



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

TRABAJO ESTRUCTURADO DE MANERA
INDEPENDIENTE

TEMA:

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.

AUTOR: Alex Mauricio Portero Jijón

TUTOR: Ing. Mg. Santiago Cabrera

AMBATO – ECUADOR

2014

Certificación

En mi calidad de tutor del trabajo de investigación, con el tema “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”, desarrollado por el estudiante Alex Mauricio Portero Jijón, egresado de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato, me permito informar que este ha sido concluido en su totalidad, y por tanto puede continuar con el respectivo trámite de graduación.

Ambato. Junio 27, 2014

.....
Ing. Mg. Santiago Cabrera Anda
DOCENTE INGENIERÍA MECÁNICA

AUTORÍA DEL TRABAJO DE GRADO

Yo, Alex Mauricio Portero Jijón declaro que los criterios expresados en la presente investigación denominada “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”, así como las ideas, análisis, conclusiones y propuesta son auténticas y de exclusiva responsabilidad de mi persona como autor de la presente investigación de grado.

EL AUTOR

.....
Alex Mauricio Portero Jijón
C.I.: 1804481461

DEDICATORIA

Esta tesis se la dedico a mi padre Hugo Portero quien con su sacrificio y apoyo durante toda mi carrera universitaria permitió que tenga éxito en esta etapa tan importante de mi vida.

A mi madre Lourdes Jijón por ser la fuerza espiritual que me apoyó siempre en los momentos de alegría y tristeza y con su amor incondicional me acompañó durante todo el trayecto de mi vida estudiantil y personal.

Alex Mauricio

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por el regalo de la vida, a mis Padres por su apoyo en momentos buenos y malos, a mi hermano por el aliento en momentos difíciles.

Al Ing. Santiago Cabrera, quien mostró mucho interés y compartió sus conocimientos de manera incondicional desde el inicio de esta investigación.

A mis amigos David, Daniel y Ladislao por ser verdaderos hermanos y brindarme todo su apoyo día a día.

Índice de Contenido

CAPÍTULO I.....	1
1.1 Tema.....	1
1.2 Planteamiento del problema.....	1
1.2.1 Contextualización.....	1
1.2.2 Análisis crítico	3
1.2.3 Prognosis	3
1.2.4 Formulación del problema	4
1.2.5 Preguntas directrices	4
1.2.6 Delimitación del problema.....	4
1.3 Justificación.....	5
1.4 Objetivos	6
1.4.1 Objetivo general	6
1.4.2 Objetivos específicos	6
CAPÍTULO II	8
2.1 Antecedentes investigativos	8
2.2 Fundamentación filosófica.....	9
2.3 Fundamentación legal	9
2.4 Categorías fundamentales	10
2.4.1 Biomasa.....	10
2.4.2 Categorización de la biomasa.....	13
2.4.3 Biomasa natural.....	13
2.4.4 Cultivos energéticos	13
2.5 Hipótesis.....	30
2.6 Señalamiento de variables de la hipótesis	30

CAPÍTULO III.....	31
3.1 Modalidad básica de la investigación	31
3.2 Nivel o tipo de la investigación.....	31
3.3 Población y muestra	32
3.3.1 Población.....	32
3.3.2 Muestra.....	33
3.4 Operacionalización de variables	34
3.4.1 Variable independiente: Adición de calor al aserrín	34
3.4.2 Variable dependiente: Friabilidad	35
3.5 Plan de recolección de la información	36
3.6 Procesamiento y análisis de la información	38
CAPÍTULO IV.....	39
4.1 Análisis de resultados.....	39
4.1.1 Aserrín.....	39
4.1.2 Proceso de peletizado	44
4.2 Interpretación de resultados	58
4.2.1 Análisis de la friabilidad	58
4.2.2 Análisis de la fuerza necesaria para la expulsión del pellet.....	63
4.2.3 Análisis de la relación entre la densidad y la friabilidad	64
4.3 Verificación de Hipótesis	66
4.3.1 Hipótesis:	66
4.3.2 Comprobación:	66
CAPÍTULO V	68
5.1 Conclusiones	68
5.2 Recomendaciones.....	69

CAPÍTULO VI.....	71
6.1 Datos informativos	71
6.2 Antecedentes de la propuesta	71
6.3 Justificación.....	73
6.4 Objetivos	74
6.5 Análisis de factibilidad.....	74
6.5.1 Análisis técnico	74
6.5.2 Análisis económico	74
6.6 Fundamentación	76
6.6.1 Determinación de la pérdida de calor al ambiente	76
6.6.2 Cálculo de la cantidad de calor absorbida por los diferentes elementos que componen la prensa de pellets singular:	80
6.6.3 Variación de la temperatura	85
6.6.4 Graficas temperatura tiempo para los pellets	88
6.7 Metodología. Modelo operativo.....	90
6.8 Administración.....	94
6.9 Previsión de la evaluación.....	95
Bibliografía.....	96
Sitios Web	97
ANEXO 1	98
ANEXO 2	102
ANEXO 3	103

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Categorías fundamentales	10
Figura 2.2 Ciclo de la biomasa.....	11
Figura 2.3 Cuadro sinóptico de la biomasa residual	14
Figura 2.4 Fuerzas de Compresión del Aserrín.....	18
Figura 2.5 Esquema del sistema de Matriz Plana	19
Figura 2.6 Esquema del sistema de Matriz Anular	20
Figura 2.7 Esquema del diámetro y longitud del pellet	23
Figura 2.8 Esquema de la transferencia de calor por conducción.....	27
Figura 3.1 Madera autorizada para el aprovechamiento a nivel provincial por origen del recurso en la región Sierra	33
Figura 3.2 Diagrama de flujo para la recolección de la información.....	36
Figura 3.3 Esquema del proceso de peletizado	37
Figura 4.1 Tamices necesarios para realizar el ensayo	40
Figura 4.2 Análisis granulométrico de aserrín de Eucalipto	40
Figura 4.3 Análisis granulométrico de aserrín de Copal.....	41
Figura 4.4 Determinación del contenido de humedad en estufa a 105°C durante 24 horas	42
Figura 4.5 Horno de mufla para la determinación del contenido de cenizas	43
Figura 4.6 Desecador donde se reduce la temperatura de las capsulas ensayadas	43
Figura 4.7 Balanza Citizen CX220	44
Figura 4.8 Proceso de peletizado en prensa hidráulica	44
Figura 4.9 Proceso de peletizado en prensa hidráulica y matriz unitaria.....	44
Figura 4.10 Friabilidad pellets de Eucalipto	59
Figura 4.11 Densidad Pellets de Eucalipto	60
Figura 4.12 Friabilidad pellets de Copal	61
Figura 4.13 Densidad pellets de Copal	62

Figura 4.14 Densidad de pellets de Eucalipto y Copal	63
Figura 4.15 Fuerza necesaria para expulsar el pellet fuera del cilindro.....	63
Figura 4.16 Friabilidad en función de la densidad del pellet de Eucalipto	65
Figura 4.17 Friabilidad en función de la densidad del pellet de Copal.....	65
Figura 6.1 Esquema del cilindro de compactación y la resistencia de calefacción	73
Figura 6.2 Representación de la distribución de potencia en el sistema de compactado	84
Figura 6.3 Detalle del pellet de Eucalipto dentro del cilindro de compactación ..	88
Figura 6.4 Curvas de los puntos dentro del pellet de Eucalipto para un estado transitorio de 10 seg.	88
Figura 6.5 Detalle del pellet de Copal dentro del cilindro de compactación	89
Figura 6.6 Curvas de los puntos dentro del pellet de Copal para un estado transitorio de 10 seg.	89
Figura 6.7 Diagrama de proceso	90
Figura 6.8 Diagrama de proceso tecnico de la fabricación de pellets de madera .	91

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Aprovechamiento forestal de acuerdo al origen 2007-2010	12
Tabla 2.2 Principales especies autorizadas para el aprovechamiento a nivel nacional durante el 2010	12
Tabla 2.3 Valores de diámetro y longitud de los pellets a nivel internacional	22
Tabla 2.4 Valores típicos de coeficiente de convección	28
Tabla 3.1 Volumen aprobado para aprovechamiento de madera en la región Sierra (2007-2009) madera en pie	32
Tabla 3.2 Especificación de los pellets	33
Tabla 3.3 Elementos de laboratorio para el ensayo de compactación de serrines	37
Tabla 4.1 Humedad del aserrín	42
Tabla 4.2 Contenido de cenizas	43
Tabla 4.3 Datos de los pellets a temperatura ambiente	45
Tabla 4.4 Resumen de las propiedades físicas de los pellets ensayados.....	45
Tabla 4.5 Datos de los pellets a temperatura de 45°C	46
Tabla 4.6 Resumen de las propiedades físicas de los pellets ensayados.....	46
Tabla 4.7 Datos de los pellets a temperatura de 65°C	47
Tabla 4.8 Resumen de las propiedades físicas de los pellets ensayados.....	47
Tabla 4.9 Datos de los pellets a temperatura de 85°C	48
Tabla 4.10 Resumen de las propiedades físicas de los pellets ensayados.....	48
Tabla 4.11 Datos de los pellets a temperatura de 105°C	49
Tabla 4.12 Resumen de las propiedades físicas de los pellets ensayados.....	49
Tabla 4.13 Datos de los pellets a temperatura ambiente	50
Tabla 4.14 Resumen de las propiedades físicas de los pellets ensayados.....	50
Tabla 4.15 Datos de los pellets a temperatura de 45°C	51
Tabla 4.16 Resumen de las propiedades físicas de los pellets ensayados.....	51
Tabla 4.17 Datos de los pellets a temperatura de 65°C	52

Tabla 4.18 Resumen de las propiedades físicas de los pellets ensayados.....	52
Tabla 4.19 Datos de los pellets a temperatura de 85°C	53
Tabla 4.20 Resumen de las propiedades físicas de los pellets ensayados.....	53
Tabla 4.21 Datos de los pellets a temperatura de 105°C	54
Tabla 4.22 Resumen de las propiedades físicas de los pellets ensayados.....	54
Tabla 4.23 Datos de los pellets a una temperatura de 22°C	55
Tabla 4.24 Resumen de las propiedades físicas de los pellets ensayados.....	55
Tabla 4.25 Datos de los pellets a una temperatura de 105°C	56
Tabla 4.26 Resumen de las propiedades físicas de los pellets ensayados.....	56
Tabla 4.27 Datos de los pellets a una temperatura de 21.3°C	57
Tabla 4.28 Resumen de las propiedades físicas de los pellets ensayados.....	57
Tabla 4.29 Resultados del ensayo de caída.....	58
Tabla 4.30 Resultados del ensayo de caída.....	61
Tabla 4.31 Resultados del ensayo de caída.....	62
Tabla 6.1 Datos informativos	71
Tabla 6.2 Costos de la prensa de pellets singular.....	75
Tabla 6.3 Costo de la mano de obra al realizar los pellets.....	75
Tabla 6.4 Costo de la energía eléctrica consumida por la resistencia eléctrica	76
Tabla 6.5 Costo total de la fabricación de los pellets.....	76
Tabla 6.6 Datos del modelo y la transferencia de calor del cilindro de compactación.....	80
Tabla 6.7 Datos del modelo y la transferencia de calor del vástago de compactación.....	81
Tabla 6.8 Datos del modelo y la transferencia de calor de la tapa inferior.....	82
Tabla 6.9 Datos del modelo y la transferencia de calor de la tapa inferior.....	83
Tabla 6.10 Especificaciones de la maquina peletizadora.....	93
Tabla 6.11 Especificaciones de la maquina peletizadora.....	94

NOMENCLATURA

m_h , masa total del material

m_s , masa seca del material

m_{H_2O} , masa de agua

$\%H_{bs}$, contenido de humedad en base seca

$\%H_{bh}$, contenido de humedad en base húmeda

FR , índice de friabilidad

N_i , numero de pellets al inicio del ensayo

N_f , numero de pellets al final del ensayo entre enteros y fraccionados

$\Delta E_{sistema}$, variación de energía del sistema

$E_{entrada}$, energía de entrada

E_{salida} , energía de salida

$Q_{entrada}$, calor de entrada

Q_{salida} , calor de salida

$W_{entrada}$, trabajo de entrada

W_{salida} , trabajo de salida

$E_{masa-entrada}$, masa de entrada

$E_{masa-salida}$, masa de salida

\dot{Q}_{conduc} , calor transferido por conducción

k , conductividad térmica del material ($W/m * ^\circ C$)

ΔT , variación de la temperatura ($^\circ C$)

Δx , espesor del material por donde fluye calor (m)

A , área de transferencia de calor (m^2)

Q_{conv} , calor transferido por convección (W)

h_{conv} , coeficiente de transferencia de calor por convección ($W/m^2 * K$)

T_s , temperatura de la superficie ($^{\circ}C$)

T_{∞} , temperatura ambiente ($^{\circ}C$)

T_f , temperatura de película ($^{\circ}C$)

A_s , área de la superficie (m^2)

Gr_H , número de Grashof

g , aceleración de la gravedad (m/s^2)

β , coeficiente de expansión volumétrica ($1/K$)

L_c , longitud característica de la configuración geométrica (m)

C_p , capacidad del material para almacenar energía térmica ($kJ/Kg * ^{\circ}C$)

ν , viscosidad cinemática (m^2/s)

Pr , número de Prandtl

Ra_h , número de Rayleigh

Nu_H , número de Nusselt de un cilindro esbelto corto

Nu_{H-FP} , de número de Nusselt de una placa

Nu_H / Nu_{H-FP} , relación del número de Nusselt de un cilindro respecto a una placa plana

Δt , variación de temperatura

Pot , potencia eléctrica efectiva (W)

RESUMEN

El objetivo del presente estudio fue identificar cómo el calor afecta el proceso de peletización de biomasa. Se estudió el impacto del tipo de materia prima, temperatura de la matriz, el contenido de humedad y el tamaño de las partículas.

Las materias primas utilizadas fueron: aserrín de Eucalipto y Copal, que representan los tipos de biomasa más comunes generados en la empresa Maderas Guerrero. El contenido de humedad en este desecho en particular es de aproximadamente 8 %, lo que es una ventaja importante, ya que no es necesario un proceso de secado del aserrín.

La peletización de la biomasa resulta en un combustible con una mayor homogeneidad de sus propiedades, para estudiar la resistencia de los pellets y relacionarlos con la temperatura de la compresión, se construyó una prensa de pellets singular en el que se aplica presión a la biomasa para aumentar su densidad. La prensa consta de una matriz cilíndrica 8 mm de diámetro, hecha de acero inoxidable AISI 304, cubierta con elementos de calefacción.

La biomasa se comprimió a una velocidad de 2 mm / s hasta una presión máxima de 225,62 MPa a temperaturas entre 20 y 105 ° C. Las densidades de pellets de biomasa pueden ser tan altas como 1,1 a 1,3 g/cm³.

En conclusión un aumento de la temperatura de la matriz durante la peletización aumentó la friabilidad del pellet, y disminuyó la fricción entre la biomasa y la superficie de acero.

ABSTRACT

The aim of the present study was to identify how heat affects in biomass pelletization processes. The impact of raw material type, die temperature, moisture content and particle size was studied.

The raw materials used were: Eucalipto and Copal sawdust, representing the most common biomass types discarded in the Maderas Guerrero Company. The moisture content in this particular waste is about 8% which it is an important advantage because they don't need a process of drying the sawdust.

Pelletization of biomass results in a fuel with a greater structural homogeneity, to study the strength of pellets and relate them to the temperature of compression, a singular pellet press was built in which pressure is applied to biomass for increasing its density. The press consists of a cylindrical die 8 mm in diameter, made of AISI 304 stainless steel, it covered with heating elements.

Biomass was compressed at a rate of 2mm/s until a maximum pressure of 225, 62 Mpa at temperatures between 20 to 105°C. The densities of biomass pellets can be as high as 1, 1 to 1, 3 g/cm³.

In conclusion an increasing temperature of the die during the peletization increased the strength, and decreases the friction between biomass and steel surface.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 Tema

“Análisis térmico del proceso de peletizado del aserrín de madera de Eucalipto (*Eucalyptus Globulus Labill*) y Copal (*Dacryodes Olivifera Cuatrecasas*) y su influencia sobre la friabilidad de los pellets.”

1.2 Planteamiento del problema

1.2.1 Contextualización

El aprovechamiento del recurso forestal en el Ecuador se da mayoritariamente en sectores de procesamiento secundario, como son: muebles, molduras, pisos, puertas y ventanas, los cuales se abastecen de madera aserrada, producida principalmente por motosierras lo que implica que esta no esté escuadrada, su superficie sea irregular y por consiguiente se generen una gran cantidad de desperdicios, principalmente serrines y virutas; lo que conlleva al plantearnos el uso de la biomasa residual para así poder aprovechar integralmente el recurso forestal.

En la actualidad los residuos son utilizados para camas en galpones avícolas, establos, como un componente para fertilizantes ecológicos, para la fabricación de tableros aglomerados y en menor medida como un biocombustible en calderas

para secadores de madera de las propias industrias como es el caso de Maderas Guerrero.

El principal inconveniente al utilizar los residuos, en este caso el aserrín sin un tratamiento previo; es la disminución de la eficiencia de la caldera, debido a la baja densidad tanto energética como física, alto contenido de humedad y la presencia de materiales extraños en la madera; lo que repercute directamente en la combustión.

Para aprovechar de una manera adecuada este recurso es necesario acondicionarlo por medio de procesos que aumenten su densidad, homogenicen su forma y tamaño y aumenten la temperatura de la combustión.

El proceso por medio del cual el aserrín es acondicionado es el peletizado, el que consiste en compactar el aserrín en pequeños cilindros para que posean características homogéneas que permitan el control tanto en el transporte, dosificado y principalmente la combustión.

Cuando el aserrín es peletizado, los pequeños cilindros de este material se denominan pellets, al ser estos un combustible ecológico cuyas emisiones de CO₂ son únicamente las mismas que absorbió el árbol durante su corta vida, la dificultad es su aglomerado sin la adición de agentes que puedan generar gases tóxicos durante la combustión.

Por lo tanto, se buscara realizar el peletizado usando la Lignina que se encuentra presente naturalmente en la composición de la madera como aglutinante, con la ayuda de la humedad contenida en los desechos y la adición de calor.

1.2.2 Análisis crítico

La problemática del uso de aserrín como biocombustible sin un proceso de peletizado que se ha presentado en la empresa Maderas Guerrero requiere de un estudio del proceso de peletizado del aserrín de las especies madereras que más se utilizan en sus procesos de fabricación que en este caso son el Eucalipto (*Eucalyptus Globulus Labill*) y Copal (*Dacryodes Olivifera Cuatrecasas*).

Para que el aprovechamiento de esta biomasa sea adecuado, es necesario analizar las condiciones en la que podemos encontrarla en los distintos talleres y aserraderos locales, dependiendo de esto se harán necesarios procesos de acondicionamiento, como son: Secado, Refinado, Tamizado y Compactado.

Para poder establecer cuáles de los anteriores procesos son necesarios, y en qué medida se debe aplicar cada uno de estos, se hace evidente que un estudio de los parámetros de peletizado del aserrín es fundamental, ya que de estos dependerá la calidad con la que se obtenga el producto final, y por lo tanto los beneficios que la utilización de este biocombustible densificado genere.

1.2.3 Prognosis

Al no realizar el estudio térmico sobre el efecto del calor añadido a los pellets, no existe la certeza de la medida en que este afecta a las propiedades de los mismos, las cuales están reflejadas en el valor de friabilidad que estos poseen. De manera que la verificación de la temperatura adecuada, con la cual sea conveniente fabricarlos es fundamental, debido a que el aprovechamiento de estos residuos depende de las propiedades para que este biocombustible satisfaga los requerimientos de las aplicaciones industriales donde sea factible su utilización.

Por lo tanto es evidente que proveer los fundamentos teóricos para realizar este proceso de manera adecuada es necesario para que así su uso sea rentable, y sea

aplicable dentro de la empresa Maderas Guerrero, que en la actualidad usa parcialmente los residuos que esta mismo genera, sin que este aprovechamiento sea integral.

1.2.4 Formulación del problema

¿Qué características térmicas serán las adecuadas para realizar el peletizado del aserrín de madera de Eucalipto (*Eucalyptus Globulus Labill*) y Copal (*Dacryodes Olivifera Cuatrecasas*) para obtener pellets con una friabilidad apropiada?

1.2.5 Preguntas directrices

- ¿Qué cantidad de calor será necesario añadir al aserrín de madera de Copal y Eucalipto para que el peletizado sea adecuado?
- ¿Cuál será el procedimiento para la realización del ensayo de friabilidad?
- ¿Cómo afectará la adición de temperatura sobre la friabilidad de los pellets?
- ¿Cómo afectara la adición de temperatura sobre la densidad de los pellets?
- ¿Cuál será la fuerza de expulsión necesaria en el cilindro de compactación en el instante de expulsar el pellet fuera de este?

1.2.6 Delimitación del problema

De contenido

Ingeniería Mecánica

Energías Alternativas

Energías Renovables no Convencionales (ERC)

Espacial

El problema de investigación se realizó en los laboratorios de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato, y la recolección de las muestras de aserrín se lo realizó en la empresa Maderas Guerrero donde se utiliza madera de Eucalipto y Copal principalmente.

Temporal

Mayo de 2013 – Mayo de 2014

1.3 Justificación

La industria forestal maderera ecuatoriana se ha desarrollado de manera desigual, mientras la industria de tableros contrachapados ha alcanzado un nivel tecnológico alto por lo que es considerada como una de las mejores de Latinoamérica; la industria del aserrado en contraposición, ha retrocedido de la producción con sierra circular o de montaña, a la motosierra operada a pulso. Los demás segmentos industriales madereros han alcanzado diversos niveles tecnológicos dependiendo del tamaño de la empresa y el tipo de mercado de sus productos.

Debido al poco desarrollo tecnológico en el área de aserrío se puede observar la generación de una cantidad considerable de desechos que en parte son utilizados en la industria de los tableros aglomerados. Pero se desea un uso integral de este tipo de residuos que son biomasa, materia prima para la fabricación de pellets, un biocombustible formado a partir del aserrín que muchas veces se desperdicia debido a su baja densidad, gran dispersión sobre el terreno, difícil transporte, entre otras dificultades que hacen parecer que su uso no es rentable.

Por otro lado, las ventajas del uso de energías renovables son la reducción del uso de combustibles fósiles para la producción de calor y vapor, disminuye su eliminación en vertederos, lo que extiende la vida útil de rellenos sanitarios, libera el CO₂ que el árbol tomó durante su corta vida. Así que es parte del ciclo natural del carbono.

Un proceso de peletizado del aserrín es necesario por las prestaciones que este manifiesta respecto al uso del mismo sin un proceso de compactado, ya que el principal inconveniente es la baja densidad tanto física como energética que estos residuos poseen, lo que trae consecuencias como un mayor espacio de almacenamiento de los desechos y por consiguiente la reducción del espacio de trabajo.

En la parte energética, al densificar el aserrín de madera; estamos aumentando su poder calorífico, además facilita procesos previos a la combustión como son el transporte y la automatización de métodos de dosificado de los pellets en calderas, que son utilizadas para el secado de la madera, aumentando la eficiencia de estas así como reduciendo costos al no utilizar combustibles fósiles

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

- Determinar las características térmicas del proceso de peletizado de aserrín de madera de Eucalipto (*Eucalyptus Globulus Labill*) y Copal (*Dacryodes Olivifera Cuatrecasas*) para obtener pellets con una friabilidad apropiada.

1.4.2 Objetivos específicos

- Determinar la cantidad de calor necesaria para realizar un peletizado adecuado de los serrines de Copal y Eucalipto.

- Realizar el ensayo de friabilidad por caída a los pellets según el método de los laboratorios de Termodinámica y Motores de la Universidad Politécnica de Madrid (ETSI de Montes).
- Evaluar la influencia de la adición de calor sobre la friabilidad de los pellets.
- Comprobar la variación de la densidad de acuerdo a la temperatura de compactación.
- Medir la fuerza necesaria para expulsar el pellet del cilindro de compactación.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes investigativos

Según Pablo Roldán nos dice que:

La biomasa se perfila con un gran potencial energético a corto plazo. En especial la utilización de **biomasa residual** puede ser una alternativa sumamente interesante que a más de generar electricidad ayudará a disminuir la contaminación ambiental. La introducción de energía renovable al Sistema Nacional Interconectado (SNI) sustituirá la generación térmica de motor de combustión interna (MCI) con lo cual se reducirá emisiones de CO₂ a la atmósfera. Además de suplir a la generación con combustibles fósiles, la generación con biomasa residual utiliza únicamente los residuos que quedan de la cosecha y de la agroindustria. Estos desechos en casi todos los casos son arrojados a los ríos o quemados al aire libre con las respectivas contaminaciones que producen. (Roldán, 2009, p. 179).

En la producción de pellets de madera, se requiere conocimiento sobre las propiedades de las materias primas que afectan los requerimientos de energía para la granulación y la calidad de los pellets. Se analizó la importancia de la temperatura de peletización y el contenido de humedad y las diferencias entre el serrín de Haya europea y el Pino silvestre. Los resultados mostraron que el aumento de la temperatura y contenido de humedad, disminuyeron los requerimientos de energía para todos los componentes del proceso de peletización y que Haya requirió más energía que el Pino en todos los componentes. Los serrines de una de las especies (Haya) produjeron las pastillas más fuertes; el

aumento de la temperatura dio como resultado gránulos más fuertes, mientras que el aumento del contenido de humedad causó gránulos más débiles. Los métodos se pueden utilizar para analizar la asignación de los requisitos de energía de peletización en la matriz y pueden ser herramientas útiles para el análisis de las propiedades de peletización de la madera y otros residuos de biomasa (Nielsen N et al, 2009)

2.2 Fundamentación filosófica

La investigación se basará en un paradigma neopositivista ya que con esta investigación se pretende obtener condiciones específicas para el uso de la biomasa que en este caso se trata de los desechos producto de la transformación de la madera es decir el aserrín; que solo pueden ser encontrados por medio de ensayos, pruebas debido a que toda esta realidad existe independientemente del sujeto ilustrado. Por lo tanto las leyes y verdades son absolutas fijas e inmutables.

2.3 Fundamentación legal

Constitución de la República del Ecuador:

“Art. 15.- El Estado promoverá, en el sector público y privado, el uso de tecnologías ambientalmente limpias y de energías alternativas no contaminantes y de bajo impacto.”

“Art. 413.- El Estado promoverá la eficiencia energética, el desarrollo y uso de prácticas y tecnologías ambientalmente limpias y sanas, así como de energías renovables, diversificadas, de bajo impacto y que no pongan en riesgo la soberanía alimentaria, el equilibrio ecológico de los ecosistemas ni el derecho al agua.”

También es necesario destacar que el Plan Nacional de Desarrollo del Gobierno Nacional, denominado: “*Plan Nacional del Buen Vivir 2009-2013*”, establece algunos objetivos y políticas sobre el desarrollo de las energías renovables, como: “Objetivo 4: Garantizar los derechos de la naturaleza y promover un ambiente sano y sustentable”.

“Política 4.3: Diversificar la matriz energética nacional, promoviendo la eficiencia y una mayor participación de energías renovables sostenibles” (ESPINOZA, Juan, 2010).

“Artículo 415.- El Estado Central y los Gobiernos Autónomos descentralizados adoptarán políticas integrales y participativas de ordenamiento territorial urbano de uso del suelo... Los gobiernos autónomos descentralizados desarrollarán programas de uso racional de agua y de reducción, reciclaje y tratamiento adecuado de desechos sólidos y líquidos.”

2.4 Categorías fundamentales

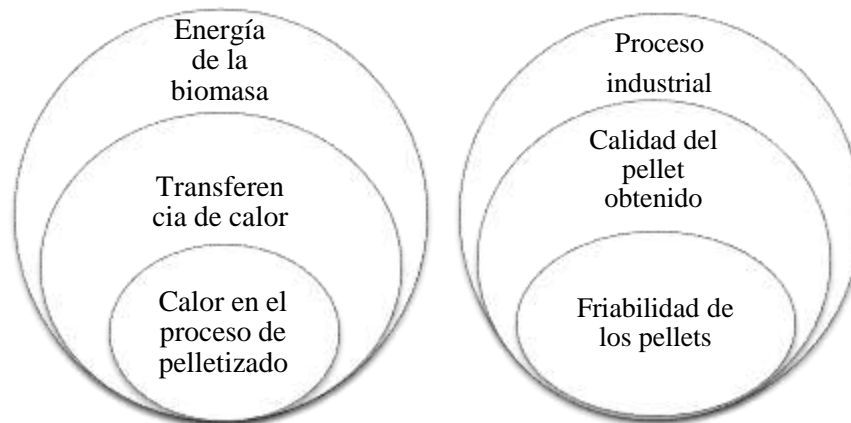


Figura 2.1 Categorías fundamentales
Elaborado por: Alex Portero

2.4.1 Biomasa

La biomasa es el conjunto de materia orgánica renovable de origen vegetal o animal obtenida naturalmente o por alteración artificial de la anterior.

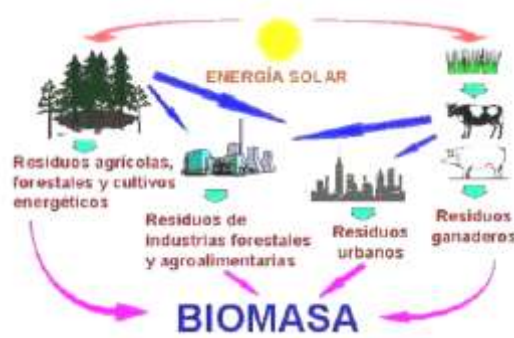


Figura 2.2 Ciclo de la biomasa

Fuente: www.cartif.es

En la presente investigación se tomará en cuenta un recurso que ha sido infravalorado por largo tiempo, como es el aserrín que se genera por los distintos mecanismos de transformación de la madera; que en este país es notorio el uso mayoritario de especies como el Eucalipto (*Eucaliptus Globulus Labilll*) y el Copal (*Dacryodes Olivifera Cuatrecasas*) dos especies con características muy diferentes, las cuales serán de utilidad al realizar la investigación ya que se podrá observar los resultados para una madera dura, como es el Eucalipto y otra relativamente suave como es el Copal.

Tendencia de las principales especies forestales autorizadas a nivel nacional según el Ministerio del Ambiente del Ecuador. 2010. Aprovechamiento de los Recursos Forestales 2007 - 2009. Quito, Ecuador.

El eucalipto (*Eucaliptus globulus* y *E. saligna* en la Sierra y *E.urograndis* en la Costa) son las especies con mayor volumen de aprovechamiento a nivel nacional, contribuyendo con el 19,43% del total. Otras especies que reportan niveles relativamente bajos de aprovechamiento, pero que son muy importantes desde la perspectiva socio-económica local y del manejo del bosque nativo, y que a su vez tienen alta demanda de aprovechamiento local, son el copal.

Tabla 2.1 Aprovechamiento forestal de acuerdo al origen 2007-2010

FORMACIÓN VEGETAL	VOLUMEN (en metros cúbicos)				
	2007	2008	2009	2010	PROMEDIO m ³ /año
PLANTACIONES FORESTALES	1 492 510,82	1 711 463,98	1 768 659,85	2 011 597,59	1 746 058,01
BOSQUE NATIVO	367 090,99	451 404,81	396 488,55	396 444,41	402 857,19
SISTEMAS AGROFORESTALES	294 746,16	338 310,47	455 957,93	800 562,05	472 394,15
FORMACIONES PIONERAS	51 227,17	275 009,79	314 617,22	480 576,14	280 357,58
VOLUMEN TOTAL DE MADERA AUTORIZADA PARA APROVECHAMIENTO	2 206 574,93	2 776 189,05	2 935 723,55	3 689 180,19	2 901 666,93

Fuente: Ministerio del ambiente del Ecuador

Tabla 2.2 Principales especies autorizadas para el aprovechamiento a nivel nacional durante el 2010

NOMBRE COMÚN	VOLUMEN AUTORIZADO (en metros cúbicos)	PARTICIPACIÓN TOTAL (%)
BALSA	794 359,45	21,53
EUCALIPTO	619 243,35	16,79
PINO	470 493,80	12,75
LAUREL	284 644,57	7,72
PACHACO	188 966,82	5,12
TECA	181 915,43	4,93
PIGUE	132168,00	3,60
SANDE	66 247,84	1,80
PICHANGO	61 772,54	1,67
LECHERO	43 908,35	1,19
Otras especies autorizadas a nivel nacional (345)	845 420,04	22,90
VOLUMEN DE MADERA TOTAL AUTORIZADO	3 689 180,19	100,00

Fuente: Ministerio del ambiente del Ecuador

Según el Ministerio del Ambiente en su informe titulado Aprovechamiento De Recursos Forestales En El Ecuador (Periodo 2010) el Eucalipto durante el 2010 representó la segunda especie con mayor aprobación, con un volumen aprovechado de 619 243,35 m³, a través de la aprobación de 1301 programas, en 13 provincias de la sierra y costa ecuatoriana. El 76,55% de este volumen se autorizó mediante la aprobación de programas de corta de plantaciones forestales en 12 provincias de la región sierra y costa, principalmente Pichincha, Cotopaxi, Imbabura, Chimborazo, Loja, Esmeraldas y Carchi. El volumen restante se autorizó a través de programas de Corta de Árboles Plantados, en 10 provincias principalmente en Chimborazo, Pichincha, Tungurahua, Carchi, Esmeraldas, Bolívar e Imbabura. En relación al año anterior el volumen de madera aprobado se incrementó en un 8,55% de esta especie.

Otras especies que reportan niveles relativamente bajos de aprovechamiento para el 2009, pero que son muy importantes desde la perspectiva socio-económica local y del manejo del bosque nativo, y que a su vez tienen alta demanda de aprovechamiento local, son el Copal con 37 213 m³ autorizados. Estas especies son utilizadas en la industria nacional para la fabricación de muebles, puertas y pisos.

2.4.2 Categorización de la biomasa

Existen diferentes tipos o fuentes de biomasa que pueden ser utilizados para suministrar la demanda de energía de una instalación, la clasificación general consta de:

- Biomasa natural
- Cultivos energéticos
- Biomasa residual

2.4.3 Biomasa natural

Es la que se produce espontáneamente en la naturaleza sin ningún tipo de intervención humana. La utilización de estos recursos requiere de la gestión de su adquisición y transporte hasta la empresa lo que puede provocar que su uso sea inviable económicamente. Siendo esta una realidad alejada de la situación que se evidencia en el territorio nacional ya que este tipo de residuos no son tomados en cuenta para la generación de energía.

2.4.4 Cultivos energéticos

Son combustibles de origen biológico que pueden ser usados puros o en mezcla con combustibles derivados del petróleo para el sector automotor o en la generación eléctrica.

Según el Ministerio de Electricidad y Energía Renovable los biocombustibles que se desarrollarán en el Ecuador serán:

- Etanol anhidro e hidratado (caña de azúcar)
- Biodiesel (palma, piñón, higuera y colza)
- Aceite vegetal (piñón, higuera y colza)

2.4.4.1 Biomasa residual

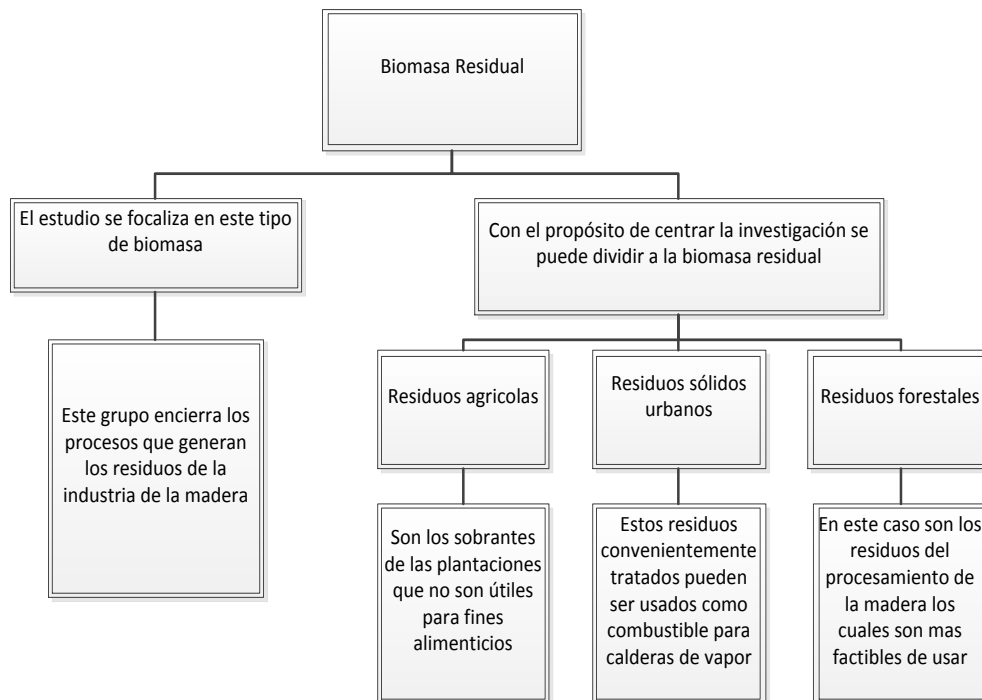


Figura 2.3 Cuadro sinóptico de la biomasa residual

Fuente: Alex Portero

2.4.4.2 Características físicas de los residuos forestales

a) Densidad aparente

La densidad aparente se refiere a la masa del material por unidad de volumen. Como el volumen aparente es mayor que el volumen real, esto debido a los espacios que están presentes en medio de estos, la densidad aparente es menor que

la densidad real, ya que esta se mide sin tomar en cuenta los huecos entre las partículas.

Junto, al poder calorífico y la densidad aparente determinan la densidad de energía que es, la energía potencial disponible por unidad de volumen de la biomasa. En general, las densidades de energía de la biomasa son aproximadamente un décimo de los combustibles fósiles tales como el petróleo o carbón de alta calidad (Luis Toscano, 2009).

b) Humedad

El destino del aserrín dependerá del contenido de humedad, esta situación se expresa claramente en el precio de comercialización del aserrín dentro del mercado y la utilización final que se le dé a este. El aserrín húmedo (alrededor de un 58,4% base húmeda) y la corteza no tienen un destino más claro que el de ser depositado en vertederos o utilizado en calderas, mientras que el aserrín seco proveniente de procesos de remanufactura (partes y piezas de muebles, molduras, etc.) es muy bien cotizado.

El contenido de humedad considerado óptimo para el procesado de la materia prima está en el rango de entre 8 -12%(BH) (Alakangas, 2002). La madera blanda (coníferas, entre otros) es considerada ligeramente mejor como materia prima que la madera dura (roble, entre otros) debido principalmente a su mayor contenido de lignina. La lignina es un aglutinante natural de las fibras de la madera y actúa con esta misma propiedad sobre el material que constituye los pellets.

Los desechos de remanufactura presentan por lo general bajos contenidos de humedad, debido a que provienen de procesos industriales en los que la materia prima es secada previamente a su procesado. En el caso de aquellos desechos de madera provenientes directamente del bosque o del aserrío directo para el

dimensionado de la madera que va a ser procesada, estos presentan contenidos de humedad por sobre un 50%.

Para poder identificar experimentalmente el contenido de humedad de la biomasa residual forestal (aserrín) es necesario saber que esta es una magnitud que expresa la cantidad de agua en un material sólido y que puede representar en términos de una base masa seca o de una base de masa húmeda. Aunque ambas expresiones representan el contenido de humedad de una muestra, sus valores numéricos son distintos, por lo que al expresar el contenido de humedad sin indicar la base de masa, se puede incurrir en un error de interpretación.

c) Contenido de humedad

Debido a que la mayoría de los materiales sólidos están constituidos de materia seca y agua, se puede establecer que la masa total (m_h) del material es igual a la suma de su masa seca (m_s) y de su masa de agua (m_{H_2O}). (Enrique Martínez, 2010)

$$\begin{array}{l} \text{Masa total} \\ m_h = m_s + m_{H_2O} \end{array} \quad \text{Ec. 2.1}$$

d) Contenido de humedad en base húmeda

Es el cociente entre la masa de agua dentro del material y su masa total.

$$\begin{array}{l} \text{Porcentaje de humedad en base húmeda} \\ \%H_{bh} = \frac{m_{H_2O}}{m_h} * 100 \end{array} \quad \text{Ec. 2.2}$$

El contenido de humedad representa el porcentaje de masa de agua que contiene la muestra respecto a su masa total (m_h). En esta ecuación la masa de agua es una fracción de la masa total, es decir la masa de agua es menor o igual a la masa total del material. La definición de H_{bh} permite identificar de manera “intuitiva” el

punto en el cual el material solo está constituido por materia seca (0 %) y el punto en el que solo está constituido de agua (100 %).

Un análisis similar al realizado para H_{bs} permite observar que en el límite $m_{H_2O} \rightarrow 0$, entonces $H_{bh} \rightarrow 0$, y para materiales que cumplen $m_{H_2O} \gg m_s$, entonces $H_{bh} \rightarrow 100$. En las ecuaciones para H_{bs} y H_{bh} la masa de agua se puede calcular indirectamente de la masa de la muestra sin secar y su masa seca. (Martines E. y Lira L. 2010)

2.4.4.3 Granulometría y proceso de tamizado

Es una de las propiedades físicas más importantes ya que de esta dependerá o no de un proceso previo de triturado, para su homogeneización y disminución de tamaño que posteriormente pasará a formar los pellets. De existir partículas que no sean aptas de acuerdo a su tamaño serán retiradas de la materia prima que se va a peletizar, y serán devueltas a la etapa de triturado, esto mediante un proceso de tamizado, el cual consta de varias etapas que garantizaran el tamaño de las partículas.

2.4.4.4 Proceso de peletizado del aserrín de madera

Los pellets son elementos densificados de forma cilíndrica con diámetros comprendidos normalmente entre 6 y 12mm y longitudes de 10 a 30mm, el densificado de este residuo es necesario debido a que eleva el poder calorífico, además al ser homogéneos en propiedades y dimensiones, permiten la automatización de los sistemas de alimentación y control de la combustión.

2.4.4.5 Presión de compactación de los pellets

Los rodillos de presión son los encargados de comprimir el aserrín dentro de los agujeros o dados que contiene la matriz circular plana. En este proceso de compresión se generan presiones y fuerzas en el interior del dado, las mismas que dependerán de varios factores. (Arpi J. et al 2010)

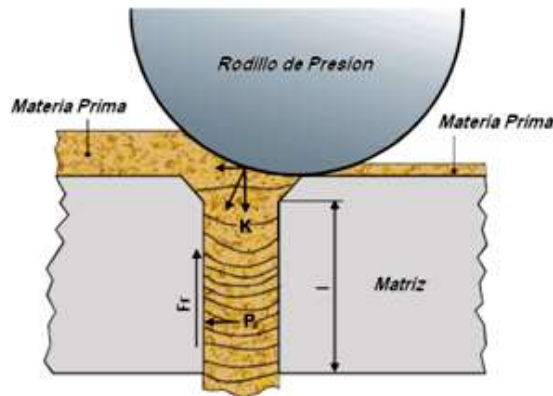


Figura 2.4 Fuerzas de Compresión del Aserrín
Fuente: Technical Research Center of Finland 2002

La presión con la cual se comprime en el aserrín en el interior de cada uno de los dados de la matriz está en función de la clasificación de la madera y la deformación que se produce en la extrusión del material. La presión de compactación del aserrín equivale a la presión que debe ejercer el rodillo para formar el pellet. Las presiones de compactación oscilan en una fuerza aplicada entre 1100 Kg/cm^2 a 2500 Kg/cm^2 dependiendo de las características de las especies de madera utilizadas. (Leaver, R. 1970)

Para la presente investigación el proceso de peletizado del aserrín se realizará por medio de una prensa oleohidráulica, disponible en los laboratorios de la universidad, con dados que permitan el compactado del aserrín tal como se lo efectuaría por medio de los rodillos de presión anteriormente mencionados, esto debido al alto costo de la fabricación de la matriz y demás elementos de la peletizadora, y debido a la extensión del estudio realizado.

En cuanto al calor que es generado en la matriz y rodillos, producto de la fricción, este calor será proporcionado por resistencias eléctricas cuya temperatura será controlada mediante un termostato.

2.4.4.6 Sistemas industriales para peletizado del aserrín de madera

a) Peletizadora de matriz plana

La característica principal de una peletizadora de matriz plana es que para este caso los rodillos recorren la cara superior del disco horizontal, forzando al material a pasar por los orificios, la presión aumenta a medida que más material se va acumulando dentro del canal, esto hace que el material compactado se desplace hacia afuera de la matriz, formando así los pellets.

El número de rodillos (2-6) depende del tamaño de la peletizadora, en los modelos más económicos los rodillos permanecen estacionarios mientras la matriz gira. La alimentación de este tipo de peletizadoras es más simple debido a que es por gravedad desde la parte superior, debiendo ser esta la adecuada para evitar atascamientos. Las ventajas respecto a la peletizadora anular son la mayor facilidad de limpieza, construcción más simple debido a la alimentación.

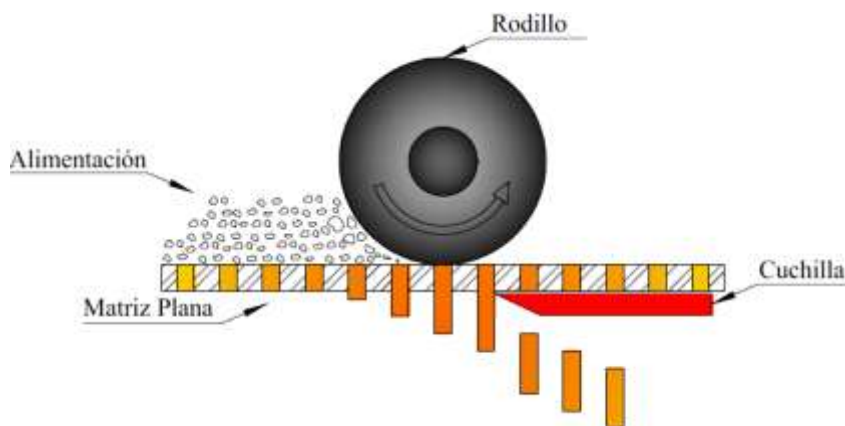


Figura 2.5 Esquema del sistema de Matriz Plana
Elaborado por: Alex Portero

b) Peletizadora de matriz anular

En este equipo la forma de la matriz es anular o en anillo. Su funcionamiento es de forma vertical de este tipo de prensa existen dos variantes, en el primero la matriz anular es fija y los rodillos, giran sobre la superficie interna del anillo, estos empujan la materia a través de las numerosas hileras; en el segundo los rodillos son fijos y es la matriz la que gira a alta velocidad, a diferencia de la peletizadora de matriz plana en esta el numero de rodillos es menor (1-3). Este modelo es el más común fabricado a nivel industrial por sus menores costos y mayor disponibilidad.

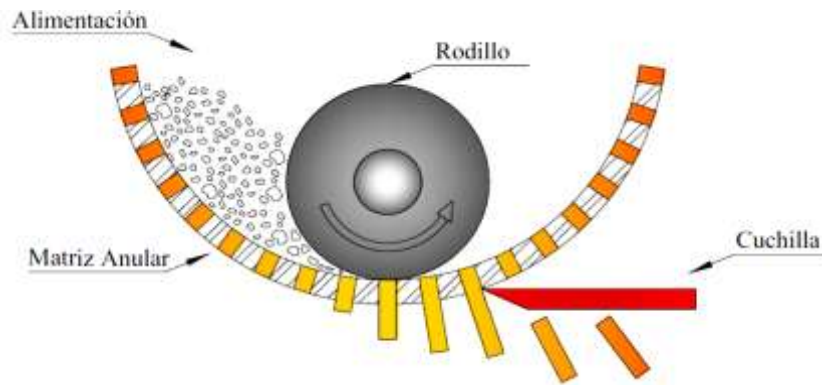


Figura 2.6 Esquema del sistema de Matriz Anular
Elaborado por: Alex Portero

2.4.4.7 Calor aplicado exteriormente

La temperatura, junto con la humedad, es el factor cuyos efectos sobre los procesos de densificación son más acentuados. La aplicación de calor a un material densificado en formación confiere a éste una mayor cohesión, necesitándose una presión mínima para obtener la densidad deseada.

La hipótesis que justifica la acción de la temperatura se basa en las características de las ligninas: a temperaturas comprendidas entre los 80 °C y 200 °C, según las materias estudiadas, la lignina se reblandece, modifica su estructura y tras su

enfriamiento, asegura una mayor unión de las partículas. En este sentido la lignina es considerada como una cola termoplástica natural. (Relova I. et al 2006)

2.4.4.8 Temperatura de salida de los pellets

El aserrín al ser sometida al proceso de peletizado, tiende a elevar la temperatura de salida de los pellets, que en un principio resulta ventajosa, ya que ayuda a la lignina que es el ligante natural de la madera, a mantener unidas las partículas de aserrín. Pero una vez formado los pellets estos deben ser enfriados rápidamente hasta la temperatura ambiente, para brindarle al pellet la característica final de friabilidad. En la presente investigación se añadió calor por medio de un elemento eléctrico por lo que los pellets obtenidos poseían temperaturas de hasta un máximo de 94°C, por lo que fue necesario enfriarlos a temperatura ambiente antes de seguir con los métodos de ensayo posteriores.

2.4.4.9 Poder aglutinante del producto

Las temperaturas originadas durante la fase de prensado producen un reblandecimiento de la lignina, de forma que tras su enfriamiento funciona como un aglomerante de las partículas. Esta acción aglomerante de la lignina a alta temperatura, permite que para la fabricación de pellets, a partir de elementos de madera, no sea necesario agregar ningún tipo de aglomerante (resinas o ceras).

El contenido de humedad considerado óptimo para el procesado de la materia prima está en el rango de entre 8 -12%. La madera blanda (coníferas, entre otros) es considerada ligeramente mejor como materia prima que la madera dura (roble, entre otros) debido principalmente a su mayor contenido de lignina. La lignina es un aglutinante natural de las fibras de la madera y actúa con esta misma propiedad sobre el material que constituye los pellets (Alakangas, 2002).

2.4.4.10 Agentes auxiliares (aditivos)

Los aditivos no son usados a menudo en la fabricación de los pellets, debido a que su aplicación encarece los costos de producción y en la mayoría de los casos no son necesarios. Los aditivos utilizados no deben intervenir la combustión o producir gases tóxicos ni malolientes. Los agentes pueden ser melaza, celulosa, el más utilizado por las restricciones de los anteriores es el vapor de agua.

El vapor es el aditivo más utilizado en la peletización. Este puede ser seco o estar ligeramente calentado, con el fin de secar el material, pero teniendo la precaución de no elevar la temperatura de la materia prima en exceso. Se ha logrado determinar que el uso de vapor contribuye a disminuir el tiempo de uso de los troqueles y hace que los pellets sean más fuertes y cohesionados (Kyto et al 1981).

El uso de vapor es mayoritariamente aplicado para operaciones industriales de gran magnitud debido a que este contribuye a la humectación de los residuos y a la elevación de la temperatura que contribuye a que la lignina aglomere con mayor facilidad las fibras, de este modo no se añaden ningún tipo de aglutinante externo.

2.4.4.11 Forma y estructura de los pellets

Tabla 2.3 Valores de diámetro y longitud de los pellets a nivel internacional

Tamaños de los pellets	Diámetro (mm)	Longitud (mm)
Austria	4-10	< 5* diámetro
Suecia	< 25	< 4* diámetro
Alemania	4-10	< 5
	indicar	< 5* diámetro

Fuente: www.cartif.es

La forma de los pellets que se seleccionó es cilíndrica, y de tamaño, de diámetro 8mm, y longitud 15mm que es un tamaño que a futuro facilitará el transporte así como también el abastecimiento a las calderas.

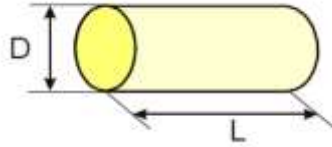


Figura 2.7 Esquema del diámetro y longitud del pellet
Elaborado por: Alex Portero

2.4.4.12 Distribución de tamaño de partículas

La distribución uniforme de las partículas facilita el proceso de compresión, ya que cuando estas poseen tamaños y formas similares son más fáciles de peletizar, además de influenciar también en la formación de “finos”.

2.4.4.13 Formación de finos

Son evitados en lo posible utilizando un tamiz que impedirá el paso de las partículas mayores a 3mm, de tal manera que los polvos finos que pasan por este tamiz sean rechazados del proceso y las partículas que se queden en el tamiz serán usadas para el peletizado. De no realizar el separado de los finos, una alta cantidad de estos produciría averías en los equipos de combustión.

2.4.4.14 Friabilidad

Las características físicas del pellet pueden ser muy diferentes, en función de la materia prima y del equipo de peletizado empleados. Interesa que el pellet adquiera una resistencia, dureza y friabilidad aceptables, con el fin de evitar su disgregación en su posterior proceso de manipulación.

a) Ensayos de friabilidad

Este ensayo consiste en arrojar uno a uno cada pellet de una altura de 1 m, hacia un suelo cerámico y observar en cuantas partes se rompe cada uno (2, 3 o más partes). Después de ensayada una cantidad determinada de pellets, se calcula una proporción entre los pellets iniciales y los resultantes al final de cada ensayo. La fórmula utilizada para los cálculos de friabilidad se presenta a continuación (Soto G et al 2008, 132):

Friabilidad de los pellets

$$FR = \frac{N_i}{N_f}$$

Ec. 2.3

Siendo:

FR: es la friabilidad resultante (adimensional)

Ni: es el número de pellets al inicio del ensayo

Nf: es el número de pellets al final del ensayo (enteros y fraccionados) (Marcos y Camps, 2002).

2.4.4.15 Contenido de cenizas

Son también normados los valores del contenido de cenizas en el pellet debido a que esta influye en la emisión de partículas, además del costo de aditivos para la eliminación de estas.

Para determinar el contenido de cenizas es necesario someter a una muestra de aproximadamente 3 gramos a una temperatura de 105°C durante 3 horas para luego pesarla, y así encontrar el porcentaje de ceniza que ha quedado sin combustionarse.

2.4.4.16 Transferencia de calor

a) Primera ley de la termodinámica

A la primera ley de la termodinámica también se la conoce como el principio de la conservación de la energía, relaciona las diversas formas de interacción de la energía. La primera ley establece que “*la energía no se puede crear ni destruir durante un proceso; solo se puede cambiar de forma*”. Por tanto toda la energía que interviene en un proceso debe justificarse. El principio de conservación de energía se expresa como: el cambio neto $[\Delta E_{\text{sistema}}]$ (incremento o disminución) en la energía total del sistema durante un proceso es igual a la diferencia entre la energía total que entra $[E_{\text{entrada}}]$ y la energía total que sale $[E_{\text{salida}}]$ del sistema durante el proceso.

$$[\Delta E_{\text{sistema}}] = [E_{\text{entrada}}] - [E_{\text{salida}}] \quad \text{Ec. 2.4}$$

b) Sistema de transferencia de calor

La energía se puede transferir desde o hacia un sistema de tres formas: calor, trabajo y flujo másico. Las dos formas de interacción de la energía a una masa fija o sistema cerrado son la transferencia de calor y trabajo.

La transferencia de calor $[Q]$ (causada por una diferencia de temperatura) hacia un sistema incrementa la energía de las moléculas (ganancia de calor), mientras que la transferencia de calor desde un sistema disminuye la energía las moléculas (pérdida de calor). La transferencia de trabajo $[W]$ es una interacción de energía que no es causada por una diferencia de temperatura entre un sistema y sus alrededores (émbolos, ejes, resistencias eléctricas). El trabajo realizado sobre un sistema incrementa la energía de este, mientras que el trabajo realizado por un sistema la disminuye. El flujo másico $[m]$ que entra y sale del sistema funciona

como un mecanismo adicional de transferencia de energía. Cuando entra masa al sistema la energía aumenta, mientras que cuando sale esta disminuye.

Como la energía puede ser transferida en las formas de calor, trabajo y masa, su transferencia neta es igual a la diferencia entre las cantidades transferidas, el balance de energía se expresa como:

$$\begin{aligned}\Delta E_{sistema} &= E_{entrada} - E_{salida} \\ &= (Q_{entrada} - Q_{salida}) + (W_{entrada} - W_{salida}) + \\ &\quad (E_{masa-entrada} - E_{masa-salida}) \quad \text{Ec. 2.5}\end{aligned}$$

Para realizar el calentamiento del aserrín en el dado de compresión es necesario analizar un sistema de transferencia de calor, el cual se adapte mejor a las condiciones experimentales.

c) **Transferencia de calor por conducción**

La conducción es la transferencia de energía de las partículas más energéticas de una sustancia hacia las adyacentes menos energéticas, como resultado de interacciones entre esas partículas. La conducción puede tener lugar en los sólidos, líquidos o gases.

La velocidad de la conducción de calor a través de un medio depende de la configuración geométrica del mismo, su espesor y el material de que esté hecho, así como la diferencia de temperatura a través de él, concluyéndose en:

“La velocidad de la conducción de calor a través de una capa plana es proporcional a la diferencia de temperatura (ΔT) a través de ésta y al área (A) de transferencia de calor, pero inversamente proporcional al espesor (Δx) de esa capa” (CENGEL, Y. Transferencia de Calor)

$$\dot{Q}_{CONDUC} = kA \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad \text{Ec. 2.6}$$

Donde la constante de proporcionalidad k , representa la conductividad térmica del material, que a la vez es una medida de la capacidad de un material para conducir calor.

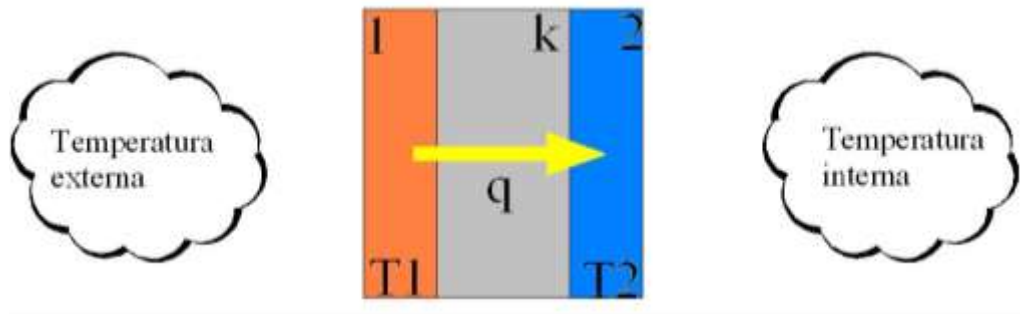


Figura 2.8 Esquema de la transferencia de calor por conducción
Fuente: Alex Portero

d) Convección

La convección es la forma de propagación de calor de un lugar a otro por el movimiento de una sustancia. Es un mecanismo característico de transferencia entre un sólido y un fluido que está en contacto. Si el fluido es obligado a moverse por un ventilador o una bomba el proceso se llama de convección forzada; pero si la sustancia se mueve a causa de diferencias de densidad, se habla de un fenómeno de convección natural.

La rapidez de la transferencia de calor por convección sigue la siguiente ecuación:

$$Q_{conv} = h_{conv} * A_s(T_s - T_{\infty}) \quad \text{Ec. 2.7}$$

Donde:

h_{conv} : es el coeficiente de transferencia de calor por convección [$W/m^2\text{°C}$]

T_s : es la temperatura de la superficie [°C]

T_{∞} : es la temperatura ambiente [°C]

A_s : es el área de la superficie [m^2]

Tabla 2.4 Valores típicos de coeficiente de convección

Convección Libre	
Proceso	h(W/m²°C)
Gases	2 – 25
Líquido	50 – 1000
Convección forzada	
Gases	25 – 250
Líquido	50 – 20000

Fuente: Fundamentos de Transferencia de calor-Frank P. Incropera y David P. De Witt.

e) Número de Grashof

Es un parámetro adimensional que representa los efectos de la convección natural, es la razón entre la fuerza de flotabilidad y la fuerza viscosa que actúa sobre el fluido.

$$Gr_H = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)}{v^2} \quad \text{Ec. 2.8}$$

Donde:

g : es la aceleración de la gravedad (m/s^2)

β : coeficiente de expansión volumétrica ($1/K$)

T_s : temperatura de la superficie ($^{\circ}C$)

T_∞ : temperatura del medio ambiente ($^{\circ}C$)

v : viscosidad cinemática del fluido (m^2/s)

f) Número de Nusselt

Es el coeficiente adimensional de transferencia de calor por convección, representa el mejoramiento de la transferencia de calor a través de una capa de fluido como resultado de la convección en relación con la conducción a través de la misma capa. (Popiel 2006)

$$Nu_H / Nu_{H-FP} = 1 + B \left[32^{0.5} (Gr_H)^{-0.25} \left(\frac{L}{D} \right) \right]^C \quad \text{Ec. 2.9}$$

$$Nu_{H-FP} = 0.68 + \frac{0.67 Ra_H^{0.25}}{\left[1 + (0.492 / Pr)^{9/16} \right]^{4/9}} \quad \text{Ec. 2.10}$$

Donde:

Nu_H : número de Nusselt de un cilindro esbelto vertical

Nu_{H-FP} : número de Nusselt de una placa plana

Nu_H / Nu_{H-FP} : número de Nusselt de un cilindro esbelto vertical respecto a una placa plana.

g) Número de Prandtl

Mediante este número se describe el espesor relativo de las capas límite de velocidad y térmica.

$$Pr = \frac{c_p \mu}{k} \quad \text{Ec 2.11}$$

Donde:

c_p : capacidad calorífica a presión constante ($kJ/Kg * ^\circ C$)

μ : viscosidad dinámica ($Pa * s$)

k : conductividad térmica ($W/m * ^\circ C$)

h) Número de Rayleigh

Es el producto de los números de Grashof y de Prandtl, es decir es la razón de las fuerzas de flotabilidad y (los productos de) las difusividades térmica y cantidad de movimiento.

$$Ra_H = Gr_H * Pr \quad \text{Ec. 2.12}$$

Donde:

Gr_H : número de Grashof

Pr : número de Prandtl

i) Coeficiente de expansión volumétrica

Representa la variación de la densidad de un fluido con la temperatura a presión constante, y para un gas ideal este equivale al inverso de la temperatura ($1/T$) donde T es la temperatura termodinámica es decir expresada en escala absoluta.

2.5 Hipótesis

La adición de calor al aserrín de madera de Eucalipto y de Copal, mejorará la friabilidad

2.6 Señalamiento de variables de la hipótesis

Variable independiente: Adición de calor al aserrín

Variable dependiente: Friabilidad

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

3.1 Modalidad básica de la investigación

La presente investigación estuvo enmarcada dentro de un enfoque cuantitativo ya que se trata de determinar los valores de los parámetros para un peletizado adecuado de la biomasa residual que en este caso será el aserrín de madera, ya que de esto dependerá su posterior uso como combustible ecológicamente limpio, tanto a nivel doméstico como industrial.

3.2 Nivel o tipo de la investigación

Para el presente trabajo es necesario realizar los siguientes tipos de investigación: **Investigación exploratoria** que permite el planteamiento del problema, a fin de tener una idea precisa de lo que se desea estudiar; siendo esta la base para conocer los parámetros básicos para el peletizado del aserrín como son: Humedad, Granulometría del aserrín, Presión de peletizado y Temperatura así como también los parámetros de calidad del pellet: Friabilidad.

Investigación correlacional ya que esta tiene como propósito medir el grado de relación que existe entre los parámetros térmicos de peletizado del aserrín sobre la calidad de los pellets obtenidos, al variar cada uno de estos.

Investigación experimental ya que mediante esta se manipularan las variables independientes para observar los efectos en las respectivas variables dependientes,

además esta investigación permitió controlar las variables de la hipótesis puesta a prueba por medio de ensayos que fueron de laboratorio y de campo.

3.3 Población y muestra

3.3.1 Población

La población de la presente investigación fueron los residuos de biomasa forestal producto de la transformación de la madera

Tabla 3.1 Volumen aprobado para aprovechamiento de madera en la región Sierra (2007-2009) madera en pie

PROVINCIAS	VOLUMEN AUTORIZADO PARA LA CORTA <small>(en miles de metros cúbicos)</small>				
	2007	2008	2009	PROMEDIO m³/año	PARTICIPACIÓN RESPECTO AL TOTAL NACIONAL (%)
Pichincha	296,8	261,4	237,5	265,2	10,05
Cotopaxi	223,0	258,4	229,8	237,0	8,96
Chimborazo	123,6	159,9	251,3	178,3	6,76
Bolívar	81,3	57,2	62,0	66,8	2,53
Loja	51,1	48,3	80,1	59,9	2,27
Carchi	50,2	42,5	42,9	45,2	1,71
Imbabura	32,4	29,7	59,9	40,6	1,54
Azuay	10,3	57,0	26,3	31,2	1,18
Tungurahua	17,3	36,1	29,0	27,5	1,04
Cañar	15,3	10,1	19,1	14,8	0,56
VOLUMEN TOTAL AUTORIZADO	901,3	960,6	1.037,0	966,5	36,58

Fuente: Aprovechamiento de recursos forestales en el Ecuador

Como se observa Tungurahua se encuentra entre las provincias de mayor aprovechamiento de recursos madereros provenientes de plantaciones forestales, principalmente de Eucalipto y Pino.

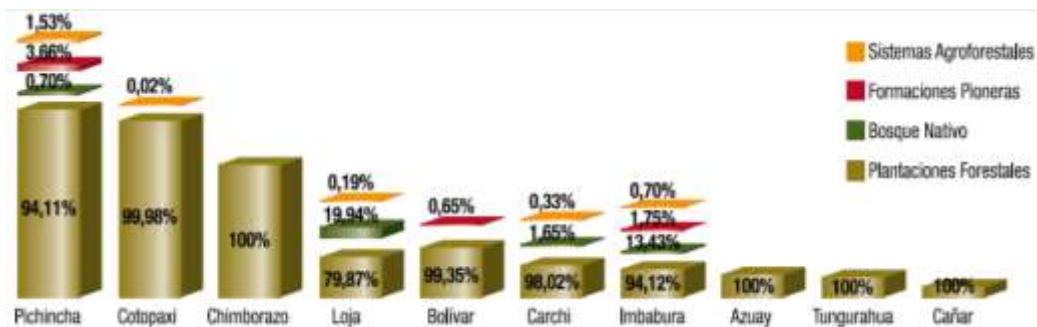


Figura 3.1 Madera autorizada para el aprovechamiento a nivel provincial por origen del recurso en la región Sierra

Fuente: Aprovechamiento de recursos forestales en el Ecuador

3.3.2 Muestra

Para realizar los ensayos se ha determinado una muestra de 20 pellets que van a ser ensayados para cada temperatura y especie ya que es necesario producir un mínimo de tres pellets bajo las mismas condiciones para poder calcular valores promedio (Stelte W. et al. 2011).

Residuos de aproximadamente 6,25 Kg/h de aserrín y 4,16 Kg/h de viruta. Para la realización de los ensayos se procedió a realizar 200 pellets con las siguientes características:

Tabla 3.2 Especificación de los pellets

Pellets	
Diámetro	8 mm
Longitud	15 mm
Peso	1,1 g aproximadamente
Cantidad	20 pellets por cada temperatura y especie

Fuente: Alex Portero

3.4 Operacionalización de variables

3.4.1 Variable independiente: Adición de calor al aserrín

Conceptualización	Dimensiones	Indicadores	Ítems Básicos	Técnicas e instrumentos
En la utilización de la biomasa residual forestal generalmente es necesario realizar una serie de operaciones de transformación física y acondicionamiento (adición de calor), ya que la biomasa posee un alto grado de humedad y una baja densidad lo que la hace bastante inconveniente para su utilización como combustible ecológico. Por lo que bajo ciertos parámetros el aserrín de madera es peletizado	Condiciones térmicas en el interior del cilindro de compactación	Temperaturas recomendadas	25 – 105°C	Cronómetro
		Temperatura mínima	20 – 25°C	Termocupla Ficha de Observación
		Temperaturas no adecuadas	< 20°C	

3.4.2 Variable dependiente: Friabilidad

Conceptualización	Dimensiones	Indicadores	Ítems Básicos	Técnicas e Instrumentos
La calidad del pellet que se obtendrá puede ser determinada por dos de los principales factores que influyen para su evaluación como son la durabilidad que para este caso se denomina friabilidad.	Grado de aglomeración de las partículas	Alto	Friabilidad FR > 0,9 Densidad d > 1,1 g/cm ³	Ficha de observación
		Medio	Friabilidad 0,3 < FR < 0,9 Densidad 0,8 < d < 1,1	Guía de laboratorio
		Bajo	Friabilidad FR < 0,3 Densidad d < 0,8	

3.5 Plan de recolección de la información

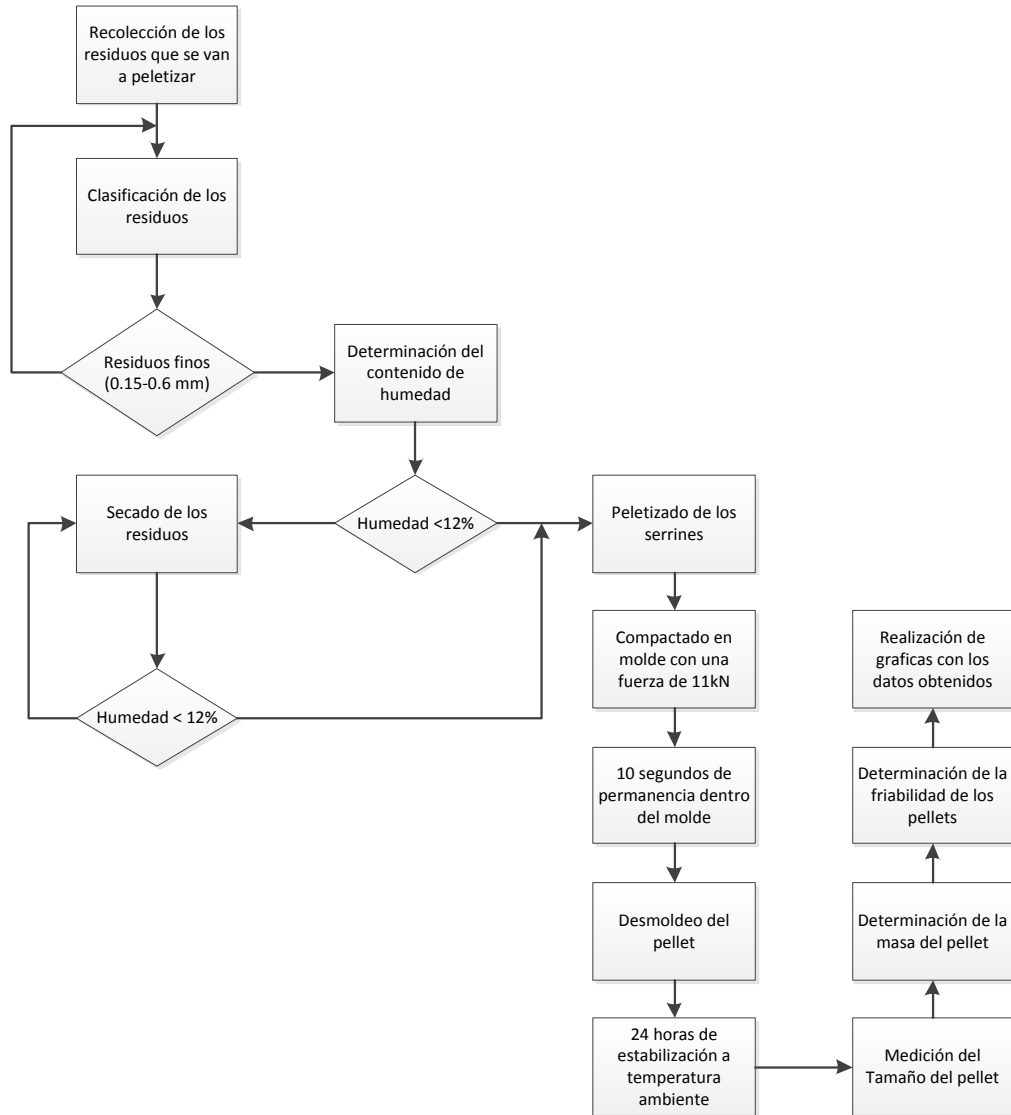


Figura 3.2 Diagrama de flujo para la recolección de la información
Fuente: Alex Portero

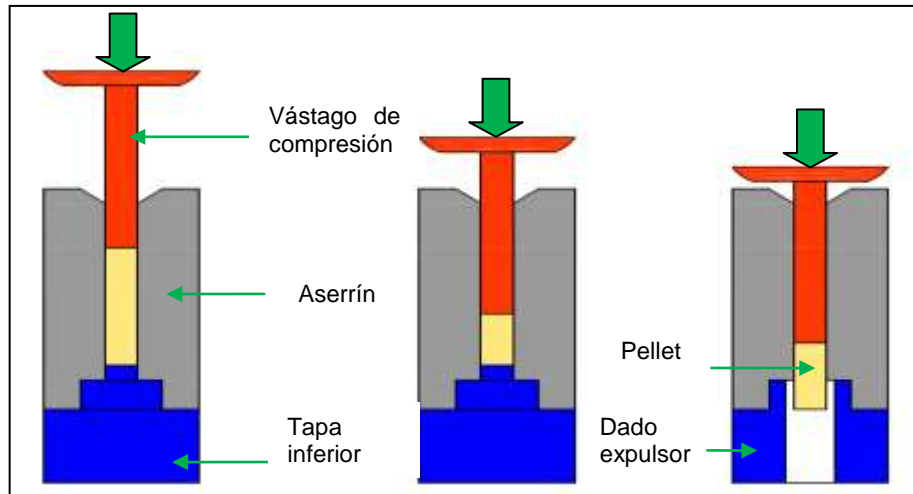







Figura 3.3 Esquema del proceso de peletizado
Elaborado por: Alex Portero

Tabla 3.3 Elementos de laboratorio para el ensayo de compactación de serrines

Materiales de laboratorio			
Matriz o Cilindro de compactación		Tope extraíble	
Expulsor del pellet		Vástago de compresión	
Resistencia eléctrica			

Elaborado por: Alex Portero

3.6 Procesamiento y análisis de la información

Una vez terminado el peletizado del aserrín de Eucalipto y Copal se determinó masa, volumen y densidad de cada pellet, obtenido con las diferentes condiciones establecidas para su estudio, así como también se examinó la forma de los bordes de cada pellet y el aspecto de la superficie en cuanto a color y brillo se refiere.

A cada grupo de pellets se lo sometió al ensayo de caída para obtener el valor de friabilidad, cuya fórmula es la ecuación 2.3

Mediante la categorización y tabulación de los datos se construyeron graficas de dispersión en las que se relacionan:

- La temperatura del cilindro de compactación y la friabilidad de los pellets.
- La temperatura del cilindro de compactación y la fuerza necesaria para expulsar el pellet.
- La densidad y la friabilidad de los pellets.

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

4.1 Análisis de resultados

En esta investigación se muestra los datos obtenidos del análisis térmico para la producción de pellets de madera, los resultados obtenidos se muestran en tablas para cada uno de los casos de estudio, los cuales tuvieron como variante la temperatura a la cual fueron comprimidos los serrines.

4.1.1 Aserrín

El aserrín de Eucalipto y de Copal se obtuvo en la empresa Maderas Guerrero, donde dichas maderas son previamente sometidas a un proceso de secado, con el propósito de optimizar su posterior procesamiento, luego de los cuales ha sido separada la fracción de aserrín de un tamaño específico mediante tamices para proporcionar una muestra homogénea, debido al proceso de secado previo de la madera, el contenido de humedad del aserrín es uniforme y muy bajo, menor al 15%, lo que facilita el uso de este residuo como pellets.

4.1.1.1 Granulometría

Determinación del tamaño de partícula de los residuos



Figura 4.1 Tamices necesarios para realizar el ensayo
Fuente: Laboratorios de Ing. Civil

Las figuras 4.2-4.3 muestran el tamaño de partícula del aserrín que fue utilizado para fabricar los pellets, para los diferentes casos de estudio cuya única variable fue la temperatura del cilindro de compactación.

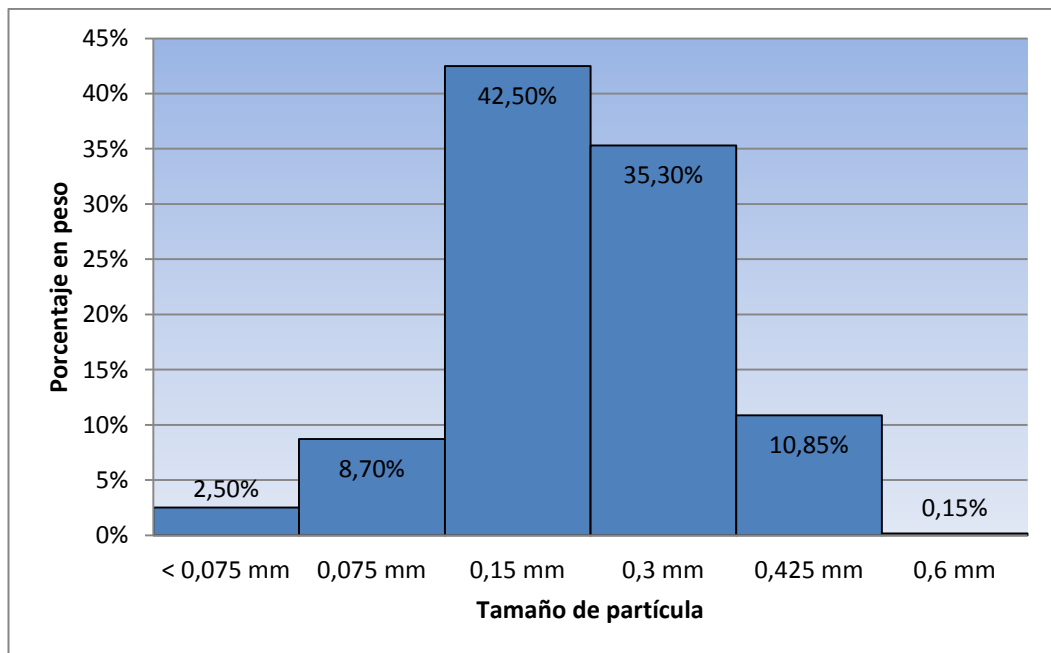


Figura 4.2 Análisis granulométrico de aserrín de Eucalipto
Elaborado por: Alex Portero

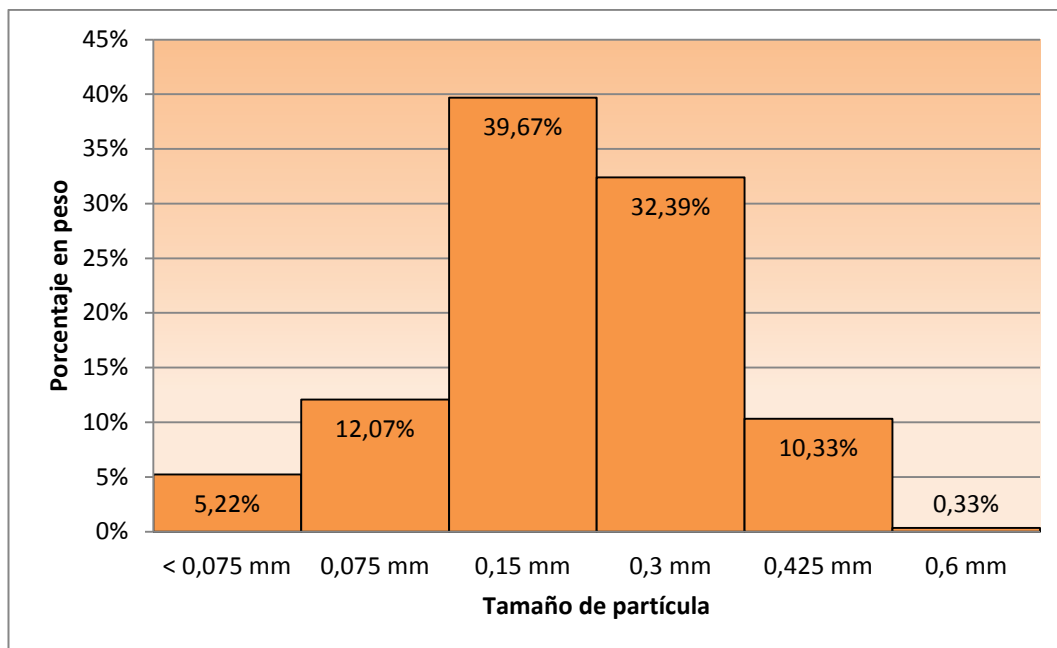


Figura 4.3 Análisis granulométrico de aserrín de Copal
Elaborado por: Alex Portero

En las figuras 4.2 y 4.3 se muestran que los porcentajes de partículas gruesas (tamaño > 0,15mm) en los serrines de Eucalipto y Copal superan el 82%, lo cual podría influir en la resistencia final del pellet, ya que los finos son más difíciles de peletizar.

4.1.1.2 Contenido de humedad

El contenido de humedad de la biomasa es un parámetro importante que debe evaluarse, ya que dependiendo de su valor se determinará si es necesario realizar un secado previo, con la finalidad de obtener un contenido de humedad apropiado para la obtención de pellets. Debido a su influencia en factores como la fuerza necesaria para realizar una compactación adecuada, la fricción del pellet contra las paredes del canal de compactación; los valores del contenido de humedad se determinaron mediante el secado de muestras de aserrín de las dos especies en una estufa a 105°C durante 24 horas, luego de las cuales se pesaron las muestras en una balanza con una precisión de 0,1 mg, obteniendo los valores de la tabla 4.1.

Tabla 4.1 Humedad del aserrín

Contenido de humedad promedio en base húmeda	
Aserrín de Eucalipto	7,57%
Aserrín de Copal	7,91%

Elaborado por: Alex Portero



Figura 4.4 Determinación del contenido de humedad en estufa a 105°C durante 24 horas

Fuente: Laboratorios la FCIAL

La humedad inicial de la madera aserrada que es de 60% a 70%, se redujo en el proceso de secado que realiza la empresa Maderas Guerrero, llegó hasta un contenido de humedad final del 12% que es el valor óptimo para utilizarla en los diferentes procesos productivos, mientras que los residuos poseen una humedad más baja debido a la pérdida de humedad producido por el maquinado de la madera.

4.1.1.3 Contenido de cenizas

Dicho contenido que tiene valores límite para su uso como biocombustible son menores a 1,5%, con lo que se puede observar que los pellets de aserrín de Eucalipto están dentro del límite por lo que su uso es adecuado en aplicaciones como son los sistemas de combustión residenciales como son calderas residenciales y estufas, consumo industrial en calderas de vapor o agua caliente.

Por otro lado los pellets de copal sobrepasan el límite impuesto para este tipo de biocombustibles por lo que no es recomendable el uso de estos; ya que al generar mayor cantidad de cenizas, los quemadores requerirán un mantenimiento frecuente para eliminar las cenizas que se acumularan en el depósito, ya que de no retirarlas hay la posibilidad de que estas cenizas lleguen a su punto de fusión, generando graves daños al quemador por adherencias que a la larga deterioraran los elementos del quemador inutilizándolo por completo.

Tabla 4.2 Contenido de cenizas

Contenido de cenizas de las especies madereras

Aserrín de Eucalipto	1,25%
Aserrín de Copal	4,28%

Elaborado por: Alex Portero



Figura 4.5 Horno de mufla para la determinación del contenido de cenizas
Fuente: Laboratorios de la FCIAL



Figura 4.6 Desecador donde se reduce la temperatura de las capsulas ensayadas
Fuente: Laboratorios de la FCIAL



Figura 4.7 Balanza Citizen CX220
Fuente: Laboratorios de la FCIAL

4.1.2 Proceso de peletizado



Figura 4.8 Proceso de peletizado en prensa hidráulica



Figura 4.9 Proceso de peletizado en prensa hidráulica y matriz unitaria

4.1.2.1 Pellets de Eucalipto

a) Análisis del proceso de peletizado de aserrín de Eucalipto

Tabla 4.3 Datos de los pellets a temperatura ambiente

Pellets de Eucalipto comprimidos a temperatura ambiente 21,2°C				
Pellets	Masa g	Longitud mm	Volumen cm³	Densidad g/cm³
1	1,1607	21,5	1,0807	1,074
2	0,7993	14,2	0,7138	1,120
3	0,9402	17,2	0,8646	1,087
4	0,9878	17,8	0,8947	1,104
5	1,1014	20,4	1,0254	1,074
6	1,0148	18	0,9048	1,122
7	0,9841	18	0,9048	1,088
8	0,8978	16	0,8042	1,116
9	0,986	17,7	0,8897	1,108
10	0,999	18	0,9048	1,104
11	0,9293	16,8	0,8445	1,100
12	0,8839	15,5	0,7791	1,134
13	0,8565	15	0,7540	1,136
14	1,0173	18,1	0,9098	1,118
15	1,0701	19,6	0,9852	1,086
16	0,9412	16,6	0,8344	1,128
17	1,1143	20	1,0053	1,108
18	0,9411	16,5	0,8294	1,135
19	0,9311	16,5	0,8294	1,123
20	0,928	16	0,8042	1,154
Promedio	0,9741	17,47	0,8781	1,111

Elaborado por: Alex Portero

Tabla 4.4 Resumen de las propiedades físicas de los pellets ensayados

Características físicas de los pellets		
Forma	Pellet con bordes irregulares y que sueltan partículas de aserrín al tacto	
Tamaño	Diámetro 8mm Longitud Prom. 17,47mm	
Aspecto	Color	Amarillo suave
	Brillo	Sin brillo
Friabilidad	0,63	

Elaborado por: Alex Portero

b) Análisis del proceso de peletizado de aserrín de Eucalipto

Tabla 4.5 Datos de los pellets a temperatura de 45°C

Pellets de Eucalipto comprimidos a temperatura 45°C				
Pellets	Masa g	Longitud mm	Volumen cm³	Densidad g/cm³
1	1,0548	16,8	0,844	1,249
2	1,1352	18	0,905	1,255
3	1,1129	17,8	0,895	1,244
4	1,0605	16,8	0,844	1,256
5	0,9883	15,6	0,784	1,260
6	1,0544	16,7	0,839	1,256
7	1,1029	17,7	0,890	1,240
8	1,00296	16	0,804	1,247
9	1,0216	16,2	0,814	1,255
10	1,0339	16,4	0,824	1,254
11	1,0805	17	0,855	1,264
12	1,0135	16	0,804	1,260
13	1,0911	17,1	0,860	1,269
14	1,009	16	0,804	1,255
15	1,0084	16	0,804	1,254
16	0,9916	15,7	0,789	1,257
17	1,102	17,4	0,875	1,260
18	0,9869	15,6	0,784	1,259
19	1,0549	16,6	0,834	1,264
20	1,0521	16,8	0,844	1,246
Promedio	1,0478	16,61	0,835	1,255

Elaborado por: Alex Portero

Tabla 4.6 Resumen de las propiedades físicas de los pellets ensayados

Características físicas de los pellets		
Forma	Pellet con bordes definidos y que sueltan muy pocas partículas de aserrín al tacto	
Tamaño	Diámetro 8mm Longitud prom. 16,61mm	
Aspecto	Color	Amarillo suave
	Brillo	Brillo leve
Friabilidad	0,80	

Elaborado por: Alex Portero

c) **Análisis del proceso de peletizado de aserrín de Eucalipto**

Tabla 4.7 Datos de los pellets a temperatura de 65°C

Pellets de Eucalipto comprimidos a temperatura 65°C				
Pellets	Masa g	Longitud mm	Volumen cm³	Densidad g/cm³
1	1,0572	16,4	0,824	1,282
2	1,0852	16,6	0,834	1,301
3	1,0752	15,5	0,779	1,380
4	1,0561	16,2	0,814	1,297
5	1,0015	15,5	0,779	1,285
6	1,0906	16,7	0,839	1,299
7	1,1873	18,3	0,920	1,291
8	1,1306	17,4	0,875	1,293
9	1,0832	16,5	0,829	1,306
10	1,124	17,26	0,868	1,296
11	1,0873	16,6	0,834	1,303
12	1,1464	17,7	0,890	1,289
13	0,9615	15	0,754	1,275
14	1,0595	16	0,804	1,317
15	1,0458	16	0,804	1,300
16	1,1131	17	0,855	1,303
17	1,1287	17,3	0,870	1,298
18	1,0274	15,8	0,794	1,294
19	1,0728	16,5	0,829	1,293
20	1,0341	15,8	0,794	1,302
Promedio	1,0783	16,503	0,830	1,300

Elaborado por: Alex Portero

Tabla 4.8 Resumen de las propiedades físicas de los pellets ensayados

Características físicas de los pellets		
Forma	Pellets de buena apariencia no hay partículas sueltas	
Tamaño	Diámetro 8mm Longitud prom. 16,5mm	
Aspecto	Color	Amarillo suave
	Brillo	Brillo mediano
Friabilidad	0,87	

Elaborado por: Alex Portero

d) **Análisis del proceso de peletizado de aserrín de Eucalipto**

Tabla 4.9 Datos de los pellets a temperatura de 85°C

Pellets de Eucalipto comprimidos a temperatura 85°C

Pellets	Masa g	Longitud mm	Volumen cm³	Densidad g/cm³
1	1,0826	16,7	0,839	1,290
2	1,0846	16,6	0,834	1,300
3	1,0646	16,4	0,824	1,291
4	1,0145	15,5	0,779	1,302
5	1,0701	16,5	0,829	1,290
6	1,1055	17	0,855	1,294
7	1,0746	16,5	0,829	1,296
8	1,1857	18	0,905	1,310
9	1,1247	17,3	0,870	1,293
10	1,0481	15,8	0,794	1,320
11	1,1161	17	0,855	1,306
12	1,1408	17,4	0,875	1,304
13	1,0949	16,9	0,849	1,289
14	1,1272	16,5	0,829	1,359
15	1,1456	17,5	0,880	1,302
16	1,0679	16,4	0,824	1,295
17	0,9715	15	0,754	1,288
18	1,0697	16,6	0,834	1,282
19	1,0278	16,9	0,849	1,210
20	1,0505	16	0,804	1,306
Promedio	1,0833	16,625	0,836	1,296

Elaborado por: Alex Portero

Tabla 4.10 Resumen de las propiedades físicas de los pellets ensayados

Características físicas de los pellets

Forma	Pellets bien definidos sin presencia de partículas sueltas	
Tamaño	Diámetro 8mm Longitud prom. 16,63mm	
Aspecto	Color	Amarillo suave
	Brillo	Brillo apreciable
Friabilidad	1,00	

Elaborado por: Alex Portero

e) **Análisis del proceso de peletizado de aserrín de Eucalipto**

Tabla 4.11 Datos de los pellets a temperatura de 105°C

Pellets de Eucalipto comprimidos a temperatura 105°C				
Pellets	Masa g	Longitud mm	Volumen cm³	Densidad g/cm³
1	1,1991	17,8	0,895	1,340
2	1,0774	16,1	0,809	1,331
3	0,958	14,2	0,714	1,342
4	1,0508	15,8	0,794	1,323
5	1,0251	15,3	0,769	1,333
6	1,0275	15,3	0,769	1,336
7	1,2376	18,6	0,935	1,324
8	0,9978	15	0,754	1,323
9	1,0071	15,2	0,764	1,318
10	1,028	15,5	0,779	1,319
11	1,0525	15,6	0,784	1,342
12	0,9808	14,64	0,736	1,333
13	1,0936	16,4	0,824	1,327
14	1,0355	15,5	0,779	1,329
15	1,0496	15,6	0,784	1,339
16	1,0163	17,5	0,880	1,155
17	0,9931	15	0,754	1,317
18	1,0349	15,52	0,780	1,327
19	1,1496	17,2	0,865	1,330
20	1,0352	15,5	0,779	1,329
Promedio	1,0524	15,863	0,797	1,321

Elaborado por: Alex Portero

Tabla 4.12 Resumen de las propiedades físicas de los pellets ensayados

Características físicas de los pellets	
Forma	Pellets bien definidos sin presencia de partículas sueltas
Tamaño	Diámetro 8mm Longitud prom. 15,86mm
Aspecto	Color Amarillo suave
	Brillo Brillo apreciable
Friabilidad	1,00

Elaborado por: Alex Portero

4.1.2.2 Pellets de Copal

a. Análisis del proceso de peletizado de aserrín de Copal

Tabla 4.13 Datos de los pellets a temperatura ambiente

Pellets de Copal comprimidos a temperatura ambiente 21,1°C				
Pellets	Masa g	Longitud mm	Volumen cm³	Densidad g/cm³
1	0,8551	15,5	0,779	1,098
2	0,8452	15,2	0,764	1,106
3	0,8641	15,5	0,779	1,109
4	0,8627	15,6	0,784	1,100
5	1	18,3	0,920	1,087
6	0,8202	14,7	0,739	1,110
7	0,9572	17,6	0,885	1,082
8	0,9172	16,9	0,849	1,080
9	0,8706	15,82	0,795	1,095
10	0,8524	15,5	0,779	1,094
11	0,8933	16,22	0,815	1,096
12	0,9168	16,68	0,838	1,093
13	0,9551	17,3	0,870	1,098
14	0,9279	16,78	0,843	1,100
15	0,8523	15,5	0,779	1,094
16	0,9395	17,1	0,860	1,093
17	0,8652	15,5	0,779	1,110
18	0,8923	17	0,855	1,044
19	0,936	16,8	0,844	1,108
20	0,9167	16,5	0,829	1,105
Promedio	0,8969	16,3	0,819	1,095

Elaborado por: Alex Portero

Tabla 4.14 Resumen de las propiedades físicas de los pellets ensayados

Características físicas de los pellets	
Forma	Pellet con bordes irregulares y que sueltan partículas de aserrín al tacto
Tamaño	Diámetro 8mm Longitud prom. 16,3mm
Aspecto	Color Marrón
	Brillo Sin brillo
Friabilidad	0,57

Elaborado por: Alex Portero

b. Análisis del proceso de peletizado de aserrín de Copal

Tabla 4.15 Datos de los pellets a temperatura de 45°C

Pellets de Copal comprimidos a temperatura 45°C				
Pellets	Masa g	Longitud mm	Volumen cm³	Densidad g/cm³
1	0,846	13,8	0,694	1,220
2	0,9757	16	0,804	1,213
3	1,0323	16,6	0,834	1,237
4	1,0279	16,7	0,839	1,225
5	0,9708	16,7	0,839	1,156
6	1,0364	16,9	0,849	1,220
7	0,9396	15,3	0,769	1,222
8	0,9815	16	0,804	1,220
9	0,9311	15,3	0,769	1,211
10	1,001	16,3	0,819	1,222
11	0,9797	16	0,804	1,218
12	0,9682	15,84	0,796	1,216
13	0,9591	15,5	0,779	1,231
14	0,9072	15,82	0,795	1,141
15	0,9541	16,2	0,814	1,172
16	0,9242	15	0,754	1,226
17	1,0109	16,3	0,819	1,234
18	0,9208	15	0,754	1,221
19	0,9297	15	0,754	1,233
20	0,943	15,3	0,769	1,226
Promedio	0,9619	15,778	0,793	1,213

Elaborado por: Alex Portero

Tabla 4.16 Resumen de las propiedades físicas de los pellets ensayados

Características físicas de los pellets	
Forma	Pellets de buena apariencia no hay partículas sueltas
Tamaño	Diámetro 8mm Longitud prom. 15,77mm
Aspecto	Color Marrón
	Brillo Leve brillo
Friabilidad	0,77

Elaborado por: Alex Portero

c. Análisis del proceso de peletizado de aserrín de Copal

Tabla 4.17 Datos de los pellets a temperatura de 65°C

Pellets de Copal comprimidos a temperatura 65°C				
Pellets	Masa g	Longitud mm	Volumen cm³	Densidad g/cm³
1	1,0365	16,5	0,829	1,250
2	1,0115	16,1	0,809	1,250
3	1,0144	16	0,804	1,261
4	1,0536	16,86	0,847	1,243
5	1,0545	16,8	0,844	1,249
6	0,9333	15	0,754	1,238
7	1,0117	16	0,804	1,258
8	1,0996	17,6	0,885	1,243
9	0,8702	14	0,704	1,237
10	0,9452	15,2	0,764	1,237
11	1,0648	16,86	0,847	1,256
12	0,9739	15,6	0,784	1,242
13	1,0322	16,2	0,814	1,268
14	1,0585	17	0,855	1,239
15	1,0435	16,6	0,834	1,251
16	0,866	14	0,704	1,231
17	1,0332	16	0,804	1,285
18	0,9603	15,2	0,764	1,257
19	0,9488	15,1	0,759	1,250
20	1,0243	16,14	0,811	1,263
Promedio	1,0018	15,938	0,801	1,250

Elaborado por: Alex Portero

Tabla 4.18 Resumen de las propiedades físicas de los pellets ensayados

Características físicas de los pellets	
Forma	Pellets de buena apariencia no hay partículas sueltas
Tamaño	Diámetro 8mm Longitud prom. 15,93mm
Aspecto	Color Marrón
	Brillo Brillo mediano
Friabilidad	0,87

Elaborado por: Alex Portero

d. Análisis del proceso de peletizado de aserrín de Copal

Tabla 4.19 Datos de los pellets a temperatura de 85°C

Pellets de Copal comprimidos a temperatura 85°C				
Pellets	Masa g	Longitud mm	Volumen cm³	Densidad g/cm³
1	1,0121	16,5	0,829	1,220
2	0,9414	15,4	0,774	1,216
3	0,9038	14,6	0,734	1,232
4	0,9481	15,4	0,774	1,225
5	0,9845	16	0,804	1,224
6	0,9442	15,2	0,764	1,236
7	0,9923	16	0,804	1,234
8	1,1042	17,6	0,885	1,248
9	0,9021	14,7	0,739	1,221
10	0,9097	15	0,754	1,207
11	0,9766	15,8	0,794	1,230
12	0,8966	14,42	0,725	1,237
13	0,9241	15	0,754	1,226
14	1,0186	16,4	0,824	1,236
15	0,8842	14,5	0,729	1,213
16	0,9548	15,6	0,784	1,218
17	0,9415	15,5	0,779	1,208
18	1,0508	17	0,855	1,230
19	1,1184	18	0,905	1,236
20	1,0153	16,5	0,829	1,224
Promedio	0,9711	15,756	0,792	1,226

Elaborado por: Alex Portero

Tabla 4.20 Resumen de las propiedades físicas de los pellets ensayados

Características físicas de los pellets	
Forma	Pellets de buena apariencia no hay partículas sueltas
Tamaño	Diámetro 8mm Longitud prom. 15,75mm
Aspecto	Color Marrón
	Brillo Brillo mediano
Friabilidad	0,91

Elaborado por: Alex Portero

e. Análisis del proceso de peletizado de aserrín de Copal

Tabla 4.21 Datos de los pellets a temperatura de 105°C

Pellets de Copal comprimidos a temperatura 105°C

Pellets	Masa g	Longitud mm	Volumen cm ³	Densidad g/cm ³
1	1,0793	16,5	0,829	1,301
2	1,065	16,48	0,828	1,286
3	1,0059	15,7	0,789	1,275
4	1,0293	16	0,804	1,280
5	1,115	17,16	0,863	1,293
6	1,048	16,2	0,814	1,287
7	0,9526	14,8	0,744	1,280
8	1,0091	15,7	0,789	1,279
9	1,0892	16,84	0,846	1,287
10	1,1056	17,2	0,865	1,279
11	1,0528	16,5	0,829	1,269
12	1,1165	17,16	0,863	1,294
13	1,0077	15,5	0,779	1,293
14	1,0513	16,4	0,824	1,275
15	1,1418	17,6	0,885	1,291
16	0,9743	15,3	0,769	1,267
17	1,0569	16,4	0,824	1,282
18	1,1	16,9	0,849	1,295
19	1,071	16,7	0,839	1,276
20	0,9497	14,9	0,749	1,268
Promedio	1,0510	16,297	0,819	1,283

Elaborado por: Alex Portero

Tabla 4.22 Resumen de las propiedades físicas de los pellets ensayados

Características físicas de los pellets

Forma	Pellets de buena apariencia no hay partículas sueltas	
Tamaño	Diámetro 8mm Longitud prom. 16,29mm	
Aspecto	Color	Marrón
	Brillo	Brillo mediano
Friabilidad	0,95	

Elaborado por: Alex Portero

4.1.2.3 Análisis del proceso de peletizado de una mezcla de aserrín de 60% Eucalipto 40% Copal a una temperatura de 22°C

Tabla 4.23 Datos de los pellets a una temperatura de 22°C
Pellets 60% Eucalipto 40% Copal comprimidos a 22°C

Pellets	masa g	Longitud mm	volumen cm ³	Densidad g/cm ³
1	0,9994	17,26	0,868	1,15
2	0,8866	15,5	0,779	1,14
3	0,8935	15,54	0,781	1,14
4	0,8571	15	0,754	1,14
5	1,0592	18,82	0,946	1,12
6	1,0576	18,44	0,927	1,14
7	1,0203	18	0,905	1,13
8	0,9372	16,42	0,825	1,14
9	1,0401	18,9	0,950	1,09
10	0,9685	17	0,855	1,13
11	0,8894	15,5	0,779	1,14
12	0,9689	17,4	0,875	1,11
13	0,9176	16	0,804	1,14
14	0,8823	15	0,754	1,17
15	0,8924	15,8	0,794	1,12
16	0,8793	15,2	0,764	1,15
17	0,8846	15,4	0,774	1,14
18	0,9425	16,7	0,839	1,12
19	0,8932	15,6	0,784	1,14
20	0,8728	15,1	0,759	1,15
Promedio	0,937125	16,429	0,826	1,14

Elaborado por: Alex Portero

Tabla 4.24 Resumen de las propiedades físicas de los pellets ensayados

Características físicas de los pellets	
Forma	Pellets con bordes irregulares aun desprenden partículas al contacto entre ellos
Tamaño	Diámetro 8mm Longitud prom. 16,42mm
Aspecto	Color Marrón con puntos oscuros
	Brillo Sin brillo
Friabilidad	0,61

Elaborado por: Alex Portero

4.1.2.4 Análisis del proceso de peletizado de una mezcla de aserrín de 60% Eucalipto 40% Copal a una temperatura de 105°C

Tabla 4.25 Datos de los pellets a una temperatura de 105°C
Pellets 60% Eucalipto 40% Copal comprimidos a 105°C

Pellets	masa g	Longitud mm	volumen cm ³	Densidad g/cm ³
1	1,0831	17	0,855	1,268
2	1,0978	17	0,855	1,285
3	0,9119	14,2	0,714	1,278
4	0,985	15,2	0,764	1,289
5	1,0103	16,88	0,848	1,191
6	1,0821	16,5	0,829	1,305
7	1,0921	16,8	0,844	1,293
8	1,1587	17,76	0,893	1,298
9	1,0624	16,24	0,816	1,301
10	1,0659	16	0,804	1,325
11	1,1254	17,26	0,868	1,297
12	1,0366	15,9	0,799	1,297
13	1,0199	15,6	0,784	1,301
14	0,9372	14,5	0,729	1,286
15	0,962	14,7	0,739	1,302
16	1,0341	15,9	0,799	1,294
17	0,9882	15	0,754	1,311
18	0,9582	14,8	0,744	1,288
19	1,0427	17	0,855	1,220
20	0,877	13,6	0,684	1,283
Promedio	1,0265	15,892	0,799	1,286

Elaborado por: Alex Portero

Tabla 4.26 Resumen de las propiedades físicas de los pellets ensayados

Características físicas de los pellets	
Forma	Buena apariencia, bordes definidos, no sueltan partículas
Tamaño	Diámetro 8mm Longitud prom. 15,89mm
Aspecto	Color Marrón con puntos oscuros
	Brillo Brillo leve
Friabilidad	1,00

Elaborado por: Alex Portero

4.1.2.5 Análisis del proceso de peletizado de una mezcla de aserrín de 60% Eucalipto 40% Copal a una temperatura de 21.3°C con humedad de 15%BH

Tabla 4.27 Datos de los pellets a una temperatura de 21.3°C

Pellets 60% Eucalipto 40% Copal comprimidos a 21,3°C				
Pellets	masa g	Longitud mm	volumen cm3	Densidad g/cm3
1	0,7263	16	0,804	0,90
2	0,8721	19,7	0,990	0,88
3	0,6703	15,8	0,794	0,84
4	0,6372	15	0,754	0,85
5	0,8139	18,6	0,935	0,87
6	0,7824	17,78	0,894	0,88
7	0,8659	19,2	0,965	0,90
8	0,8381	19	0,955	0,88
9	0,7712	18,34	0,922	0,84
10	0,7749	18,2	0,915	0,85
11	0,6837	16	0,804	0,85
12	0,7584	16,5	0,829	0,91
13	0,7906	17	0,855	0,93
14	0,7178	16,2	0,814	0,88
15	0,8382	19	0,955	0,88
16	0,7851	17,5	0,880	0,89
17	0,7818	17,4	0,875	0,89
18	0,7582	16,9	0,849	0,89
19	0,7069	16,2	0,814	0,87
20	0,8034	18,14	0,912	0,88
Promedio	0,76882	17,423	0,876	0,88

Elaborado por: Alex Portero

Tabla 4.28 Resumen de las propiedades físicas de los pellets ensayados

Características físicas de los pellets	
Forma	Forma irregular, bordes poco compactados con grietas transversales visibles
Tamaño	Diámetro 8mm Longitud prom. 15,89mm
Aspecto	Color Marrón oscuro
	Brillo Sin brillo
Friabilidad	0,48

Elaborado por: Alex Portero

Como se puede observar en las tablas 4.27-28 un alto contenido de humedad provoca una seria disminución en la densidad, perjudica el peletizado de los serrines y afecta directamente el índice de friabilidad que es muy inferior al rango aceptable que es mayor al 0.8, además de imposibilitar el peletizado con la adición de temperatura, ya que al realizarlo los pellets producidos salieron completamente deformados.

4.2 Interpretación de resultados

4.2.1 Análisis de la friabilidad

Después de haber culminado la compactación de los pellets de las dos especies madereras, se procedió a realizar el ensayo de friabilidad usando el método comúnmente ocupado en los Laboratorios de Termodinámica y Motores de la Universidad Politécnica de Madrid (ETSI de Montes), que consiste en arrojar los pellets desde una altura de 1m hacia un suelo cerámico. Para a continuación determinar la relación del número de pellets al inicio del ensayo respecto del número de pellets al final del ensayo.

a) Pellets de Eucalipto

Tabla 4.29 Resultados del ensayo de caída

Pellets de aserrín de Eucalipto				
Código	Número de pellets al inicio del Ensayo (Ni)	Número de pellets al final del Ensayo (Nf)	Índice de Friabilidad (FR)	Grado de aglomeración de las partículas
A	20	32	0,63	Medio
B	20	25	0,80	Medio
C	20	23	0,87	Medio
D	20	20	1,00	Alto
E	20	20	1,00	Alto

Elaborado por: Alex Portero

De la tabla 4.29 se observa que el 40% de los pellets de Eucalipto alcanzaron un alto grado de aglomeración, lo suficientemente apto para su uso como un biocombustible para quemadores.

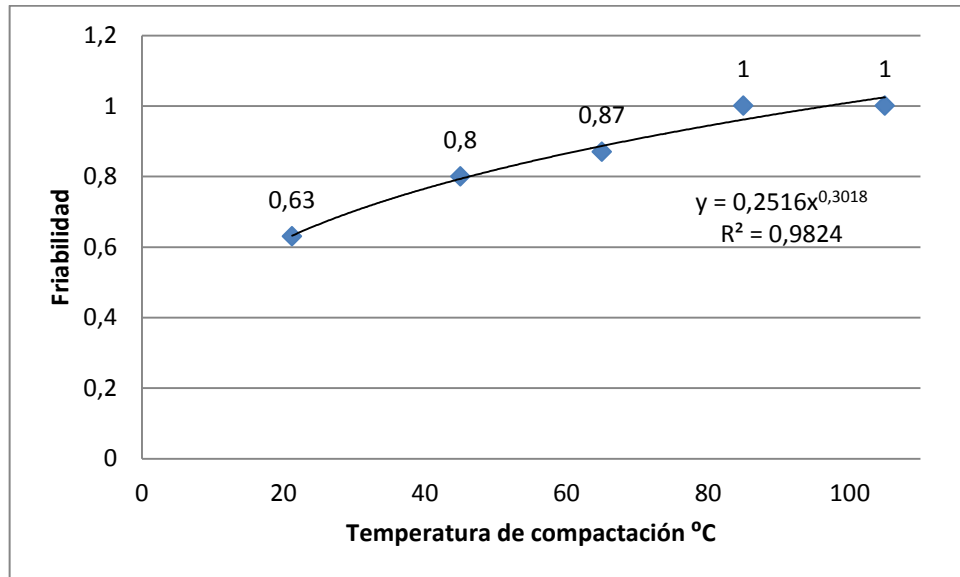


Figura 4.10 Friabilidad pellets de Eucalipto
Elaborado por: Alex Portero

Los pellets compactados a una temperatura ambiente tienen un índice de friabilidad de 0,63 que está por debajo de los límites aceptables para un biocombustible sólido densificado que tienen un mínimo de 0,9. Los pellets compactados con una temperatura del cilindro es de 45°C incrementaron el índice de friabilidad a 0,80; mientras el índice de los pellets compactados a 65°C fue de 0,87; ambos valores aun por debajo del límite mínimo aceptable para pellets de madera sin ningún tipo de aglomerante. Los índices de friabilidad llegaron a su valor máximo de 1,00 para los pellets compactados a temperaturas de 85-100°C.

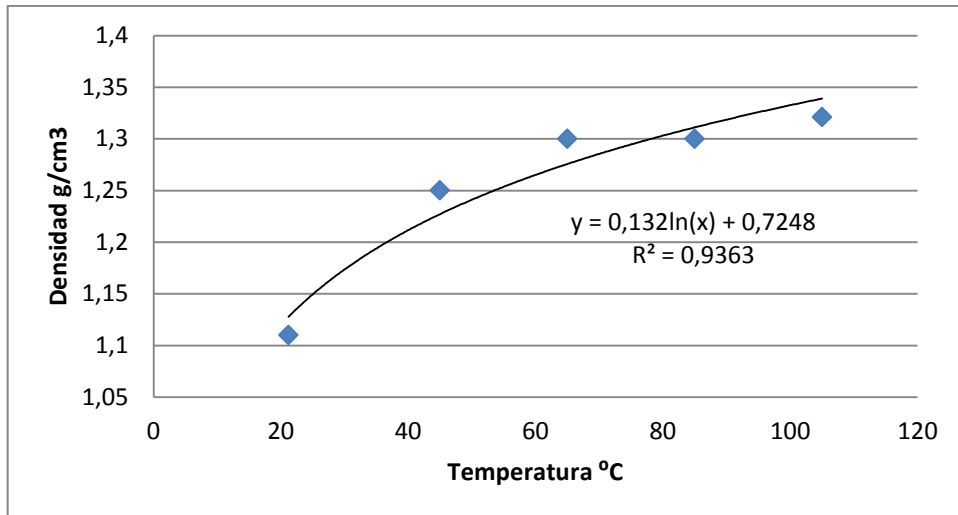


Figura 4.11 Densidad Pellets de Eucalipto
Fuente: Alex Portero

En la figura 4.11 se representan los valores de las densidades de los pellets a diferentes temperaturas de compactación siendo evidente su aumento mientras mayor es el calor añadido.

b) Pellets de Copal

Para el caso del Copal se nota la misma tendencia al aumento del índice de friabilidad, conforme va aumentando la temperatura del cilindro de compactación, sin embargo, para esta especie los valores son de 0,57 para los pellets realizados a temperatura ambiente, observándose un incremento a 0,77 para los pellets compactados a una temperatura de 45°C y de 0,87 para los pellets compactados a 65°C, valores que se encuentran debajo del límite mínimo para este tipo de comprimidos que es de 0,9. Los pellets compactados a una temperatura de 85°C tuvieron un índice de 0,91; mientras que a 105°C el índice alcanzó un valor de 0,95. Para esta especie es notorio, que aun con la máxima temperatura aplicada al cilindro de compactación no se alcanzó un valor de friabilidad de 1,00 como si se dio para el Eucalipto. Lo que evidencia la necesidad de aplicar mayor presión de compactación o temperatura para esta especie maderera.

Tabla 4.30 Resultados del ensayo de caída

Pellets de aserrín de Copal				
Código	Número de pellets al inicio del Ensayo (Ni)	Número de pellets al final del Ensayo (Nf)	Índice de Friabilidad (FR)	Grado de aglomeración de las partículas
A	20	35	0,57	Medio
B	20	26	0,77	Medio
C	20	23	0,87	Medio
D	20	22	0,91	Alto
E	20	21	0,95	Alto

Elaborado por: Alex Portero

En la tabla 4.30 se observa que el 40% de pellets de Copal alcanzaron un alto grado de aglomeración sin llegar a un índice FR de 1,00; lo que indica que aun es necesario añadir más calor o presión para esta especie maderera.

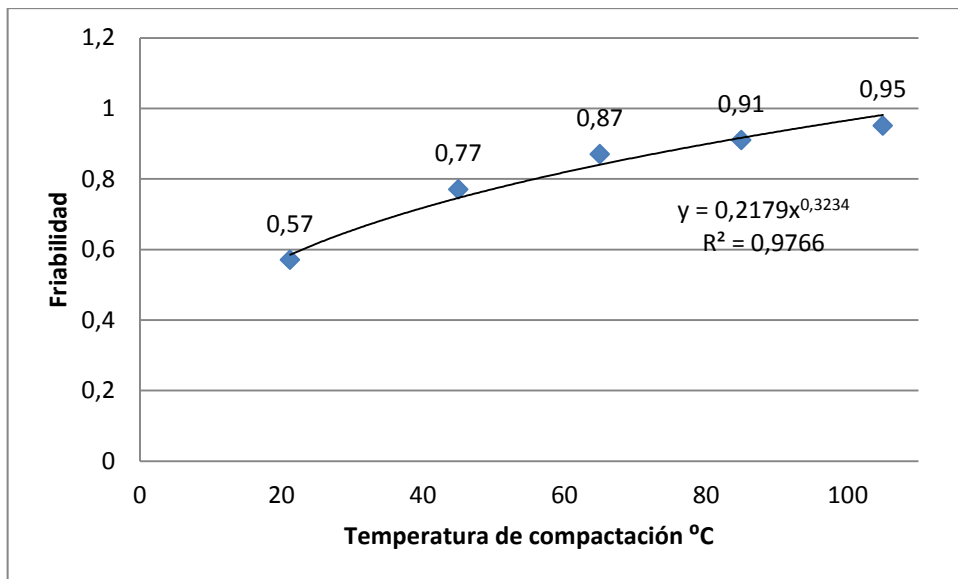


Figura 4.12 Friabilidad pellets de Copal

Elaborado por: Alex Portero

El índice de friabilidad obtenido es un indicador de la durabilidad de los pellets durante su manejo, en procesos como son el empaquetado y transporte, sin que los comprimidos se desmenucen. Propiedad importante ya que garantiza el uso apropiado de este biocombustible sólido densificado, en aplicaciones donde la combustión del mismo necesita ser apropiada.

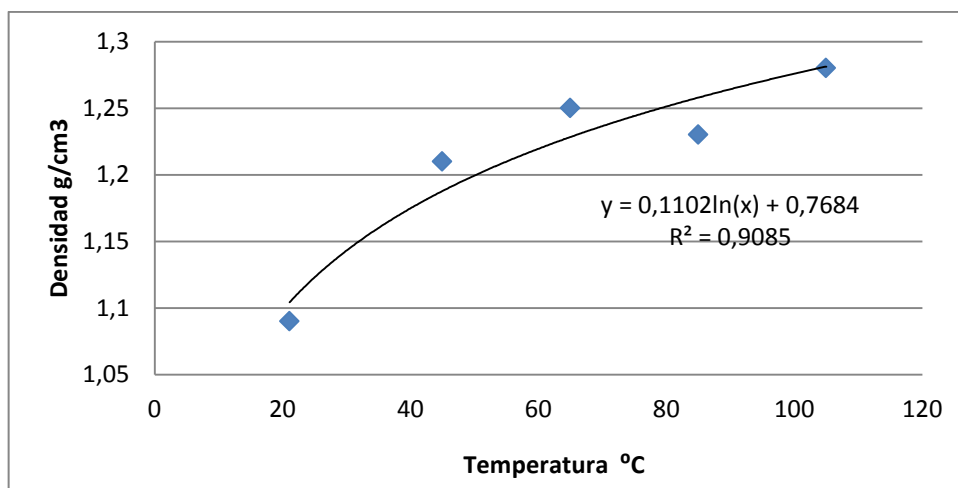


Figura 4.13 Densidad pellets de Copal
Fuente: Alex Portero

En la figura 4.13 se observa el aumento de la densidad de los pellets respecto al aumento de la temperatura de compactación, lo cual indica que el calor es un factor fundamental para que el compactado sea adecuado siendo este necesario en más o menos medida, de acuerdo a la especie con la cual se esté trabajando.

c) Pellets de mezcla de Eucalipto y Copal

Se efectuó además pellets con una mezcla de los serrines de Eucalipto y Copal en una proporción de 60% y 40% respectivamente, esto como medida para mejorar la friabilidad de los pellets de Copal, al usar el Eucalipto como aglomerante, y así obtener valores por sobre el 0,9 que es el mínimo aceptable; logrando valores de 0,61 para los comprimidos a temperatura ambiente (22°C), y de 1,00 para los comprimidos a una temperatura de 105°C, llegando así a su máximo valor.

Tabla 4.31 Resultados del ensayo de caída

Pellets de aserrín de Eucalipto y Copal (60/40)				
Código	Número de pellets al inicio del Ensayo (Ni)	Número de pellets al final del Ensayo (Nf)	Índice de Friabilidad (FR)	Grado de aglomeración de las partículas
A	20	33	0,61	Medio
B	20	20	1,00	Alto

Fuente: Alex Portero

En la tabla 4.31 se observa los resultados del índice FR para los pellets compuestos por Eucalipto y Copal donde se evidencia un grado de aglomeración medio y un índice FR de 0,61 para los pellets sin la adición de calor y un grado de aglomeración alto para los pellets fabricados a 105°C y un índice FR de 1,00.

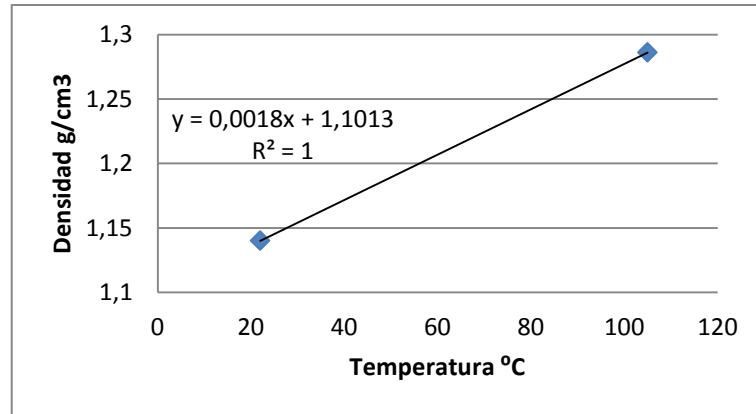


Figura 4.14 Densidad de pellets de Eucalipto y Copal
Fuente: Alex Portero

4.2.2 Análisis de la fuerza necesaria para la expulsión del pellet

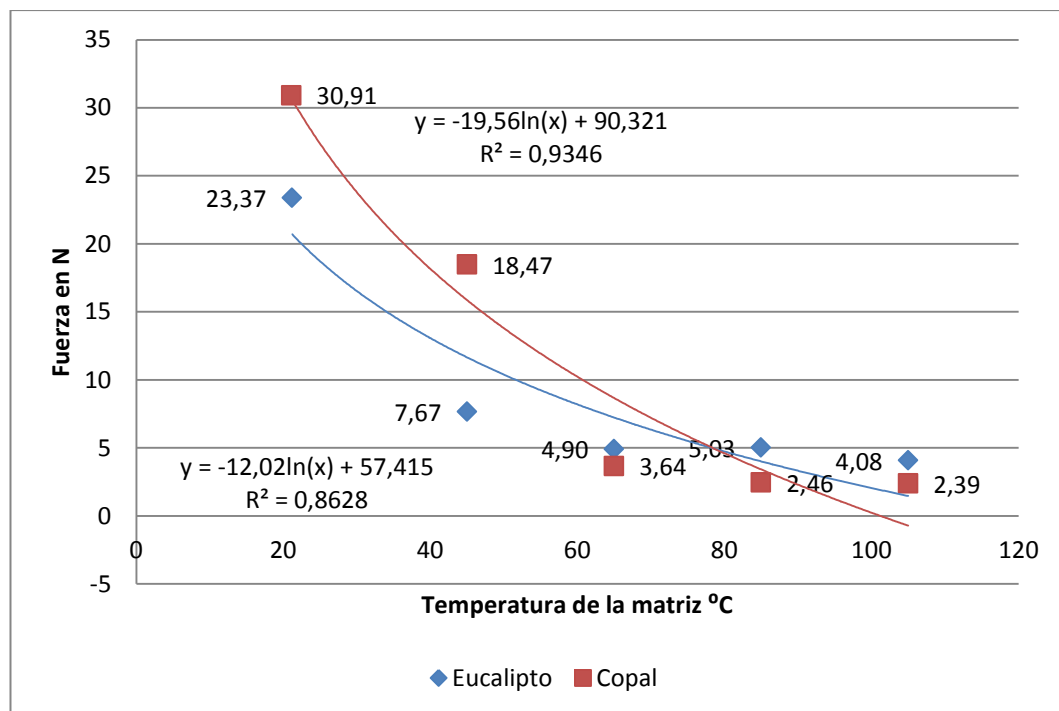


Figura 4.15 Fuerza necesaria para expulsar el pellet fuera del cilindro
(Elaborado por: Alex Portero)

A demás se registro la fuerza necesaria para expulsar los pellets de las especies madereras fuera del cilindro, para cada caso de estudio, siendo notoria la disminución de la misma, mientras aumentaba la temperatura de compactación, dicha variación se la observa en la figura 4.15. Lo que indica la reducción de la fricción en las paredes del canal de compactación, característica que es una gran ventaja al producir pellets de mejor calidad, al darle a la superficie de los mismos un acabado más suave, es decir la superficie es mas lisa. Por lo que se evidenció la importancia de la temperatura del canal de compactación, además de este parámetro también influye la especie maderera con la cual se está trabajando, siendo esto representado en la figura 4.15 donde es evidente la variación tanto para las diferentes temperaturas en una misma madera, como entre las dos especies.

4.2.3 Análisis de la relación entre la densidad y la friabilidad

Con los valores de friabilidad obtenidos después del ensayo de caída se construyen diagramas de dispersión que se muestran en las figuras 4.11 para el Eucalipto y la figura 4.13 para el caso del Copal, que muestran el aumento de la friabilidad de los pellets mientras más alta es la densidad llegando a un punto optimo cuando esta es del rango de entre 1,2-1,3 g/cm³.

En el ensayo de peletizado de 60% y 40% de aserrín de Eucalipto y Copal respectivamente fue notoria la elevación de la densidad (1,28 g/cm³ a 105°C), que la densidad de un pellets 100% de copal, siendo su friabilidad igual a 1,00.

Mientras que para pellets de la misma composición (60/40), con la diferencia del valor del contenido de humedad de 15% BH, la densidad de los pellets disminuye considerablemente llegando a un valor promedio de 0,880 g/cm³, con un valor de friabilidad de 0,48.

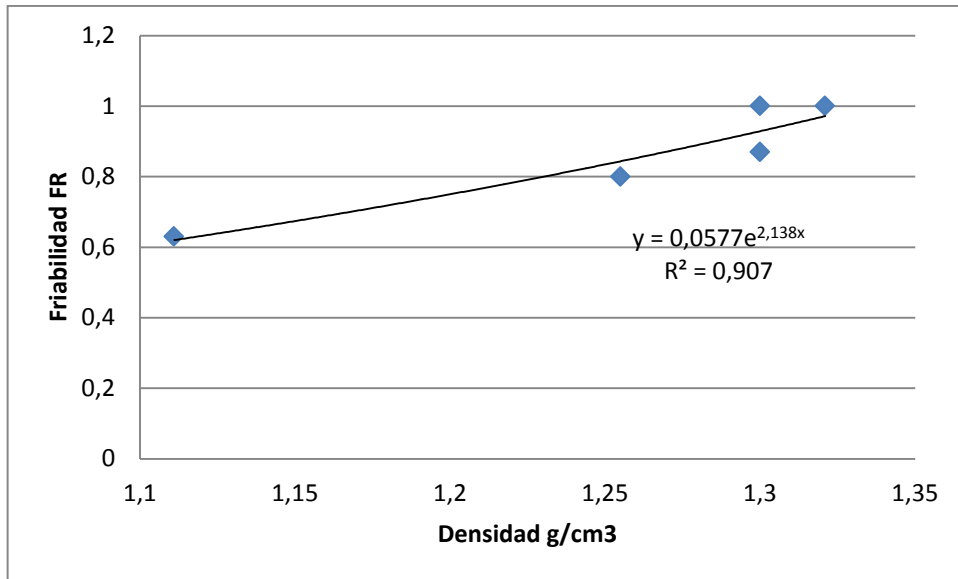


Figura 4.16 Friabilidad en función de la densidad del pellet de Eucalipto
Elaborado por: Alex Portero

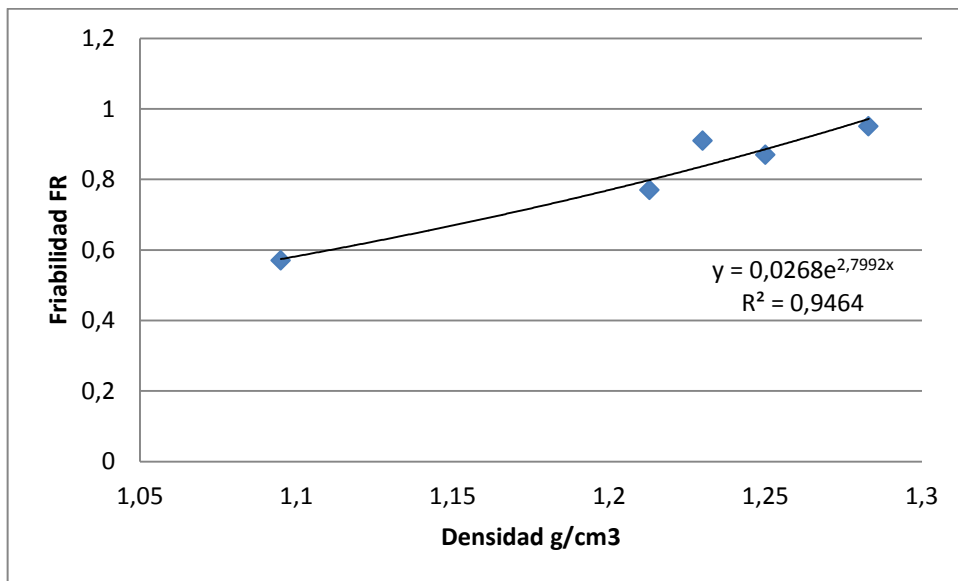


Figura 4.17 Friabilidad en función de la densidad del pellet de Copal
Elaborado por: Alex Portero

4.3 Verificación de Hipótesis

4.3.1 Hipótesis:

H₀ Hipótesis nula:

La aplicación de calor al aserrín de madera de Eucalipto y de Copal, no mejorará el índice de friabilidad.

H₁ Hipótesis alternativa:

La aplicación de calor al aserrín de madera de Eucalipto y de Copal, mejorará el índice de friabilidad.

4.3.2 Comprobación:

Mediante el estudio realizado al proceso de peletizado de aserrín de madera, en el cual fueron aplicadas diferentes temperaturas durante su compactación, se determinó que la adición de calor al aserrín mejora notablemente la friabilidad de los comprimidos.

Para el caso del Eucalipto tanto la friabilidad como la densidad subieron a medida que subió la temperatura de compactación, dando como resultado que el 40% de los pellets fabricados manifiestan un alto grado de aglomeración, esto cuando la temperatura de compactación fue mayor a 85°C, logrando un índice FR de 1,00 y una densidad máxima de 1,32 g/cm³.

Para el Copal se evidencia la misma tendencia tanto para la friabilidad como para la densidad aumentaron obteniendo el 40% de pellets con un alto grado de aglomeración, cuando la temperatura de compactación fue mayor a 85°C, logrando un índice FR de 0,95 y una densidad máxima de 1,28 g/cm³.

Debido a estos resultados es evidente que la adición de calor mejora la friabilidad de los pellets por lo que se acepta la hipótesis alternativa:

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

- La evaluación a nivel de laboratorio del ensayo de friabilidad permitió obtener los valores de este índice para cada una de las temperaturas a las cuales se obtuvieron los pellets.
- Se demostró que la friabilidad de los pellets aumenta cuando se eleva la temperatura del cilindro de compactación, permitiendo obtener pellets con índices: FR de 1,00 para el Eucalipto y FR de 0,95 para el Copal; a una temperatura máxima de 105°C.
- Se comprobó que la densidad de los pellets aumenta según la temperatura del cilindro de compactación se eleva, llegando a un valor de 1.32 g/cm³ para el Eucalipto y de 1.28 g/cm³ para el Copal.
- La fuerza necesaria para expulsar los pellets del cilindro de compactación disminuyó, desde un valor máximo de 30,91 N y 23,37 N hasta 2,39 N y 4,08 N para el Copal y el Eucalipto respectivamente.
- Al elevar la temperatura la lignina natural de la madera actúa como lubricante por lo que se reduce la fricción en el canal de compactación, por lo tanto también se disminuye la energía usada para el peletizado.

- Se determinó que la variable de mayor influencia en el índice de friabilidad, la densidad y la fuerza de expulsión del pellet es la temperatura de compactación.
- Al mezclar los serrines de Eucalipto y Copal en proporciones de 60% y 40% se incrementa el índice de friabilidad (FR=1,00) de los pellets, a diferencia de usar únicamente Copal.
- Al incrementar el contenido de humedad al 15% BH en los serrines estos no pueden ser peletizados de forma adecuada con o sin la adición de calor.
- La granulometría de los serrines es un factor importante que debe ser analizado con mayor profundidad, realizando ensayos con un rango mayor de tamaño de partícula.
- Es necesario realizar ensayos para estudiar el peletizado continuo de los serrines, ya que de esta manera se simula el proceso industrial de fabricación de los pellets.

5.2 Recomendaciones

- Antes de empezar a producir pellets es necesario determinar el contenido de humedad ($\leq 12\%$) de los serrines; así como también, el tamaño de partícula ($\geq 0,15\text{mm}$).
- Para realizar el peletizado de forma correcta es necesario tomar en cuenta la fuerza que está siendo aplicada al aserrín ya que esta debe ser como máximo 15kN.
- Para añadir calor a los pellets producidos se lo realiza con elementos de calefacción eléctrica por su facilidad de control.

- Para producir pellets es importante que no se añada ningún tipo de aglomerante, a no ser el indicado en las especificaciones de la norma (DIN Plus Anexo 2) y en el porcentaje permitido.

- Es necesario realizar un ensayo de la generación de finos que sea normalizada, el cual se lo puede hacer mediante un friabilometro, cuyas especificaciones se encuentran en la norma ISO/TC 238 N 117 “Determination of mechanical durability of pellets and briquettes — Part 1: Pellets”. La importancia de conocer este parámetro es debido al efecto que tienen los finos en los equipos de combustión de pellets de madera ya que una excesiva cantidad de finos perjudicaría el correcto funcionamiento de los mismos.

CAPÍTULO VI

PROPUESTA

“Eficiencia energética del proceso de peletizado con adición de calor para mejorar la friabilidad de los pellets de aserrín de madera.”

6.1 Datos informativos

Tabla 6.1 Datos informativos

Tipo de proyecto	Estudio
Entidad Beneficiaria	Maderas Guerrero
Contacto	Ing. Andrés Guerrero
Entidad Ejecutora	Universidad Técnica de Ambato
Autor	Alex Mauricio Portero Jijón

Fuente: Alex Portero

6.2 Antecedentes de la propuesta

Del producto

La granulometría de los serrines a utilizar debe ser de entre 0,15mm a 0,6mm, en un porcentaje superior al 83%, teniendo en cuenta que de haber partículas más pequeñas la generación de finos se elevaría perjudicando el funcionamiento de los quemadores de pellets.

El contenido de humedad debe estar alrededor del 8 al 12% dado que de ser mayor este valor el proceso de peletizado se ve afectado, resultando en índices de friabilidad bajos.

La forma y el tamaño son factores fundamentales al momento de su utilización en quemadores aptos para este tipo de biocombustible densificado, por lo que se definió un diámetro de 8×10^{-3} m y una longitud de 15×10^{-3} m, que además se encuentran dentro de los pellets comercialmente mas aceptados.

La especie maderera es otro factor ya que el poder aglutinante fue diferente para el Eucalipto y el Copal, obteniendo mejores resultados con una mezcla de 60% de Eucalipto y 40% de Copal, que los pellets de 100% de Copal.

Del proceso

La presión con la que se obtuvieron los pellets para los diferentes casos de estudio fue de 225620 kPa con un tiempo de permanencia de 10seg.

La temperatura del cilindro de compactación a la cual se lograron las propiedades más adecuadas para los pellets estuvo entre 85°C y 105°C niveles de ON OFF a los cuales se podría configurar la resistencia que proporciona el calor.

Se obtuvieron pellets con una masa promedio de $1,02 \times 10^{-3}$ Kg y una densidad de entre 1200 y 1300 Kg/m³.

Se verificó las siguientes temperaturas en los diferentes elementos del sistema de peletizado mediante los instrumentos de los puntos de interés que son:

$$T_1 = 104^\circ\text{C} \quad T_2 = 105^\circ\text{C} \quad T_3 = 93.4^\circ\text{C} \quad T_\infty = 22$$

Descripción del esquema:

1. Vástago de compresión
2. Canal de compactación
3. Cilindro de compactación
4. Resistencia eléctrica de abrazadera
5. Tope extraíble
6. Temperatura de la superficie externa de la resistencia de abrazadera T1(T_s)
7. Temperatura de la superficie interna de la resistencia de abrazadera T2
8. Temperatura del interior del canal de compactación T3

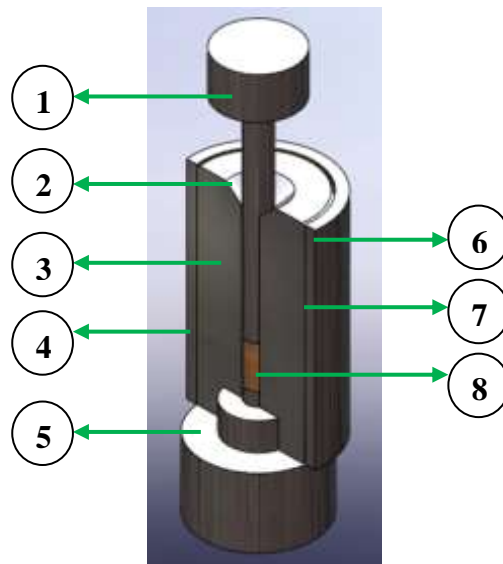


Figura 6.1 Esquema del cilindro de compactación y la resistencia de calefacción
(Elaborado por: Alex Portero)

6.3 Justificación

El presente estudio se realizó con el propósito de obtener información técnica sobre el proceso de peletizado de residuos de la industria de la transformación de la madera como el caso del aserrín, que en la actualidad tiene pocas aplicaciones en las que se aprovecha sus propiedades.

6.4 Objetivos

- Determinar las pérdidas de calor al ambiente.
- Determinar la cantidad de calor absorbido por el aserrín de madera.
- Simular la distribución de temperaturas del sistema de peletizado usando elementos finitos
- Determinar la eficiencia del sistema de calentamiento.

6.5 Análisis de factibilidad

6.5.1 Análisis técnico

La producción de pellets a nivel industrial es totalmente factible para la empresa Maderas Guerrero, ya que cuentan con los residuos, en cantidades de al menos 6,25 Kg/h de serrines y 4,16 Kg/h de virutas; y mucho más importante aun la aplicación para el uso de esta biomasa, debido a que para el proceso de secado de la madera se usa una caldera en la que son incinerados únicamente parte de los residuos, por la dificultad de alimentación de los mismos y su inadecuada combustión, problema que se resuelve con el sistema de incineración de los pellets.

6.5.2 Análisis económico

Debido a que esta investigación es de tipo experimental no se ha podido realizar un análisis económico, ya que solo se han realizado ensayos para los diferentes casos de estudio, por lo que se ha calculado únicamente el costo de la realización de los mismos, los cuales se detallan a continuación.

A continuación se presenta una tabla donde se especifica los costos de los materiales y mano de obra usados para obtener 200 pellets de aserrín de madera.

Tabla 6.2 Costos de la prensa de pellets singular

COSTOS DE LA INVERSIÓN INICIAL				
Cantidad	Unidades	Descripción	Precio Unitario	Total \$
3	metros	Cable gemelo # 16	0.60	1.80
20	metros	Cable flexible # 12	0.40	8.00
2	unidades	Termocupla tipo J	6.00	12.00
10	unidades	Terminales U	0.05	0.50
20	centímetros	Eje de acero AISI 304	15.00	15.00
1	unidad	Maquinado de la matriz y componentes	25.00	25.00
16	unidades	Recipientes para muestras	0.5	8.00
1	unidad	Resistencia de calefacción	41.44	41.44
Total				\$ 111.74

Fuente: Alex Portero

Tabla 6.3 Costo de la mano de obra al realizar los pellets

COSTOS DE LA MANO DE OBRA Y TRANSPORTE				
Cantidad	Unidades	Descripción	Precio Unitario	Total \$
10	horas	Operario	2,12	21,20
2	unidades	Transporte de aserrín	3.00	6.00
Total				\$ 27,20

Fuente: Alex Portero

Tabla 6.4 Costo de la energía eléctrica consumida por la resistencia eléctrica

COSTOS DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA				
Cantidad	Unidades	Descripción	Precio Unitario	Total \$
10	Horas de energía	220 V	0.09	0.27
Total				\$ 0.27

Fuente: Alex Portero

Tabla 6.5 Costo total de la fabricación de los pellets

COSTOS TOTAL DE LOS 200 PELLETS	
Descripción	Total \$
Transporte	6,00
Mano de obra	21,20
Energía eléctrica	0,27
Total	\$ 27,47

Fuente: Alex Portero

El costo unitario de los pellet producidos en una cantidad de 200 unidades es de \$ 0,14 por cada pellet de 1, 1 gramos aproximadamente.

6.6 Fundamentación

A continuación se presenta el análisis de transferencia de calor en los elementos necesarios para producir pellets, que son:

- Matriz de compactación de acero inoxidable AISI 304
- Resistencia eléctrica tipo abrazadera de 300W 220V

6.6.1 Determinación de la pérdida de calor al ambiente

Mediante la ecuación 2.8 se calcula:

El número de Grashof

$$Gr_H = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L_C^3}{\nu^2}$$

$$T_f = \frac{T_s + T_\infty}{2}$$

$$T_f = 336 \text{ K}$$

$$\beta = \frac{1}{T_f}$$

$$\beta = \frac{1}{336}$$

$$L_c = 0,075 \text{ m}$$

Se toman las propiedades del aire a 25°C

$$C_p = 1007 \text{ J/Kg} \cdot \text{K}$$

$$k = 0,02551 \text{ W/m} \cdot \text{K}$$

$$\nu = 1,562 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$P_r = 0,7296$$

Por lo tanto el número de Grashof es:

$$Gr_H = \frac{(9,81 \text{ m/s}^2)(1/336\text{K})(82\text{K})(0,075\text{m})^3}{(1,562 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s})^2}$$

$$\mathbf{Gr_L = 4,139 \cdot 10^6}$$

El número de Rayleigh

Para el caso del aire se tiene el valor en la tabla A-15 de Transferencia de calor y masa de Cengel $P_r = 0,7296$

$$Ra_H = Gr_H \cdot P_r \quad \text{Ec. 2.12}$$

$$Ra_H = 4,139 \cdot 10^6 \cdot 0,7296$$

$$\mathbf{Ra_H = 3,0203 \cdot 10^6}$$

Mecanismo físico de la convección natural

Para el cálculo del coeficiente de convección es necesario determinar parámetros adimensionales que permitirán obtenerlo. (Popiel 2006)

Numero de Nusselt

$$Nu_H / Nu_{H-FP} = 1 + B \left[32^{0,5} (Gr_H)^{-0,25} \left(\frac{L}{D} \right) \right]^C \quad \text{Ec. 2.9}$$

$$B = 0,0571322 + 0,20305 P_r^{-0,43}$$

$$C = 0,9165 - 0,0043 P_r^{0,5} + 0,01333 \ln P_r + \frac{0,0004809}{P_r}$$

$$Nu_{H-FP} = 0,68 + \frac{0,67 Ra_H^{0,25}}{\left[1 + (0,492 / P_r)^{9/16} \right]^{4/9}} \quad \text{Ec. 2.10}$$

Las correlaciones anteriores son válidas para:

$$Gr_{H-cr} \leq 4 * 10^9$$

$$Ra_H \geq 10^4$$

$$0,01 < P_r < 100$$

Desarrollo:

Cálculo de Nu_{H-FP}

$$Nu_{H-FP} = 0,68 + \frac{0,67(3,0203 * 10^6)^{0,25}}{\left[1 + (0,492/0,7296)^{9/16} \right]^{4/9}}$$

$$Nu_{H-FP} = 22,18$$

Cálculo de Nu_H / Nu_{H-FP}

$$B = 0,0571322 + 0,20305(0,7296)^{-0,43}$$

$$B = 0,2896$$

$$C = 0,9165 - 0,0043(0,7296)^{0,5} + 0,01333 \ln(0,7296) + \frac{0,0004809}{0,7296}$$

$$C = 0,9165 - 3,67 * 10^{-3} - 4,2 * 10^{-3} + 6,59 * 10^{-4}$$

$$C = 0,9092$$

$$Nu_H / Nu_{H-FP} = 1 + 0,2896 \left[32^{0,5} (4,139 * 10^6)^{-0,25} \left(\frac{0,075}{0,045} \right) \right]^{0,9092}$$

$$Nu_H / Nu_{H-FP} = 1,0697$$

Cálculo de Nu_H

$$Nu_H = 1,0697 * Nu_{H-FP}$$

$$Nu_H = 1,0697 * 22,18$$

$$Nu_H = 23,72$$

Determinación del coeficiente de convección

$$h = \frac{Nu * k}{L_c}$$

$$h = \frac{23,72 * 0,02551 \text{ W/m * K}}{0,075 \text{ m}}$$

$$h = 8,07 \text{ W/m}^2 \text{ °K}$$

Cálculo de la pérdida de calor hacia el aire:

$$\dot{Q} = hA_s(T_s - T_\infty)$$

$$A_s = \pi * D * L$$

$$A_s = \pi * 0,045 \text{ m} * 0,075 \text{ m}$$

$$A_s = 10,6 * 10^{-3} \text{ m}^2$$

Calor calculado con el coeficiente de convección

$$\dot{Q}_{perdidas} = 8,07 \text{ W/m}^2 \text{ °K} * (0,0106 \text{ m}^2)(82 \text{ K})$$

$$\dot{Q}_{perdidas} = 7,01 \text{ W}$$

6.6.2 Cálculo de la cantidad de calor absorbida por los diferentes elementos que componen la prensa de pellets singular:

a) Cilindro de compactación	
Esquema	Propiedades del material
	Masa 625,17 g
	Calor específico 0,12 cal/(g*°C)
	Conductividad térmica 14,9 W/(m*K)
	Tiempo de calentamiento 200 seg
	Calentamiento en régimen transitorio Temperatura inicial 22°C Temperatura final 105°C

Tabla 6.6 Datos del modelo y la transferencia de calor del cilindro de compactación

Fuente: Alex Portero

$$\dot{Q}_{cilindro} = \frac{mCp\Delta T}{\Delta t}$$

$$\dot{Q}_{cilindro} = \frac{625,17g * 0,12 (cal/g * °C) * 83°C}{200 seg}$$

$$\dot{Q}_{cilindro} = 31,133 cal/seg$$

$$\dot{Q}_{cilindro} = 130,34 W$$

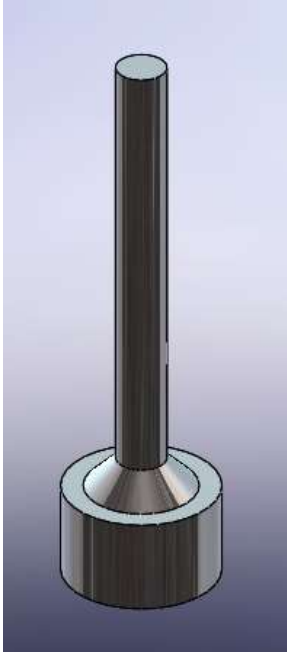
b) Vástago de compactación	
Esquema	Propiedades del material
	Masa 18 g
	Calor específico 0,12 cal/(g*°C)
	Conductividad térmica 14,9 W/(m*K)
	Tiempo de calentamiento 10 seg
	Calentamiento en régimen transitorio Temperatura inicial 22°C Temperatura final 95°C

Tabla 6.7 Datos del modelo y la transferencia de calor del vástago de compactación

Fuente: Alex Portero

$$\dot{Q}_{vástago} = \frac{mC_p\Delta T}{\Delta t}$$

$$\dot{Q}_{vástago} = \frac{18g * 0,12 (cal/g * °C) * 73°C}{10 seg}$$

$$\dot{Q}_{vástago} = 15,76 cal/seg$$

$$\dot{Q}_{vástago} = 66,02 W$$

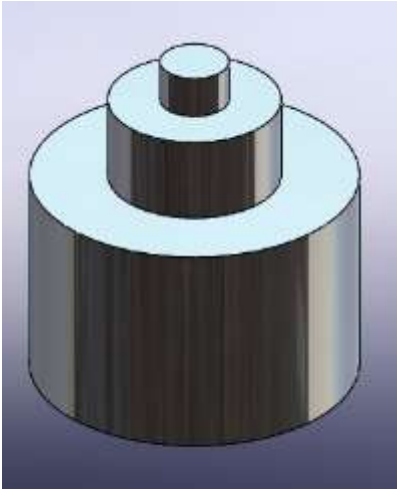
c) Tapa inferior (Backstop)	
Esquema	Propiedades del material
	Masa 253,97 g
	Calor específico 0,12 cal/(g*°C)
	Conductividad térmica 14,9 W/(m*K)
	Tiempo de calentamiento 200 seg
	Calentamiento en régimen transitorio Temperatura inicial 22°C Temperatura final 70°C

Tabla 6.8 Datos del modelo y la transferencia de calor de la tapa inferior

Fuente: Alex Portero

$$\dot{Q}_{tapa} = \frac{mCp\Delta T}{\Delta t}$$

$$\dot{Q}_{tapa} = \frac{253,97g * 0,12 (cal/g * °C) * 48°C}{200 seg}$$

$$\dot{Q}_{tapa} = 7,31 cal/seg$$

$$\dot{Q}_{tapa} = 30,62 W$$


d) Pellet de aserrín de madera de Eucalipto	
Esquema	Propiedades del material
	Masa 1,02 g
	Calor específico 0,3296 cal/(g*°C)
	Conductividad térmica 0,065 W/(m*K)
	Tiempo de calentamiento 10 seg
	Calentamiento en régimen transitorio Temperatura inicial 22°C Temperatura final 71,4°C

Tabla 6.9 Datos del modelo y la transferencia de calor de la tapa inferior

Fuente: Alex Portero

$$\dot{Q}_{pellet} = \frac{mCp\Delta T}{\Delta t}$$

$$\dot{Q}_{pellet} = \frac{1,02g * 0,3296 (cal/g * ^\circ C) * 49,4^\circ C}{10 seg}$$

$$\dot{Q}_{pellet} = 1,66 cal/seg$$

$$\dot{Q}_{pellet} = 6,95 W$$

Para determinar la potencia efectiva de la resistencia de calefacción se procedió a realizar una medición del amperaje de funcionamiento de la misma, siendo este de 1,31 Amperios a los cuales funciono de manera constante durante todo el ciclo de calentamiento ejecutado a una temperatura de 105°C.

Y con el valor del amperaje obtenido se obtuvo una potencia efectiva de:

$$\begin{aligned}Pot &= V * I \\Pot &= 220 V * 1,3 A \\Pot &= 286 W\end{aligned}$$

Para obtener una eficiencia del sistema de calentamiento usado se suman los calores utilizados:

$$\dot{Q}_{Total} = \dot{Q}_{perdidas} + \dot{Q}_{cilindro} + \dot{Q}_{vastago} + \dot{Q}_{tapa} + \dot{Q}_{pellet}$$

$$\dot{Q}_{Total} = 6,76 + 130,34 + 66,02 + 30,62 + 6,95 W$$

$$\dot{Q}_{Total} = 240,69 W$$

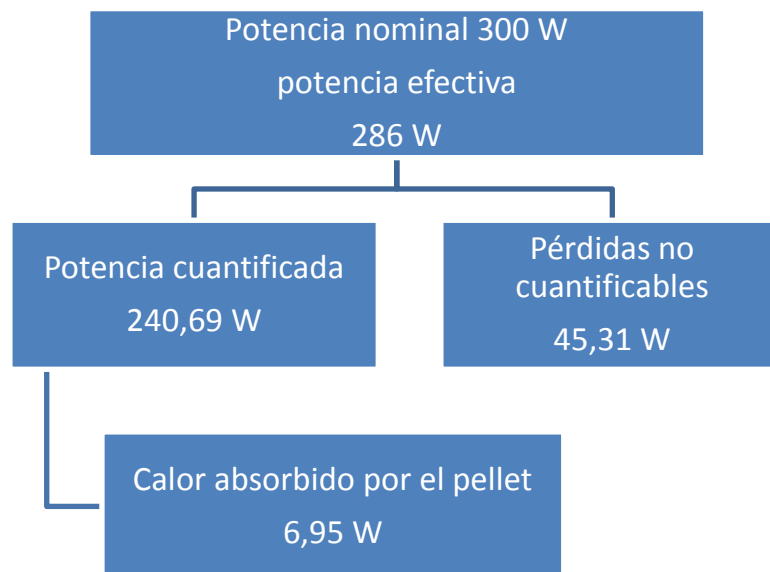


Figura 6.2 Representación de la distribución de potencia en el sistema de compactado

Fuente: Alex Portero

Cálculo de la eficiencia teórica del sistema de calentamiento.

$$Eficiencia_{Teórica} = \frac{286}{300} * 100$$

$$Eficiencia_{Teórica} = 95,33\%$$

Cálculo de la eficiencia térmica del sistema de calentamiento donde se toma en cuenta las pérdidas no cuantificables de calor.

$$Eficiencia_{Térmica} = \frac{240,69}{300} * 100$$

$$Eficiencia_{Térmica} = 80,23\%$$

Cálculo de la eficiencia de uso donde se toma en cuenta el calor que absorbió el pellet respecto del total del calor absorbido por el sistema de peletizado.

$$Eficiencia_{Uso} = \frac{6,95}{240,96} * 100$$

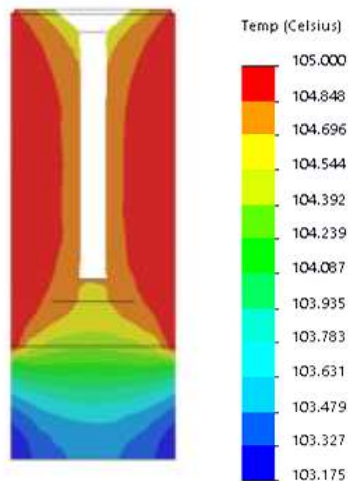
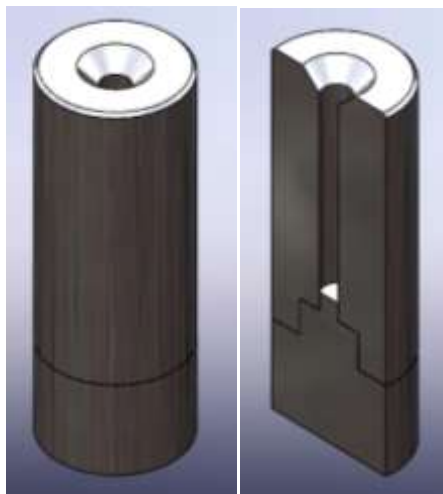
$$Eficiencia_{Uso} = 2,88\%$$

Las pérdidas no cuantificadas se deben a la falta de aislamiento en la tapa inferior de la matriz, ya que esta se encuentra en contacto con el pedestal de la prensa hidráulica la cual se uso para proveer la presión necesaria para realizar el peletizado del aserrín.

6.6.3 Variación de la temperatura

Para el análisis térmico del modelo usado para peletizar el aserrín de madera de las diferentes especies madereras, se utilizo un software que permitiera replicar las condiciones reales, para de esta manera obtener curvas del calentamiento producido en la matriz, vástago y pellet.

Análisis del cilindro de compactado en estado estable



Propiedades del estudio

Tipo de análisis	Térmico
Tipo de solución	Estable
Tiempo total	Infinito

Temperatura

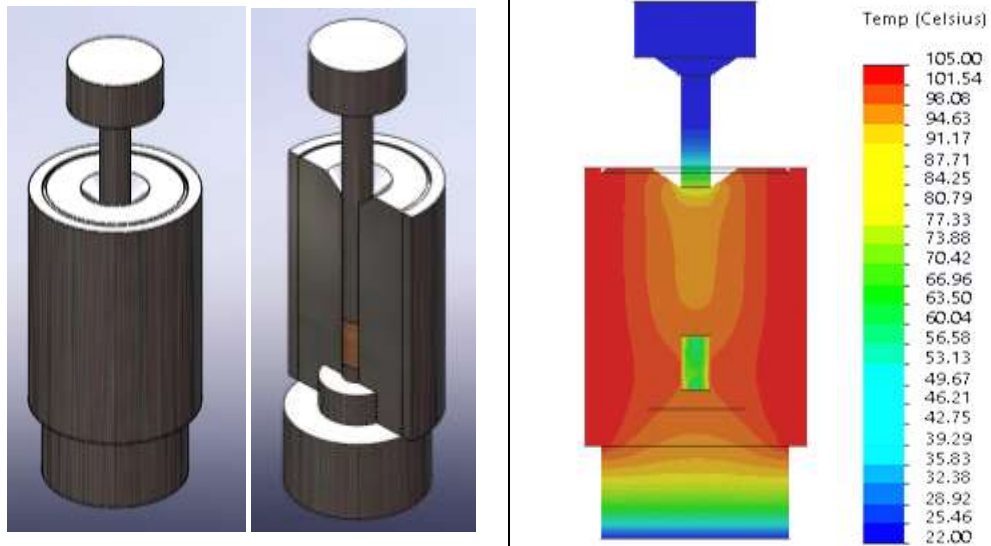
Temperatura máxima	105 °C
Temperatura mínima	103,17 °C

Interpretación de resultados

En este análisis se pueden observar las diferentes zonas de temperaturas producto del calentamiento mediante la resistencia eléctrica de 300 W existiendo una temperatura de hasta 104,8°C en el canal de compactación, que es muy cercana a la temperatura teórica de compactación que es de 105°C.

En el proceso de precalentamiento se alcanzó la temperatura necesaria para producir pellets con un alto índice de friabilidad ya que el calor proporcionado ayuda a los aglomerantes naturales a adherir las partículas de los serrines.

Análisis del modelo en estado transitorio



Propiedades del estudio

Tipo de análisis	Térmico
Tipo de solución	Transitorio
Tiempo total	10 segundos

Temperatura

Temperatura máxima	105 °C
Temperatura mínima	22 °C

Interpretación de resultados

Para el análisis en estado transitorio se tomaron las temperaturas obtenidas en el estudio anterior ya que es necesario que la matriz de compactación se encuentre precalentada a los 105°C, el tiempo en el que se realizó el estudio es de 10 seg ya que este es el tiempo de permanencia del aserrín en el interior del dado de compactación, de este análisis se obtuvieron curvas de temperatura tiempo de tres puntos en el interior del pellet, las cuales se muestran a continuación.

6.6.4 Graficas temperatura tiempo para los pellets

Pellet de Eucalipto

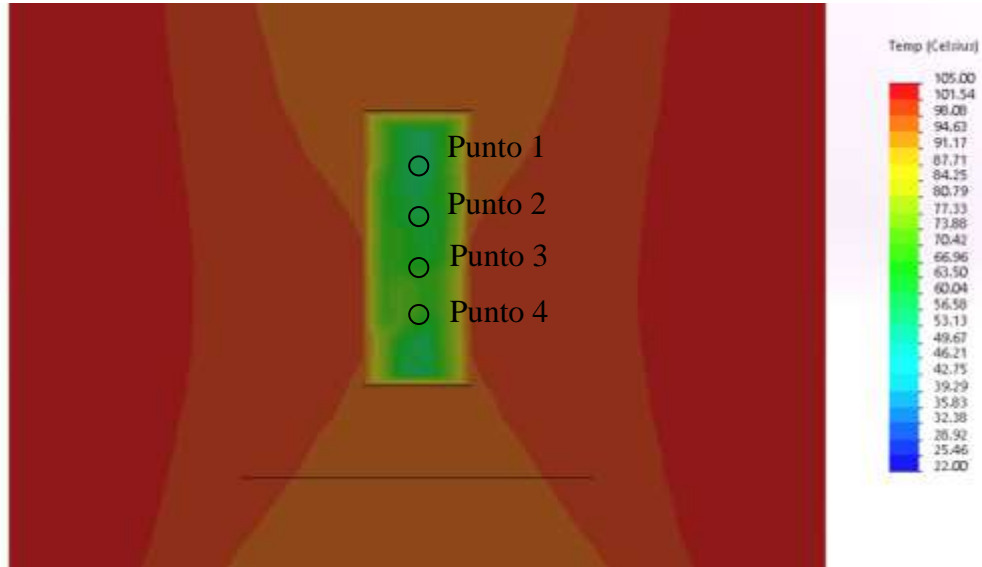


Figura 6.3 Detalle del pellet de Eucalipto dentro del cilindro de compactación
Fuente: Alex Portero

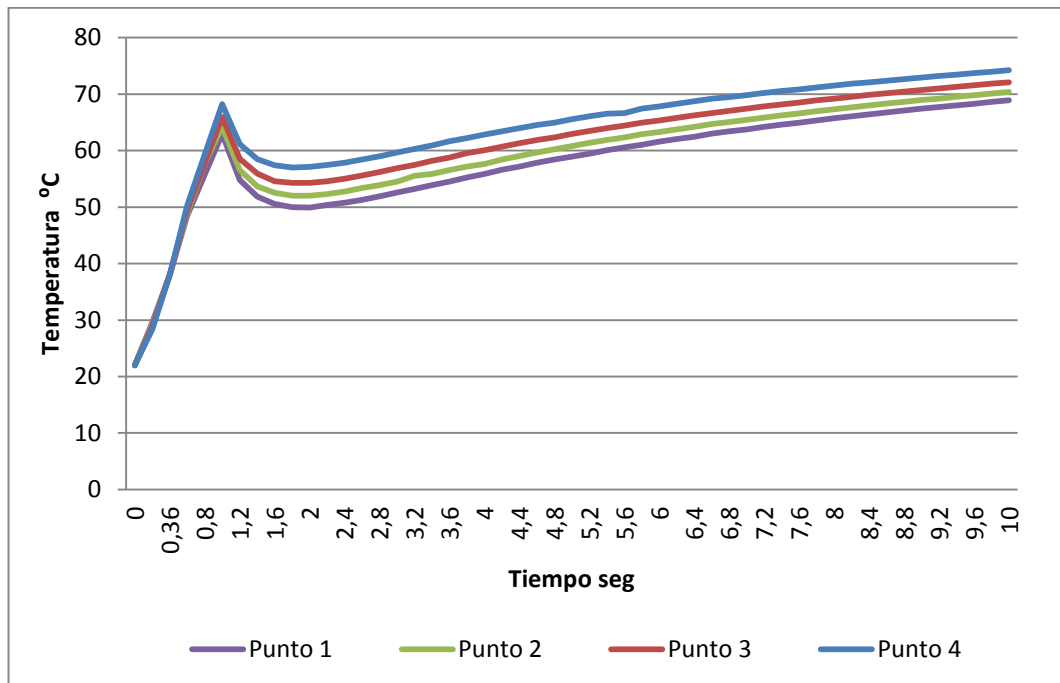


Figura 6.4 Curvas de los puntos dentro del pellet de Eucalipto para un estado transitorio de 10 seg.
Fuente: Alex Portero

Pellet de Copal

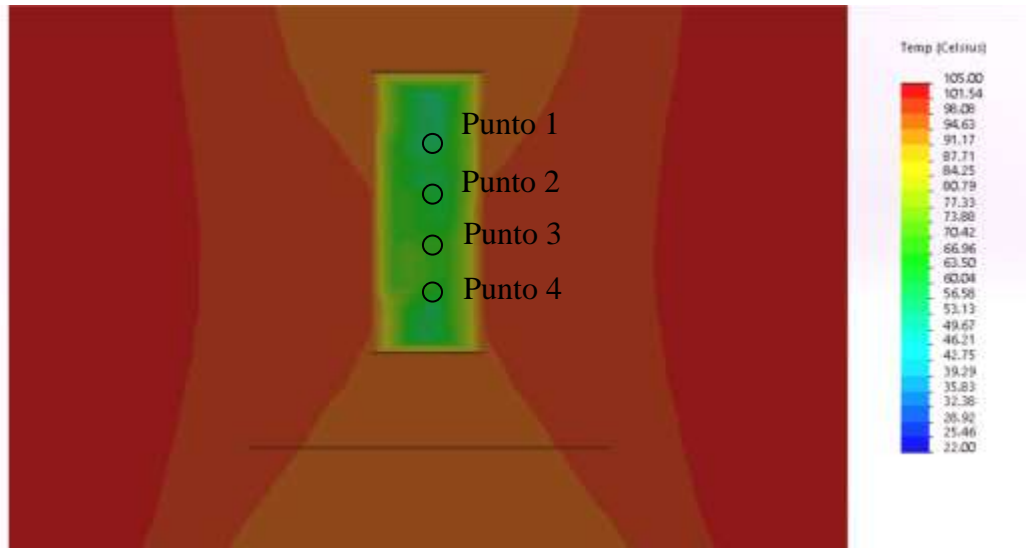


Figura 6.5 Detalle del pellet de Copal dentro del cilindro de compactación
Fuente: Alex Portero

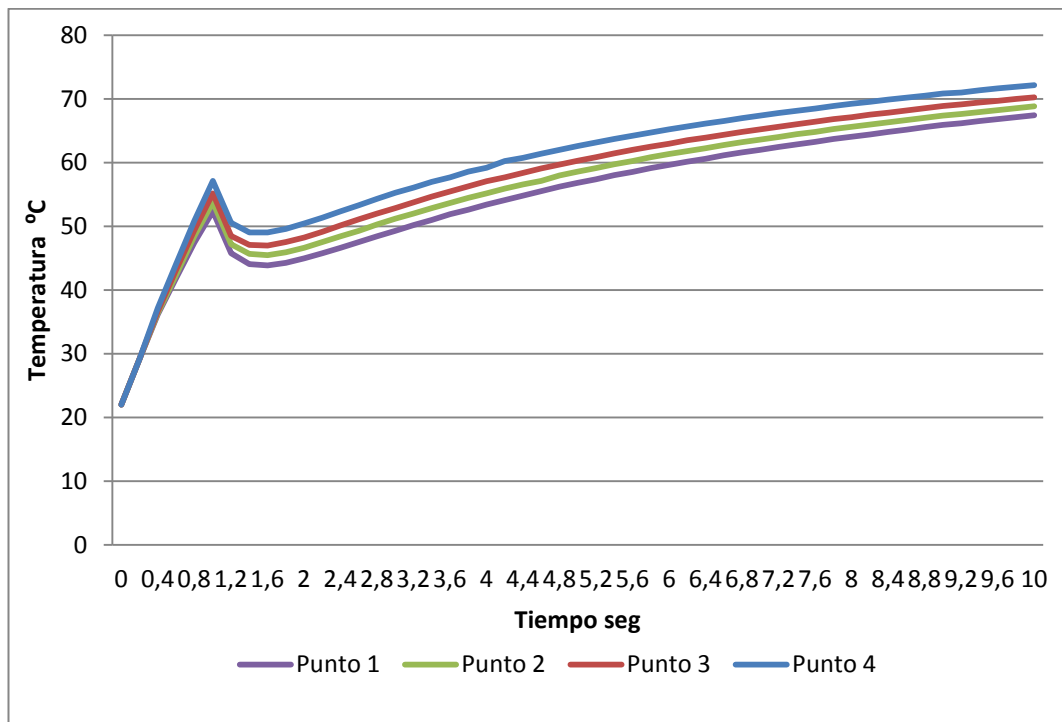


Figura 6.6 Curvas de los puntos dentro del pellet de Copal para un estado transitorio de 10 seg.
Fuente: Alex Portero

6.7 Metodología. Modelo operativo

Diagrama de proceso de producción de la empresa Maderas Guerrero

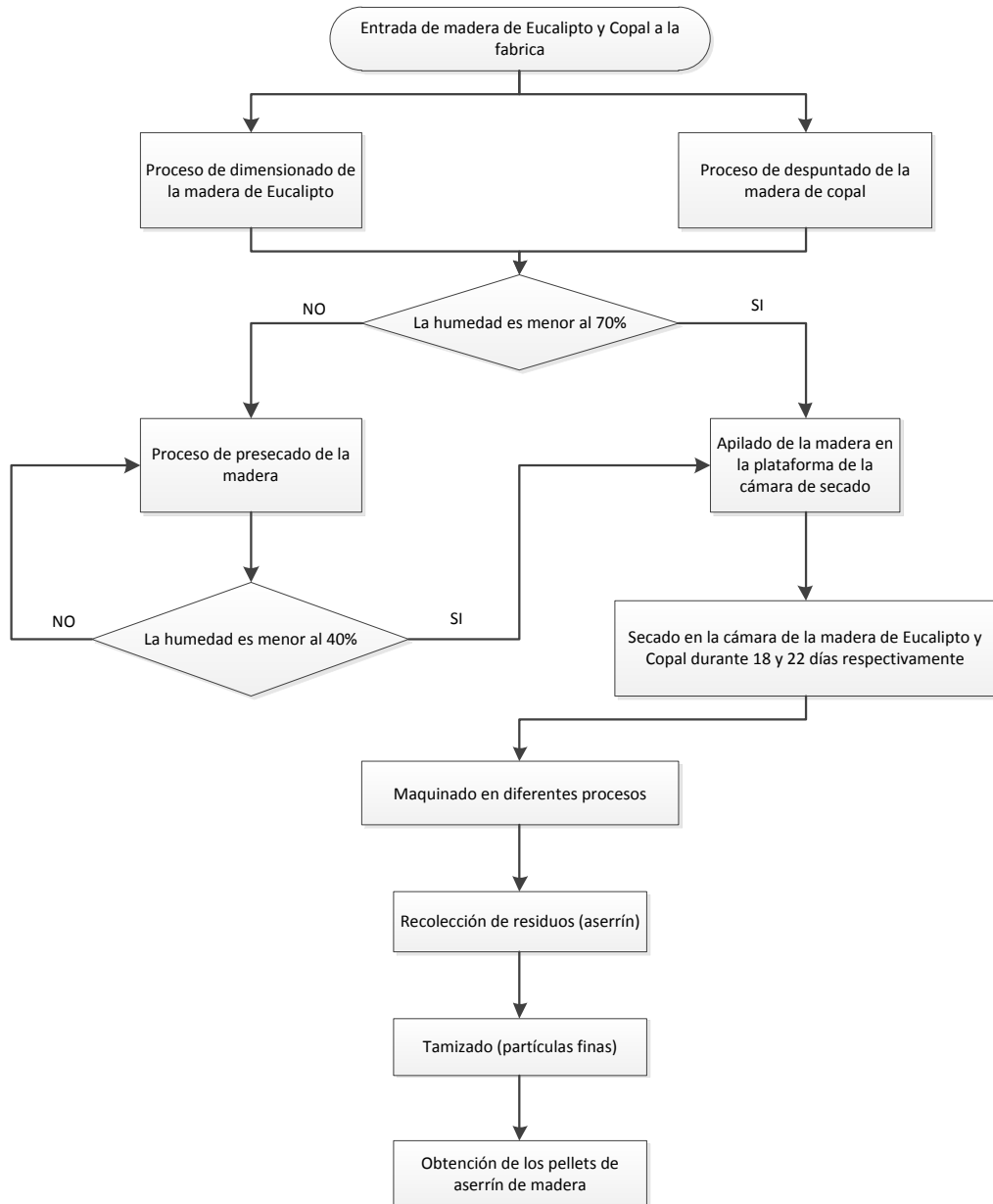


Figura 6.7 Diagrama de proceso
Elaborado por: Alex Portero

Para la implementación de un proceso de peletizado en la industria Maderas Guerrero es necesario realizar una secuencia de procesos los cuales son descritos a continuación en un diagrama de procesos.

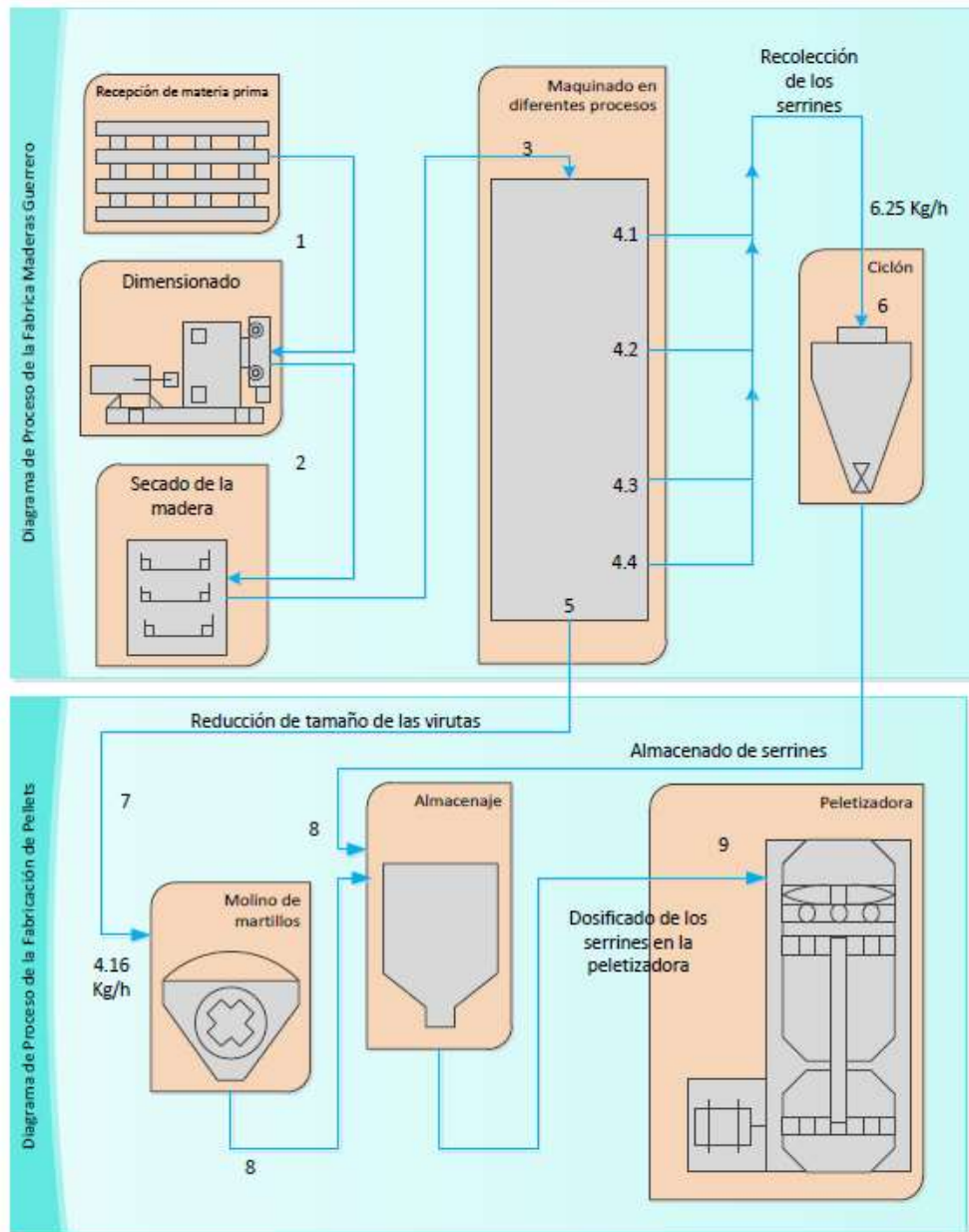


Figura 6.8 Diagrama de proceso técnico de la fabricación de pellets de madera
Fuente: Alex Portero

Diagrama de procesos de la planta Maderas Guerrero adicionado los métodos necesarios para llevar a cabo la peletización de los residuos.

A. Recepción de la materia prima

- I. La madera es recibida con un alto contenido de humedad que varía entre el 30-40%, siendo esta en ocasiones más elevada llegando hasta el 60-70%.

B. Dimensionado

- I. La madera es cortada dándole las dimensiones definitivas, debido a que es innecesario llevar a cabo el proceso de secado de la parte que no se usara.

C. Secado de la madera

- I. El proceso de secado de las diferentes especies de maderas es diferenciado, ya que los tiempos de permanencia son diferentes en cada caso, ya que para el Eucalipto es de 16 días más dos de estabilización, mientras que para el Copal es de 20 días más dos de estabilización, al final de este proceso se obtiene un contenido de humedad de la madera de 12%.

D. Maquinado en los diferentes procesos de manufactura

- I. Durante el maquinado se generan distintos tipos de residuos como son las virutas y los serrines de diferentes tamaños y formas, de los cuales los serrines son recogidos por medio de un ciclón que las acumula en un cierto lugar donde son almacenadas.
- II. Mientras que las virutas al ser de mayor tamaño se quedan acumuladas en el lugar donde son generadas hasta ser posteriormente trasladadas a un proceso de homogenización.

E. Molino de martillos

Debido a la variedad de tamaños de los residuos se hace necesario un proceso de trituración y pulverización para obtener una adecuada granulometría, lo

cual es posible mediante un molino de martillos, cuyas características son presentadas a continuación.

Tabla 6.10 Especificaciones de la maquina peletizadora

Capacidad	900 Kg/h
Potencia	3.73 KW
Energía	220V 60Hz 3fases
Numero de martillos	20 martillos

Fuente: <http://www.gemco-machine.com/>

F. Almacenaje de los residuos una vez homogenizado el tamaño de partícula
El almacenado de los serrines es una parte crucial del proceso, ya que estos no deben estar expuestos a los elementos, especialmente humedad, debido a que el contenido de humedad de los mismos afectará directamente en las propiedades de los pellets producidos posteriormente.

G. Peletizadora

Una vez obtenida la materia prima con las condiciones iniciales adecuadas se la dosifica en la peletizadora de matriz plana, que está provista de dos rodillos, los cuales proporcionan la presión necesaria para que el aserrín pase por los agujeros de la matriz y así obtener los pellets de forma continua que son cortados por cuchillas de las dimensiones requeridas por el usuario.

Es necesario aclarar que para una producción industrializada de los pellets, el calor necesario para la compactación adecuada, es generado por el rozamiento de:

Superficie de rodillo – producto

Producto – superficie de la matriz

Producto – producto

Producto – canal de compactación

Tabla 6.11 Especificaciones de la maquina peletizadora

Capacidad	120-200Kg/h
Potencia	11KW
Energía	380V 60Hz 3 fases
Características	Matriz plana
	Modelo ZLSP230B Tipo D
Tamaño de embalaje	1180X540X1000 mm

Fuente: Alex Portero

6.8 Administración

Fases	Objetivos	Actividades	Recursos	Responsable
Sensibilización	Presentación del proyecto al Ing. Andrés Guerrero de Maderas Guerrero	<ul style="list-style-type: none"> • Presentación • Discusión del proyecto y los requerimientos de ambas partes 	<ul style="list-style-type: none"> • Humano • Cámara digital 	<ul style="list-style-type: none"> • Investigador
Planificación	Realizar las pruebas necesarias para demostrar la factibilidad de usos de los residuos	<ul style="list-style-type: none"> • Ejecución de las pruebas de laboratorio 	<ul style="list-style-type: none"> • Humano • Material de oficina • Equipo de laboratorio 	<ul style="list-style-type: none"> • Investigador
Ejecución	Implementación de las maquinaria apropiada para la fabricación de pellets	<ul style="list-style-type: none"> • Presentar propuesta • Aprobación del presupuesto 	<ul style="list-style-type: none"> • Humano • Material de oficina • Proformas 	<ul style="list-style-type: none"> • Investigador
Evaluación	Comprobar las características de los pellets obtenidos	<ul style="list-style-type: none"> • Revisión del cumplimiento de las propiedades del pellet 	<ul style="list-style-type: none"> • Humano • Material de oficina 	<ul style="list-style-type: none"> • Investigador

6.9 Previsión de la evaluación

A futuro se podrá continuar profundizando la presente investigación, ya que se han quedado datos por investigar, ya sea por falta de equipos en los laboratorios o recursos, y así complementar esta investigación con datos que son necesarios conocerlos como son el poder calorífico y la generación de finos por fricción, que son altamente relevantes para definir la utilización y mantenimiento de quemadores, tanto industriales como domésticos.

Para industrializar el proceso de peletizado es necesario seguir unas recomendaciones que facilitaran la fabricación de pellets.

Existen dos tipos de sistemas de peletizado los cuales son los más frecuentes a nivel comercial que son:

- Sistema de anillo plano (Flat type die)
- Sistema de anillo cilíndrico (Ring type die)

La alimentación de la peletizadora debe ser dosificada de manera que se eviten atascamientos y un excesivo rozamiento, el cual elevaría la temperatura de la matriz desgastándola prematuramente.

Para la obtención de pellets de longitudes uniformes es necesario colocar un dispositivo cortante ajustable al tamaño deseado.

La granulación es de mayor efectividad cuando el número de rodillos es de 3 a 6. De ser necesario se pueden usar agentes auxiliares para el aglomerado de las partículas, siempre y cuando estos sean los permitidos y en las cantidades apropiadas como por ejemplo melaza, almidón de maíz.

Bibliografía

1. Arpi, J. y Calderón, C. (2010). *Diseño De Una Maquina Peletizadora En Base A La Disponibilidad de Residuos Madereros De La Ciudad De Cuenca Para Su Aprovechamiento Energético.*
2. Espinoza, J. (2010). *Energía Renovable en Ecuador: Situación actual y perspectivas*, Presentación en Conferencia USFQ, Quito, Ecuador.
3. Giraldo, G. (2006). *Normalización Y Estandarización De Los Pellets.* Valladolid
4. IDEA (2007). *Guía Técnica Procedimiento de Inspección Periódica de Eficiencia Energética para Calderas.* Madrid España
5. Martínez, E. y Lira, L. (2010). *Análisis y Aplicación de las Expresiones del Contenido de Humedad en Sólidos.* Querétaro México.
6. Ministerio del Ambiente del Ecuador. (2010). *Aprovechamiento de los Recursos Forestales 2007 - 2009.* Quito, Ecuador
7. Rojas, A. (2004). *Prefactibilidad Técnica Y Económica Para La Instalación De Una Planta De Pellets Para Combustibles A Partir De Desechos De Madera.* Santiago Chile
8. Serrano, L. (2009). *Producción De Carbón Vegetal Mediante Carboneras En Zonas Rurales Empobrecidas.* Madrid España
9. Soto G. y Núñez M. (2008). *Fabricación De Pellets De Carbonilla, Usando Aserrín De Pinus Radiata (d. Don), Como Material Aglomerante,* Talca Chile.
10. Toscano, L. (2009). *Análisis de los parámetros y selección de hornos para la combustión de biomasa.*

Sitios Web

1. Nielsen N, Gardner DJ, Poulsen T, Felby C (2009). *Importance of temperature, moisture content, and species for the conversion process of wood into fuel pellets*. Wood Fiber Sci; 417. The University of Maine (Forest Bioproducts Research Institute)
2. Popiel C.O., Wojtkowiak J., Bober K. (2007), *Laminar free convective heat transfer from isothermal vertical slender cylinder*. Experimental Thermal and Fluid Science 32 607–613 Rajendra Mane College of Engineering and Technology
3. Stelte W (2011), *Fuel Pellets from Biomass Processing, Bonding, Raw Materials*. Technical University of Denmark (DTU Orvit-The Research Information System)
4. Stelte W, Holm J, Sanadi A, Barsberg S, Ahrenfeldt J, Henriksen U (2011). *A study of bonding and failure mechanism in fuel pellets from different biomass resources* p 3-7. Technical University of Denmark (DTU Orvit-The Research Information System)
5. Stelte W, Jens K. Holmb, Anand R. Sanadic, Søren Barsbergc, Jesper Ahrenfeldta and Ulrik B. Henriksena (2011), *Fuel pellets from biomass: The importance of the pelletizing pressure and its dependency on the processing conditions*. The University of Maine (Forest Bioproducts Research Institute)

ANEXO 1

Catálogo controlador de temperatura OMRON

OMRON

Controladores digitales de temperatura **E5CN/E5CN-U**

Este controlador de temperatura de empleo general de 48×48 mm y líder en ventas ahora es incluso mejor. Fácil, fiable, con más funciones y displays de 11 segmentos.

- Controladores disponibles con entradas analógicas.
- Muestreo más rápido a 250 ms.
- Salida transfer para facilitar el envío a registradores.
- Salidas de tensión (a SSR) para control de calor y frío. Se pueden utilizar para alarmas con el fin de ofrecer tres salidas de alarma.
- Disponibilidad de modelos con detección trifásica de rotura de calentador y de fallo SSR.
- Configuración sencilla gracias a los displays de 11 segmentos.
- Conexión a termopar o termoresistencia de platino con el mismo modelo.
- Visualización sencilla a distancia con display PV con función de cambio de tres colores.
- El indicador de protección de la configuración informa al operario si la protección está activada.
- Dispone de salida manual.
- Disponibilidad de controlador con salida relé de larga vida útil.



NEW

Nota: Consulte la página 18 para obtener información sobre los cambios en relación con modelos anteriores.

Características

Funciones mejoradas para una gama más amplia de aplicaciones

Valores analógicos de control, como presiones, caudales y niveles

La nueva serie E5CN ahora también incluye modelos que aceptan entradas analógicas, lo que permite aplicaciones distintas del control de temperatura, incluyendo control de presión, caudal, nivel, humedad y peso.

Nota: E5CN-□L (modelos con entradas analógicas)

Muestreo más rápido a 250 ms

El tiempo de muestreo anterior de 500 ms se ha reducido a la mitad, hasta 250 ms. De este modo, el nuevo E5CN puede controlar aplicaciones que requieren una velocidad de respuesta y una precisión aún mayores.

Conexión sencilla con registrador

Una salida transfer ahora facilita la conexión a un registrador o unidad de E/S analógicas de PLC.

Nota: E5CN-C□ (modelos con salidas de corriente)

Salidas de tensión (a SSR) para control de calor y frío. Se pueden utilizar para alarmas con el fin de ofrecer tres salidas de alarma.

Las salidas de tensión se pueden utilizar para calor y frío en modelos con dos salidas de control. Además, la salida de control se puede configurar para utilizarla como salida de alarma, lo que permite el uso de hasta tres salidas de alarma.

Nota: E5CN-□Q (tarjeta opcional)

Detección trifásica de rotura del calentador

En los modelos con detección trifásica de rotura del calentador y fallo SSR, se pueden conectar dos transformadores de corriente para detectar roturas del calentador y fallos SSR simultáneamente, con lo que se reducen costes debido a que no se necesita un dispositivo de alarma de rotura del calentador por separado. La detección de fallo SSR se puede utilizar incluso con modelos con alarmas monofásicas de rotura del calentador.

Nota: E5CN-□H□ (tarjeta opcional)

Fácil, fiable y aún más rápido

Configuración sencilla gracias a los displays de 11 segmentos

El nuevo E5CN dispone de displays de 11 segmentos que facilitan la lectura del texto, por lo que no se tienen que deslizar los displays al intentar seleccionar los parámetros, tal como era necesario con controladores de temperatura anteriores.

Capacidad de entrada múltiple con un solo controlador

Conexión a termopar o termoresistencia de platino con el mismo modelo. La selección de modelo se ha simplificado, se reducen los stocks a la mitad y se precisan menos repuestos.

Visualización sencilla a distancia con display PV con función de cambio de tres colores

El indicador de protección de la configuración informa al operario si la protección está activada

Un icono especial en el panel de visualización se ilumina para que el operario sepa si se ha establecido la protección de la configuración.

Especificaciones

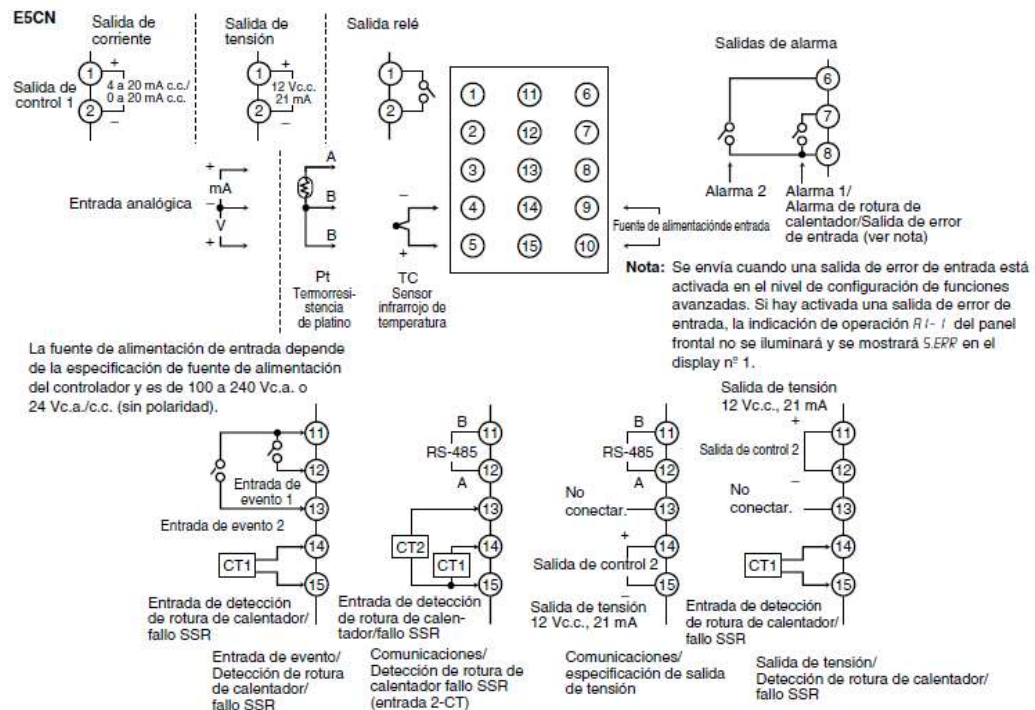
■ Valores nominales

Elemento	Tensión de alimentación	100 a 240 Vc.a., 50/60 Hz	24 Vc.a., 50/60 Hz o 24 Vc.c.
Rango de tensión de funcionamiento		85% a 110% de la tensión de alimentación nominal	
Consumo	E5CN	7,5 VA máx. (E5CN-R2T: 3,0 VA a 100 Vc.a.)	5 VA/3 W máx. (E5CN-R2T: 2,7 VA a 24 Vc.a.)
	E5CN-U	6 VA máx.	3 VA/2 W máx.
Entrada de sensor		Modelos con entradas de temperatura Termopar: K, J, T, E, L, U, N, R, S o B Termoresistencia de platino: Pt100 o JPt100 Sensor infrarrojo de temperatura: 10 a 70°C, 60 a 120°C, 115 a 165°C o 160 a 260°C Entrada de tensión: 0 a 50 mV Modelos con entradas analógicas Entrada de corriente: 4 a 20 mA o 0 a 20 mA Entrada de tensión: 1 a 5 V, 0 a 5 V ó 0 a 10 V	
Impedancia de entrada		Entrada de corriente: 150 Ω, entrada de tensión: 1 MΩ (Utilice una conexión 1:1 cuando conecte el ES2-HB.)	
Salida de control	Salida relé	E5CN	SPST-NA, 250 Vc.a., 3 A (carga resistiva), vida útil eléctrica: 100.000 operaciones; mínima carga aplicable: 5 V, 10 mA
		E5CN-U	SPDT, 250 Vc.a., 3 A (carga resistiva), vida útil eléctrica: 100.000 operaciones; mínima carga aplicable: 5 V, 10 mA
	Salida de tensión	E5CN E5CN-U	Salida de tensión: 12 Vc.c. ±15% (PNP), corriente de carga máx.: 21 mA, con circuito de protección contra cortocircuitos
	Salida de corriente	E5CN	4 a 20 mA c.c./0 a 20 mA c.c.; carga: 600 Ω máx.; resolución: aprox. 2.700
	Salida relé de larga vida útil	E5CN	SPST-NA, 250 Vc.a., 3 A (carga resistiva), vida útil eléctrica: 1.000.000 operaciones; mínima carga aplicable: 5 V, 100 mA (no conectar una carga de c.c.)

Salida de alarma	SPST-NA, 250 Vc.a., 1 A (carga resistiva), vida útil eléctrica: 100.000 operaciones; mínima carga aplicable: 1 V, 1 mA.
Entrada de evento	Entrada de contacto ON: 1 kΩ máx. OFF: 100 kΩ mín.
	Entrada de estado sólido ON: Tensión residual: 1,5 V máx. OFF: Corriente de fuga: 0,1 mA máx.
	Corriente de descarga: Aprox. 7 mA por punto
Método de control	Control ON/OFF o 2-PID (con auto-tuning)
Método de configuración	Configuración digital mediante el teclado del panel frontal
Método de indicación	Display digital de 11 segmentos e indicadores individuales (también son posibles los displays de 7 segmentos) Altura de caracteres: PV: 11 mm, SV: 6,5 mm
Otras funciones	Salida manual, control de calor/frío, salida transfer (en algunos modelos), alarma de rotura de lazo, multi SP, limitador de MV, filtro digital de entradas, ajuste automático, desplazamiento de entrada de temperatura, marcha/paro, funciones de protección, etc.
Temperatura ambiente de servicio	-10 a 55°C (sin formación de hielo ni condensación), para garantía de 3 años: -10 a 50°C
Humedad ambiente de servicio	25% a 85%
Temperatura de almacenamiento	-25 a 85°C (sin formación de hielo ni condensación)

Conexiones externas

- Una salida de tensión (salida de control) no está aislada eléctricamente de los circuitos internos. Cuando se utilice un termopar conectado a masa, no conecte a masa ninguno de los terminales de salida de control para evitar errores en los valores de temperatura medidos provocados por la corriente de fuga.
- Se aplica aislamiento estándar entre cualquiera de los siguientes elementos: terminales de fuente de alimentación, terminales de entrada, terminales de salida y terminales de comunicaciones (para modelos con comunicaciones). Si se precisa aislamiento reforzado, aplique aislamiento adicional, como distancia de separación o aislamiento de material según se define en IEC 60664, adecuado para la tensión de operación máxima.

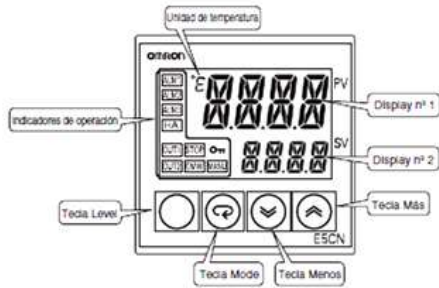


Los terminales del 11 al 15 no existen en los modelos sin una unidad opcional (detección de rotura de calentador, salida de control 2, entradas de evento o comunicaciones). Las aplicaciones de terminales dependen del modelo de la unidad opcional.

Descripción

E5CN
E5CN-U

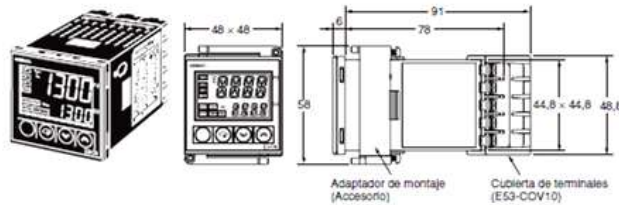
El panel frontal es el mismo para E5CN y E5CN-U.



Dimensiones

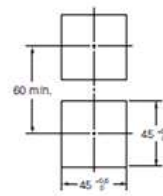
■ Modelos estándar

E5CN
Modelos con terminales



Sección del panel

Montaje por separado



Montaje en grupo
(48 x número de unidades - 2,5) ^{+0,2}_{-0,2}



El montaje en grupo no permite la estanqueidad.

- El grosor recomendado del panel es de 1 a 5 mm.
- El montaje en grupo no se puede realizar en dirección vertical. (Deje el espacio de montaje indicado entre controladores.)
- Para montar el controlador de modo que sea estanco, instale la junta estanca en el controlador.
- Cuando monte dos o más controladores, compruebe que la temperatura circundante no excede la temperatura de operación permisible indicada en las especificaciones.

ANEXO 2

Normativas existentes para pellets de madera

ALEMANIA

DIN 51731, de pellets y briquetas y la DIN Plus que es específica de pellets de gran calidad para calderas que sólo trabajan con pellets.

DIN 51731

Propiedades	Pellets de Madera
Diámetro (mm)	4-10
Longitud (mm)	< 5
Densidad (kg/m ³)	1 - 1,4
Humedad (% masa)	< 12
Cenizas (%masa)	< 1,5
Poder calorífico (MJ/kg)	17,5 - 19,5
Azufre (%masa)	< 0,09%
Nitrógeno (%masa)	< 0,3%
Ouro (%masa)	< 0,03%
Arsénico (mg/kg)	< 0,8
Cadmio (mg/kg)	< 0,5
Cromo (mg/kg)	< 8
Cobre (mg/kg)	< 5
Mercurio (mg/kg)	< 0,05
Plomo (mg/kg)	< 10
Zinc (mg/kg)	< 100

DIN Plus

Propiedades	Pellets de madera
Diámetro (mm)	Indicar
Longitud (mm)	< 5 * diámetro
Densidad real(kg/m ³)	> 1,12 kg/m ³
Humedad (% masa)	< 10
Cenizas (%masa)	< 0,5
Poder calorífico (MJ/kg)	> 19
Azufre (%masa)	< 0,04
Nitrógeno (%masa)	< 0,3
Ouro (%masa)	< 0,02
Arsénico (mg/kg)	< 0,8
Cadmio (mg/kg)	< 0,5
Cromo (mg/kg)	< 8
Cobre (mg/kg)	< 5
Mercurio (mg/kg)	< 0,05
Plomo (mg/kg)	< 10
Zinc (mg/kg)	< 100
Densidad aparente	Indicar
Durabilidad	< 2,3%
Aditivos	< 2%

ITALIA

CTI R04/05 establece los parámetros de calidad de los pellets de biomasa con fines energéticos. Establece 4 categorías en función del origen.

Parámetro	Unidad	Categoría		
		A.1	A.2	A.3
Origen		Troncos de árboles caducifolios sin corteza Troncos de conifera sin corteza Madera sin tratar de industrias madereras Madera sin corteza y sin tratar tras ser utilizada Mezcla de las categorías anteriores.	Materiales en crudo comprendidos en la categoría A.1 Biomasa herbácea sin tratar Mezcla de las categorías anteriores.	Materiales en crudo comprendidos en la categoría A.2.
Diámetro (D)	mm	$D = 6 \pm 0,5 - 8 \pm 0,5$	$D = 6 \pm 0,5 - 8 \pm 0,5$	$10 \pm 0,5 \leq D \leq 25 \pm 1,0$
Longitud (L)	mm	$D \leq L \leq 5 \times D$	$D \leq L \leq 5 \times D$	$D \leq L \leq 4 \times D$
Humedad	% peso b.h	≤ 10	≤ 10	≤ 15
Cenizas	% peso b.h	$\leq 0,7$	$\leq 1,5$	Indicar
Durabilidad	% peso	$\geq 97,7$	$\geq 95,0$	$\geq 90,0$
Folvo	% peso	$\leq 1,0$	$\leq 1,0$	Indicar
Agentes Aglomerantes	% peso	No aceptados		
S	% peso b.s	$\leq 0,05$	$\leq 0,05$	Indicar
N	% peso b.s	$\leq 0,3$	$\leq 0,3$	Indicar
Cl	% peso b.s	$\leq 0,03$	Indicar	Indicar
Densidad aparente	kg/m ³	$\geq 620 - \leq 720$	$\geq 600 - \leq 720$	≥ 550
Poder	MJ/kg	$\geq 16,9$	$\geq 16,2$	Indicar
Calorífico b.h	(kcal/kg)	(≥ 4.039)	(≥ 3.870)	

FUNDACIÓN CARTIF

Parque Tecnológico de Boecillo, Parc. 205, 47151 Boecillo (Valladolid)
Inscrito en el Registro de Fundaciones de la Junta de Castilla y León con el nº3. CIT nº27 - OTRI nº 122
Tel. (983) 546504 Fax, (983) 546521. NIF.G-47565478
Página web: www.cartif.es correo electrónico: cartif@cartif.es
Copyright © 2006 CARTIF

ANEXO 3

PLANOS

1

2

3

4

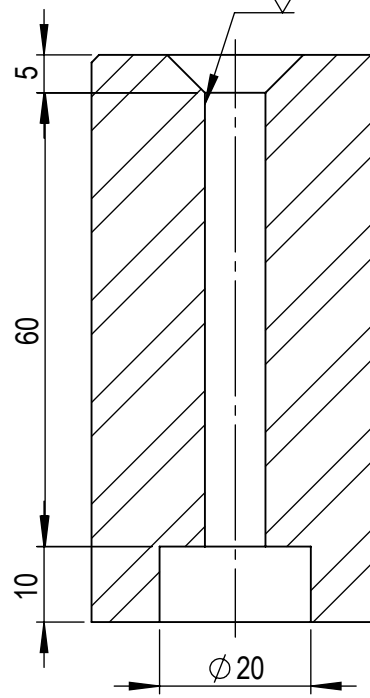
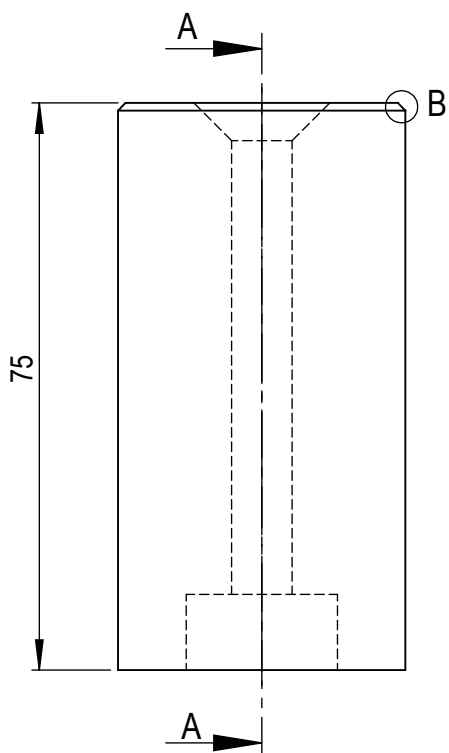
A

Torneado
N7

B

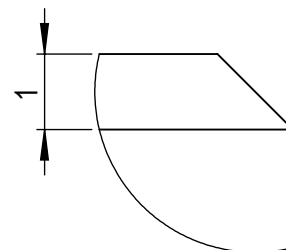
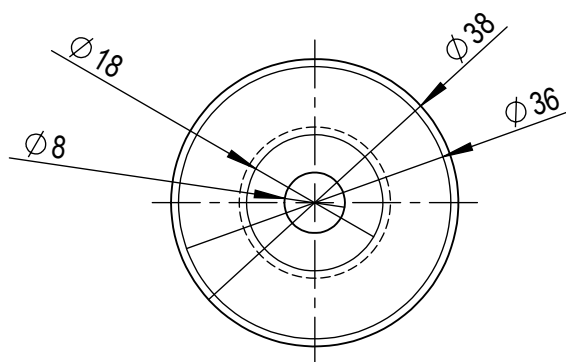
Taladrado
N9

C



SECCIÓN A-A

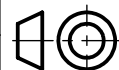
D

DETALLE B
ESCALA 10 : 1

E

Nota: Eliminar aristas vivas

				Tolernacia : $\pm 0,1$	Peso: 0.63 Kg	Material: AISI 304	
				Fecha	Nombre	Título :	Escala:
				Dibujó: 18/08/2014	Alex Portero	dato de compresión	1:1
				Revisó: 18/08/2014	Ing S Cabrera		
				Aprobó: 18/08/2014	Ing S. Cabrera		
				UTA		No. Lámina	Registro:
				INGENIERÍA MECÁNICA		2 DE 5	
Edición:	Modificación	Fecha	Nombre				



1

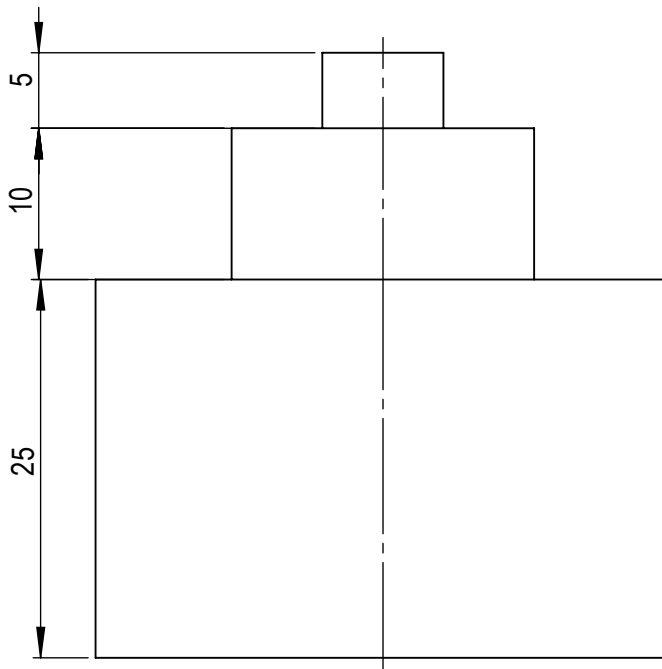
2

3

4

N7 Torneado

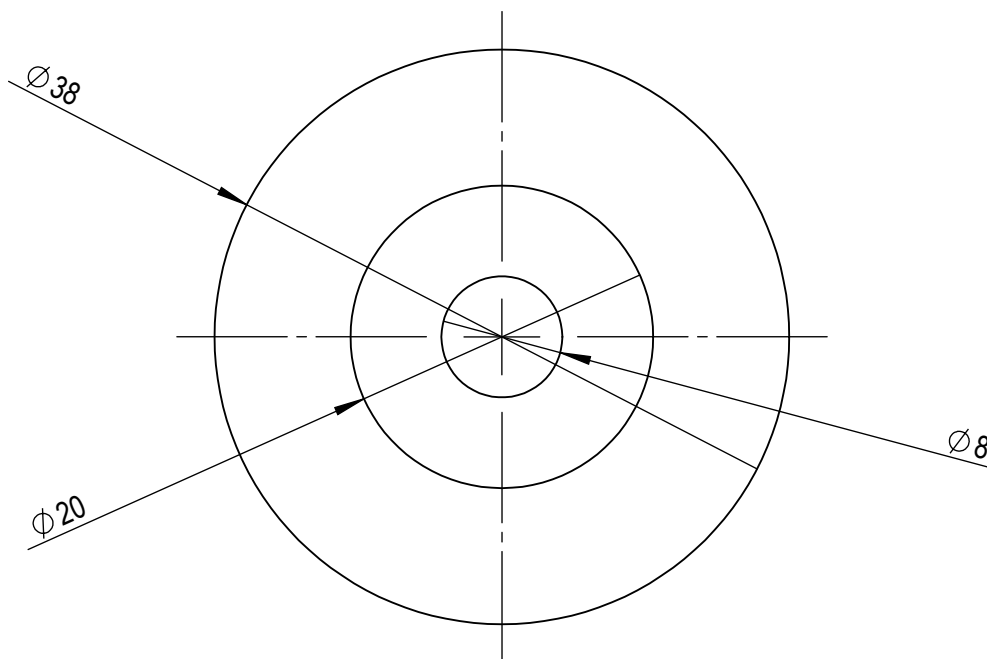
A



B

C

D



E

Nota: Eliminar aristas vivas

				Tolerancia :	Peso:	Material:		
				$\pm 0,1$	0.25 Kg	AISI 304		
				Fecha	Nombre	Título :	Escala:	
				Dibujó: 18/08/2014	Alex Portero	Tapa inferior	2:1	
				Revisó: 18/08/2014	Ing S Cabrera			
				Aprobó: 18/08/2014	Ing S. Cabrera			
				UTA		No. Lámina	Registro:	
				INGENIERÍA MECÁNICA		3 DE 5		
Edición:	Modificación	Fecha	Nombre					

1

2

3

4

N7 Torneado

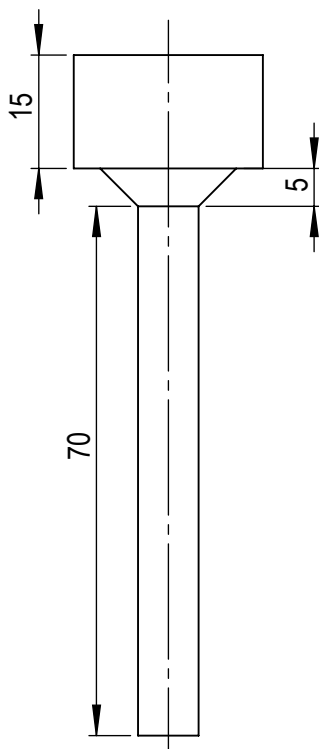
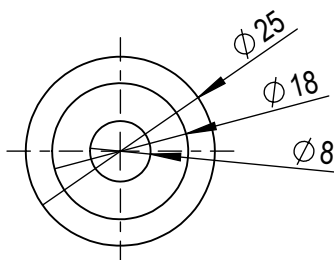
A

B

C

D

E



Nota: Eliminar aristas vivas

				Tolernacia :	Peso:	Material:		
				$\pm 0,1$	0.09 Kg	AISI 304		
				Fecha	Nombre	Título :	Escala:	
				Dibujó: 18/08/2014	Alex Portero	Vastago de compresión	1:1	
				Revisó: 18/08/2014	Ing S Cabrera			
				Aprobó: 18/08/2014	Ing S. Cabrera			
				UTA		No. Lámina	Registro:	
				INGENIERÍA MECÁNICA		4 DE 5		
Edición:	Modificación	Fecha	Nombre					

1

2

3

4

N7 Torneado

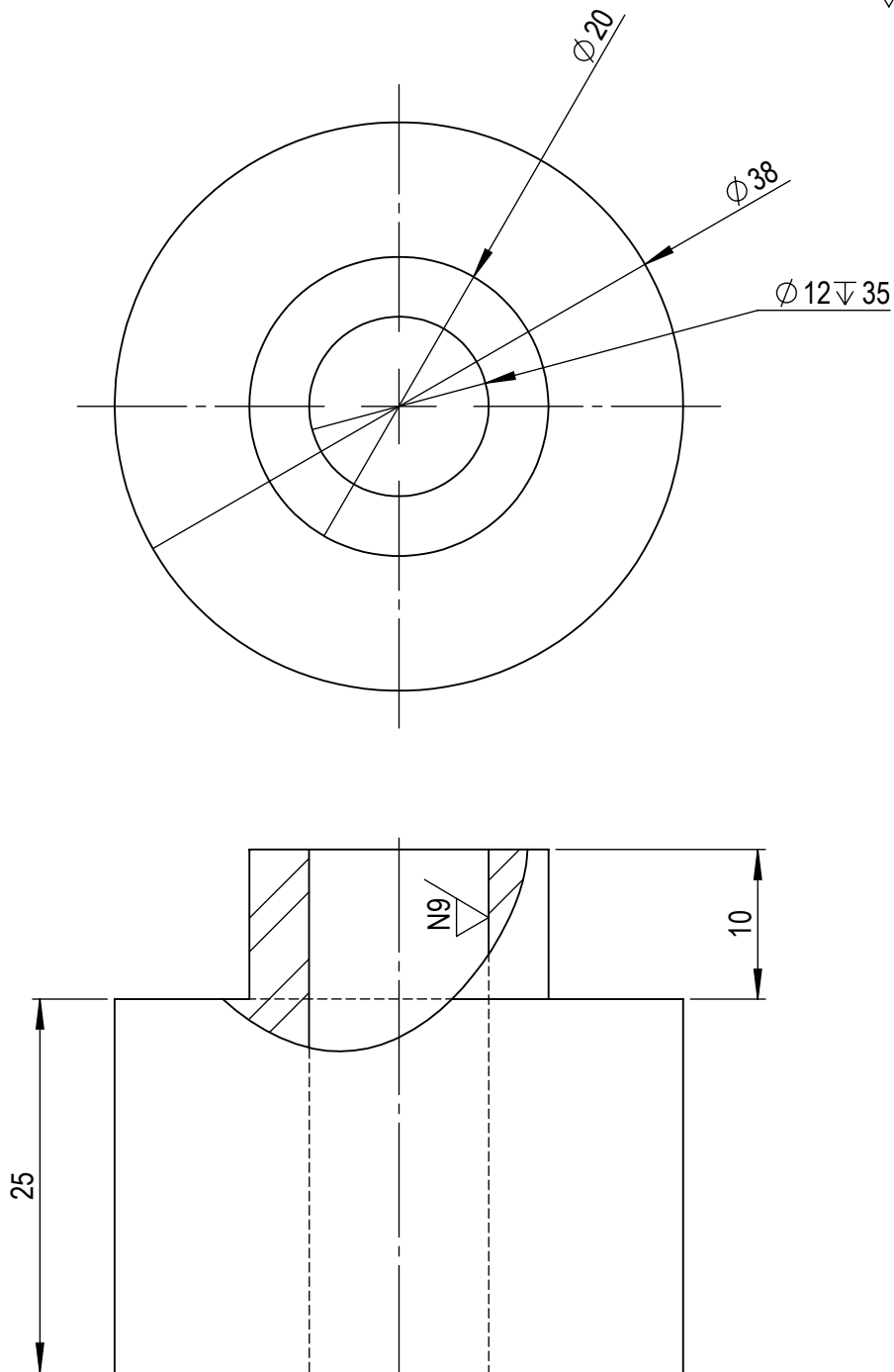
A

B

C

D

E



Nota: Eliminar aristas vivas

				Tolernacia :	Peso:	Material:		
				±0,1	0.22 Kg	AISI 304		
				Fecha	Nombre	Título :	Escala:	
				Dibujó: 18/08/2014	Alex Portero	Dado de expulsión	2:1	
				Revisó: 18/08/2014	Ing S Cabrera			
				Aprobó: 18/08/2014	Ing S. Cabrera			
				UTA		No. Lámina	Registro:	
				INGENIERÍA MECÁNICA		5 DE 5		
Edición:	Modificación	Fecha	Nombre					