

**DISEÑO DE UNA MAQUINA PELETIZADORA DE RESIDUOS DEL
CACAO**

**NESTOR RAUL
GOMEZ ROJAS
ID 257162**



**UNIVERSIDAD PONTIFICIA
BOLIVARIANA**

**FACULTAD DE INGENIERIA
MECANICA**

**ESCUELA DE INGENIERIAS
BUCARAMANGA 2019**

**DISEÑO DE UNA MÁQUINA PELETIZADORA DE RESIDUOS DEL
CACAO**

NÉSTOR RAÚL GÓMEZ ROJAS

**TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR
AL TÍTULO DE
INGENIERO MECÁNICO**

Director:

Dr. agr. SANDRA PATRICIA CUERVO ANDRADE

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA
BOLIVARIANA**

**FACULTAD DE INGENIERIA
MECANICA**

**ESCUELA DE INGENIERIAS
BUCARAMANGA 2019**

NOTA DE ACEPTACIÓN:

**Firma del presidente
del jurado**

Firma del jurado

Firma del jurado

Bucaramanga, diciembre 2019

DEDICATORIA

Quiero dedicar este proyecto a mis padres que me apoyaron en todo momento y me enseñaron a no rendirme ante cualquier adversidad que se presenta en la vida.

A mis hermanos que siempre estuvieron cuando los necesité

A mi familia y amigos los cuales fueron un gran apoyo en todo momento.

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a todas esas personas que me apoyaron durante este camino por ayudarme a cumplir mis metas en la vida. Por esto quiero dar las gracias a mis padres y a mi abuela quienes estuvieron siempre brindándome un apoyo personal y económicamente durante toda la carrera universitaria.

A la universidad Pontificia Bolivariana por una gran formación académica, personal y deportiva que me permitió formarme como un gran profesional.

A los docentes de la facultad de ingeniería mecánica de la universidad y todos aquellos que dentro de la universidad que me ayudaron cuando lo necesité.

Finalmente agradezco a mi directora de proyecto por ayudarme y guiarme cuando requerí de su ayuda, también por la calidad de persona en su facultad como profesional.

RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

TITULO: DISEÑO DE UNA MAQUINA PELETIZADORA DE RESIDUOS DEL CACAO

AUTOR(ES): NESTOR RAUL GOMEZ ROJAS

PROGRAMA: Facultad de Ingeniería Mecánica

DIRECTOR(A): SANDRA PATRICIA CUERVO ANDRADE

RESUMEN

Reutilizar residuos orgánicos en zonas agrícolas es una gestión que se ha implementado en varias partes del mundo, demostrando una solución al consumo excesivo que ha provocado el crecimiento de la economía. Este proyecto utilizará residuos de la cosecha del cacao para posteriormente caracterizarlos y con esto poder diseñar los elementos mecánicos que componen la máquina peletizadora. Por último se hace un modelo CAD en el cual se ensamblan todas las piezas de diseño creadas anteriormente, con este modelo se hace un estudio de movimiento para observar como trabaja cada componente de la máquina.

PALABRAS CLAVE:

Peletizadora, Cacao, residuos, Caracterizar, diseñar

V° B° DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO

GENERAL SUMMARY OF WORK OF GRADE

TITLE: DESIGN OF COCOA WASTE PELLETIZING MACHINE

AUTHOR(S): NESTOR RAUL GOMEZ ROJAS

FACULTY: Facultad de Ingeniería Mecánica

DIRECTOR: SANDRA PATRICIA CUERVO ANDRADE

ABSTRACT

Reuse organic waste in agricultural areas is a management that has been implemented in several parts of the world, demonstrating a solution to excessive consumption that has caused the growth of the economy. This project will use residues from the cocoa crop to later characterize them and thus be able to design the mechanical elements that make up the pelletizing machine. Finally, a CAD model is made in which all the previously created design pieces are assembled, with this model a motion study is done to observe how each machine component works.

KEYWORDS:

Pelletizer, Cocoa, waste, Characterize, design

V° B° DIRECTOR OF GRADUATE WORK

INTRODUCCIÓN

Reutilizar los residuos orgánicos en zonas agrícolas es una gestión que ha sido implementada en varias ciudades del mundo, demostrando una solución al consumo excesivo que ha generado el crecimiento de la economía. El desarrollo de las áreas urbanas han generado un crecimiento en la población, esto involucra una mayor producción y consumo de recursos, todo esto va de la mano con un aumento en la generación de recursos sólidos y líquidos, afectando la calidad de vida en la población en la producción de recursos y manejo de residuos. [1]

Este proyecto reutilizará la cáscara del cacao para la generación de energía por medio de la combustión, se empieza caracterizando toda la materia prima mediante pruebas de laboratorio, realizando cálculos los cuales nos ayudan a entender el comportamiento del material en el campo de acción que se quiere usar. Debemos recordar que la cáscara del cacao es un residuo orgánico y los residuos orgánicos si no se dejan descomponer en un ambiente adecuado producen lixiviados que afectan la calidad del suelo. Se requiere diseñar una máquina peletizadora cuyo propósito es darle un uso a los residuos agrícolas y ayudar con el manejo de esta clase de residuos. [2]

Seleccionar la cáscara del cacao como materia prima en el proyecto es pensar que en Santander somos productores y se quiso poner un residuo que abunde en el departamento.

TABLA DE CONTENIDO

| | |
|--|----|
| 1. Planteamiento del problema | 11 |
| 2. Antecedentes | 12 |
| 3. Justificación | 13 |
| 4. Objetivos | 14 |
| 5. Alcance | 16 |
| 6. Marco teórico | 17 |
| 6.1 norma din plus | 18 |
| 6.2 tipos de peletizadora | 18 |
| 6.3 elección del tipo de molino para el material | 19 |
| 6.4 caracterización | 23 |
| 6.5 análisis y estudios de la materia prima | 26 |
| 6.6 método de caracterización | 26 |
| 7. Metodología | 30 |
| 8. Resultados y discusión | 35 |
| 8.1 primer objetivo específico | 35 |
| 8.1.1 prueba de humedad | 35 |
| 8.1.2 prueba de granulometría | 38 |
| 8.1.3 prueba de densidad | 43 |
| 8.2 segundo objetivo específico | 48 |

| | |
|--|----|
| 8.3 segundo y tercer objetivo específico | 74 |
| 8.3.1 planos y diseño en solidworks | 74 |
| 9. Conclusiones | 80 |
| 10. Recomendaciones | 81 |
| 11. Bibliografía | 82 |

Lista de tablas

| | |
|--|----|
| Características del pellet según la norma DIN..... | 18 |
| Porcentaje de ceniza en los pellet..... | 22 |

| | |
|---|----|
| Propiedades físicas del pellet..... | 22 |
| Poder calorífico en distintas biomosas..... | 23 |
| Prueba de humedad 1.1..... | 25 |
| Prueba de humedad 1.2..... | 25 |
| Prueba de humedad 2..... | 28 |
| Prueba de humedad 3..... | 28 |
| Prueba de granulometría 1..... | 30 |
| Prueba granulometría 2..... | 32 |
| Prueba granulometría 3..... | 33 |
| Prueba densidad 1..... | 36 |
| Prueba densidad 2..... | 36 |
| Prueba densidad 3..... | 36 |
| Caracterización de la materia prima..... | 40 |

TABLA DE IMÁGENES

| | |
|---|----|
| Imagen 1. Molino de martillos | 20 |
| Imagen 2. Molino de bolas | 20 |
| Imagen 3. Bandejas con material triturado y molido antes de entrar al horno | 36 |
| Imagen 4. Molino de cuchillas eléctrico usado para moler la materia prima | 36 |
| Imagen 5. Horno usado para secar las bandejas..... | 37 |
| Imagen 6. Tamices usados para clasificar el material | 42 |
| Imagen 7. Balanza digital usada para clasificar lo retenido en cada tamiz | 43 |
| Imagen 8. Pistola de calor usada en el procedimiento..... | 45 |
| Imagen 9. Material siendo secado por la pistola de calor | 45 |
| Imagen 10. Picnómetro usado en las pruebas, lleno de cáscara de cacao molida | 46 |
| Imagen 11. Embudo usado para agregar el material dentro del picnómetro | 46 |
| Imagen 12. Proceso de compresión en los rodillos..... | 50 |
| Imagen 13. Zona de trabajo del rodillo..... | 58 |
| Imagen 14. Rodamientos axiales, catálogo FAG | 68 |
| Imagen 15. Rodamientos axiales con ángulo > 45°. Catálogo FAG | 70 |

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Colombia es uno de los mayores productores de cacao en las américas, está detrás de países como Brasil y Ecuador, en américa se producen 450 millones de toneladas al año. Todas estas toneladas producidas, dejan un gran problema de residuos agrícolas debido a que del cacao solo se aprovecha la semilla, la cáscara del cacao es el 70% del fruto y generalmente es desechado. Los residuos de la producción de cacao es la mazorca que cubre al fruto, se ha intentado usarla como alimento para algunos animales, pero no todos pueden comerla porque no poseen en sus cuerpos las enzimas necesarias para digerirla, por lo general se acumulan los residuos y esto va produciendo lixiviados que afectan la calidad del suelo, los lixiviados son el resultado de dejar en lugares anaeróbicos desechos orgánicos. Se requiere diseñar una máquina que pueda dar una solución al problema planteado con anterioridad, en este caso es una peletizadora que use la mazorca del cacao en la producción de pellets que luego serán usados en la generación de energía por medio de una gasificadora que por medio de la combustión genera los gases necesarios para que un motor de combustión interna pueda trabajar, los pellets que producirá esta máquina también pueden ser usados para calefacción. [3]

2. ANTECEDENTES

La cáscara de cacao en Colombia usualmente se quema o se deja descomponer al aire libre, no existen muchos estudios sobre el potencial energético que puede tener. La mazorca del cacao colombiano tiene niveles homogéneos de carbono, hidrógeno y oxígeno, aunque por otra parte son muy heterogéneas las cantidades de ceniza. [4]

El pellet usado como combustible es una fuente energética que se ha venido desarrollando con el paso de los años, son fabricados de los serrines secos de las industrias de la madera y partes de troncos que se desaprovechan, se aprovecha la lignina como aglomerante natural en el proceso de peletizado. También es posible hacer pellets con otros residuos que tengan buenas características energéticas como la cascarilla del arroz.

Las ventajas de este tipo de combustible es la capacidad de automatización, tienen mejor poder calorífico que la leña, además de ser un producto ecológico y renovable. Se usan para calefacción y proveer agua caliente a las viviendas. En los últimos años se han hecho pellets con diferentes biomásas, no solo con la biomasa agrícola sino de otras industrias, esto ayuda a disminuir la contaminación que llegan a generar algunas industrias.

3. JUSTIFICACION

En el beneficio del cacao, la parte útil corresponde solo al 30 % del fruto, siendo el 70% desechos del proceso, este hecho representa un gran problema para el agricultor al no encontrar una alternativa de uso y solo dejarlo como abono sin composta. Estos residuos generan una gran cantidad de problemas para el mismo cultivo, ya que son focos de contaminación y de enfermedades. La contaminación a nivel mundial por el uso excesivo de combustibles fósiles es muy alta, a través del tiempo se ha venido desarrollando nuevos métodos para generar energía de una manera que no afecte al medio ambiente. Este tipo de energías se conocen como “Energías limpias”, este proyecto le da ese enfoque a la máquina a diseñar. [5]

Teniendo como base lo anterior y el hecho de que la región de Santander es una de las principales zonas de cultivo en el país, se ve la necesidad de buscar alternativas de uso de esta biomasa, con este proyecto se pretende diseñar un equipo que densifique el material seco de la biomasa residual para ser utilizada como fuente energética. [6]

4. OBJETIVOS

4.1 OBJETIVO GENERAL

Diseño de una máquina peletizadora de biomasa residual del beneficio del cacao, a partir de la caracterización fisicoquímica de la biomasa como requerimiento de diseño en la realización de los planos y modelo CAD, la máquina será utilizada para producción energética.

4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Caracterizar la biomasa residual de cacao, para determinar el potencial la humedad, composición química, densidad, caracterizar la biomasa residual.

Resultado: tabla de caracterización fisicoquímica de la biomasa residual del cacao. **Indicador:** Análisis de las medidas descriptivas como promedios, moda, mediana, desviación estándar y coeficiente de variación de las pruebas experimentales realizadas.

2. Diseñar los elementos mecánicos que componen el sistema de peletizado de acuerdo con las características de la biomasa, utilizando software de diseño.

Resultado: Tener planos de construcción

Indicador: cumplir con los requerimientos de diseño.

3. Hacer un modelo de la peletizadora en Solidworks. **Resultado:**

Tener el modelo final de la máquina. **Indicador:** Cumplir con las dimensiones establecidas en los planos.

5. ALCANCE

Con este proyecto se diseñará un sistema de peletizado que use como materia prima un residuo agrícola que actualmente solo se almacena y se bota. Actualmente la mayor parte de los pellets provienen del serrín contaminando el suelo por medio de los lixiviados que se generan. Se quiere dar uso a este residuo que es la cáscara del cacao, el cacao es un fruto abundante en el departamento de Santander.

Se busca generar una alternativa energética en el campo de la biomasa, y contribuir en el mercado de las energías alternativas poniendo en la línea de producción de las gasificadoras, residuos agrícolas diferentes de la madera.

En un futuro se espera que la Peletización abarque muchos residuos que se les pueda usar en otro tipo de campos y mejore el manejo que se les da en el momento.

6. MARCO TEÓRICO

¿Qué es un pellet? El pellet es un producto de biomasa hecho con sustancias renovables, generalmente con residuos de las industrias de madera. Son usados para calefacción, estufas independientes, chimeneas, hornos y calentadores.

Los pellets son una forma de usar muchas toneladas de residuos para convertirlos en energía, son cilindros de unos pocos milímetros de diámetro, el tipo de biomasa puede venir de distintas fuentes, no solo de la madera, hay una gran cantidad de desechos en distintas industrias que también pueden entrar al mercado de los pellets como en el caso del cacao. La cáscara del cacao es desechada luego de la extracción del fruto, esto genera un problema ambiental debido a la forma en la que son desechadas.

Las medidas estándar de un pellet son 1.1cm de diámetro y (1.5 – 2) cm de largo.

6.1 Norma DIN PLUS

La norma DIN PLUS nació en Alemania en el año 2000, específica de pellets de gran calidad para calderas que solo trabajan con pellets. Combina la norma ONORM M7135 con la DIN 51731. [7]

La norma ONORM M7135 nació en Holanda en el año 2000, define los requisitos y especificaciones de pellets y briquetas de madera con y sin corteza. Por otro lado la norma DIN 51731 se creó en el 2000 en Alemania, definiendo los requerimientos de calidad de los pellets de madera. [8]

Tabla 1. Características del pellet según la norma DIN PLUS

| Parámetro | Unidad | Pellet |
|---------------------------|-------------------|-------------|
| Diámetro (D) | Mm | Especificar |
| Longitud | Mm | < 5*D |
| Densidad | Kg/m ³ | >1.12 |
| Contenido de agua | Wt% (b.h) | <10 |
| Contenido de cenizas | Wt% (b.s) | <0.5 |
| Abrasión | Wt% (b.h) | <2.3 |
| Poder calorífico inferior | MJ / kb (b.s) | >18 |

Tomado de [4]

6.2 Tipos de peletizadora:

- a. Molino de pellet plano (plato vertical): el material cae sobre una sección de rodillos que se instala en la superficie de un troquel puesto horizontalmente.

- b. Molino de anillo vertical: son utilizados para la producción a gran

escala, los rodillos y la matriz operan en el eje vertical. Los bordes interior y exterior de los rodillos cubren la misma distancia a través de la superficie de la matriz.

- c. Molino de anillo horizontal: el funcionamiento es similar al molino de anillo vertical, lo que cambia es el sentido de alimentación y la posición del anillo.

Los pellets usados en mayor cantidad son los producidos con la madera, su valor calorífico depende de la madera a utilizar, pero es aproximadamente 4500 Kcal/Kg. Si se miran equivalencias energéticas, 2 kilos de pellet generan la misma energía que 10 kilovatios de electricidad y la potencia de calefacción de un litro de petróleo. [8]

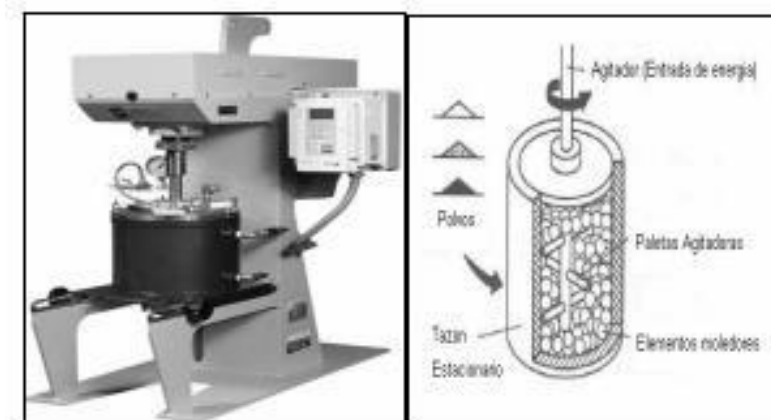
Peletizadora de matriz plana: su diseño es vertical, el material cae sobre una sección de rodillos que se monta en la superficie de un troquel colocado horizontalmente. Después el material se comprime por medio de la matriz y los pellets salen por la parte inferior de esta. La desventaja de este tipo de molino son los rodillos, que saltan constantemente debido a las irregularidades del material, pero en este caso el material va a estar molido antes de entrar a la tolva de alimentación de la máquina. [9]

6.3 Elección del tipo de molino para el material

La materia prima debe ser molida antes de arrojarse en la peletizadora, debe alcanzar un tamaño de partícula entre 0.1mm y 0.5mm para que el proceso de peletizado sea óptimo. Por esto se ha tenido en cuenta estos distintos tipos de molino.

Molino de martillos: Su funcionamiento es basado en la compresión de un material entre dos cuerpos, cuando la aplicación de la fuerza aumenta, más rápido ocurre el proceso de molido. [10]

Imagen 1. Molino de martillos



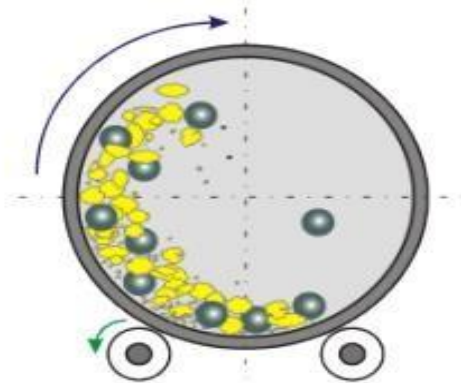
Tomado de [8]

¿Cómo funciona un molino de bolas?

Este tipo de molino trabaja girando sobre sus apoyos con una velocidad estipulada dependiendo del tamaño del molino.

Cuando el molino gira, las bolas junto al material van girando debido a las ondulaciones y cada vez que el molino da una vuelta, hay unos golpes producidos por las bolas, estos son los que van triturando el material. [11]

Imagen 2. Molino de bolas



Tomado de [9]

Ventajas y desventajas del molino de martillo respecto al molino de bolas.

- Ventajas

- Capaces de producir una alta gama de tamaños de partículas.
- Trabajar con cualquier material friable y fibra.
- Facilidad de uso.
- Una menos inversión inicial en comparación con un molino de rodillos.
- Mantenimiento mínimo necesario.
- Las partículas producidas por lo general son esféricas, con una superficie que parece pulida.

- Desventajas

- Menos eficiente en energía, en comparación con un molino de rodillos.
- Puede generar calor (fuente de pérdida de energía).
- Produce una mayor variabilidad de tamaño de partícula (menos uniforme).
- Son ruidosos y pueden generar contaminación por polvo.

Molino de cuchillas: Las cuchillas con la velocidad de giro se encargan de

cortar el material a un motor eléctrico hace girar las cuchillas encargadas de la molienda del material que se deposita en la alimentación del molino.

Análisis del porcentaje de ceniza en pellets hechos de cáscara de cacao con distintos diámetros. 50 gramos de muestra.

6.4 CARACTERIZACION

Tabla 2. Porcentaje de ceniza en los pellet de madera

| TIEMPO (s) | % CENIZA | | |
|------------|----------|---------|----------|
| | A (6mm) | B (8mm) | C (10mm) |
| 0 | 100 | 100 | 100 |
| 30 | 83 | 89 | 97 |
| 60 | 81 | 81 | 83 |
| 90 | 78 | 78 | 56 |
| 120 | 74 | 76 | 50 |
| 150 | 61 | 61 | 45 |
| 180 | 30 | 51 | 22 |
| 210 | 26 | 36 | 18 |
| 240 | 16 | 31 | 12 |
| 270 | 10 | 31 | 11 |

[12]

Tabla 3. Propiedades físicas del pellet de madera

| Parámetros | A | B | C |
|-------------------------------|--------|--------|--------|
| Masa (g) | 0,3486 | 0,828 | 1,2527 |
| Volumen (m ³) | 0,4241 | 0,7539 | 1,178 |
| Densidad(Kg/m ³) | 821,9 | 1098,2 | 1063,4 |
| PCS(MJ/Kg) | 20,2 | | |
| %Cenizas | 10 | 31 | 11 |
| Diámetro(mm) | 6 | 8 | 10 |
| Longitud(mm) | 15 | 15 | 15 |
| Área ext.(g/cm ³) | 3,38 | 4,76 | 6,28 |
| R (cm ² /g) | 9,69 | 5,74 | 5,01 |
| Mn | 0,1007 | 0,3081 | 0,1092 |

[5]

Poder calorífico de distintos tipos de biomasa.

Tabla 4. Poder calorífico en distintas biomásas

| Biomasa | Poder calorífico (MJ/kg) |
|---------------------------|--------------------------|
| Carbón coquizado | 25 a 32 |
| Madera | 10 a 20 |
| Cáscara de coco | 18 a 19 |
| Paja | 14 a 16 |
| Cáscara de café | 16 |
| Tallos de algodón | 16 |
| Cáscara de cacao | 13 a 16 |
| Cuesco de palma de aceite | 15 |
| Cáscara de arroz | 13 a 14 |
| Tallos de maíz | 13 a 15 |
| Aserrín | 11 |
| Pellet de aserrín | 20.5 |
| Pellet de madera | 20.3 |

[13]

En la tabla del poder calorífico, se puede observar un aumento de este con el aserrín al convertirlo en pellet, esto nos muestra a la cáscara de cacao con un gran potencial al momento de peletizarlo. [12]

La tabla de las características físicas de los pellets, al momento de la fabricación no tuvo en cuenta la norma DIN para el cálculo correcto de la longitud del pellet, por lo cual los porcentajes de ceniza observados pueden variar debido a que el cálculo de la longitud del pellet no se hizo de acuerdo con la norma.

6.5 Análisis y estudios de la materia Prima

El cacao es un fruto muy popular. Es un cultivo tropical que crece bajo condiciones húmedas en Centroamérica y Sudamérica. Colombia es el quinto productor en el mundo y el tercero en Latinoamérica. Según la Federación Nacional de Cacaoteros, en el 2012 el área plantada fue de 158000 hectáreas, produciendo 50000 toneladas. [4]

La cáscara del cacao es el residuo luego de extraer el fruto, posee del 52% al 70% del peso húmedo del fruto, y su valor calorífico es aproximadamente de 17 a 22[MJ kg^{-1}]. Analizando las cenizas que quedan libres, las cáscaras del cacao tienen entre el 30% y 10% de lignina, celulosa y hemicelulosa; lo restante son extractos. Los pellets que se obtienen de la cáscara del cacao presionada y molida contienen valores calóricos y cantidades de ceniza similares a pellets de diferente biomasa. [14]

Este tipo de biomasa al ser un desecho agrícola no amenaza el suministro de alimentos.

6.6 Método de caracterización

PRUEBA DE HUMEDAD

- Se comparó el peso de material molido y triturado antes y después de haberlo secado en el horno, se hicieron 3 pruebas de humedad.
- Los equipos utilizados fueron los siguientes:
 - Balanza digital de alta precisión.
 - Horno de temperatura graduable y que mantenga la temperatura establecida.

- Bandejas resistentes a altas temperaturas.
- Molino eléctrico.
- El procedimiento es el siguiente:
 - Triturar manualmente las muestras de material o molerlas con el molino y separarlas el material molido del que se trituró manual.
 - En cada bandeja se ponen 100 gramos de material aproximadamente y se pesan.
 - Se precalienta el horno hasta que alcance la temperatura deseada 104°C.
 - Se deja el tiempo establecido según la prueba (24 horas).
 - Se sacan las bandejas del horno y se vuelven a pesar para realizar los cálculos de humedad.

Prueba de granulometría

Se determinó que tan buena fue la molienda en cada uno de los molinos utilizados para alcanzar el tamaño de partícula deseado (0.1mm – 0.5mm).

- Los equipos utilizados fueron:
 - Balanza digital de alta precisión
 - Tamices de varios tamaños de abertura
 - Recipiente para pesar el material clasificado en la balanza.
- El procedimiento es el siguiente:

- Se ordenan los tamices de mayor a menor tamaño de abertura
- Se procede a esparcir la muestra en el tamiz de la parte superior para empezar con el tamizado.
- Se separa cada tamiz para pesar el material que no pudo pasar y clasificarlo.
- Se guarda en bolsas plásticas el material clasificado por cada tamiz para un estudio posterior.

PRUEBAS DE DENSIDAD

Por medio de un picnómetro se calculó la densidad experimental de la cáscara del cacao, este método es de gran utilidad para el cálculo de densidad de productos pulverulentos, los pasos que se siguieron fueron los siguientes.

- Dejar la muestra seca (100gramos) durante 24 horas en agua para que adquiriera humedad.
- Cumplido este tiempo se deja secar para retirar el exceso de agua y que la muestra quede parcialmente húmeda, para agilizar el proceso se usó una pistola de calor a 600°C durante 1 hora y 20 minutos.
- Se pesó el picnómetro vacío (161.6 gramos).
- Teniendo el material con la humedad deseada, se pesó en la balanza digital (100 gramos), esto se le conoce como peso parcialmente seco.
- Se introdujo material en el picnómetro y se le agregó agua hasta llenar por completo picnómetro y se pesó (688.1122 gramos).

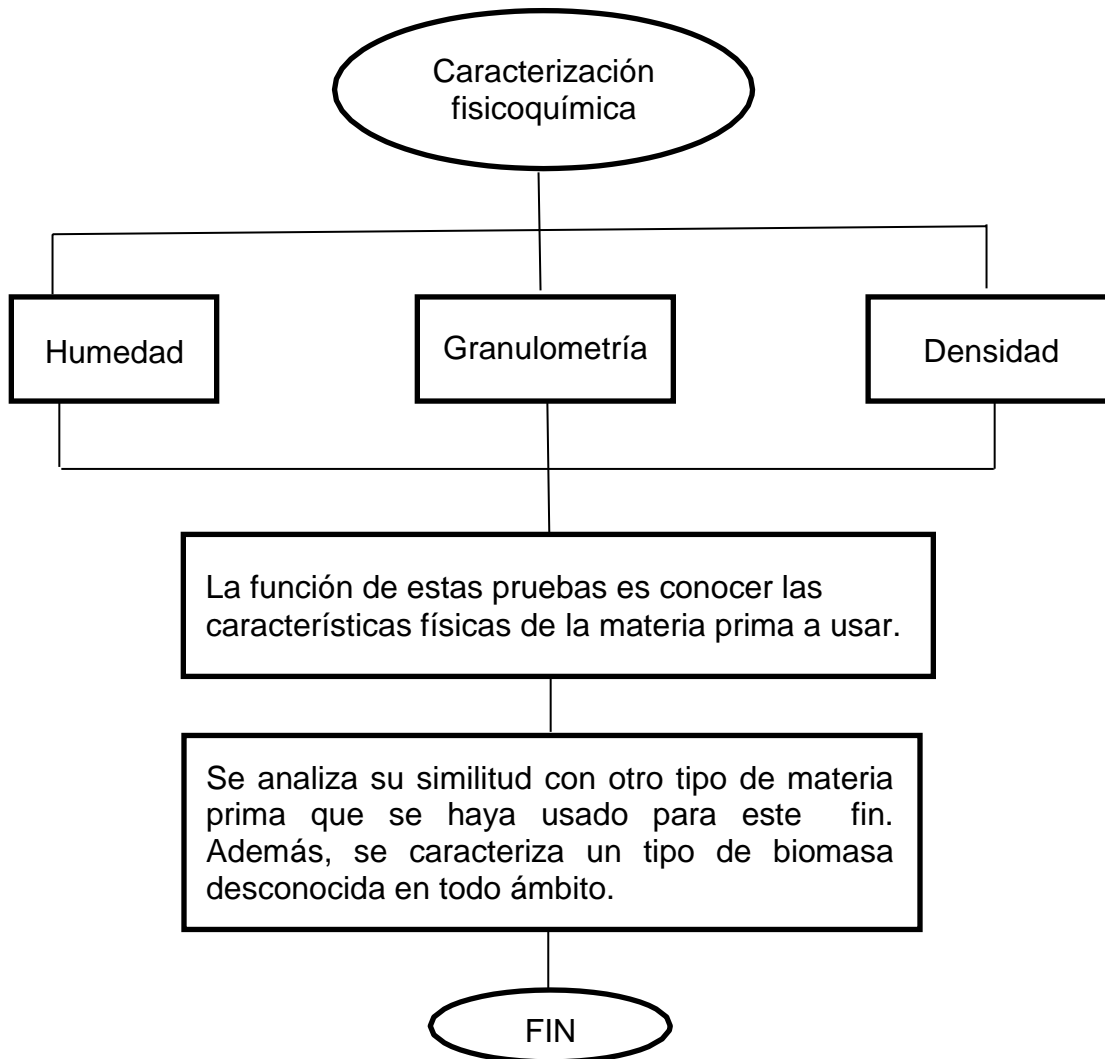
- Se pesó el picnómetro lleno de agua (693 gramos).
- Luego el material se dejó en una bandeja con agua secando en un horno durante 24 horas para obtener el peso del material totalmente seco.
- Se procede a hacer el cálculo de la densidad con la siguiente fórmula.

$$p = \frac{P_{sec}}{P_{sec} + P_{pH} - P_{pmH}}$$

- Dónde:
- p_{sec} : Peso parcialmente seco.
- p_{pH} : Peso picnómetro + agua.
- p_{pmH} : Peso picnómetro + material + agua.

7. METODOLOGÍA

Primer objetivo específico



- Prueba de humedad (norma CEN/TS 14774):
 - Secado en horno.
 - Masa de muestra 100g.
 - Temperatura de secado 104°C.
 - Tiempo de secado 24 horas.
 - Balanza digital, precisión 0,1g.

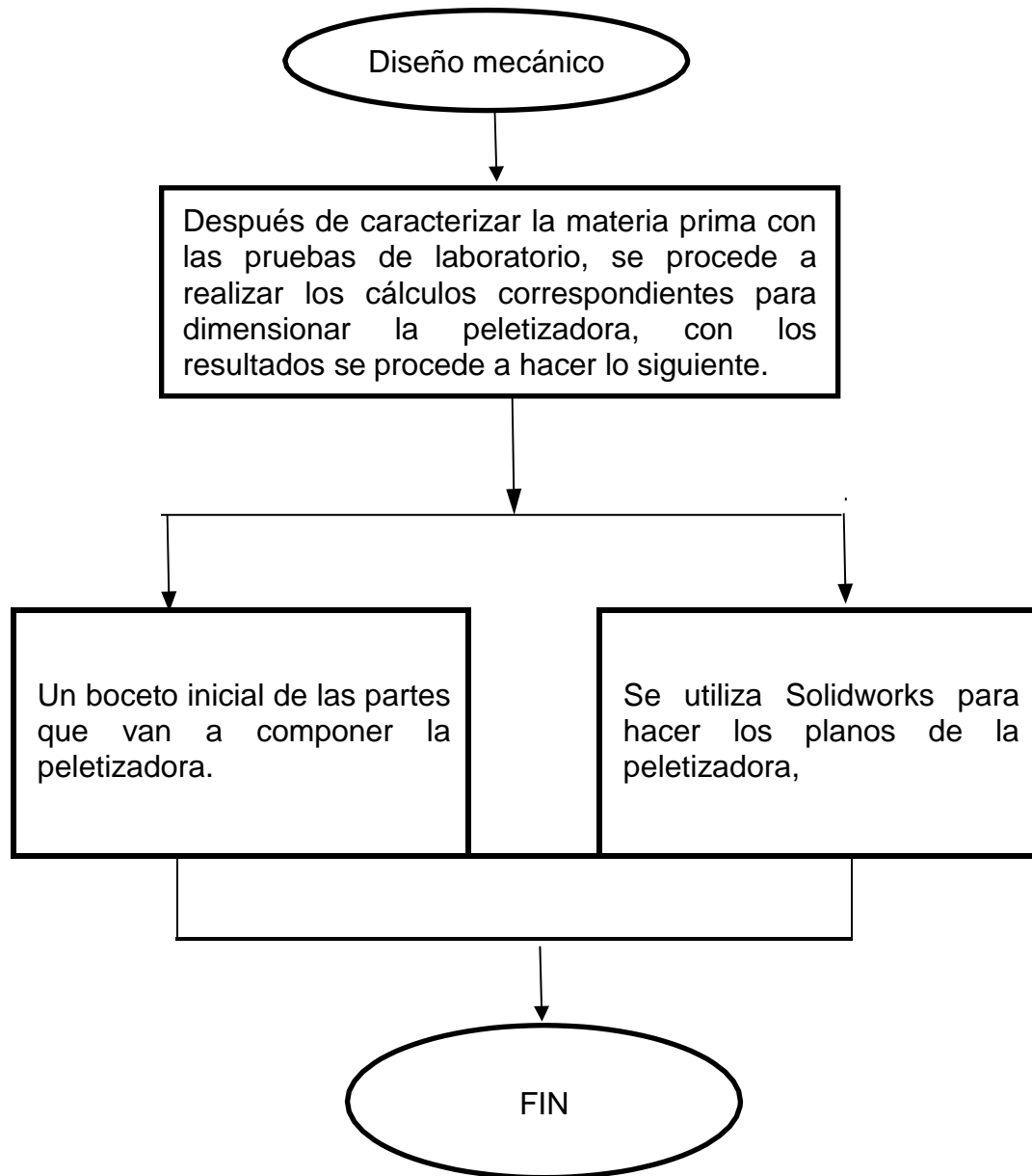
La norma recomienda que las muestras sean mayores a 300gramos, pero para nuestra prueba se usaron muestras de 100gramos. El tiempo de secado es recomendado en la norma hasta que haya una masa constante, es por esto por lo que se dejaron 24 horas en el horno.

- Prueba de granulometría
 - Masa de muestra 100g
 - Tamices de diferente número de malla.
 - Clasificación de la cantidad de material en los tamices.

La prueba consiste en colocar los tamices uno sobre otro de mayor a menor, teniendo en cuenta la apertura de la malla. Luego la muestra de masa se arroja en el tamiz de la parte superior para que queden clasificados en los diferentes tamices.

- Prueba de densidad
 - Se hizo por medio de un picnómetro con el cual se determinó la densidad de cierta cantidad de material, se usó la muestra molida en el molino de martillos de la universidad.

6.1.2. Segundo objetivo específico

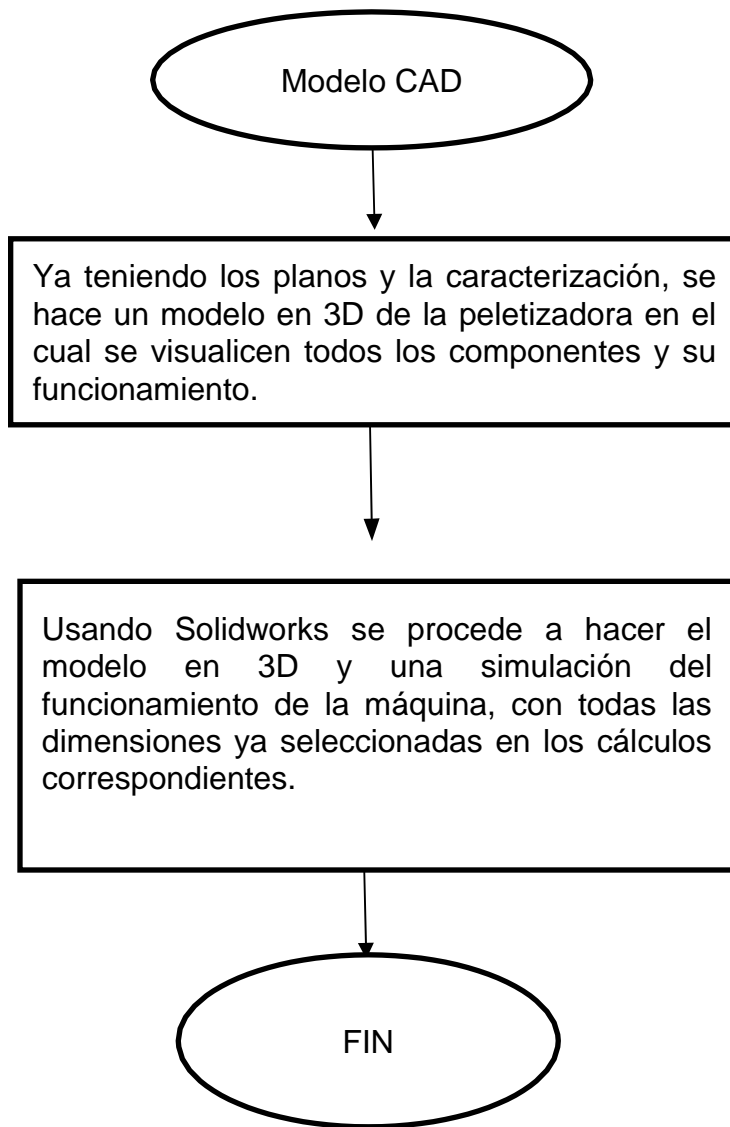


Los cálculos a realizar se hacen con el fin de tener unas dimensiones de la máquina con la cual sabemos que puede cumplir con el propósito de producir pellets, en la teoría se encontraron muchos parámetros, los cuales nos sirven para guiarnos en el proceso de dimensionamiento del equipo

Criterios de selección para determinar el tipo de máquina de fabricación de pellets se va a elegir [6]:

- Producción moderada.
- Calidad en el producto.
- Costos no muy altos en la fabricación.
- Velocidad de producción.
- Complejidad de fabricación.
- Tiempo de fabricación.

Tercer objetivo específico



8. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

8.1 PRIMER OBJETIVO ESPECÍFICO

8.1.1 Prueba de humedad

Prueba 1

Tabla 5. Prueba de humedad 1.1

| Bandejas sin moler | | | |
|---------------------------|-----------------------|---------------------|------------|
| Bandejas | Peso inicial (gramos) | Peso final (gramos) | Cálculos % |
| 1 | 100,255 | 87,063 | 13,1584 |
| 2 | 100,325 | 87,9 | 12,3847 |
| 3 | 100,3 | 87,353 | 12,9082 |

Fuente: el autor

Tabla 6. Prueba de humedad 1.2

| Bandejas molidas | | | |
|-------------------------|-----------------------|---------------------|------------|
| Bandejas | Peso inicial (gramos) | Peso final (gramos) | Cálculos % |
| 1 | 100,345 | 88,27 | 12,0335 |
| 2 | 100,45 | 87,76 | 12,6331 |
| 3 | 28,355 | 25,585 | 9,7690 |

Fuente: el autor

Los cálculos del porcentaje de humedad se realizaron con la fórmula humedad en base húmeda, la fórmula es la siguiente:

$$\left(\frac{\text{Peso inicial} - \text{Peso final}}{\text{Peso inicial}} \right) * 100$$

El material molido, se dejó moler durante 2 minutos para tener un tamaño de grano lo más homogéneo posible.

Imágenes del procedimiento

Imagen 3. Bandejas con material triturado y molido antes de entrar al horno



Fuente: el autor

Imagen 4. Molino de cuchillas eléctrico usado para moler la materia prima



Fuente: el autor

Imagen 5. Horno usado para secar las bandejas



Fuente: el autor

Prueba 2

Tabla 7. Prueba de humedad 2

| Bandejas con material molido y triturado | | | |
|---|-----------------------|---------------------|------------|
| Bandejas | Peso inicial (gramos) | Peso final (gramos) | Cálculos % |
| 1 | 106,89 | 95,882 | 10,2984 |
| 2 | 91,245 | 87,366 | 4,2512 |
| 3 | 100,23 | 90,245 | 9,96208 |

Fuente: el autor

Prueba 3

Tabla 8. Prueba de humedad 3

| Bandejas con material molido | | | |
|-------------------------------------|-----------------------|---------------------|------------|
| Bandejas | Peso inicial (gramos) | Peso final (gramos) | Cálculos % |
| 1 | 100,239 | 84,769 | 15,4331 |
| 2 | 100,062 | 84,714 | 15,3384 |
| 3 | 99,872 | 82,546 | 17,3482 |

Fuente: el autor

El procedimiento para las pruebas número 2 y 3 fue igual al de la prueba 1 y se usaron los mismos instrumentos de laboratorio.

Observación: en la prueba número 1 se usaron 6 bandejas, 3 bandejas con material molido y 3 bandejas con material triturado manualmente. Esto se hizo con el fin de determinar si moliendo o no el material la humedad variaba mucho.

La prueba número 2 se hizo con 3 bandejas, mezclando material molido y material triturado en cada una de las bandejas hasta completar 100 gramos de material en cada una.

Y la prueba 3, solo se utilizó material triturado, haciendo uso de un mortero.

8.1.2 PRUEBA DE GRANULOMETRÍA:

Prueba 1

Cálculos:

Tabla 9. Prueba de granulometría 1

| Prueba granulometría | | |
|----------------------|---------------------------|-------------------------|
| Peso (gramos) | Tamiz y fondo | Abertura del tamiz (mm) |
| 0,51 | #4 | 4,75 |
| 5,53 | #8 | 2,38 |
| 46.43 | #16 | 1,19 |
| 21,82 | #30 | 0,595 |
| 15.92 | #50 | 0,297 |
| 2,95 | #100 | 0,149 |
| 3,39 | Fondo (material restante) | |

Fuente: el autor

El fondo es el material que pasó el tamiz más fino usado en la prueba.

Imágenes de la prueba



Fuente: el autor

Este es el tamiz #100, es el de malla más fina usado en la prueba.



Fuente: el autor

Tamices ordenados de mayor a menor tamaño de abertura en la malla.



Fuente: el autor

Balanza digital de alta precisión pesando el material que quedó en uno de los tamices.



Fuente: el autor

Se separó el material de acuerdo con los tamices como se observa en las bolsas plásticas.

Prueba 2.

- Peso inicial 100gramos

- La molienda de esta muestra fue realizada en el molino de martillos.

Tabla de resultados

Tabla 10. Prueba granulometría 2

| Tamiz | Peso en gramos | Abertura del tamiz (mm) |
|-------|----------------|-------------------------|
| #4 | 0.4 | 4.75 |
| #8 | 4.8 | 2.38 |
| #16 | 38.8 | 1.19 |
| #30 | 21.8 | 0.595 |
| #50 | 17.2 | 0.297 |
| #100 | 5.2 | 0.149 |
| Fondo | 9 | |

Fuente: el autor

El peso final fue de 97.2, hubo pérdidas en el tamizado, estos 100gramos se molieron en el molino de martillos que posee la universidad.

El procedimiento y los equipos utilizados fueron los mismos que en la prueba 1.

Imágenes de la prueba



Fuente: el autor

Clasificación de lo retenido en cada uno de los tamices

Prueba 3

- Peso inicial 99.2 gramos
- Esta muestra fue molida en el molino de martillos de la universidad.

Tabla de resultados

Tabla 11. Prueba granulometría 3

| Tamiz | Peso en gramos | Abertura del tamiz (mm) |
|-------|----------------|-------------------------|
| #4 | 0 | 4.75 |
| #8 | 4.5 | 2.38 |
| #16 | 36.4 | 1.19 |
| #30 | 22 | 0.595 |
| #50 | 23 | 0.297 |
| #100 | 6 | 0.149 |
| Fondo | 7 | |

Fuente: el autor

El peso final fue de 98.2 gramos, no hubo mucha pérdida de material en el proceso de tamizado.

Imágenes de la prueba

Imagen 6. Tamices usados para clasificar el material



Fuente: el autor

Imagen 7. Balanza digital usada para clasificar lo retenido en cada tamiz



Fuente: el autor

- Las mallas de tamiz a tener en cuenta son la #30, #50, #100 y el fondo debido a que entre estas está el tamaño de partícula deseado. Al analizar los resultados se puede concluir que las muestras molidas en el molino eléctrico alcanzaron mayor cantidad de peso en el tamaño de partícula requerido (0.1mm – 0.5mm). Por tanto, se recomienda el molino eléctrico para realizar la molienda del material. En el tamiz #30 el tamaño de partícula sobrepasa los 0.5mm pero se tiene en cuenta debido a que queda retenido un porcentaje pequeño de material el cual nos sirve para fabricar los pellets.

8.1.3 Prueba de densidad

Prueba 1

Tabla 12. Prueba densidad 1

| Peso parcialmente seco | Peso picnómetro + agua | Peso picnómetro + material + agua |
|------------------------|------------------------|-----------------------------------|
| 100 | 693 | 688.1122 |

Fuente: el autor

Prueba 2

Tabla 13. Prueba densidad 2

| Peso parcialmente seco | Peso picnómetro + agua | Peso picnómetro + material + agua |
|------------------------|------------------------|-----------------------------------|
| 97.5 | 691.3 | 686.6215 |

Fuente: el autor

Prueba 3

Tabla 14. Prueba densidad 3

| Peso parcialmente seco | Peso picnómetro + agua | Peso picnómetro + material + agua |
|------------------------|------------------------|-----------------------------------|
| 101.005 | 693.09 | 689.3311 |

Fuente: el autor

Cálculos prueba 1

$$\rho = \frac{P_{sec}}{P_{sec} + P_{ph} - P_{vmh}} = \frac{100}{100 + 693 - 688.1122} = 0.95339$$

Cálculos prueba 2

$$\rho = \frac{P_{sec}}{P_{sec} + P_{ph} - P_{vmh}} = \frac{97.5}{97.5 + 691.3 - 686.6215} = 0.9542$$

Cálculos prueba 3

$$\rho = \frac{p_{sec}}{P_{sec} + P_{ph} - p_{vmh}} = \frac{101.005}{101.005 + 693.09 + 689.3311} = 0.964120$$

Imágenes de la práctica

Imagen 8. Pistola de calor usada en el procedimiento



Fuente: el autor

Imagen 9. Material siendo secado por la pistola de calor



Imagen 10. Picnómetro usado en las pruebas, lleno de cáscara de cacao molida



Fuente: el autor

Imagen 11. Embudo usado para agregar el material dentro del picnómetro



Fuente: el autor

- Materiales usados en la práctica:
 - Pistola de calor.
 - Horno.
 - Balanza digital.
 - Picnómetro.
 - Embudo.

El laboratorio en el que se realizó la práctica contaba con un picnómetro de 500ml, se usó 100g de material para la prueba. Hubo pérdidas de material al momento de colar y secar la cáscara del cacao, eso pudo afectar el resultado final.

8.1.4 TABLA DE CARACTERIZACIÓN DE LA CÁSCARA DE CACAO PARA LA FABRICACIÓN DEL PELLET

Tabla 15. Caracterización de la materia prima

| Características | Pellet de diámetro 6mm |
|--|------------------------|
| Humedad deseada (%) | < 15% |
| Granulometría deseada (mm) | 0.1 – 0.5 |
| Densidad [kg / m ³] | 957.2441 |
| Poder calorífico de la cáscara del cacao [MJ/Kg] | 13 – 16 |
| Porcentaje de ceniza (%) | 10 |

Esta tabla fue obtenida de acuerdo a los datos consultados con anterioridad y a las pruebas realizadas dentro de los laboratorios de la universidad.

Estos son los parámetros que se deben tener en cuenta para la fabricación de pellets con este tipo de biomasa, el poder calorífico del pellet será mucho mayor al mostrado en la tabla debido a que el material va a estar muy compactado.

El porcentaje de ceniza es un aproximado debido a que la teoría de la cual se tomó el dato no siguió la norma DIN para calcular la longitud del pellet. No existe una norma establecida para la fabricación de pellets de biomasa, los cálculos para este proyecto se basaron en la norma antes mencionada.

8.2 SEGUNDO OBJETIVO ESPECÍFICO

Resultados de cálculos de diseño

Se obtiene de la norma CEN/TS 14691, se debe elegir el diámetro deseado del pellet

$$Lp = Dp * 5 = 30mm$$

(1)

Dónde:

Dp = diámetro del pellet.

Lp = longitud del pellet.

El volumen del pellet (Vp), se obtiene haciendo el cálculo del volumen de un cilindro, por tanto, la ecuación 2 se obtiene

$$Vp = \pi * \frac{D_p^2}{4} * lp = 848.23mm$$

(2)

El grado de compactación del material es el siguiente.

$$Rc = \frac{1}{\frac{Dp}{lp}} = 5$$

(3)

Rc = relación de compactación

El volumen de cáscara (Vc) de cada pellet se obtiene al multiplicar el volumen del pellet (ecuación 2), por la relación de compactación obtenida en la ecuación 3.

$$Vc = Vp * Rc = 4241.1501 mm^3$$

(4)

Al multiplicar la relación de compactación por la densidad de la cascarilla (P_{cas}) = 957.2241 $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$, se obtiene la densidad del pellet.

$$Pp = p_{cas} * Rc = 4786.1205 \left[\frac{Kg}{m^3}\right]$$

Donde

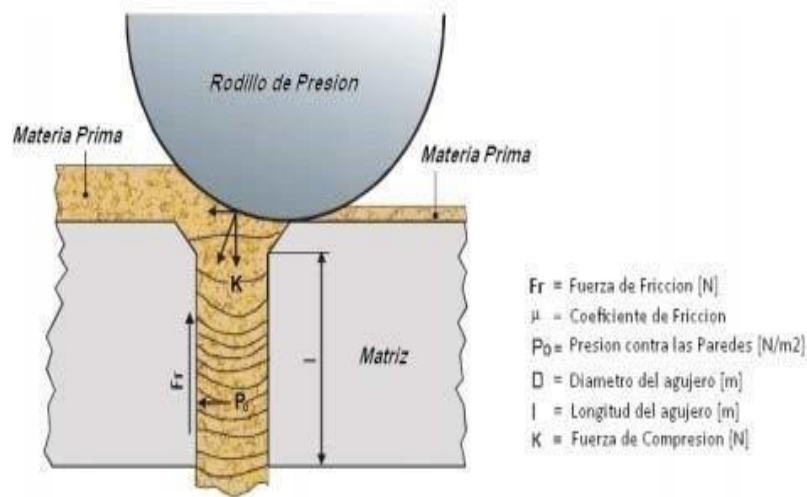
Pp= Densidad del pellet

Pc= Densidad de la cascarilla.

Presión de peletizado

Es necesaria una presión de compactación, la cual es generada por los rodillos que pasan sobre el agujero de la matriz, la ecuación es la siguiente.

Imagen 12. Proceso de compresión en los rodillos.



(Fuente: www.fcyt.umss.edu.co)

$$P_{pel} = Y_f * \epsilon \chi \quad (6)$$

Dónde:

Yf= Esfuerzo de fluencia promedio.

ex= Deformación de extrusión

La deformación por extrusión está en función de los ángulos de avellanado que tenga los agujeros de la matriz los cuales se exponen en la siguiente tabla.

Valores de avellanado empírico

Para un ángulo entre (50° - 60°)

a = tiene un valor entre (0,8 – 0,9)

B = tiene un valor entre (1,2 – 1,5)

$$\epsilon x = a + B * \ln(Rc) = 3.314$$

(7)

Dónde:

a y b = coeficientes de avellanado.

Rc = relación de compactación.

Según la tabla anexa A7, se toma el esfuerzo de fluencia de la madera del pino, este esfuerzo varía entre 40 y 80 Mpa, el valor se tomó 60 Mpa.

Se ha demostrado que para obtener buenos registros de compactación en el pellet, la presión de peletizado oscila entre (188 Mpa – 295 Mpa). Tomando el esfuerzo de fluencia como 60, la presión de peletizado queda en el rango. Usando la madera como referencia ya que sus características son similares a las de la cáscara del cacao.

$$P_{pel} = Yf * \epsilon x = 198.84 MPa$$

(8)

Dónde:

P_{pel} = Presión de peletizado

Una vez obtenida la presión dentro de la matriz se calcula la fuerza que debe

aplicar el rodillo por medio de la siguiente ecuación.

$$K = P_{pel} * \left(\pi * \frac{Dp^2}{4} \right) = 5.62 \text{ kN}$$

(9)

Dónde:

K= Fuerza de Compresión o Compactación que debe ejercer el rodillo.

Presión en la matriz

Cuando el material ingresa a la matriz se forma una capa inicial con una altura determinada y cuando pasa el rodillo deja una segunda altura.

La fricción generada entre la matriz de Peletización y los rodillos, produce una fuerza que debe vencer los rodillos para lograr la extrusión del pellet. Esta fuerza es calculada por medio de la siguiente ecuación.

$$P_f = Y_f * \left(\frac{2 * h_f}{D_p} \right)$$

$$P_f = 60 * \left(\frac{2 * h_f}{D_p} \right) = 4 \text{ MPa}$$

(10)

Dónde:

Pf= Presión adicional requerida para superar fricción.

hf= Altura mínima luego de pasar el rodillo entre 0.2 mm - 0.3 mm. Se usó la de altura de 0.2mm.

Dp= Diámetro del pellet.

La fricción originada entre la matriz y la mazorca del cacao

ocasiona una presión en las paredes internas, la cual se puede determinar mediante la ecuación 11.

$$P_{pint} = \frac{P_f * D_p}{4 * \mu * h_f} = 42.8571 MPa$$

(11)

Dónde:

P_{pint} = presión en las paredes internas.

D_p = diámetro del pellet.

μ = coeficiente de fricción entre madera y acero (0.7)

h_f = altura inicial antes del rodillo.

Fuerza de fricción interna

Se encarga de compactar el material y no debe ser mayor que la fuerza K , que es la fuerza de empuje, si esto no se cumple, no habría extrusión. Por medio de la ecuación 12 la podemos hallar.

$$F_r = \mu * P_{pint} * D_p * l_p = 5.40 kN$$

(12)

Dónde:

F_r = fuerza de fricción interna.

μ = coeficiente de fricción.

P_r = presión interna.

D_p = diámetro del pellet.

l_p = longitud del pellet.

La fuerza de fricción debe ser menor a la fuerza de compactación, para que haya extrusión de material.

$$Fr < K$$

$$5.40 \text{ kN} < 5.62 \text{ kN}$$

Podemos observar que se cumple lo mencionado anteriormente.

Dimensionamiento de rodillos

Las fórmulas para dimensionar los rodillos se obtuvieron de la fuente (Alakangas & Paju 2002) y (Universidad mayor de San Simón, 2014). Donde $h_o = 35\text{mm}$.

$$r = \frac{h_o - h_f}{\mu^2} = 71.02\text{mm} \approx 7.1\text{cm}$$

(13)

Dónde:

U = coeficiente de fricción.

r = radio del rodillo de compactación.

Ho = altura antes del rodillo.

Hf = altura final después del rodillo.

El ancho del rodillo a_r tiene la misma medida del radio calculado.

(14)

La cantidad de rpm y tiempo de producción se obtiene con la velocidad del rodillo ya que está en función de la masa, la ecuación es la siguiente.

$$m_r = (\pi * r^2 * a_r) * P_a = 8.8341Kg$$

(15)

Dónde:

Pa= Densidad del acero

$$\frac{7850kg}{m^3}$$

En la siguiente ecuación, la aceleración del rodillo se da en función de las fuerzas de compresión y fricción, por lo tanto:

$$A_{c_r} = \frac{K - F_r}{mr} = 24.9035 \left[\frac{m}{s} \right]$$

(16)

La velocidad tangencial de los rodillo es calculada mediante la ecuación 17, obtenida de la fuente HIBBERLER, 2006.

$$V_r = \sqrt{AC_r * r} = 2.5962 [m]$$

(17)

En la ecuación 18 se obtiene una fuerza originada entre el rodillo y el material por la normal de la fricción [Ff_r], a esta fuerza se suma la fuerza de compactación [K] para obtener la fuerza total del rodillo [F_T], la cual es determinada por medio de.

$$Ff_r = m_r * g * \mu = 60.6638 N$$

(18)

La sumatoria de estas fuerzas es casi nula.

$$F_T = Ff_r + K = 5.6806 kN$$

(19)

Los engranajes se usan como medio de trasmisión de potencia y se usó una relación de engranajes 1:1 con el fin que la potencia del motoreductor sea la misma que le llegue a los rodillos. El diseño de los engranajes cónicos se basó en el catálogo Roller.

Diseño de Matriz

Es necesario calcular la velocidad angular de los rodillos, esta es la velocidad tangencial que hay respecto a la matriz para hacer estos cálculos se usan los datos de la velocidad del rodillo

y el brazo del rodillo.

$$w = \frac{V_r}{l_b} = 30.5435 \left[\frac{rad}{s} \right]; w = 291.6689 \text{ rpm}$$

(20)

Dónde:

V_r = Velocidad del rodillo.

l_b = Longitud del brazo de rodillo 0.085m

Se debe determinar la distancia angular que cubre el rodillo para esto se emplea la ecuación 21.

$$D_w = \sqrt{r \cdot (h_o - h_f)} = 49.7141 \text{ mm}$$

(21)

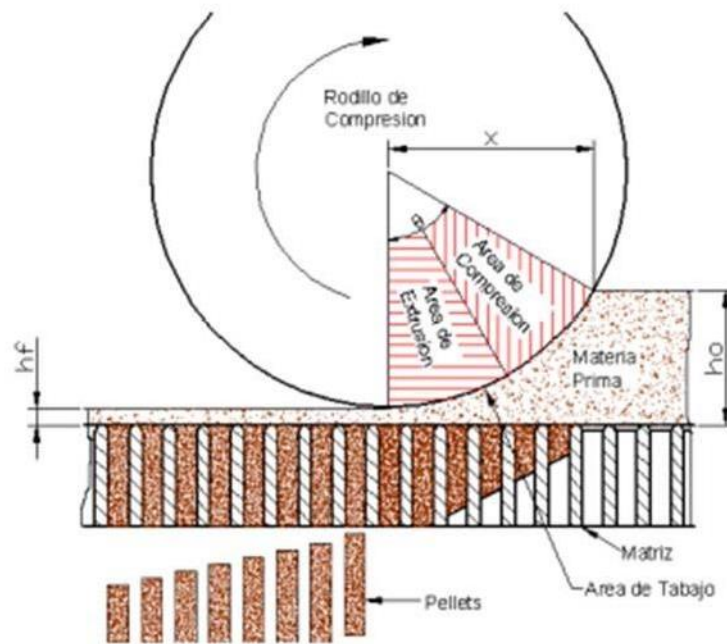
Dónde:

D_w = distancia angular.

R = Radio del rodillo.

En el trabajo de los rodillos, se diferencian dos partes en el rodillo la de compresión y la de extrusión.

Imagen 13. Zona de trabajo del rodillo



Tomado de [12]

El ángulo de trabajo se define con la siguiente ecuación.

$$\theta_r = \text{atan}\left(\frac{D_w}{r}\right) = 34.992^\circ$$

(22)

Es necesario calcular la velocidad de salida de cada pellet, se halla de la siguiente manera.

$$t_s = \frac{\theta_r}{\omega} = 0.1199 \text{ s}$$

(23)

Para saber el número de agujeros de la matriz, se calcula la aceleración dentro de ella. La aceleración se calcula de la siguiente forma.

$$A_m = \frac{K - F_r}{m_c} = 11 \frac{m}{s^2}$$

(24)

Dónde:

A_m = Aceleración dentro de la matriz

K = fuerza compactación.

F_r = fuerza fricción en la matriz.

M_c = masa compactación (20kg).

Ahora es calculada la velocidad de salida de los pellets (extrusión), por medio del siguiente análisis.

$$V_{ex} = V_0 + A_m * t_s = 1.3189 \left[\frac{m}{s} \right]$$

(25)

Dónde:

V_0 = Velocidad inicial (es cero)

A_m = Aceleración dentro de la matriz.

T_s = tiempo salida de los pellets.

Usando la capacidad de peletizado, se obtiene un flujo volumétrico, el cual nos da el volumen que se procesa en un tiempo determinado.

$$Q = F_m * I_{pelet} = 4.1915 * 10^{-3} \left[\frac{m^3}{hr} \right]$$

(26)

Dónde:

F_m = Flujo másico (20 kg/h)

I_{pelet} = Inversa de la densidad del pellet $1/P_p$

Con la ecuación anterior se obtiene el número de agujeros de la matriz, dividiendo para el área de cada pellet y multiplicando por la velocidad de extrusión.

$$N_{am} = \frac{Q}{(V_{ex} * N_r) * (\pi * (r_p)^2)} = 93.6659 = 94$$

(27)

Dónde:

Nam = número agujeros en la matriz.

Q = flujo volumétrico.

Vex = velocidad de extrusión.

Nr = número de rodillos.

Rp = radio del pellet.

Con los datos obtenidos anteriormente es posible calcular la capacidad de peletizado de la máquina, en la siguiente ecuación es multiplicado el volumen de material por la densidad de cada pellet y se obtiene.

$$C_{pe} = Q * P_p = 20 \frac{Kg}{hr}$$

(28)

Dónde:

Q= Flujo volumétrico.

Pp = Densidad del pellet.

Obtenido este valor se comprueba que se cumple con el parámetro de diseño de 20 kG/Hr.

Ahora obtenemos la potencia de peletizado la cual viene a ser fundamental para la selección del motor y la caja reductora, la potencia se la calcula de la ecuación 29.

$$Pot = (2 * \pi) * w * (N_r * K) * D_w = 17.0671Kw = 22.8874 Hp$$

(29)

Dónde:

W = velocidad angular.

Nr = número rodillos.

K = fuerza compactación.

Dw = distancia angular.

Torque final en los rodillos

Es calculado en la siguiente ecuación, la potencia es usada en kW y la velocidad angular en rad/s. El resultado es multiplicado por 1000 para obtenerlo en Nm.

$$Tr = \frac{pot}{w} = 558.780 [N * m]$$

(30)

Cálculo de cuchillas

Los datos mostrados a continuación, son de la madera, esto es porque las características de la cáscara del cacao son muy similares a las de la madera.

$\tau_c = 1.176 \text{ MPa}$, *esfuerzo cortante de la madera.*

$N_a = 3$, *número de cuchillas.*

$S_{py} = 9.1 \text{ MPa}$.

$$S_y = 36 \text{ Ksi}$$

$l_c = 0.090\text{m}$, longitud de cada cuchilla

Se va a considerar un factor de seguridad de 1.5 para los cálculos de las cuchillas.

Con la fórmula de esfuerzo se calcula la fuerza de corte, teniendo en cuenta el esfuerzo cortante de la madera, la ecuación es la siguiente.

$$F_c = \tau_c * (\pi * r_p^2) * N_a = 99.752 \text{ N} \quad (31)$$

En la siguiente ecuación se calcula la fricción en la cuchilla.

$$F_{fr} = (\pi * r_p^2) * S_{py} * \mu = 180.108 \text{ N}$$

Fuente de la ecuación, forraje de alimento, Universidad de Navarra.

(32)

La fuerza total de las cuchillas es equivalente a la suma de las fuerzas calculadas anteriormente que en las ecuaciones 30 y 31.

$$F_{total} = F_c + F_{fr} = 279.859 \text{ N}$$

(33)

Torque final de las cuchillas, se calcula usando la fuerza total, la longitud de cada cuchilla y el número de rodillos que son 2.

$$T_c = F_{total} * l_c * 2 = 50.37 \text{ [N * m]}$$

(34)

Determinamos el torque de cálculo final que relaciona el torque final de las cuchillas y el torque final de los rodillos. Este es el torque necesario final.

$$M_r = T_c + T_r = 609.15 \text{ [Nm]}$$

(35)

$$Pot_c = T_c * w = 1.008 \text{ kW}$$

(36)

En la siguiente ecuación se calcula la potencia de la caja reductora.

$$Pot_{total} = Pot_c * Pot = 18.0751 \text{ kW}$$

(37)

Con el resultado de la ecuación anterior seleccionamos el motor a emplear, se selecciona un motor de serie 1LE0141, la potencia es de 18.5 kW = 25Hp con 3530 rpm, eficiencia del 91%, factor de potencia 0.86 a 60 Hz. Tabla anexa A1

La relación de reducción de giro se obtiene mediante la siguiente ecuación.

$$Rm = \frac{1750 \text{ rpm}}{w} = 6 \quad (38)$$

Donde

W = velocidad angular

Con los datos obtenidos podemos seleccionar el reductor, es un reductor tipo coaxial, tiene un torque máximo de 729 Nm y una relación de reducción de 6.25, datos que cumplen con las necesidades de diseño. Tabla anexa A2.

Diseño de flecha y ejes

El acero con el cual se piensa fabricar el eje principal es A36, el factor de seguridad de este acero es de 1.5, se toma el método de Von-Misses, se siguen los siguientes pasos para determinar el diámetro del eje principal.

$$\sigma_p = \frac{S_y}{F_s} = 165.474 \text{ Mpa}$$

(39)

Dónde:

S_y = esfuerzo último a la fluencia.

F_s = factor de seguridad.

Momento aplicado al extremo del eje

$$M_{pr} = K * l_b = 477.7 \text{ [Nm]} \quad (41)$$

$$t_r = \frac{60s * 1 \text{ rpm}}{w \text{ segs}} = 0.206 \quad (42)$$

$$\alpha = \frac{w}{t_r} = 148.2694 \left[\frac{\text{rads}}{\text{s}^2} \right] \quad (43)$$

$$I_r = \frac{m_r * r^2}{2} = 0.0223 \text{ [Kg * m}^2\text{]} \quad (44)$$

Se calcula el torque ocasionado por la velocidad angular.

$$T_{pr} = I_r * \alpha = 3.31 [Nm]$$

(45)

Con los datos anteriores se procede a calcular el diámetro del eje porta rodillos.

$$d_{pr} = \sqrt[6]{\frac{F_{s^2} * (1024(M_{pr})^2 + 2304T_{pr^2})}{S_{v^2} * \pi^2}} = 30.8662 \text{ mm}$$

(46)

:

M_{pr} = Momento aplicado al extremo del eje

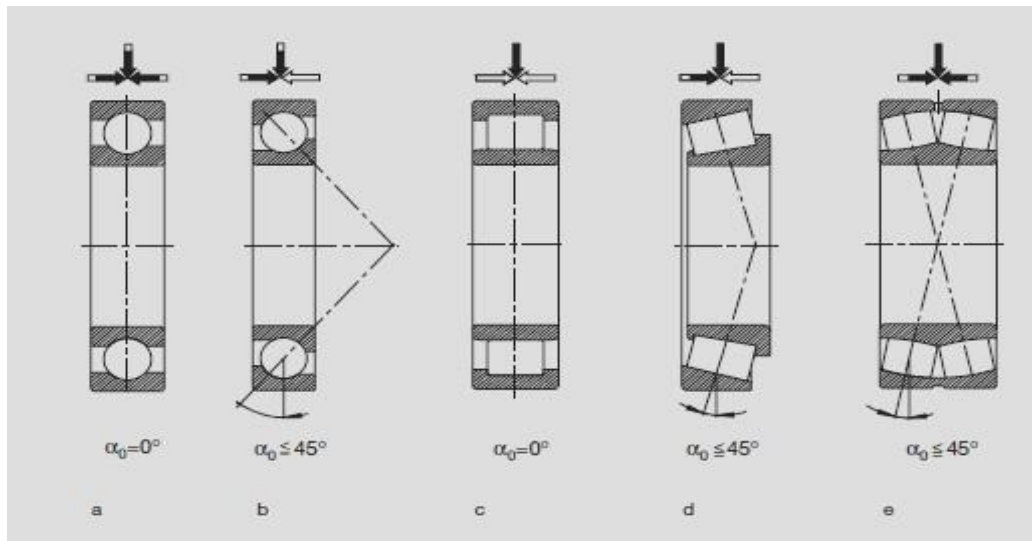
T_{pr} = Torque ocasionado por
velocidad angular.

F_s = Factor de seguridad.

Selección de rodamientos

La dirección de las cargas nos ayuda a seleccionar los rodamientos adecuados, la siguiente gráfica muestra cada uno de los rodamientos que existen para el diseño de la peletizadora, se va a tener en cuenta el catálogo de rodamientos FAG.

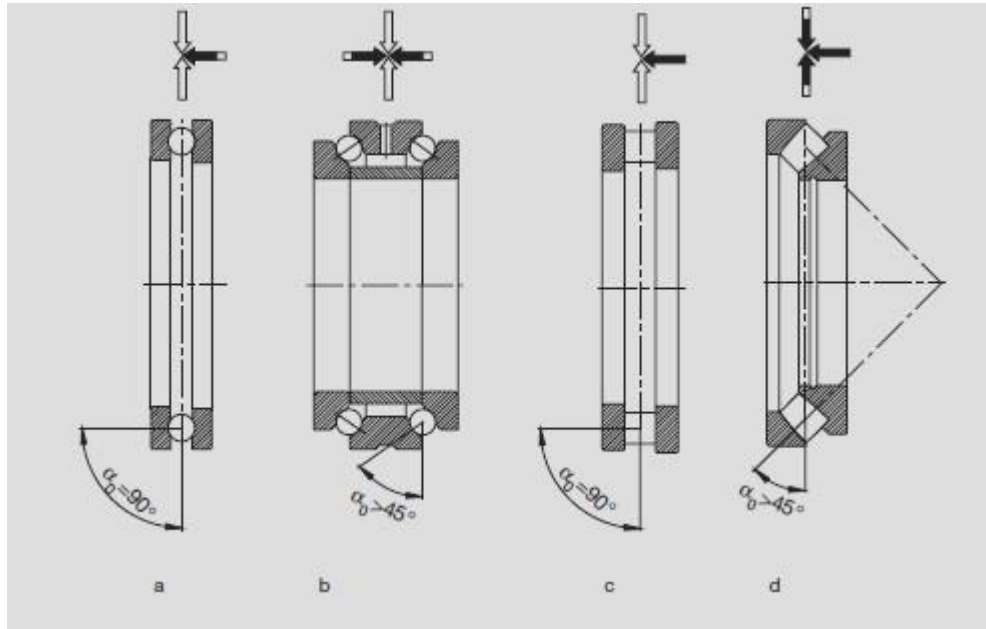
Imagen 14. Rodamientos axiales, catálogo FAG



Rodamientos radiales con un ángulo de contacto nominal \leq

45°, catálogo FAG, página 14

Imagen 15. Rodamientos axiales con ángulo > 45°. Catálogo FAG



Rodamiento para flecha.

Si tenemos en cuenta que las fuerzas se presentan en dirección axial o radial, un rodamiento de bolas es el más adecuado para este tipo de trabajo. Para esto debemos conocer la capacidad de carga dinámica y estática. De las mismas obtenidas se encuentra detallado en tabla anexa A1. [13]

$$C = \frac{f_L * P}{f_n}$$

(47)

Dónde:

C = capacidad carga dinámica.

P = carga dinámica equivalente.

FI = factor de esfuerzos dinámicos.

F_n = factor de velocidad.

El factor de esfuerzos dinámicos lo obtenemos de la tabla anexa A3, el valor es de a 3.73, El valor seleccionado tiene 26000 horas que son igual a 3 años continuos de trabajo o 6 años en turnos de 12 horas. Es considerada la cantidad de horas porque el uso de la peletizadora no va a ser continuo y con estas horas, tiene una buena vida útil.

El factor de velocidad lo obtenemos de la tabla anexa A4, se selecciona de acuerdo con la velocidad de rotación, que es de 291.6689rpm, teniendo en cuenta este valor, se procede a elegir uno que cumpla con los rpm calculados en la ecuación (20), el factor de velocidad es de 0.461.

El valor calculado para la carga dinámica equivalente es el siguiente.

$$P = (X * f_r) + (Y * f_a) \tag{48}$$

Donde

F_a = carga axial

F_r = carga radial

Los factores X y Y se eligen de la tabla anexa A5, pero antes de elegirlos se debe hacer los cálculos siguientes.

$$f_a = F_r = 5.40 \text{ kN}$$

$$f_r = F_{fr} = 0.607 \text{ kN}$$

$$P_o = 0.6 * f_a + 0.5 * f_r = 3.5435 \text{ kN}$$

El factor de esfuerzos estáticos para exigencias normales es de 1.5

Factor $f_o = 14.5$, se obtiene de la tabla anexa, para un rodamiento rígido de bolas serie 60.

$C_o = f_s * P_o = 5.3152 \text{ kN}$, esta es la capacidad de carga estática.

$$\frac{f_o * f_a}{C_o} = 14.73$$

En la tabla anexa es valor máximo es 6, por lo tanto, se calcula con ese valor los valores de X y Y en un juego normal de rodamientos

$$X = 0.56$$

$$Y = 1$$

Con los cálculos que hemos obtenido podemos resolver la ecuación 48 de la carga dinámica equivalente.

$$P = (X * f_r) + (Y * f_a) = 5.74 \text{ kN}$$

Verificamos el factor de seguridad para asegurarnos que el rodamiento estuvo bien seleccionado.

$$F_{Sf} = \frac{C_o}{P} = 1.4999 \approx 1.5$$

(49)

Dónde:

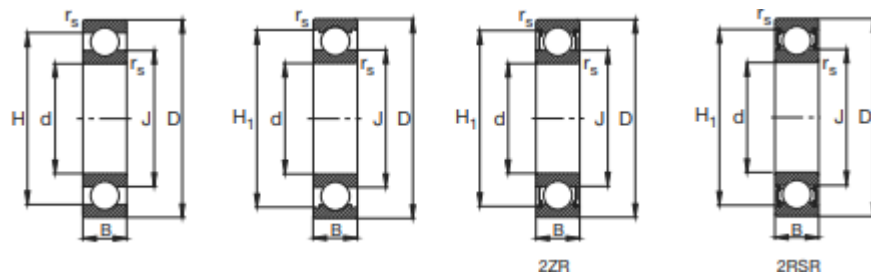
C_o = Capacidad de carga estática.

Po = Capacidad de carga estática equivalente.

Teniendo calculado lo anterior podemos dar solución a la ecuación 47, donde se obtiene la capacidad de carga dinámica.

$$C = \frac{f_l * P}{f_n} = 46.443 \text{ kN}$$

El rodamiento seleccionado para la flecha se encuentra en el catálogo FAG mencionado



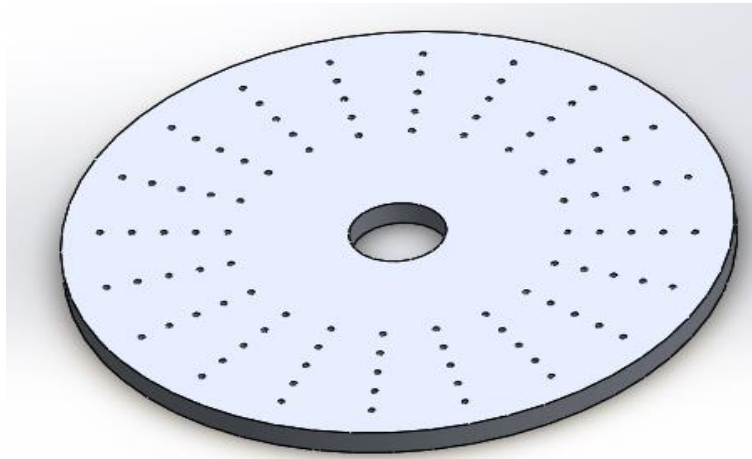
La selección del rodamiento se hace de acuerdo con los siguientes datos, donde se mira la dimensión del eje porta rodillos antes calculada y la carga dinámica calculada en la ecuación 47. El código FAG en el catálogo es 6407. [13]

Estos rodamientos aplican para los rodillos, el porta eje de los rodillos y el eje que viene desde el motor reductor.

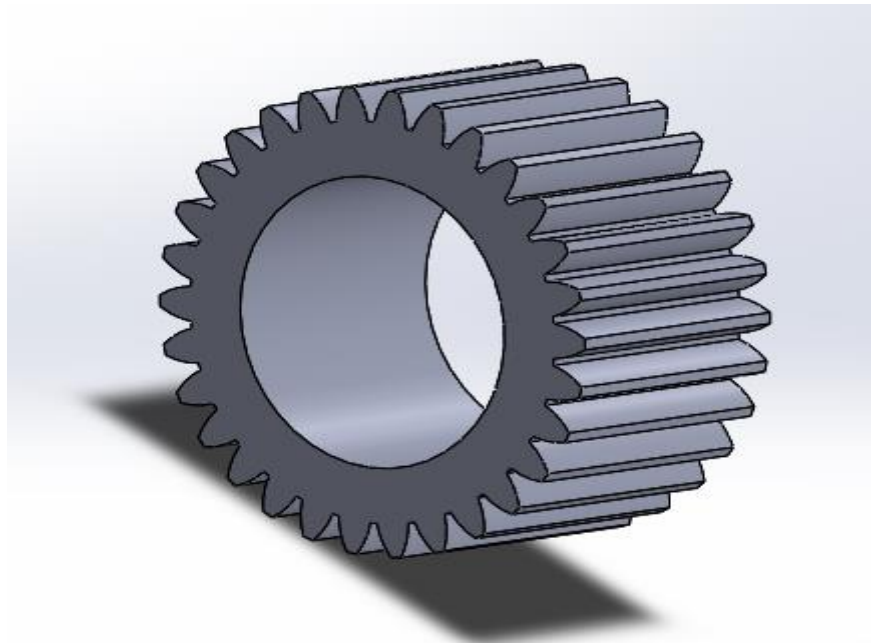
8.3 TERCER OBJETIVO ESPECÍFICO

8.3.1 diseño en Solidworks

1. Matriz.

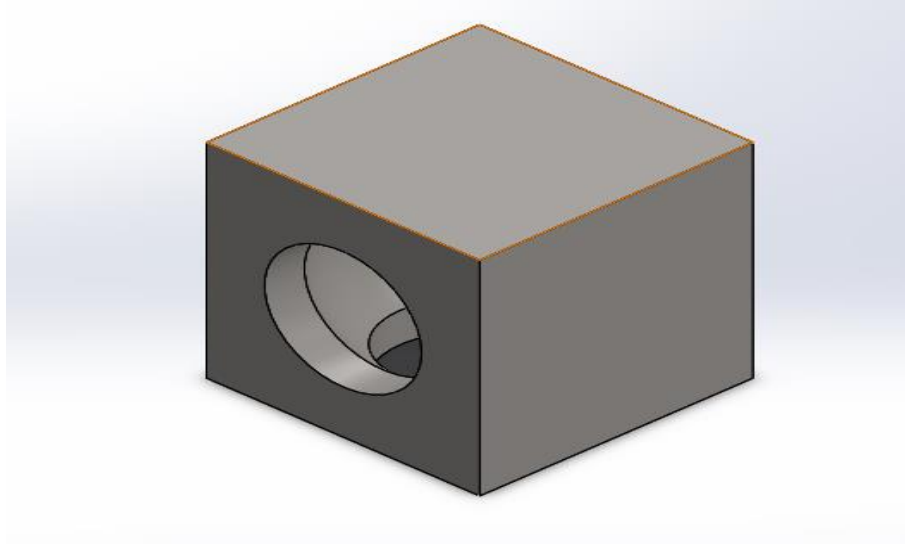


2. Rodillo.

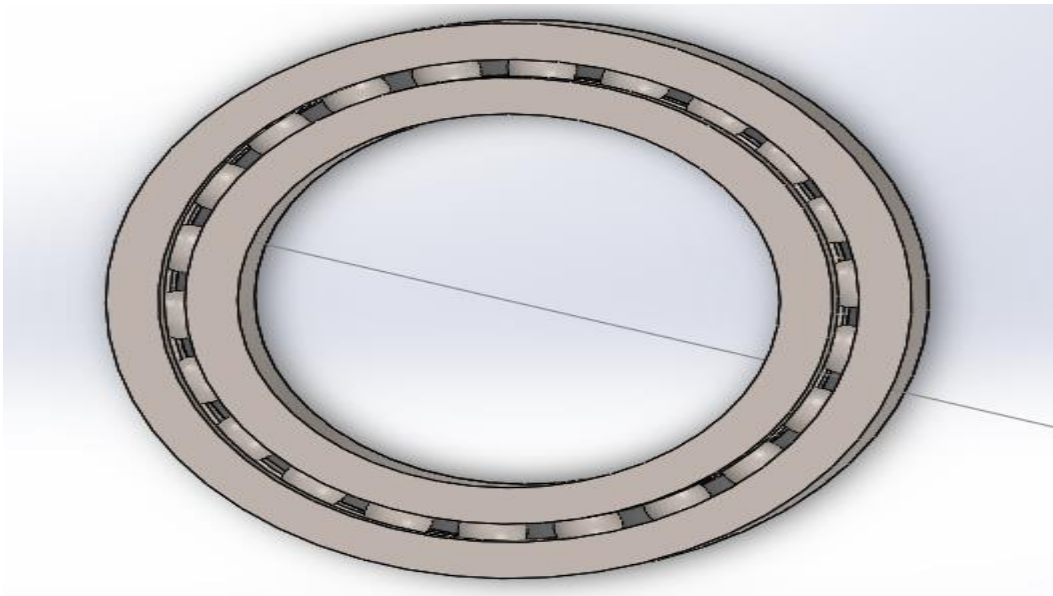


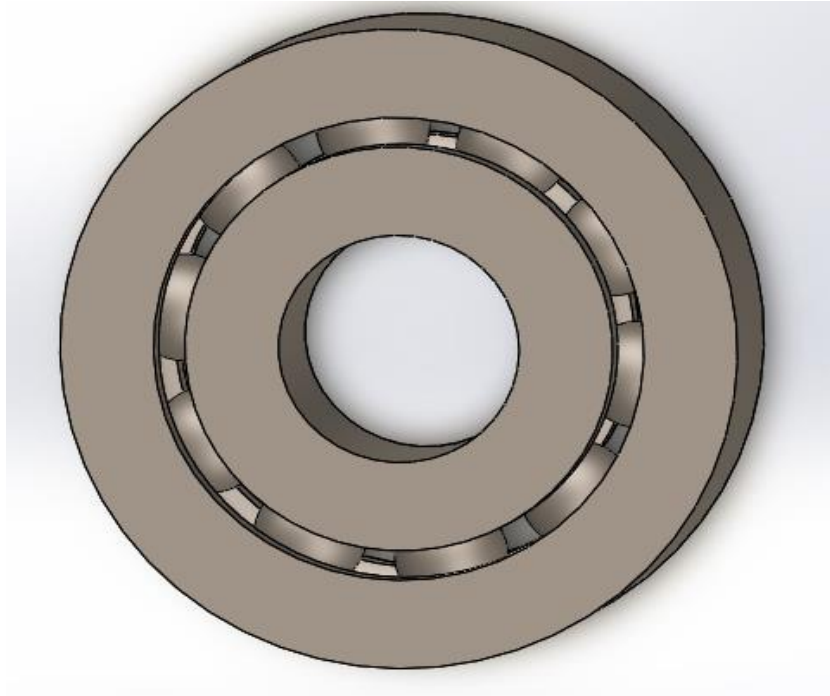
- El diámetro del rodillo es 142.02mm.

3. Caja de engranajes.



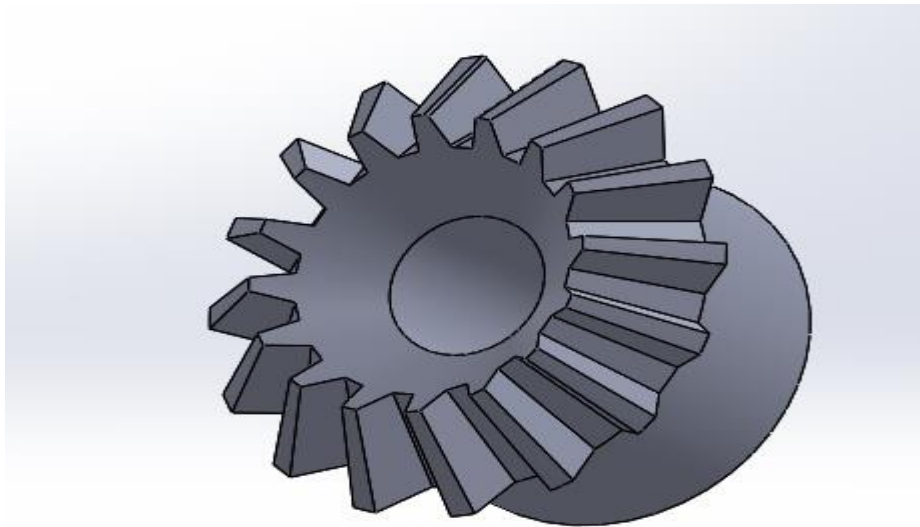
4. Rodamientos de bolas





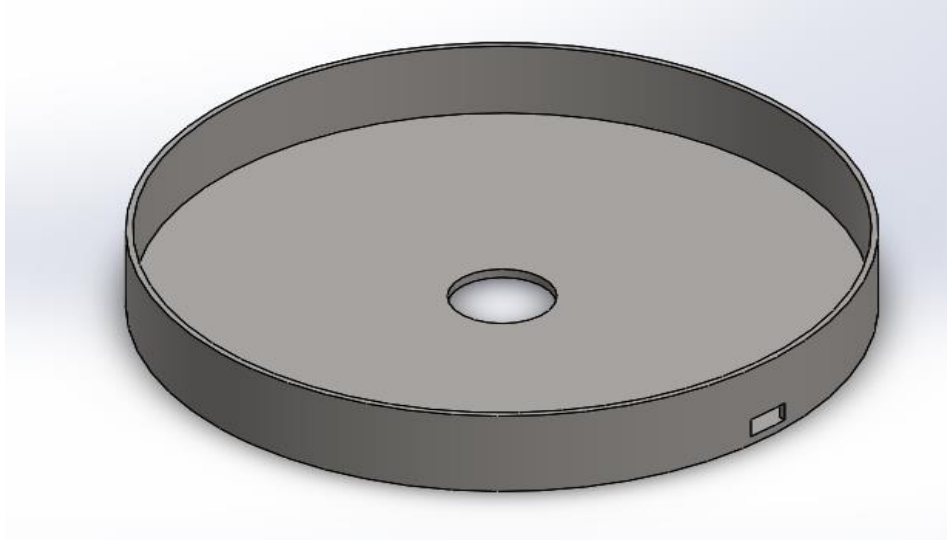
- Las medidas están especificadas en el catálogo FAG y en los cálculos previos.

5. Engranajes cónicos, medidas sacadas de catálogo



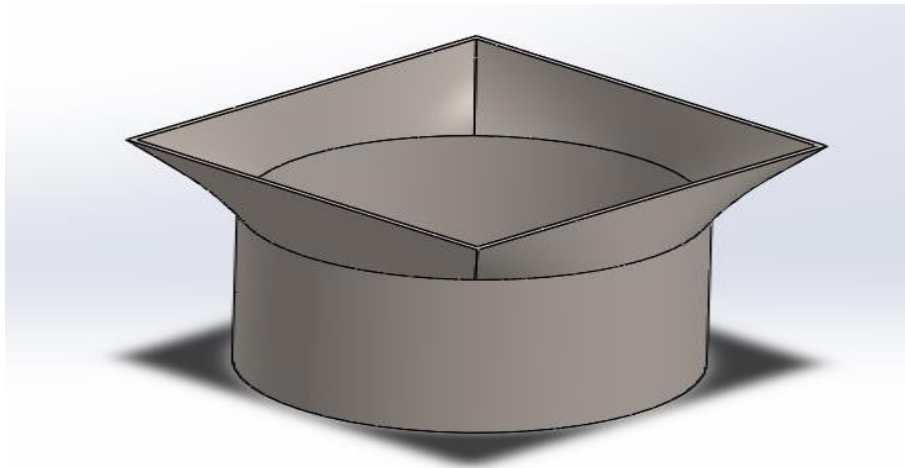
Son 2 engranajes, solo se muestra 1 debido a que tiene las medidas iguales.

6. Salida de los pellets extruidos.

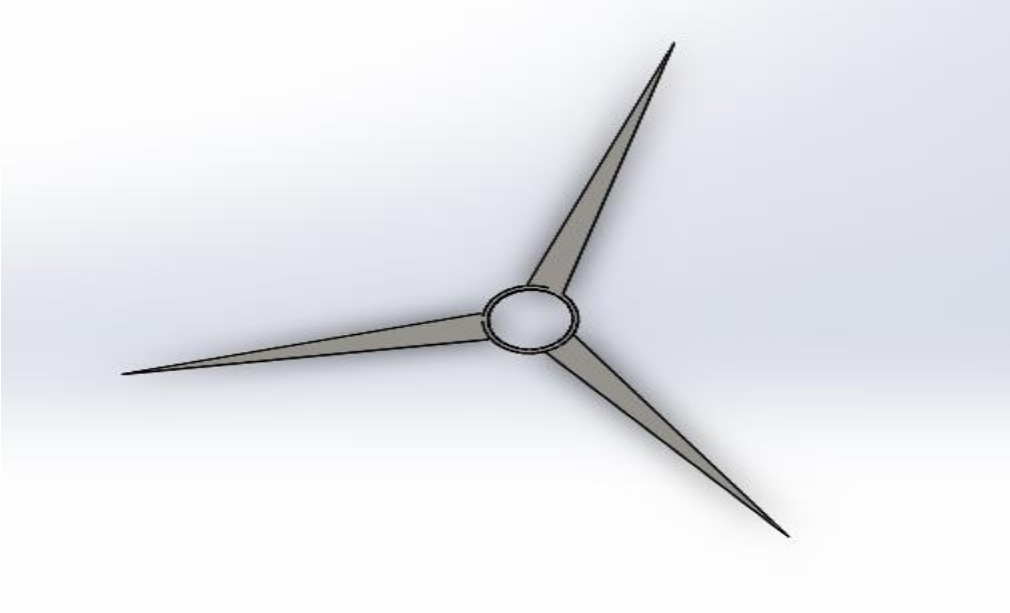


Las medidas están sujetas al diseño de los otros componentes de la máquina.

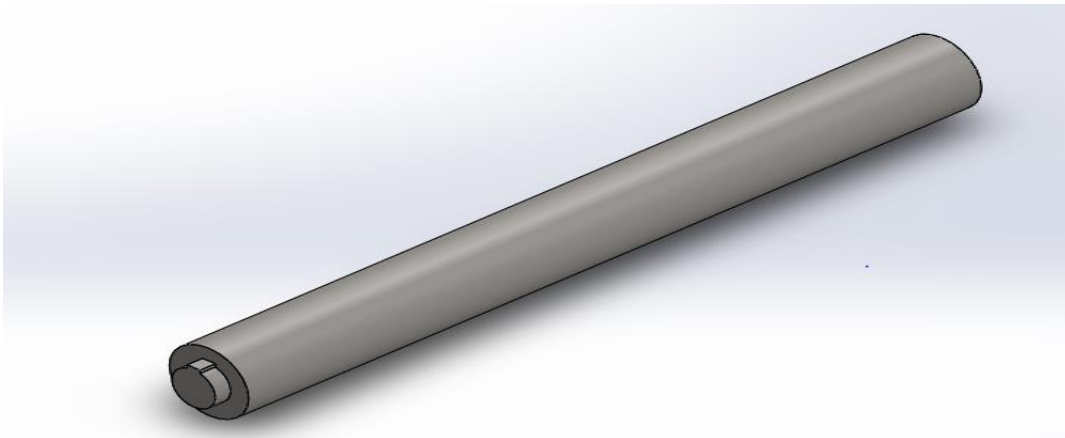
7. Tolva de alimentación de materia prima



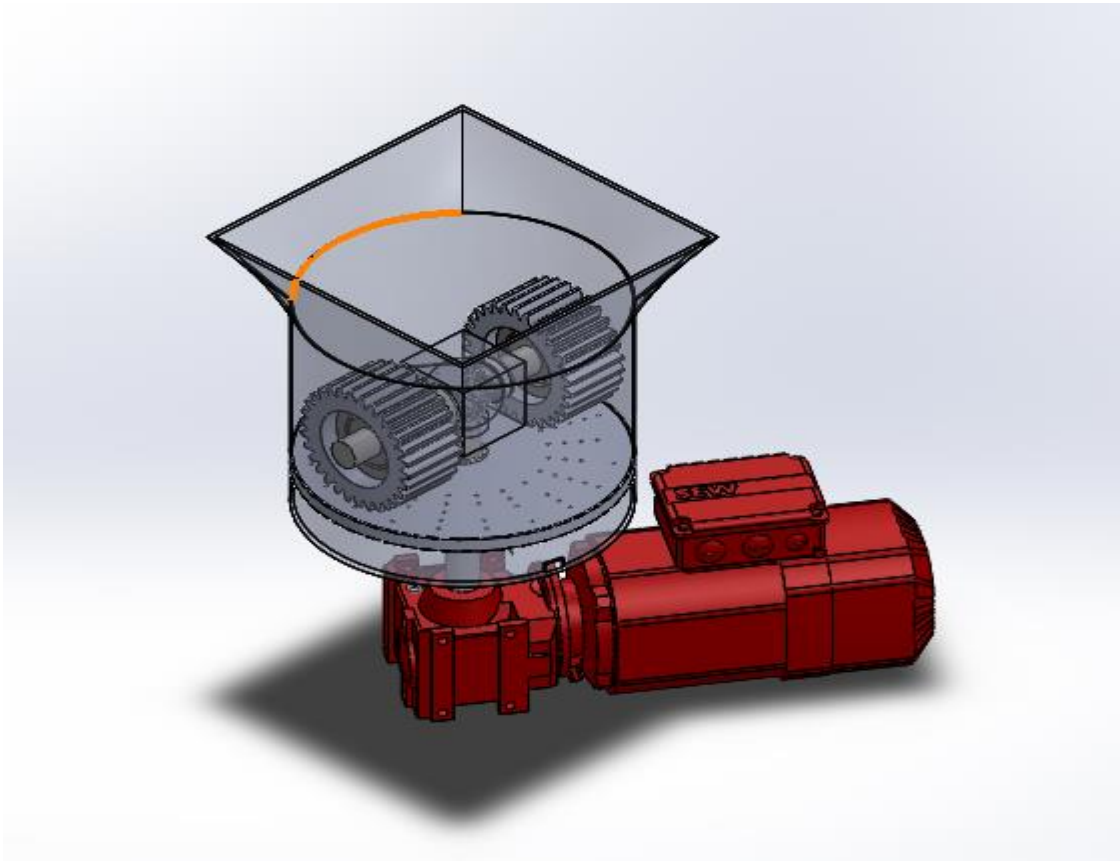
8. Cuchillas



9. Eje principal



10. Ensamble de la máquina.



- Las medidas del motor-reductor dependen del fabricante elegido, desde que cumpla con las condiciones de diseño.

9. CONCLUSIONES

1. La fabricación de pellets con la cáscara del cacao es muy viable gracias a la similitud de las características con los pellets fabricados de residuos de la industria maderera como el serrín, además de su potencial energético.
2. La construcción de la máquina es muy práctica para una producción a pequeña escala, además de cáscara de cacao, se puede realizar pellets de otro tipo de biomasa similar a la madera.
3. Las dimensiones de algunas partes de la peletizadora fueron tomadas por construcción.
4. Se opta por elegir un molino de cuchillas, este tipo de molino fue usado en la prueba 1, se elige debido a que los porcentajes de humedad se mantuvieron cercanos al 15%, ese es el porcentaje adecuado para la fabricación del pellet.
5. El valor de la densidad no se pudo encontrar en la teoría consultada, por esto se realizó la práctica de laboratorio del picnómetro debido a que al hacerla se puede obtener un valor con el cual se puede proceder para realizar los cálculos
6. Se espera que con este proyecto se pueda observar el potencial que tiene la cáscara de cacao en el campo de las energías limpias y como una biomasa residual puede llegar a ser importante en este ámbito.

10. RECOMENDACIONES

1. Conseguir la materia prima en Colombia no es complicado debido a que el país produce una gran cantidad de cacao al año y las cáscaras del cacao son consideradas como residuo.
2. La fabricación de pellets hechos de la cáscara del cacao es muy escasa para ser un material con una gran capacidad energética, por esto se debe profundizar el estudio de esta forma de energía alternativa.
3. El tipo de acero con el cual se recomienda construir la máquina peletizadora puede variar, el que se eligió cumple con las características necesarias para trabajar a altas temperaturas.

11. BIBLIOGRAFÍA

- [1] «PORRAS, Álvaro Chávez. Aprovechamiento de residuos orgánicos agrícolas y forestales en Iberoamérica. Revista Academia y Virtualidad, 2016, vol. 9, no 2, p. 6.».
- [2] «PORRAS, Álvaro Chávez. Aprovechamiento de residuos orgánicos agrícolas y forestales en Iberoamérica. Revista Academia y Virtualidad, 2016, vol. 9, no 2, p. 6.».
- [3] M. Q. L. F. M. & R. L. A. M. García, «Análisis comparativo de competitividad de las cadenas productivas de cacao de Colombia y Ecuador,» Revista de Ciencias Agrícolas, 29(1), 99-112., 2012.
- [4] «J. D. MARTÍNEZ-ÁNGEL, R. A. VILLAMIZAR-GALLARDO y O. ORTÍZ-RODRÍGUEZ, Caracterización y evaluación de la cáscara de mazorca de cacao (Theobroma cacao L.) como fuente de energía renovable, Colombia, 2015.».
- [5] «V. Bolívar y J. A. Valenzuela Macías, Estudio de las posibilidades de peletización de la cáscara del cacao y su utilización como biocombustible, Guayaquil, 2015.».
- [6] «Z. KALVATCHEV, D. J. GARZARO y F. G. CEDEZO, «Theobroma cacao L.: Un nuevo enfoque para nutrición y salud. Revista agroalimentaria.,» vol 4, no 6, p. 23-25, 1998.».
- [7] ««DIN PLUS,» 2000.».
- [8] «E. e. a. FRANCO VALDERRÁBANO, «Sustitución de un caldera de gasóleo por una caldera de biomasa en el hogar de la tercera edad de villamuriel de cerrato,» 2013.».
- [9] «R. S. DE LA TORRE OJEDA, Diseño de una peletizadora para biomasa de matriz plana de capacidad 80 kg/hr, Tesis doctoral: Universidad internacional SEK, 2015.».
- [10] «W. Q. y. C. Yanque, Diseño y construcción de un molino para la extracción de aceite de chonta (Fruto de palmeras), Quito, 2011.».
- [11] «F. BOTERO, «Diseño de un molino de bolas tipo atritor,» 2009.».
- [12] «V. A. L. Enrique, Estudio de las posibilidades de Peletización de la cáscara del cacao ecuatoriano y su uso como biocombustible, Quito, 2016.».
- [13] «www.fcyt.umss.edu.bo, Bolivia».
- [14] «W. G. QUITIAQUEZ SARSOZA, R. YANQUE y C. IGNACIO, Diseño y construcción de un molino para la extracción de aceite de chonta (fruta de palmeras), Quito: Tesis de licenciatura , 2011.».

12.

ANEXOS

A1. Catálogos motores eléctricos SIEMENS

| Potencia | Referencia del motor | Tamaño constructivo | Rated Speed | Eficiencia 100% | Factor de potencia | Corriente nominal | | | Torque nominal | Datos de arranque | | | Peso IM B3 | |
|--|----------------------|---------------------|-------------|-----------------|--------------------|-------------------|--------|--------|----------------|----------------------------|-------------------------|--------------------|------------|------|
| kW | HP | - | rpm | % | - | 220V A | 380V A | 440V A | Nm | Corriente de arranque x In | Torque de arranque x Tn | Torque Máximo x Tn | kg | |
| Datos eléctricos motores Serie 1LE0141 IE2 2 Polos 3600 rpm | | | | | | | | | | | | | | |
| 0,75 | 1 | 1LE0141-ODA26-4AA4 | 80M | 3450 | 75,5 | 0,81 | 3,2 | 1,85 | 1,6 | 2,1 | 6 | 2,2 | 3 | 14,0 |
| 1,1 | 1,5 | 1LE0141-ODA36-4AA4 | 80M | 3440 | 82,5 | 0,83 | 4,3 | 2,5 | 2,15 | 3,1 | 7 | 2,8 | 3 | 16,0 |
| 1,5 | 2 | 1LE0141-ODA86-4AA4 | 80M | 3450 | 84,0 | 0,83 | 5,6 | 3,25 | 2,8 | 4,2 | 7 | 2,8 | 3 | 18,0 |
| 2,2 | 3 | 1LE0141-OEA46-4AA4 | 90L | 3500 | 85,5 | 0,87 | 7,9 | 4,55 | 3,95 | 6,0 | 8 | 2,8 | 3 | 28 |
| 3 | 4 | 1LE0141-OEA86-4AA4 | 90L | 3505 | 87,5 | 0,87 | 10,3 | 6 | 5,1 | 8,2 | 8 | 2,8 | 3 | 28 |
| 3,7 | 5 | 1LE0141-1AA86-4AA4 | 100L | 3440 | 87,5 | 0,88 | 12,7 | 7,4 | 6,4 | 10,3 | 8 | 3 | 3,5 | 40 |
| 5,5 | 7,5 | 1LE0141-1BA86-4AA4 | 112M | 3510 | 88,5 | 0,88 | 18,8 | 10,9 | 9,4 | 15,0 | 8 | 3 | 3,5 | 45 |
| 7,5 | 10 | 1LE0141-1CA16-4AA4 | 132S | 3525 | 89,5 | 0,88 | 25 | 14,4 | 12,4 | 20,3 | 8,5 | 2,3 | 3,5 | 70 |
| 11 | 15 | 1LE0141-1CA86-4AA4 | 132S | 3535 | 90,2 | 0,88 | 37 | 21,5 | 18,5 | 29,8 | 8,5 | 2,3 | 3,5 | 75 |
| 15 | 20 | 1LE0141-1DA36-4AA4 | 160M | 3535 | 90,2 | 0,84 | 52 | 30 | 26 | 40,5 | 7,5 | 2,3 | 3,5 | 95 |
| 18,5 | 25 | 1LE0141-1DA46-4AA4 | 160L | 3530 | 91,0 | 0,86 | 63 | 36 | 31,5 | 50 | 7,5 | 2,3 | 3,5 | 115 |
| 22 | 30 | 1LE0141-1DA86-4AA4 | 160L | 3530 | 91,0 | 0,88 | 73 | 42,5 | 36,5 | 59,5 | 7,5 | 2,3 | 3,5 | 125 |
| 30 | 40 | 1LE0141-2AA46-4AA4 | 200L | 3558 | 91,7 | 0,89 | 96 | 56 | 48 | 80,5 | 8,5 | 3 | 3,5 | 260 |
| 37 | 50 | 1LE0141-2AA56-4AA4 | 200L | 3556 | 92,4 | 0,89 | 119 | 69 | 60 | 99,4 | 8,5 | 3 | 3,5 | 275 |
| 45 | 60 | 1LE0141-2BA26-4AA4 | 225M | 3570 | 93,0 | 0,88 | 143 | 83 | 72 | 120 | 8,5 | 2,6 | 3 | 325 |
| 55 | 75 | 1LE0141-2BA86-4AA4 | 225M | 3560 | 93,0 | 0,88 | 179 | 104 | 90 | 148 | 8,8 | 2,6 | 3 | 340 |
| 75 | 100 | 1LE0141-2CA86-4AA4 | 250M | 3570 | 93,6 | 0,89 | 235 | 136 | 117 | 201 | 7,5 | 2,2 | 3 | 430 |
| 90 | 125 | 1LE0141-2DA23-3AA4 | 280M | 3578 | 94,5 | 0,89 | | | 145 | 240 | 8 | 2,5 | 3 | 610 |

A2. Selección del reductor, catálogo MOTOVARIO (una opción).

| n2 [rpm] | M2 [Nm] | fs | l | Reductor | Tamaño Motor | Polos | Fr2 [N] |
|----------|---------|-----|------|----------|----------------------|-------|---------|
| 1042,4 | 164 | 2,9 | 1,41 | HR101 | 180M ⁽²⁾ | 4 | 3456 |
| 813,8 | 211 | 3,5 | 1,81 | HR121 | 180M ⁽²⁾ | 4 | 4796 |
| 796,3 | 217 | 3,3 | 1,23 | HR121 | 200LA ⁽²⁾ | 6 | 4825 |
| 735,0 | 233 | 3,3 | 2,00 | HR121 | 180M ⁽²⁾ | 4 | 4944 |
| 723,3 | 237 | 2,0 | 2,03 | HR101 | 180M ⁽²⁾ | 4 | 3828 |
| 691,8 | 250 | 3,1 | 1,42 | HR121 | 200LA ⁽²⁾ | 6 | 5031 |
| 592,7 | 289 | 2,8 | 2,48 | HR121 | 180M ⁽²⁾ | 4 | 5269 |
| 592,4 | 289 | 2,0 | 2,48 | HR101 | 180M ⁽²⁾ | 4 | 4038 |
| 542,5 | 319 | 2,4 | 1,81 | HR121 | 200LA ⁽²⁾ | 6 | 5403 |
| 497,5 | 344 | 2,4 | 2,95 | HR121 | 180M ⁽²⁾ | 4 | 5544 |
| 490,0 | 353 | 2,3 | 2,00 | HR121 | 200LA ⁽²⁾ | 6 | 5565 |
| 467,7 | 366 | 2,3 | 3,14 | HR121 | 180M ⁽²⁾ | 4 | 5643 |
| 449,2 | 382 | 1,6 | 3,27 | HR101 | 180M ⁽²⁾ | 4 | 4335 |
| 410,7 | 417 | 2,0 | 3,58 | HR121 | 180M ⁽²⁾ | 4 | 5855 |
| 397,3 | 431 | 1,4 | 3,70 | HR101 | 180M ⁽²⁾ | 4 | 4467 |
| 395,2 | 438 | 2,0 | 2,48 | HR121 | 200LA ⁽²⁾ | 6 | 5915 |
| 357,0 | 480 | 1,8 | 4,12 | HR121 | 180M ⁽²⁾ | 4 | 6000 |
| 348,2 | 492 | 1,2 | 4,22 | HR101 | 180M ⁽²⁾ | 4 | 4608 |
| 331,7 | 522 | 1,6 | 2,95 | HR121 | 200LA ⁽²⁾ | 6 | 6000 |
| 311,8 | 555 | 1,6 | 3,14 | HR121 | 200LA ⁽²⁾ | 6 | 6000 |
| 306,3 | 560 | 1,6 | 4,80 | HR121 | 180M ⁽²⁾ | 4 | 6000 |
| 301,5 | 568 | 1,1 | 4,88 | HR101 | 180M ⁽²⁾ | 4 | 4759 |
| 281,9 | 608 | 1,4 | 5,21 | HR121 | 180M ⁽²⁾ | 4 | 6000 |
| 279,3 | 607 | 3,0 | 5,26 | H102 | 180M ⁽²⁾ | 4 | 14749 |
| 279,1 | 614 | 1,0 | 5,27 | HR101 | 180M ⁽²⁾ | 4 | 4839 |
| 273,8 | 632 | 1,4 | 3,58 | HR121 | 200LA ⁽²⁾ | 6 | 6000 |
| 238,0 | 727 | 1,2 | 4,12 | HR121 | 200LA ⁽²⁾ | 6 | 6000 |
| 235,2 | 729 | 1,2 | 6,25 | HR121 | 180M ⁽²⁾ | 4 | 6000 |
| 231,3 | 733 | 2,7 | 6,36 | H102 | 180M ⁽²⁾ | 4 | 15366 |
| 208,5 | 814 | 2,8 | 7,05 | H102 | 180M ⁽²⁾ | 4 | 15695 |
| 204,2 | 848 | 1,1 | 4,80 | HR121 | 200LA ⁽²⁾ | 6 | 6000 |

A3. Factor de esfuerzos dinámicos para rodamientos de bolas.

▼ Valores f_L para rodamientos de bolas

$$f_L = \sqrt[3]{\frac{L_h}{500} \frac{1}{f_L}}$$

| L_h h | f_L | L_h h | f_L | L_h h | f_L | L_h h | f_L | L_h h | f_L |
|------------|-------|------------|-------|------------|-------|------------|-------|------------|-------|
| 100 | 0,585 | 420 | 0,944 | 1700 | 1,5 | 6500 | 2,35 | 28000 | 3,83 |
| 110 | 0,604 | 440 | 0,958 | 1800 | 1,53 | 7000 | 2,41 | 30000 | 3,91 |
| 120 | 0,621 | 460 | 0,973 | 1900 | 1,56 | 7500 | 2,47 | 32000 | 4 |
| 130 | 0,638 | 480 | 0,986 | 2000 | 1,59 | 8000 | 2,52 | 34000 | 4,08 |
| 140 | 0,654 | 500 | 1 | 2200 | 1,64 | 8500 | 2,57 | 36000 | 4,16 |
| 150 | 0,669 | 550 | 1,03 | 2400 | 1,69 | 9000 | 2,62 | 38000 | 4,24 |
| 160 | 0,684 | 600 | 1,06 | 2600 | 1,73 | 9500 | 2,67 | 40000 | 4,31 |
| 170 | 0,698 | 650 | 1,09 | 2800 | 1,78 | 10000 | 2,71 | 42000 | 4,38 |
| 180 | 0,711 | 700 | 1,12 | 3000 | 1,82 | 11000 | 2,8 | 44000 | 4,45 |
| 190 | 0,724 | 750 | 1,14 | 3200 | 1,86 | 12000 | 2,88 | 46000 | 4,51 |
| 200 | 0,737 | 800 | 1,17 | 3400 | 1,89 | 13000 | 2,96 | 48000 | 4,58 |
| 220 | 0,761 | 850 | 1,19 | 3600 | 1,93 | 14000 | 3,04 | 50000 | 4,64 |
| 240 | 0,783 | 900 | 1,22 | 3800 | 1,97 | 15000 | 3,11 | 55000 | 4,79 |
| 260 | 0,804 | 950 | 1,24 | 4000 | 2 | 16000 | 3,17 | 60000 | 4,93 |
| 280 | 0,824 | 1000 | 1,26 | 4200 | 2,03 | 17000 | 3,24 | 65000 | 5,07 |
| 300 | 0,843 | 1100 | 1,3 | 4400 | 2,06 | 18000 | 3,3 | 70000 | 5,19 |
| 320 | 0,862 | 1200 | 1,34 | 4600 | 2,1 | 19000 | 3,36 | 75000 | 5,31 |
| 340 | 0,879 | 1300 | 1,38 | 4800 | 2,13 | 20000 | 3,42 | 80000 | 5,43 |
| 360 | 0,896 | 1400 | 1,41 | 5000 | 2,15 | 22000 | 3,53 | 85000 | 5,54 |
| 380 | 0,913 | 1500 | 1,44 | 5500 | 2,22 | 24000 | 3,63 | 90000 | 5,65 |
| 400 | 0,928 | 1600 | 1,47 | 6000 | 2,29 | 26000 | 3,73 | 100000 | 5,85 |

A4. Factor de velocidad para rodamientos de bolas.

▼ Valores f_n para rodamientos de bolas

$$f_n = \sqrt[3]{\frac{33 \frac{\%}{n}}{n}}$$

| n min ⁻¹ | f_n | n min ⁻¹ | f_n | n min ⁻¹ | f_n | n min ⁻¹ | f_n | n min ⁻¹ | f_n |
|------------------------|-------|------------------------|-------|------------------------|-------|------------------------|-------|------------------------|--------|
| 10 | 1,49 | 55 | 0,846 | 340 | 0,461 | 1800 | 0,265 | 9500 | 0,152 |
| 11 | 1,45 | 60 | 0,822 | 360 | 0,452 | 1900 | 0,26 | 10000 | 0,149 |
| 12 | 1,41 | 65 | 0,8 | 380 | 0,444 | 2000 | 0,255 | 11000 | 0,145 |
| 13 | 1,37 | 70 | 0,781 | 400 | 0,437 | 2200 | 0,247 | 12000 | 0,141 |
| 14 | 1,34 | 75 | 0,763 | 420 | 0,43 | 2400 | 0,24 | 13000 | 0,137 |
| 15 | 1,3 | 80 | 0,747 | 440 | 0,423 | 2600 | 0,234 | 14000 | 0,134 |
| 16 | 1,28 | 85 | 0,732 | 460 | 0,417 | 2800 | 0,228 | 15000 | 0,131 |
| 17 | 1,25 | 90 | 0,718 | 480 | 0,411 | 3000 | 0,223 | 16000 | 0,128 |
| 18 | 1,23 | 95 | 0,705 | 500 | 0,405 | 3200 | 0,218 | 17000 | 0,125 |
| 19 | 1,21 | 100 | 0,693 | 550 | 0,393 | 3400 | 0,214 | 18000 | 0,123 |
| 20 | 1,19 | 110 | 0,672 | 600 | 0,382 | 3600 | 0,21 | 19000 | 0,121 |
| 22 | 1,15 | 120 | 0,652 | 650 | 0,372 | 3800 | 0,206 | 20000 | 0,119 |
| 24 | 1,12 | 130 | 0,635 | 700 | 0,362 | 4000 | 0,203 | 22000 | 0,115 |
| 26 | 1,09 | 140 | 0,62 | 750 | 0,354 | 4200 | 0,199 | 24000 | 0,112 |
| 28 | 1,06 | 150 | 0,606 | 800 | 0,347 | 4400 | 0,196 | 26000 | 0,109 |
| 30 | 1,04 | 160 | 0,593 | 850 | 0,34 | 4600 | 0,194 | 28000 | 0,106 |
| 32 | 1,01 | 170 | 0,581 | 900 | 0,333 | 4800 | 0,191 | 30000 | 0,104 |
| 34 | 0,993 | 180 | 0,57 | 950 | 0,327 | 5000 | 0,188 | 32000 | 0,101 |
| 36 | 0,975 | 190 | 0,56 | 1000 | 0,322 | 5500 | 0,182 | 34000 | 0,0993 |
| 38 | 0,957 | 200 | 0,55 | 1100 | 0,312 | 6000 | 0,177 | 36000 | 0,0975 |
| 40 | 0,941 | 220 | 0,533 | 1200 | 0,303 | 6500 | 0,172 | 38000 | 0,0957 |
| 42 | 0,926 | 240 | 0,518 | 1300 | 0,295 | 7000 | 0,168 | 40000 | 0,0941 |
| 44 | 0,912 | 260 | 0,504 | 1400 | 0,288 | 7500 | 0,164 | 42000 | 0,0926 |
| 46 | 0,898 | 280 | 0,492 | 1500 | 0,281 | 8000 | 0,161 | 44000 | 0,0912 |
| 48 | 0,886 | 300 | 0,481 | 1600 | 0,275 | 8500 | 0,158 | 46000 | 0,0898 |
| 50 | 0,874 | 320 | 0,471 | 1700 | 0,27 | 9000 | 0,155 | 50000 | 0,0874 |

A5. Propiedades de algunos materiales

| Material | Módulo de Young E [GPa] | Tensión de Fluencia σ_F [Mpa] | Módulo de Corte G [Gpa] | Módulo de Volumen K [Gpa] | $\alpha \times 10^6$ Coef. Exp. [1/°C] | μ Coef. Poiss. |
|-----------------------|------------------------------|---|------------------------------|-----------------------------|--|-----------------------|
| Hierro Colado | 100 | | 40 | 90 | | |
| Hierro | 150-170 | 180 | 60 | 120 | 11.7 | |
| Acero Inox. | 195 | 550 | | | 17.3 | 0.24 0.28 |
| Acero | 200 | | 80 | 140 | | 0.25 0.30 |
| Latón | 100 | | 35 | 80 | | 0.32 0.42 |
| Aluminio | 70 | | 25 | 70 | 21.0 | 0.32 0.36 |
| Cobre | 110-120 | 300 | 38 | 120 | 16.5 | 0.33 |
| Níquel | 204 | 460 | | | 13.3 | |
| Bronce | 90 | | | | | |
| Plata | 82.7 | | | | | 0.37 |
| Concreto | 20 (compresión) | 5- 35 (compresión) | | | 11.7 | 0.1 0.15 |
| Vidrio | 48-78 | | | | | 0.2 0.3 |
| Mármol | 50 | | | 70 | | 0.10 0.15 |
| Granito | 52 | 5-145 (tracc-comp) | | | | |
| Madera, pino | 1 a 10 | 40 – 80 | | | | |
| Madera, roble | 11 | 117-59 (tracc-comp) | | | | |
| Nylon | 5 | 40-100 | | | | 0.35 |
| Hueso de extremidades | 15 | 160-170 (tracc-comp) | | | | |