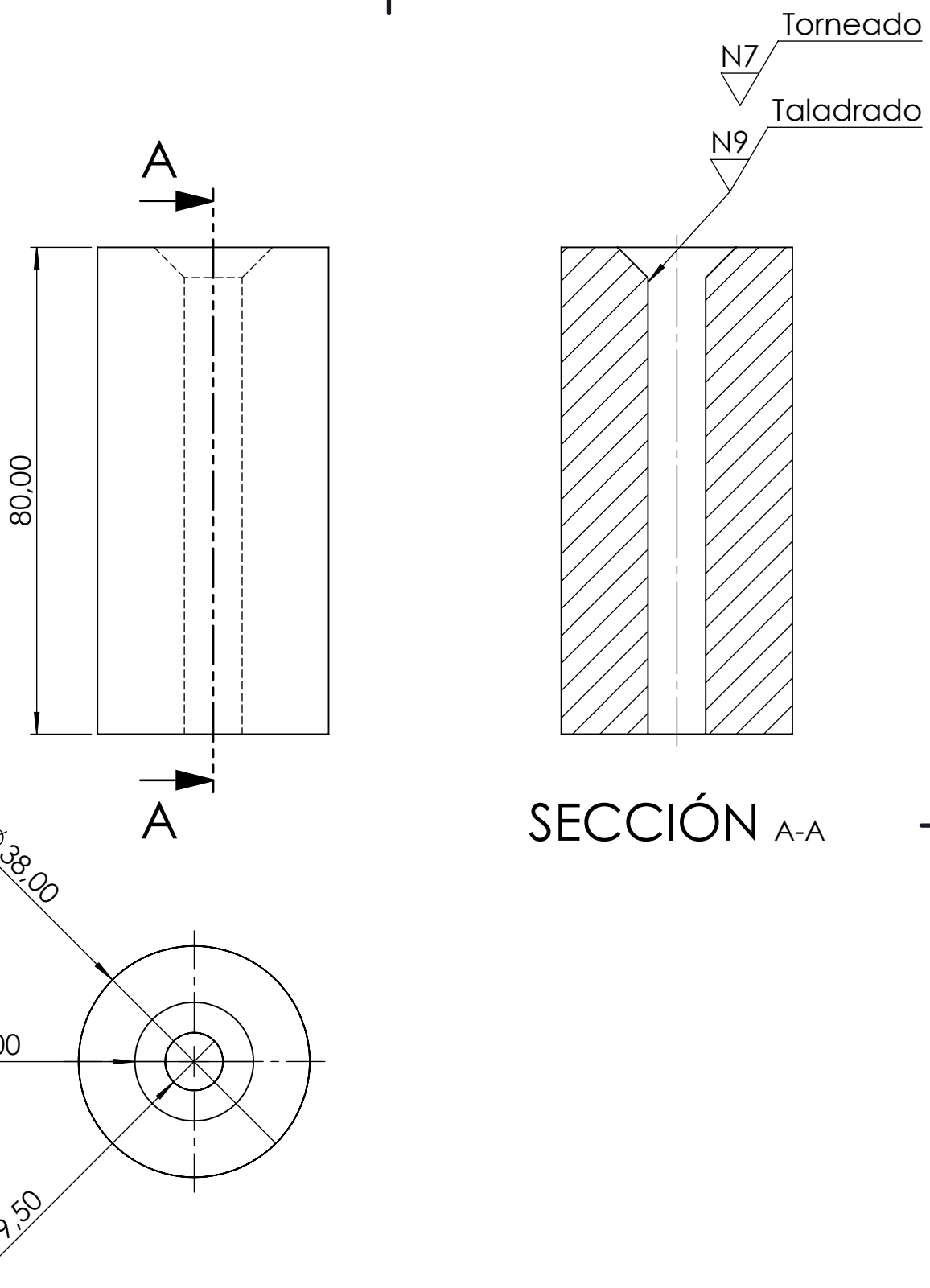
N7





Nota: Eliminar aristas vivas

Edic.	Modifi.	Fecha	Nom.	Tolerancia: ±1 mm	Peso: 0.222 kg	Materiales: Acero AISI 4340	
					Fecha / Nombre	Denominacion: Tapa posterior	Escala: 2:1
				Dib.	17/04/2024 Sanchez Felix		
				Rev.	26/06/2024 Ing.Cabrera S.		
				Apro.	26/06/2024 Ing. Cabrera S.		
				UTA Organizacion		Numero de dibujo: 02 de 04	Registro
						Sustitucion: SUSTITUCION	

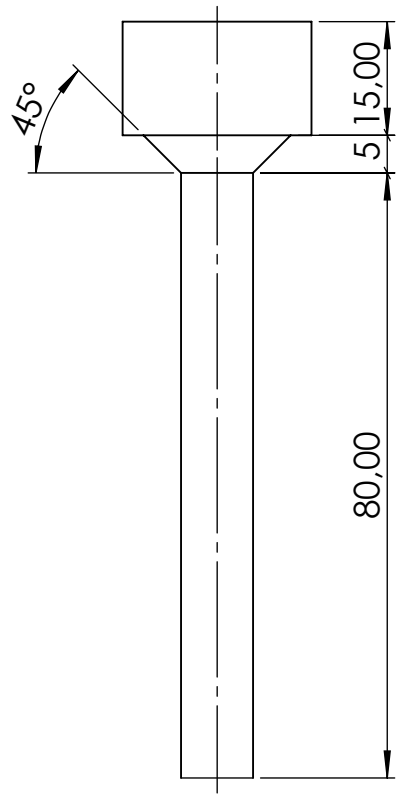


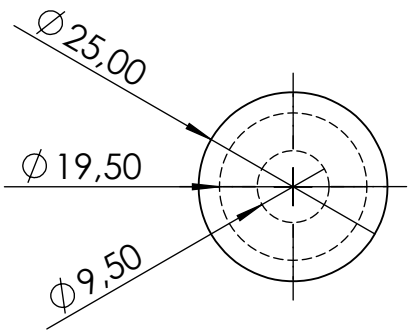
Nota: Eliminar aristas vivas

Edic.	Modifi.	Fecha	Nom.	Tolerancia: ±1 mm	Peso: 0.586 kg	Materiales: Acero AISI 4340	
					Fecha / Nombre	Denominacion: Cilindro de compresión	Escala: 1:1
				Dib.	17/04/2024 Sanchez Felix		
				Rev.	26/06/2024 Ing.Cabrera S.		
				Apro.	26/06/2024 Ing. Cabrera S.		
				UTA Organizacion		Numero de dibujo: 03 de 04	Registro
						Sustitucion: SUSTITUCION	

Torneado

N7





Nota: Eliminar aristas vivas

Edic.	Modifi.	Fecha	Nom.	Tolerancia: ±1 mm	Peso: 0.115 kg	Materiales: Acero AISI 4340	
					Fecha / Nombre	Denominacion: Punzón de compresión	Escala: 1:1
				Dib.	17/04/2024 Sanchez Felix		
				Rev.	26/06/2024 Ing.Cabrera S.		
				Apro.	26/06/2024 Ing. Cabrera S.		
				UTA Organizacion		Numero de dibujo: 04 de 04	Registro
						Sustitucion: SUSTITUCION	