

REPÚBLICA DE CUBA
MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR
UNIVERSIDAD DE CIENFUEGOS "CARLOS RAFAEL RODRIGUEZ"
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA



TRABAJO DE DIPLOMA

DISEÑO DE BRIQUETeadora HIDRÁULICA PARA PRODUCIR BRIQUETAS MULTITUBULARES DE BIOMASAS

Autor: Anil Terence James

Tutores: Dr. Pedro Beltrán Fundora

Ing. Andrés Sendon Medina

Año 52 de la Revolución
Cienfuegos, 2010.

PENSAMIENTO

Una mente estirada por una nueva idea nunca regresará a sus dimensiones anteriores.

William Schultz

DEDICATORIA

A Amilsa Sarah y a la memoria de Balwant.

AGRADECIMIENTOS

Primeramente, quiero dar gracias al Creador por sostenerme y traerme hasta este punto de la carrera. También, a mis padres y a la familia inmediata por sus varias formas de contribuciones durante los 6 años de estudio.

Mis agradecimientos al gobierno y al pueblo cubano por abrir sus puertas a todos los estudiantes extranjeros. Gracias a los profesores y trabajadores de la Universidad, especialmente mi tutor Dr. P.B.Fundora- sus enseñanzas duraran para toda una vida.

Quiero reconocer las contribuciones de mis compañeros y amigos académicos y seculares que he encontrado durante los años en este país. A todas las personas de las diferentes naciones y culturas que han tenido un impacto en mi vida- a ellos estoy obligado a decir gracias. La lista es inmensa, sin embargo quisiera nombrarles por sus naciones respectivas: Angola, Antigua, Bahamas, Bolivia, Bután, Burkina Faso, Cambodia, Djibouti, Dominica, Ghana, Guatemala, Guinea Bissau, Haití, Honduras, Jamaica, Laos, Mali, Namibia, Palestina, Panamá, República Dominicana Santa Lucia, Senegal, Morueco, Mongolia, Nicaragua, San Vicente, Senegal, Seychelles, Siria, Sri Lanka, Trinidad y Tobago, Uganda, Vietnam, Venezuela y Zimbabue. Entre ellos hay que señalar mis compañeros de aula especialmente Mandel y Cecilia, también mis hermanos de Guyana con quienes después el curso de preparatoria siguieron en la misma escuela conmigo; Martin, Rohit y Samantha.

Finalmente, debo expresar mi gratitud a mi novia Mileisys y su familia por su constante cuidado y preocupación por mi bien. Gracias también a mi hija Sarah, durante los últimos días ha sido una inspiración para terminar este trabajo y luchar para lograr retos más grandes en la vida.

RESUMEN

La frase “densificación de la biomasa” significa la transformación física de residuos vegetales en un combustible sólido sin adición de aglomerantes. Los productos densificados reciben diferentes denominaciones según su forma y dimensiones físicas. Las maquinas que hagan el trabajo son llamados briqueteadoras. El proceso final presenta numerosas ventajas técnicas y socio-económicas.

Los análisis de las diferentes tecnologías de densificación y sus ventajas, costos, gastos energéticos, posibilidades de densificar biomasa y los antecedentes en el diseño, nos preparan para desarrollar otra tecnología - las máquinas briqueteadoras hidráulicas multitubulares.

Esta tecnología utiliza la presión de un sistema hidráulico para crear la fuerza de compresión. El gasto de la energía depende de la presión y el flujo del sistema hidráulico. Las máquinas permiten garantizar más estabilidad de la briqueta producida, y resuelve los problemas de las máquinas predecesores. Como es de suponer la profundización de este estudio de esta nueva innovación puede dar la respuesta definitiva a las máquinas de densificación.

PALABRAS CLAVES DEL AUTOR

Briquetas

Briqueteadora

Hidráulica

Máquina

Multitubular

ABSTRACT

The phrase “biomass densification” can be interpreted as the physical transformation of vegetable residues into a solid combustible without the use of agglomerants. The densified products are defined with respect to their geometric shape and their physical characteristics, and the machines which perform the compression operation are called briqueteadoras. The overall process has proven its effectiveness with its outstanding technical, social and economical advantages.

An analysis of the different technologies of densification and their economic values, cost, energy used, ability to compress biomass, and the structure of their design, had sprouted the necessity to develop a new technology- the multiple orifices briquettes hydraulic machine.

This new technology uses the pressure generated by two hydraulic cylinders in parallel to create the compressive force. Its energetic values are directly dependent on the pressure used and the hydraulic flow. This machine allows stability in production of briquettes, and resolves the common problems encountered in its predecessors. The outcome of this scientific investigation has shown favourable results and the machine can be considered as the definitive prototype of all former designs.

KEY WORDS OF THE AUTHOR

Briquette

Briquette machine

Hydraulics

Machine

Multiple orifices

TABLA DE CONTENIDOS

Pág.

INTRODUCCIÓN	1
CAPITULO 1: EL PROCESO DE DENSIFICACIÓN DE LAS BIOMASAS, ESTADO ACTUAL Y PERSPECTIVOS	4
1.1 LA ENERGÍA	4
1.1.1 Fuentes de energía no renovable.....	4
1.1.2 Fuentes de energía renovable.....	4
1.1.3 Propiedades de la energía renovable.....	5
1.2 LA BIOMASA	5
1.2.1 Tipos de residuos biomasicos susceptibles de ser briquetas	7
1.2.2 Formas de extraer la energía de la biomasa	7
1.2.3 Aplicaciones de la biomasa	8
1.2.4 La biomasa y el medio ambiente	8
1.2.5 Pronostico del uso de la biomasa.....	8
1.3 LA BRIQUETA	8
1.3.1 Técnicas:.....	9
1.3.2 Socio-económicas:.....	9
1.3.3 Uso de las briquetas	10
1.3.4 La densificación de la biomasa para producir briqueta	11
1.4 TECNOLOGIA DE DENSIFICACION MÁS USADO EN EL MUNDO Y SUS POTENCIALES DE PRODUCCION	15
1.4.1 Algunos países que emplean el uso de maquinas briqueteadoras.....	15
1.4.2 Característica de la tecnología de densificación más utilizados	16
1.4.3 Análisis comparativo de las diferentes tecnologías de densificación	17
1.4.4 Maquinas briqueteadoras en Cuba	19
1.5 TEORÍA DEL DISEÑO	21
1.5.1 Criterios del diseño	21
1.5.2 Defensa del diseño de una briqueteadora multitubular.....	22
1.5.3 Generalidades sobre el diseño de maquinas	22
1.5.4 Cálculo de las piezas de las maquinas durante el diseño.....	23
CAPITULO 2: METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO DE LAS BRIQUETeadoras HIDRÁULICAS PARA PRODUCIR BRIQUETAS MULTITUBULARES DE BIOMASAS.....	25
2.1 INTRODUCCIÓN	25

2.2 ESTUDIO DE LOS FACTORES VINCULADOS AL ASEGURAMIENTO DE LA CAPACIDAD DE PRODUCCIÓN Y CALIDAD DE LAS BRIQUETAS EN EL DISEÑO DE UNA BRIQUETEADORA HIDRÁULICA	26
2.2.1 Análisis del proceso de densificación.....	28
2.3 CARACTERÍSTICA DE LA BIOMASA EN EL PROCESO DE DENSIFICACIÓN.....	29
2.4 METODOLOGÍA PARA LA INVESTIGACIÓN	29
2.4.1 Experimento para determinar la humedad de las biomosas	30
2.4.2 Técnica operatoria para determinar la humedad de la biomasa.....	30
2.4.3 Experimento para determinar la densidad natural de las biomosas	31
2.4.4 Técnica operatoria para determinar la densidad natural de las biomosas (paja de caña) ..	31
2.4.5 Experimento para determinar el comportamiento de la densidad en un	33
2.4.6 Descripción del experimento	34
2.4.7 Máquinas y dispositivos utilizados.....	34
2.5 ALGORITMO PARA LAS DIMENSIONES GEOMÉTRICAS DE LA CÁMARA DE ALIMENTACIÓN, NÚMERO DE CICLOS, NÚMERO DE ÉTAPAS REQUERIDO, SEGÚN LA CAPACIDAD DE PRODUCCIÓN	36
2.5.1 Determinación de la masa potencial barrida en briqueteadoras hidráulicas.....	37
2.5.2 Briqueteadoras hidráulicas de una etapa densificación (fig. 2.6).....	37
Fig. 2.1	37
2.5.3 Briqueteadora hidráulica de dos etapas densificación (fig. 2.7).....	38
2.6 CAPACIDAD DE PRODUCCIÓN (CT) REAL DE BRIQUETEADORAS HIDRÁULICAS.....	41
2.6.1 Capacidad de producción en briqueteadora hidráulica de una etapa de densificación.....	41
2.6.2 Capacidad de producción en briqueteadora hidráulica de dos etapas de densificación.....	41
2.6.3 Capacidad de producción en briqueteadora hidráulica de tres etapas de densificación	41
2.6.4 Simulación experimental.....	42
2.7 CALCULO ENERGÉTICO FUNDAMENTALES PARA LA SELECCIÓN DE LOS COMPONENTES DEL SISTEMA HIDRÁULICO A PARTIR DE LOS MAGNITUDES DESEADAS.....	43
2.7.1 Calculo teórico del trabajo en los distintos procesos en la formación de la briqueta (WE)	44
2.7.2 Calculo del flujo (Qc) necesario en los cilíndricos hidráulicos	46
2.7.3 Selección de la bomba hidráulica	46
2.7.4 Selección del motor.....	47
2.7.5 Las magnitudes geométricas de las briquetas multitubulares.....	47
2.8 CÁLCULO TEÓRICO DE LA RESISTENCIA MECÁNICA DE LOS COMPONENTES FUNDAMENTALES DE LA BRIQUETEADORA	50
2.8.1 Teoría del cálculo de la resistencia mecánica de los soportes de los cilindros hidráulicos de la última etapa de densificación	50
2.8.2 Teoría del cálculo del espesor (δ_{tubo}) del tubo de compactación	53

2.9 ELECCIÓN DE LOS COMPONENTES DEL SISTEMA HIDRÁULICO. SEGÚN TIPO Y CALIDAD DE BRIQUETAS Y CAPACIDAD DE PRODUCCIÓN DE LA MAQUINA.....	54
2.9.1 Calculo del mecanismo de accionamiento.....	54
2.9.2 Calculo de los mecanismos de accionamiento con cilindros y pistones	55
2.10 METODOLOGÍA DEL CÁLCULO DEL DIMENSIONAMIENTO GEOMÉTRICO DE LA BRIQUETEADORA	56
2.10.1 Magnitudes geométricas de la briquea multitubular	57
2.10.2 Calculo del número de conductos en el segundo nivel de ubicación	57
2.10.3 Calculo de la masa de la briquea	59
2.10.4 Capacidad de producción deseada (<i>CT</i>)	59
Capacidad de producción para dos etapas de densificación	59
2.10.5 Determinación de la fuerza mínima aplicada (<i>Fcilmin</i>) a la briquea por el embolo	59
2.10.6 Determinación de la fuerza máxima (<i>Fmax</i>) aplicada a la briquea por el embolo.....	60
2.10.7 Número de ciclos (<i>Nc</i>) por minuto de trabajo de la maquina.....	60
2.10.8 Tiempo de un ciclo (<i>T</i>)	60
2.10.9 Densidad teórica final de la briquea	61
2.10.10 Diámetro necesaria de los cilindros hidráulicos (<i>Dcil</i>)	61
2.10.11 Determinación del tiempo del ciclo de la última etapa de densificación	62
2.10.12 Determinación del tiempo de la carera de trabajo de la última etapa.....	62
2.10.13 Cálculo del flujo necesario en los cilíndricos hidráulicos	62
2.10.14 Calculo del desplazamiento geométrico de la bomba en <i>cm3</i>	63
2.10.15 Potencia máxima necesaria de la bomba.....	63
2.10.16 Selección del motor.....	63
2.10.17 Selección de la bomba hidráulica.....	64
2.10.18 Análisis de la etapa de compactación	64
2.10.19 Calculo de la fuerza de fricción (<i>Ff</i>) mínima desarrollada por la briquea en el conducto	71
2.10.20 Calculo del espesor mínimo del tubo de compactación	72
2.10.21 Calculo de parámetros geométricos de la maquina	72
CAPITULO 3: CÁLCULO DE LA RESISTENCIA MECÁNICA DE CONJUNTOS FUNDAMENTALES DE LA MÁQUINA BRIQUETEADORA.....	75
3.1 INTRODUCCIÓN	75
3.2 CALCULO DE LA RESISTENCIA MECÁNICA DEL BASTIDOR.....	76
3.3 CALCULO DE LA RESISTENCIA MECÁNICA DEL SOPORTE PRINCIPAL	79
3.4 CALCULO DE LA RESISTENCIA MECÁNICA DEL TUBO DE COMPACTACIÓN.....	81
3.5 CALCULO DEL PASADOR	82

CAPITULO 4: PREDETERMINACIÓN DEL COSTO DE FABRICACIÓN DE LA MAQUINA BRIQUETEADORA HIDRÁULICA	85
4.1 GENERALIDADES DEL COSTO.....	85
4.2 CALCULO DE LAS MATERIAS PRIMAS Y LOS DISPOSITIVOS.....	86
4.3 COSTOS DE MATERIALES AUXILIARES UTILIZADOS	87
4.4 LOS GASTOS RELACIONADOS CON EL TRABAJO HUMANO.....	88
4.4 GASTO GENERADO POR LA AMORTIZACIÓN DE LOS EQUIPOS.....	89
4.5 COSTO POR EL CONSUMO DE ENERGÍA ELÉCTRICA.....	90
4.6 Costo total de la fabricación.....	91
4.7 Análisis de los resultados	91
CONCLUSIONES	93
RECOMENDACIONES	94
BIBLIOGRAFIA	
ANEXOS	

INTRODUCCIÓN

Durante la XIII Reunión del Foro de Ministros de Medio Ambiente de América Latina y el Caribe, celebrada en octubre de 2001, los participantes manifestaron la “necesidad de diversificar los suministros de energía y de promover la eficiencia energética, evaluando el potencial de las fuentes tradicionales de energía e incrementando la participación de las fuentes renovables, con la expectativa de que las instituciones financieras brinden un mayor apoyo, acorde con las necesidades de cada país”; Los países de América Latina y el Caribe se comprometieron a alcanzar la meta de 10% de las fuentes de energía renovable en el total de su mezcla de suministros para el año 2010. A fin de lograr este objetivo, cada país debe evaluar sus perspectivas reales de alcanzar la meta y definir, si es el caso, sus necesidades prioritarias y el apoyo externo que necesita.

Una de las más importantes fuentes de energía es la biomasa, la cual refiere a todos los materiales orgánicos. Se constituye aproximadamente 14% de energía total consumo en el mundo. Según la información divulgada en el mundo de hoy, es aceptable que el abastecimiento del petróleo y sus derivados, aumenta en sus precios, el calentamiento global incluyendo otros problemas ambientales son temas críticos. Por lo tanto, la energía de la biomasa sigue llamando la atención como una fuente de energía útil y limpia, porque con su uso se puede lograr a una reducción depreciable de dióxido de carbono en la atmosfera. Es decir, el dióxido de carbono que se cede durante el proceso de combustión esta compensado por el consumo de dióxido de carbono utilizado en el proceso de fotosíntesis.

Entre los diversos tipos de biomasa, el residuo de la agricultura ha sido una de las mejores elecciones. Sus costos son nulos o muy bajos y su disponibilidad es abundante. Sin embargo en la mayoría de los caso ellos no son aplicables como combustible por razón de su localización y su baja densidad. Estas características no son favorables para la biomasa porque dificultar su manejo, almacenaje, transporte y uso como alternativo energético. Una de las soluciones más adecuada a estos problemas es la densificación de la biomasa. Una gran cantidad de estudios fueron realizados en el campo de la densificación. Ejemplos de estos papeles son paja de cana, paja de trigo, cascara de avellana, desechos de olivino, las hojas del plátano y también la cascara y la paja del arroz.

Briquetas producidas bajo condiciones distintas tienen características variables. A parte de estas características son afectadas por las propiedades químicas-físicas de la materia prima. La densidad de las briquetas es una de las más importantes propiedades para una buena combustión, transportación y almacenamiento.

Durante muchos años la Universidad de Cienfuegos ha realizado estudios y experimentos de densificación con presión y diseño de briqueteadoras. Algunas de estas maquinas fueron construidas. Los estudios teóricos podrían ser vistos en algunos de los títulos de grado.

Sin embargo los estudios de combustión demostraron dificultades en las briquetas macizas. Para eliminar este problema el investigador realizó experimentos en las briquetas tubulares y multitubulares. Los resultados fueron satisfactoria y ello fue el estímulo fundamental para el diseño de una maquina briqueteadora hidráulica para producirlas. El siguiente trabajo está dirigido al diseño de una briqueteadora hidráulica para producir briquetas multitubulares de biomasas.

TITULO

Diseño de briqueteadora hidráulica para producir briquetas multitubulares de biomasas.

SITUACIÓN PROBLEMÁTICA

El favorable comportamiento en la combustión de las briquetas multitubulares de biomasas, así como la dificultad tecnológica y los problemas de resistencia mecánica de las briquetas tubulares de relaciones de diámetros ($\frac{d}{D} > 0,5$) y grandes dimensiones ($D > 200mm$) conduce a la alternativa de producir briquetas multitubulares de relaciones ($\frac{d}{D}$) equivalentes.

Sin embargo la literatura consultada y los sitios de web revisado en internet, así como registros de patentes analizados, no se presenta visible al menos, una tecnología de densificación hidráulica que asegure la producción de briquetas multitubulares de biomasa o combustible sólido.

HIPOTESIS

Con el diseño de una briqueteadora hidráulica para producir briquetas multitubulares de biomasas se aseguran la producción de esta nueva briqueta y con uso racional y eficiente de las biomasas como alternativa energética.

OBJETIVOS GENERALES

1. Establecer una metodología general para el diseño geométrico de briqueteadoras hidráulicas multitubulares.
2. Utilizar la metodología establecida para diseñar una briqueteadora hidráulica multitubular haciendo uso de las programas Autocad Inventor Profesional y Ansys.

OBJETIVOS ESPECIFICOS

1. Revisar y analizar la bibliografía disponible.
2. Producir un diseño geométrico flexible de la briqueteadora hidráulica para engendrar briquetas multitubulares sobre la base de los dimensiones de la briqueta y de la capacidad de producción de la misma.
3. Calcular la resistencia mecánica de las partes fundamentales de la máquina para un caso dado.

4. Seleccionar los componentes principales del sistema hidráulico en función de las necesidades de las briquetas a producir y de la capacidad de la capacidad de producción elegida.
5. Valorar económicamente la alternativa elegida.
6. Realizar planos de unidades ensambladas y los planos de piezas que los forman.

CAPITULO 1: EL PROCESO DE DENSIFICACIÓN DE LAS BIOMASAS, ESTADO ACTUAL Y PERSPECTIVOS

En este capítulo se analizan el estado de arte, el origen y utilidad de las biomasas para la producción de briquetas y las maquinas involucrado en el proceso. Énfasis fue dado al tema de la energía renovable y no-renovable, la biomasa, las briquetas y las maquinas briqueteadoras; en expectación de desarrollar la idea de la importancia de una maquina que funciona con el dicho recurso (biomasa) para producir un combustible sólido. Se considera los datos de varias fuentes de información, que incluye libros de textos, tesis de grado y maestría, patentes y el internet.

1.1 LA ENERGÍA

Se puede definir la energía como la capacidad que tienen los cuerpos para cambiar o para producir cambios.

Esta energía se manifiesta de múltiples formas, si es en forma de calor se denomina calorífica, si es en forma de luz, luminosa y si es en forma de electricidad, eléctrica.

Hay muchos tipos de energía, pero podemos destacar la solar, la atómica o nuclear, la hidráulica, la química, la eléctrica, la biomásica, la eólica, la mecánica y la térmica. Los tipos de energía se suelen clasificar en función a su fuente, en especial si su fuente es agotable (no renovable) o no agotable (renovable).

1.1.1 Fuentes de energía no renovable

Las energías no renovables son aquellos que no se reponen al ritmo que se consumen, podemos encontrar:

- I. Combustibles fósiles (carbón, petróleo, gas natural)
- II. Nuclear (fission y fusion nuclear).

1.1.2 Fuentes de energía renovable

Las energías renovables son aquellos que no se agotan aunque se utilicen:

- I. Mareomotriz (mares)
- II. Hidráulica (embalses)
- III. Eólica (viento)
- IV. Geotermal (tierra)
- V. Solar (sol)
- VI. Biomasa (vegetación)

1.1.3 Propiedades de la energía renovable

- I. Son recursos que se encuentran muy distribuidos en todo el planeta, lo que permite una dependencia energética.
- II. Generalmente son tecnologías modulares con cortos periodos de construcción, permitiendo la instalación en múltiples emplazamiento.
- III. El proceso tecnológico involucrado es relativamente sencillo, siendo interesante para los países en desarrollo.
- IV. Las maquinas para extraer la energía son fáciles a construir y instalar.
- V. El impacto ambiental es muy bajo.
- VI. Es un recurso inagotable.

Por energía sostenible se entiende la energía producida y utilizada de forma que sustente el desarrollo humano en todas sus dimensiones sociales, económicas y medioambientales. El objetivo de tal sistema es satisfacer las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer las suyas.

1.2 LA BIOMASA

La biomasa es la cuarta fuente de energía más grande en el mundo¹. Se conoce como biomasa energética al conjunto de materia orgánica, de origen vegetal o animal, incluyendo los materiales procedentes de su transformación natural (fotosíntesis) o artificial de uso no alimentario. Se pueden clasificarse según su origen en:

Natural: Es la generada en cualquier ecosistema natural sin manipulación humana. Esta fuente no debería explotarse a causa del deterioro ambiental, no obstante constituye un recurso de importancia para países en desarrollo.

Residual: Se genera como resultado de la actividad humana. En este grupo se incluye:

¹ Sokhansanj, S., & Turhollow, A. (2004). *Biomass densification-Cubing operation and cost for corn stower*.

- I. Residuos agrícolas y forestales. Contempla los residuos de la actividad agrícola y forestal (hojas, cáscaras, etc.) y de la propia industria forestal (madera, corcho, papel)
- II. Residuos biodegradables de industrias agro-ganaderas y agroalimentarias y también los procedentes de la actividad urbana.
- III. Cultivos energéticos, dedicados a la producción de biomasa con fines no alimentarios.
- IV. Excedentes de cosechas agrícolas: Al resultar excedentes no tienen un destino alimentario, y son susceptibles de usarse como biomasa residual agrícola.
- V. Los mayores por cientos de la biomasa empleada son de origen vegetal. La biomasa vegetal está constituida mayoritariamente por hidratos de carbono, principalmente en forma de compuestos ligneocelulósicos, donde predominan las celulosas (hemicelulosa y holocelulosa) y la lignina.

En el mundo los pueblos habían utilizado y sigue utilizando estufas de leña para calentar edificios y para cocinar-convirtiendo la biomasa en una de las más comunes formas de la energía.

Según el informe del banco mundial 50-60% de la energía en los países desarrollados en Asia, y 70-90% de la energía de los países en el proceso de desarrollo en África sacan sus energías de la madera o la biomasa, y la mitad del mundo cocina con madera. Hoy, la biomasa suministra 14% de la energía primaria en el mundo-equivalente a 1000 millón de toneladas de petróleo cada año. Un ejemplo de la cantidad de biomasa utilizada para generar energía en algunas países, tenemos; Kenia 75%, India 50%, China 33%, Brasil 25%, Finlandés 18 %, Irlanda 16 %, Suecia 9% y los Estados Unidos 3%. El gasto mundial en el área de la biomasa es más que U.S\$2 billones/año². Según las estadísticas 2 400 millones de personas dependen de la biomasa para su supervivencia y 1 400 millones de personas están cada día más alejados de los avances tecnológicos³.

² Bhattacharya, S (n.d.). *Biomass energy and densification: A Global Review with Emphasis on Developing Countries Energy Program*. Asian Institute of Technology

³ The importance for international bioenergy trade. (2007). (p. 4,14,21). Presented at the IEA Bio-energy Task 40, European Biomass Conference & Exhibition in Berlin, Germany.

1.2.1 Tipos de residuos biomasicos susceptibles de ser briquetas

Anteriormente se hizo una clasificación de la biomasa con respecto a su origen, explicando que la densificación está reservada para aquella de origen vegetal o fitomasa tanto desde el punto de vista de la viabilidad económica como técnica. Las características que debe reunir una materia prima, en general, adecuada para ser densificada son:

- I. Bajo contenido de ceniza.
- II. Bajo contenido de humedad.
- III. Fácil de fluidizarse.
- IV. Bajo costo de recoger y transportar la materia prima.

1.2.2 Formas de extraer la energía de la biomasa⁴

La biomasa está constituida por los elementos carbono, hidrogeno, oxigeno en un gran porcentaje- también tiene en minoridad nitrógeno y azufre.

Hay muchas formas para extraer esta energía química en estos compuestos.

1. Combustión directa- quemando la materia prima utilizando calor directo. Esto es la tecnología más sencilla y puede ser lo más económico si la fuente esta cercana.
2. Pirolisis- es la degradación termal de la biomasa en la ausencia del oxigeno. La biomasa esta calentada a una temperatura entre 800-1400 °F sin la presencia de oxigeno resultando en la creación de gas, combustible, y carbón.
3. Digestión anaeróbica- es un proceso donde se utiliza la materia orgánica para producir metano (el mayor componente del gas natural), y dióxido de carbono.
4. Gasificación- un proceso utilizado para producir metano a través de calor y digestión anaeróbica.
5. Fermentación de alcohol- fuel alcohol puede ser producido por conversión de fécula a azúcar, después el azúcar a alcohol, después separando el alcohol por método de destilación. Pajas de trigo, cebada, las papas, etc. que contiene azúcar, fécula o celuloso puede se convertido en alcohol por fermentación con levadura.
6. Gas natural- puede ser generado por la descomposición (digestión anaeróbica) de subterráneo materia orgánica.

⁴ Patomsok, W. (n.d.). *Physical Characteristics of Maize Cob Briquette under Moderate Die Pressure* Mechanical Engineering Department. Engineering Faculty, Naresuan University, Phitsanulok 65000, Thailand.

7. Cogeneración es la producción simultáneamente de más que una forma de la energía. Cogeneración de la biomasa tiene más potencial que solo la biomasa generación porque se produce calor y electricidad.

1.2.3 Aplicaciones de la biomasa

El rango de uso de la biomasa es desde estufas para cocinar en las casas hasta estaciones para producir electricidad. En aplicaciones residenciales la biomasa puede ser utilizada por calentamiento de hogares y/o cocinando. Las industrias utilizan la biomasa por calentamiento de lugares, calentamiento del agua, generación de electricidad, etc.

Había pronosticado que en el año presente (2010), los beneficios de la biomasa se van a triplicar⁵.

1.2.4 La biomasa y el medio ambiente

La biomasa absorbe el dióxido de carbono durante su crecimiento, y lo cede durante la combustión, por lo tanto, se recicla el dióxido de carbono en el atmosfera y no añade al efecto invernadero. También no se contribuye a la lluvia acida porque durante su combustión se produce un bajo valor de azufre, nitrógeno y ceniza.

1.2.5 Pronostico del uso de la biomasa⁶

El futuro de la energía biomasa será caracterizado por el desarrollo de los organismos ambientales y la utilización de maquinas especiales. Algunos de los usuarios de la biomasa tradicional cambiaran a la energía comercial, particularmente en el área de cocinar. Sin embargo, el cambio climático y otros factores del medio ambiente van a promocionar el uso de la biomasa. La consumación mundial de energía en el año 2000 era alrededor de 370 EJ, se ha pronosticado que en el año 2050 el uso de la biomasa llegara a 328 EJ. Para el año 2025 se cuenta que la biomasa generara aproximadamente 145 EJ de la energía en el mundo.

1.3 LA BRIQUETA

I. Definición

⁵ Reed, G. J. (1979). *Biomass densification energy requirements*. Washington D.C.

⁶ Bhattacharya, S. Augustus Leon, M., & Rahman, M. (2004). *A Study on Improved Biomass Briquetting*. Energy Program, School of Environment, Resources and Development. Asian Institute of Technology.

Los productos densificados reciben diferentes denominaciones según su forma y dimensiones: gránulos, pellets, briquetas, astillas o leños. Si el producto obtenido al final de un proceso de compactación tiene dimensiones superiores a 30 mm se le denomina briketa. Los pellets son las que tiene diámetro entre 6 - 8 mm y longitud entre 10 – 12 mm.

II. Ventajas del uso de las briquetas

La producción de las briquetas presenta numerosas ventajas técnicas y socio-económicas, entre las cuales se encuentran las siguientes:

1.3.1 Técnicas:

Homogeniza la biomasa, haciéndola susceptible de ser empleada en transformaciones termoquímicas (combustión, gasificación, carbonización), que son sensibles a las variaciones de las características del combustible.

La materia densificada permite reducir los volúmenes de almacenamiento y facilitar las manipulaciones y el transporte.

Durante el período de almacenamiento, los desechos húmedos y amontonados ocasionan una oxidación lenta que modifica sensiblemente la distribución molecular de ciertas sustancias orgánicas, lo que disminuye fuertemente el valor calórico inferior. Al cabo de un cierto tiempo, una solidificación del conjunto de la masa acarrea enormes dificultades para su manipulación. La tecnología de extracción necesaria para estos grandes volúmenes, representa en ciertos casos el 50% de la inversión. La densificación evita estos problemas.

Además, si bien no es propia de este proceso, el secado del material, previo a la densificación, le confiere a los productos densificados mayor valor energético, mejorando su valor calórico.

1.3.2 Socio-económicas:

Las ventajas del uso de la briketa incluyen:

- I. Permite comercializar residuos vegetales, generalmente carentes de valor en estado bruto.
- II. Reduce los costos en el transporte.
- III. Los residuos ligneocelulósicos, difícilmente valorizados en las transformaciones termoquímicas a causa de su granulometría y humedad inadecuada, pueden transformarse en un combustible que puede sustituir la

madera o el carbón vegetal sin modificar sustancialmente las costumbres de los pueblos de los países en desarrollo.

- IV. Favorece el desarrollo de las comunidades o actividades artesanales.
- V. La valorización de residuos puede contribuir a reducir la deforestación.

1.3.3 Uso de las briquetas⁷

I. Países en desarrollo

En general las briquetas son más caras que la madera en los países desarrollados. Por ejemplo, en Katmandú, el capital de Nepal el precio por un kilogramo de briqueta es tres veces mayor que la madera.

Sin embargo las briquetas siguen ventajosas por las siguientes calidades:

- a. Constante suministro del producto: Una pacto de confianza puede ser establecido entre el fabricante y el consumidor. Un ejemplo típico de esta tipo son las briquetas utilizadas en la venta de té para los turistas en Nepal.
- b. Una coherente calidad de combustible: La alternativa mas común a las briquetas es la madera desecha. Sin embargo la forma y tamaño; también el contenido de la humedad son variables que afecta la precesión de la combustión.
- c. Amistoso al ambiente: Es un combustible que tiene cero contribución al efecto invernadero.
- d. Alta calidad: Las briquetas son superior a las otras biomاسas especialmente la madera. Mientras que la madera puede necesitar más preparación por ejemplo, secar, reducción del tamaño, etc.; la biomasa puede ser introducida directamente en el proceso de combustión.
- e. Bajo precio: La materia prima en algunos casos es gratis, y la tecnología de densificación hace que las briquetas sean un combustible más preferido. En lugares donde el carbón es más caro por razón del precio de transportación, los consumidores prefieren la briqueta.

ii. Países desarrollados

⁷ S. Sokhansanj, A. F. Turhollow. Biomass densification-Cubing operation and cost for corn stower.2004.p.1

El rango de uso de la briqueta es desde estufas para cocinar en las casas hasta estaciones para producir electricidad. En usos residenciales la biomasa puede ser utilizada por calentamiento de hogares y/o cocinando. Las industrias utilizan la biomasa por calentamiento de lugares, calentamiento del agua, generación de electricidad, etc.

1.3.4 La densificación de la biomasa para producir briqueta

El proceso de densificación consiste en reducir el volumen de la biomasa por incremento de presión, para obtener un producto compacto y resistente, que lo haga más fácil de manipular y abastecer que el material original. La materia prima empleada debe ser ligneocelulósicas, pues presentan las siguientes ventajas:

- I. La lignina, bajo la acción de las altas temperaturas, actúa como aglomerante en la obtención de un producto densificado compacto, otorgando un valor añadido al residuo.
- II. Evita la contaminación por materia orgánica de suelos y aguas.
- III. Su uso como biomasa contribuye a la prevención de incendios.
- IV. Elimina las emisiones de SO_2 durante la combustión.
- V. No incrementa el efecto invernadero.
- VI. Genera nuevos puestos de trabajo.
- VII. Disminuye la dependencia energética.
- VIII. Convierte los gastos que se producían por eliminación de desperdicios (por ejemplo recogida, transporte, incineración, vertido) en ingresos, por cuanto al adquirir un nuevo valor de uso adquiere un valor económico.

1.3.4.1 La ciencia de la densificación

El término densificación está reservado a la transformación física de residuos vegetales en un combustible sólido sin adición de aglomerantes (en caso contrario se denomina aglomeración). Implica el uso de alguna forma de presión mecánica para reducir su volumen y facilitar su manejo, transportación y almacenaje.

La biomasa en su forma original tiene una densidad aproximadamente igual a 30 kg/m^3 con humedad entre 10% y 70 % por una unidad volumen. La densificación es un proceso que se desarrolla fundamentalmente en dos fases. Inicialmente al aplicarle presión ($2-51 \text{ kg/cm}^2$), el material reduce su volumen, eliminándose el aire existente en los vacíos inter partículas. Posteriormente, al continuar aumentando la presión (hasta 1750 kg/cm^2), el elemento que actúa de cementador, en este caso la

lignina, se reblandece acoplando entre sí las partículas y reduciendo los espacios libres. En este estado, la lignina, acentúa sus propiedades aglutinantes, permitiendo que, al cesar la presión, el nuevo producto permanezca compacto⁸.

En general durante la primera compactación las partículas reordenan su configuración para formar una masa masiva. Las partículas retienen la mayoría de sus propiedades originales, aunque la energía está distribuida a través de las fuerzas inter-atómicas e intermoleculares. Cuando se aumenta la presión de densificación las partículas están forzadas en dirección contraria de la fuerza y se deforman elásticamente y plásticamente. El aumento del contacto entre las partículas desarrollan fuerzas de enlace como van der Waal. A presiones altas los poros de las partículas se rompen hasta que la densidad de la masa logra su mayor densidad máxima real. Si el punto de fundición de la sustancia que forma una mezcla eutéctica es favorable, el calor generado al punto de contacto puede favorecer la fundición de la materia prima. Cuando se enfría la materia fundida se forma puentes-sólidos muy fuertes. La biomasa ligneocelulósica contiene componentes como celulosa, hemicelulosa, proteínas, lignina, fibras y ceniza. Entre estos componentes químicos la lignina tiene un bajo punto de ebullición de 140°C. Cuando la biomasa esta calentada el lignina se convierte en una material aglomerante y aglutinante.

1.3.4.2 Modelos matemáticos de la densificación

Las propiedades de mayor influencia en la densificación de la biomasa son las características mecánicas de las partículas solidas. El mecanismo de densificación de materiales diferentes es distintas para cada cual. En el estudio se representa dos ecuaciones fundamentales para la densificación, la de B.P Fundora y la de S. Sokhansanj .Se analiza el trabajo del científico anterior por razón de su valor científico en términos de su experimental exactitud.

1.3.4.3 La ecuación de densificación⁹

El procedimiento de densificación se considera en cuatro etapas:

- I. La primera etapa consiste en expulsar el aire presente entre las partículas para provocar el contacto.

⁸ Barriando, E. (2000). *Dispositivo para producir briquetas cilíndricas tubulares de paja de caña de diferentes dimensiones*. Trabajo de Diploma, Universidad de Cienfuegos.

⁹ Peraza, L., & Pascual, N. (1994). *Modelo físico-matemático para la compactación de la paja de caña*. Universidad de Cienfuegos.

- II. La segunda etapa es la fase principal de compresión, en la que se forma la briqueta.
- III. Durante la tercera etapa, la briqueta se mantiene un cierto tiempo bajo la acción de la presión y el calor. En este momento se operan las deformaciones de la materia en función de la duración y de la temperatura.
- IV. La última etapa es la de expulsión de la briqueta.

Fundora, P utilizó un modelo matemático-exponencial, que satisface adecuadamente los requerimientos de la tendencia experimental y que puede ser extrapolado para valores de los parámetros fundamentales, fuera del rango experimentado, ya que se adapta al comportamiento físico de la sustancia analizada (paja de caña sin preparación previa), y toma en cuenta la influencia e interacción de otros parámetros de la sustancia y del proceso de densificación respectivamente.

La formulación del modelo teórico propuesto.

$$\rho = a - b \cdot e^{-c \cdot P} \dots \dots (kg/m^3) \quad (1.1)$$

Donde:

$a \dots$ Representa la densidad límite (ρ_1), en kg/m^3 , cuando la presión sobre la biomasa tiende a un valor muy elevado.

$b \dots$ Representa el rango de densidades que puede alcanzar la biomasa sometida a presión (kg/m^3). $b = \rho_1 - \rho_0$ Siendo: ρ_1 densidad (kg/m^3) para una presión que tiende al infinito.

$\rho_0 \dots$ Densidad inicial de la biomasa natural (kg/m^3)

$c \dots$ Es una constante dimensional, que toma en consideración el material y su estado, así como las condiciones iniciales y finales del proceso de densificación. Su valor influye en la forma de la característica de la densidad-presión, acercándola o no a la forma del modelo experimental.

$$c = \frac{k_0 - \rho_0}{\rho_1 - \rho_0} \dots \dots MPa^{-1} \quad (1.2)$$

$K_0 \dots$ Constante de compresibilidad para $P = 0$ (comienzo de la respuesta elástica de la biomasa) MPa^{-1}

Como puede observarse, es un modelo formado por dos funciones matemáticas: $Y_1 = a$; $Y_2 = b \cdot e^{-c \cdot P}$; que al sumarse algebraicamente, producen una función con semejante tendencia que la función experimental. Sin embargo, es una función aproximada. La exactitud queda determinada por un proceso matemático de regresión lineal del modelo teórico exponencial linealizado que tiene como objetivo

fundamental, determinar los valores de las constantes dimensionales a, b y c se materializa, buscando el valor de la constante a , que mejores índices estadísticos proporcione, considerando la densidad correspondiente a cada presión analizada, así como los valores de ésta.

1.3.4.4 Compresibilidad (K)¹⁰

$$K = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{d\rho}{dP} \quad (1.3)$$

Sabemos:

$$\rho = a - b \cdot e^{-c \cdot P}$$

Así que:

$$\frac{d\rho}{dP} = b \cdot c \cdot e^{-c \cdot P} \quad (1.4)$$

Por lo que:

$$K = \frac{b \cdot c \cdot e^{-c \cdot P}}{a - b \cdot e^{-c \cdot P}} \dots \dots \dots MPa^{-1} \quad (1.5)$$

$$\text{Cuando } P = 0 \Rightarrow K_0 = \frac{b \cdot c}{a - b} \dots \dots \dots MPa^{-1}$$

El módulo de elasticidad (E):

$$E = \frac{1}{K} \dots \dots \dots (MPa) \quad (1.6)$$

Linealizando el modelo teórico, tenemos:

$$\ln(a - \rho) = \ln(b) - c \cdot P \quad (1.7)$$

O sea una función del tipo:

$$y = A + bx ; \text{ Donde } y = \ln(a - \rho) ; A = \ln b ; B = -c \text{ y } x = P$$

Considerando:

$a = \rho_1 = 1750 \text{ kg/m}^3$ para diferentes presiones (P) en los diferentes estados de la biomasa, se obtiene un modelo que satisface de forma general, cualquier requerimiento de la biomasa.

¹⁰ Dr. Fundora Beltrán, P. (2002). *Estudio de la densificación de la paja de caña sin preparación previa con tecnología hidráulica para el perfeccionamiento de su proceso tecnológico*. Tesis. Para optar para el grado científico de Máster en Ciencias Técnicas. Cenfuegos, Universidad de Cienfuegos.

1.4 TECNOLOGIA DE DENSIFICACION MÁS USADO EN EL MUNDO Y SUS POTENCIALES DE PRODUCCION¹¹

Los dos tipos comunes de máquinas briqueteadoras que se encuentran funcionando en los países desarrollados son de husillo sin fin y prensa de pistón. Los tornillos sin fin fueron inventados en Japón y el Estados Unidos en el año 40. Se ha extendido a países como Corea, China, Taiwán, Vietnam, Tailandia, Filipinas, Bangladesh, etc. La prensa de pistón es popular en países como Brasil, India y África. Mientras que estas maquinas están construidas en Brasil e India, en África están importada.

1.4.1 Algunos países que emplean el uso de maquinas briqueteadoras

China: La tecnología de densificación de tornillo sin fin es muy maduro en China, mientras que el uso de prensas de pistón esta en desarrollo. La capacidad de las maquinas de tornillos está entre 100-120 *kg/h*. Las materias primas más comunes son cascara de arroz, paja de arroz, aserrín de madera y residuos agrícolas. Casi la mitad de las briquetas producidas están utilizadas como combustibles para las calderas.

India: Casi 70 maquinas briqueteadoras fueron instaladas en el año 1995; desde aquel tiempo el uso de la briqueta ha aumentado. Las maquinas comunes son los tornillos sin fin y las prensas de pistón. Tiene aproximadamente 150 maquinas de tornillo instalados con una capacidad entre 400-2 000 *kg/h* y alrededor de 60 maquinas de prensas. En Rajastyan hay tres plantas con una capacidad combinada de 45 000 toneladas al año. En este momento se están construyendo 14 fábricas con una capacidad combinada de 200 000 toneladas al año.

Myanmar: Al principio del año 1990 había solo uno fabricante que diseño una maquina de 10 hp. Antes de 1995 el vendió 10 de sus maquinas.

Nepal: En el año 1982 se instalo una planta con una capacidad de 90 *t/año*. En el año 1984 se instaló 2 plantas mas con capacidad de 1 200 y 1 400 *t/año* respectivamente.

Tailandia: Tiene un total de 44 maquinas con una capacidad de 100 *kg/hr*, 9 de ellos densifican cascara de arroz, 7 densifican aserrín y los demás funcionan con otras materias orgánicas.

África: Hay un gran interés en la producción de briquetas en África. Existen plantas de producción másica en Etiopia, Kenia, Malawi, Uganda, Sudan, Zambia y

¹¹Executive Committee of IEA Bioenergy. (n.d.).

Zimbabue. Algunos países como Camerón, Eritrea, Ghana, Ruanda, Senegal y Tanzania tienen plantas pero no son de producción másica.

ABC Hansen, una compañía de Demarque tiene diez y nueve plantas en los países africanos, por ejemplo; Burkina Faso (1), Eritrea (1), Gambia (1), Ghana (1), Kenia (2), Nigeria (1), Ruanda (1), Sudan (4) y Zambia y Zimbabue.

Brasil: En Sao Paulo, Brasil se consume más que treinta mil toneladas de briquetas mensualmente. En el año 2002, la producción anual de briquetas estaba por encima de un millón de toneladas.

En el norte América (Estados Unidos y Canadá) y Suecia se producen seis ciento ochenta mil y cuatro ciento setenta mil toneladas de pellets de aserrín anualmente. Además Suecia importa más que 1 millón de toneladas de briquetas anualmente. Estados Unidos tiene más que 60 empresas que producen briquetas. En el año 2002 la estimada producción en Austria, Demarque y Noruega estaba cuarenta uno mil, ciento cincuenta mil y veinte mil toneladas respectivamente. En Finlandia se producen más que noventa mil toneladas de briquetas anualmente.

1.4.2 Característica de la tecnología de densificación más utilizados¹²

Las máquinas para densificar las biomásas están clasificados por su mecanismo principal de compresión. Hasta ahora, se han diversificado entre tres grupos; prensas, husillo y de émbolos.

1.4.2.1 Briqueteadora mecánica de prensa

Fueron las primeras máquinas utilizadas en el proceso de densificación, activadas anteriormente por máquinas de vapor. Un embolo se encarga de llevar la biomasa al tubo de alimentación donde un mecanismo de biela manivela realiza el trabajo de compactación. Las briquetas producidas eran generalmente másicas con una densidad entre 1 000- 1 204 kg/cm^3 . Se puede destacar que el diámetro de la briqueta que se produce, determina el gasto energético. Son las máquinas más difundidas después del husillo.

1.4.2.2 Briqueteadora mecánica de husillo

Realiza su función al movimiento continuo de un husillo cilíndrico o cónico con un conducto de similares características, que en su extremo dispone de unas o varias

¹² Granada Álvarez, E. (1999). *Estudio de la influencia de los parámetros humedad, temperatura y presión en el proceso de densificación, mediante auto-aglomeración, de biomasa ligneocelulósica residual*. Tesis Doctoral, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y Minas. Universidad de Vigo (España).

salidas calibradas. Por la elevada fricción entre la superficie del husillo y la biomasa además de su interacción con el cuerpo, se generan temperaturas que alcanzan los 250-300 °C, por lo cual requiere de enfriamiento a la salida, para la garantía de la estabilidad de la briqueta producida.

Como exigencia para el adecuado funcionamiento de esta tecnología es requisito indispensable:

- I. La granulometría de la biomasa no debe superar los 10 mm.
- II. La humedad nunca debe superar el 15 %; comúnmente entre 8-15%.

Estas condiciones garantizan que la biomasa fluya como una sustancia plástica y pueda ser sometida a pasar por diferentes calibres o alrededor de un dado cilíndrico, para formar una briqueta tubular. Los niveles de presión, superan los 150 MPa y las densidades pueden oscilar entre 1200-1400 kg/cm^3 . Estas máquinas son productivas pero el gasto de energía puede alcanzar entre 50-70 kWh/T .

1.4.2.3 Briqueteadoras hidráulicas de émbolos

Son las máquinas que ocupan el espacio dejado por las máquinas de husillo y la mecánica de émbolo. La forma de producir la briqueta las hace comparables a las mecánicas de émbolo; pero el modo gradual y sin golpes de funcionamiento, las acerca a las máquinas de husillo. Además, en muchas cualidades supera a una y a otras, al tener la capacidad de asimilar biomasa de disímiles cualidades, con elevada granulometría y humedad que puede llegar hasta 28 %. Sus consumos energéticos son muy inferiores a las anteriormente analizadas. Las recomiendan para usos tales como: reducir volúmenes en la transportación de residuos y para usos comparables con las otras tecnologías.

1.4.3 Análisis comparativo de las diferentes tecnologías de densificación¹³

La siguiente tabla demuestra las ventajas y desventajas de las distintas tecnologías de densificación. Se analiza las diferentes máquinas briqueteadoras en el mundo desde un punto de vista de fiabilidad, económica y su contribución tecnológica.

¹³ Ing. Dwight Abu, P. (2008). *Metodología del diseño de una máquina briqueteadora flexible multipropósito*. Trabajo de diploma, Universidad de Cienfuegos.

Tab.1 Comparación entre diferentes tipos de briqueteadoras

Hidráulica	Mecánica de émbolo	Mecánica de husillo
Gasto bajo de energía depende de la presión del sistema hidráulico (20-30 kWh/t).	Gasto elevado de energía, que crece con el incremento de la sección transversal de la briqueta (35-45 kWh/t)	Posee un muy elevado gasto de energía (50-75 kWh/t).
Son máquinas flexibles por lo que se adaptan a variaciones de la biomasa. Aceptan cualquier granulometría y humedades hasta 28 %.	Las características de la biomasa, la granulometría y la humedad son factores que deben ser muy controlados, pues no aceptan cualquier biomasa. La granulometría es la recomendada por el fabricante, y la humedad no debe superar el 15 %.	Admiten granulometría hasta 80 mm, humedad entre el 15 al 17 %. Son menos sensibles al tipo de biomasa, aunque al usar biomásas que no son las que el fabricante propone, puede provocar acelerado deterioro de las partes de la máquina. Sin embargo, para estos casos se propone el precalentamiento entre 110-140°C.
Las tecnologías que se comercializan actualmente, resultan relativamente costosas (180-350 USD/(kg/h)	Son máquinas cuyo costo es inferior a los precedentes pero varía según la capacidad de producción. Oscila entre 80-180 USD/(kg/h)	Los índices de costos son los menores de todas las tecnologías analizadas (50-100 USD/(kg/h). Sin embargo, los costos de mantenimiento y reparación de las partes fundamentales son muy elevados.
Producen briquetas de media densidad y baja calidad, macizas, con dimensiones promedios de 40-140 mm de diámetro y densidades de 600-1100 kg/m ³ . Su durabilidad es alta.	Las briquetas presentan adecuada calidad, sus dimensiones son de 250 mm de diámetro y longitudes entre 400-450 mm. La durabilidad de las briquetas en presencia de humedad alta, es de horas. Densidad 1000-1200 kg/m ³ .	Briquetas de muy alta calidad, lisas y sin poros con densidades entre 1400-1500 kg/m ³ y dimensiones entre 40-110 mm de diámetro con longitudes de 110-300 mm. Son menos sensibles a los cambios de humedad que los casos anteriores.
Se pueden producir múltiples briquetas de forma simultánea.	Solamente se produce una briqueta por cada carrera del émbolo.	Se pueden producir múltiples briquetas de forma simultánea.

1.4.4 Maquinas briqueteadoras en Cuba¹⁴

Los siguientes trabajos fueron desarrollados dentro la Universidad de Cienfuegos. Algunas de las maquinas ya fueron construidas y están en uso.

BHPF-500

La briqueteadora hidráulica de tres etapas de densificación desarrollada en la base de reparación de buques B.R.B, con marca BHPF-500 y capacidad de 500 kg/h , produce briquetas macizas de 200 mm de diámetro y longitud entre 200-400 mm, densidades entre 350-750 kg/cm^3 , con paja de caña entera (200-400 mm), y humedades hasta 22%. La máquina fue el primer prototipo que dio lugar al desarrollo de nuevas versiones. Sus principales limitaciones estaban en su rigidez y la imposibilidad de producir briquetas de dimensiones inferiores a las planteadas. Costo de fabricación de 8 560 USD.

BHPF-700

La briqueteadora Hidráulica BHPF-700, que surgió como resultado del estudio del prototipo anterior y se transfirió como tecnología a la provincia de las Tunas, en la esfera de pan y dulce. Sus características eran muy parecidas al prototipo precedente, con una capacidad de producción ligeramente superior y similar costo de fabricación.

BHPFB-1000

La briqueteadora hidráulica BHPFB-1000, con características multipropósito de tres etapas. La primera y segunda etapas como unidad ensamblada independiente constituyó la principal novedad de esta máquina, con la cual se garantizaba una preparación o pre-compactación indirecta de la paja de caña para un mayor incremento de su capacidad. Los niveles de rigidez y resistencia fueron superiores a sus versiones precedentes. También la disposición de un carro briqueteador externo en la tercera etapa de densificación, con posibilidades de intercambio de las dimensiones del vástago y de los tubos del briqueteado, amplió las posibilidades de esta máquina. Capacidad máxima de producción 1 000 kg/h , costo de fabricación 12 372.63 USD.

BHPF-300E.

¹⁴ Sánchez, Y. (2001). *Diseño de briqueteadora Multipropósito para producir briquetas macizas y tubulares de paja de caña*. Trabajo de diploma, Universidad de Cienfuegos.

Se diseñó la versión BHPF-300E para capacidades de 300 kg/h , con posibilidad de intercambio de los vástagos y tubos de briqueteado, con dos etapas de alimentación. Una primera etapa que accionaba directamente sobre una sección axial del tubo del briqueteado y un sistema de cuchillas cortaban la paja que sobresalía de dicha sección y una segunda etapa, constituida por un carro briqueteador con vástago saliente, encargado de la compactación final de la briqueta formada y su desplazamiento (expulsión) en el tubo de briqueteado. La máquina tiene la posibilidad de producir briquetas cilíndricas macizas de diferentes diámetros, gracias a la intercambiabilidad de los tubos y vástagos. Capacidad máxima de producción: 300 kg/h , costo de fabricación 5 783,75 USD.

BHFM-2000¹⁵

La briqueteadora hidra-mecánica de elevada capacidad con el aprovechamiento de las dos carreras de un cilindro de doble vástago (BHFM-2000) ^[12]. De igual potencialidad hidráulica que la BHPF-1000; pero aprovechando la doble carrera de los cilindros. La primera etapa era accionada por un mecanismo de palanca que funcionaba con el cilindro hidráulico de la segunda etapa. En la última etapa disponía de dos cilindros de doble vástagos conectados en paralelo, de una carrera de 1000 mm y un diámetro interior de 140 mm. La opción fundamental era producir la briqueta de diámetro de 200 mm, aunque permitía otras dimensiones (briquetas macizas). Los niveles de densidad de este tipo de briqueta superaban los 800 kg/m^3 y con pequeños calibres se podía alcanzar densidades cercanas a 1100 kg/cm^3 . Capacidad máxima de producción: 2000 kg/h , costo de fabricación: 17 351.65 USD.

BHPFB-4000

La briqueteadora empacadora BHPFB-4000, con capacidad para 4000 kg/h , de sección cuadrada de 400 mm de lado y con posibilidad de convertirse en briqueteadora multipropósito para otros calibres de tubos. El esquema de esta máquina tenía bastante semejanza con la BHPF-1000, con la diferencia de que se necesitaban dos motores de igual capacidad que la anterior y dos sistemas hidráulicos para garantizar su elevada productividad. Se utilizaron dos alimentadores independientes que funcionaban de forma alterna, para garantizar el

¹⁵ Díaz Torres, J., & Bravo Nunez, J. (1997). *Diseño de la maquina empacadora briqueteadora hidráulica de paja de caña*. Trabajo de diploma .

aprovechamiento de la doble carrera de los cilindros hidráulicos de la última etapa de compactación. Capacidad máxima de producción: 4 000 kg/h , costo de fabricación: 25 793.97 USD.

BHPF-50

Dada la necesidad de estudio del comportamiento de las dimensiones y densidades de la briqueta en la combustión, así como del comportamiento de la paja de caña y otras biomاسas, surgió la necesidad de concebir una briqueteadora hidráulica pequeña BHPF-50 con calibres de tubo de 50 mm de diámetro y un solo cilindro, para la producción de briquetas cilíndricas macizas de paja de caña y otras biomاسas y determinar en condiciones reales, los parámetros del proceso de densificación y magnitudes físicas de las briquetas. La maquina tiene una capacidad máxima de producción: 50 kg/h , y un costo de fabricación: 2 486.54 USD.

BHPFBT-400¹⁶

La briqueteadora hidráulica multipropósito para producir briquetas cilíndricas macizas o tubulares de diferentes dimensiones (BHPFBT-400) de paja de caña y otras biomاسas, por su novedad se encuentra en fase de registro de patentes. Capacidad máxima de producción: 400 kg/h , costo de fabricación: 8 668.65 USD.

Los precios de venta de algunos tipos de briqueteadoras hidráulicas, aportados por los catálogos de la firma Spanex, Alemania año 1995, son los siguientes: Para 50 kg/h de capacidad de producción, el precio es de 23 000 USD que es más de 9 veces superior al costo de fabricación de su similar construida en Cuba. Si la capacidad es de 350 kg/h el precio correspondiente es de 83 534 USD y si la capacidad es de 1 000 kg/h el precio es de 165 000 USD, que equivale a más de 10 veces el costo de fabricación de su similar en Cuba.

1.5 TEORÍA DEL DISEÑO¹⁷

1.5.1 Criterios del diseño

- I. Diseñar una máquina capaz de ser flexible desde el punto de vista de sus posibilidades, como de la disponibilidad de materiales.
- II. Brindar facilidad en el montaje y desmontaje.

¹⁶ Castex, I. (1992). *Proyecto Constructivo de briqueteadora Hidráulica para paja de caña*. Trabajo de diploma, Universidad de Cienfuegos.

¹⁷ Reshetov, D. (1990a). *Elementos de Máquinas* (Empresa Nacional de Producción del Ministerio de Educación Superior).

- III. Construir una maquina invariable y lograr intercambiabilidad con las herramientas vinculadas al proceso de compactación.
- IV. Bajo costo de fabricación y posibilidad de mejorar los índices de costo, al utilizar todas los cilíndricos hidráulicos.
- V. Apta para ser usada en cualquier tipo de biomasa con humedad entre 2-16%.
- VI. Posibilidad de aceptar determinadas magnitudes de desgaste de las herramientas para la densificación, sin afectaciones sensibles en la calidad de la briqueta.

1.5.2 Defensa del diseño de una briqueteadora multitubular

Los análisis de las diferentes tecnologías de densificación y sus ventajas, costos, gastos energéticos, posibilidades de densificar biomاسas y los antecedentes en el diseño, nos preparan para desarrollar otra tecnología; las briqueteadoras hidráulicas multitubulares.

Con esta tecnología, nueva a esta región (América del sur, América Latina y el Caribe), no se pierda en vacío ninguno de las careras del cilindro. La presión del sistema hidráulico de las tecnologías de este tipo, no depende de la sección transversal de la briqueta producida. El gasto de la energía depende de la presión y el flujo de sistema hidráulico. Las maquinas hidráulicas permiten garantizar más estabilidad de la briqueta producida, y resuelve los problemas de las maquinas predecesores. Como es de suponer la profundización de este estudio de esta nueva innovación puede dar la respuesta definitiva a las maquinas de densificación.

1.5.3 Generalidades sobre el diseño de maquinas¹⁸

El diseño es un proceso de creación de las maquinas en forma de documentos (generalmente, dibujos) que se lleva a cabo de base de cálculos teóricos, practicas de construcción, tecnología y de explotación, así como también de experiencias. El diseño lleva muchas versiones. En caso general, la óptima es tal versión que permite obtener los índices necesarios de trabajo con un gasto mínimo de trabajo social.

El diseño de maquinas se realiza por fases, lo que permite controlar y aprobar los proyectos en diferentes etapas de elaboración. En las fases principales del diseño de maquinas se elaboran los documentos que siguen:

¹⁸ Feodosiev, V. (1980). *Resistencia de materiales* (Tercera.). Impreso en la URSS: Mir.

- I. Especificaciones técnicas: Se hacen para un proyecto de maquinas que entran en la nomenclatura principal de las maquinas de fabricación en serie y en masa.
- II. Anteproyecto: Comprende el desarrollo en croquis de las vistas generales de los conjuntos principales.
- III. Proyecto de contrato: Comprende las vistas generales definitivamente desarrolladas de la maquina y de sus conjuntos, lista para el despiece.
- IV. Proyecto de ejecución: Es un conjunto de vistas generales, dibujos de taller de las piezas, especificaciones y otros documentos, suficiente para la fabricación de la maquina.

Al terminar el diseño es necesario preocuparse por la estética técnica. Entre los conceptos de belleza, desde el punto de vista ingenieril, y de racionalidad estructural. Las estructuras racionales parecen bellas y las bellas resultan racionales.

1.5.4 Cálculo de las piezas de las maquinas durante el diseño

A fin de determinar preliminarmente las medidas de las piezas se emplean los cálculos convencionales simplificados. Las piezas de máquinas tienen que satisfacer la condición de fiabilidad-conservando sus índices de explotación y debe tener el costo mínimo necesario de producción y de explotación. Por eso es importante utilizar los materiales más adecuados teniendo en cuenta su costo y déficit. Los criterios de cálculo más importante que se toman en consideración en el análisis de las piezas son:

- I. Resistencia mecánica
- II. Rigidez
- III. Resistencia al desgaste
- IV. Resistencia al cambio de la temperatura
- V. Resistencia a las vibraciones.

Como definitivos se emplean los cálculos por criterios de capacidad de trabajo y fiabilidad que reflejan con bastante exactitud los fenómenos físicos que se manifiestan durante el funcionamiento de la maquinas.

En los últimos tiempos, muchos cálculos de las piezas se llevan a cabo con calculadoras y computadoras electrónicas digitales, incluso los cálculos de las

piezas a fabricar de acuerdo con programas normalizados, cálculos complejos que son difíciles o imposibles para el cálculo a mano, y confección de tablas de cálculos.

Conclusiones parciales

1. Las máquinas briqueteadoras hidráulicas en muchas cualidades supera las otras maquinas de densificación en el mercado comercial, al tener la capacidad de asimilar biomasa de disímiles cualidades, con elevada granulometría, humedad y temperatura. Sus consumos energéticos son muy inferiores y demuestran un alto rendimiento de producción, con la posibilidad de producir las briquetas multitubulares se asegura su competitividad con el resto de la tecnología de densificación.
2. Es importante entender el mecanismo fundamental del proceso de densificación de la biomasa y las variables para lograr eso. Razón que, se da los datos necesarios para diseñar maquinas briqueteadoras eficientes y se aumenta la calidad de la producción (de briquetas y maquinas).
3. La biomasa puede suministrar una gran parte de la energía en el mundo, un país, un barrio o un hogar a través de; métodos para dirigir los productos forestales y de las agriculturas, una eficiente producción de maquinas para producir briquetas, una alta calidad de briquetas y un calculado diseño de de estufas y calderas.
4. En la literatura no se reporta la existencia de maquinas briqueteadoras hidráulicas para producir briquetas multitubulares aunque existen aplicaciones donde se utilizan dichos briquetas.

CAPITULO 2: METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO DE LAS BRIQUETEADORAS HIDRÁULICAS PARA PRODUCIR BRIQUETAS MULTITUBULARES DE BIOMASAS

2.1 INTRODUCCIÓN

El diseño de cualquier máquina para densificar biomاسas requiere del análisis de diferentes factores que obligatoriamente deben ser tomado en consideración para asegurar, por un lado las exigencias de la producción y por otros la fiabilidad, economía en la explotación y costos de inversión.

Los factores que satisfacen las exigencias de la producción están vinculados a la calidad de las briquetas (dimensiones, densidad, resistencia mecánica) y a la capacidad de producción por unidad de tiempo, en ello es determinante el tipo de biomasa y su estado (granulometría, humedad y densidad natural por lo que resulta indispensable un estudio para su caracterización en el proceso de densificación.

En la calidad de las briquetas resulta determinante, elevados valores de la densidad y en la capacidad de producción por la unidad de tiempo influyen, además del tiempo del proceso de densificación, el estado de la biomasa (densidad natural, granulometría, humedad), y los volúmenes de esta que en cada ciclo estén involucrados en la producción de una briketa, lo que indica que el numero de ciclos por la unidad de tiempo y la masa de biomasa que se compacta en cada ciclo, constituyen los factores principales en el incremento de la capacidad de producción de una máquina, sobre todo, si se combinan ambos factores.

- I. Los factores precedentes conducen a dividir el diseño de una tecnología de densificación, en este particular una tecnología de densificación hidráulica, en dos direcciones.
- II. La que se encarga de la determinación de las dimensiones requeridas (volumen de la cámara de alimentación y número de etapas de densificación) para la carga de biomasa en cada ciclo así como el numero de ciclos necesarios para asegurar la capacidad de producción deseada.

Las que se encargan de la forma y las dimensiones de los diferentes componentes de la máquina, para asegurar la producción de briquetas de calidad, en las cantidades deseadas, con fiabilidad y resistencia mecánica asegurada.

2.2 ESTUDIO DE LOS FACTORES VINCULADOS AL ASEGURAMIENTO DE LA CAPACIDAD DE PRODUCCIÓN Y CALIDAD DE LAS BRIQUETAS EN EL DISEÑO DE UNA BRIQUETEADORA HIDRÁULICA

Cuando una biomasa cualquiera (paja de caña) es sometida a un proceso de densificación por presiones y en ello se emplea un recipiente o conducto metálico de una sección transversal dada, ocurren cambios físicos fundamentales, que están caracterizados por la influencia de parámetros inherentes a la sustancia y al proceso en cuestión, en la interacción con el recipiente o conducto metálico. La disminución del volumen de la sustancia dentro del recipiente o conducto metálico, conduce al incremento de la densidad, según una determinada regularidad o ley respecto a la presión como parámetro principal del proceso, y está influenciada por la humedad, granulometría y tipo de biomasa, que son factores propios de la sustancia. No podemos subestimar en este proceso, que la repetición y continuidad de los procesos de densificación pueden originar incrementos de temperaturas, precisamente originados por la fricción interna, que tiene lugar entre las partículas de biomasa que se densifica y entre éstas y las paredes del recipiente o conducto metálico que las contienen. Aquí, de forma indirecta, está implícita la influencia del tipo de biomasa y su estado (humedad y granulometría). Si la temperatura alcanza el entorno de los 100 °C, aparece un factor adicional que puede cambiar completamente la regularidad del proceso de densificación, al fluir la lignina y la hemocelulosa. Se ha originado un cambio químico en el proceso de densificación, muy favorable, que permite consolidar el producto densificado, si se enfría a temperaturas inferiores a 40 °C.

Los modelos experimentales de respuesta de las biomásas sometidas a presión y sus diferentes estados; ajustados a modelos matemático o físicos-matemáticos, resultan muy importantes para la elección de las dimensiones de la sección transversal del conducto, espesor y calidad del material empleado en el mismo, así como para la determinación de la fuerza y la energía necesaria para lograr un nivel dado de densidad de la biomasa. También permite elegir o diseñar el tipo de tecnología de densificación más apropiada.

La briqueta es el resultado de la densificación a elevadas presiones de una sustancia, sin necesidad de aglutinantes, donde influyen factores inherentes a las sustancias, como: la humedad, la granulometría y factores que surgen en el proceso

de densificación, tales como: el incremento de la temperatura por la fricción interna y con las paredes metálicas del conducto así como el incremento de la densidad. Cada estado inicial de una sustancia, puede generar un estado final diferente. Es por ello, que resulta importante estudiar la influencia de todos los factores antes mencionados, para garantizar la efectividad del proceso.

Las biomاسas en general son sustancias de bajas densidades naturales, con un comportamiento anisótropo, sin embargo, a elevadas presiones resulta aceptable, considerarlas sustancias isotrópicas. Ello es una simplificación que algunos autores utilizan, para abordar el problema, al estudiar su comportamiento, en un proceso uniaxial de deformación.

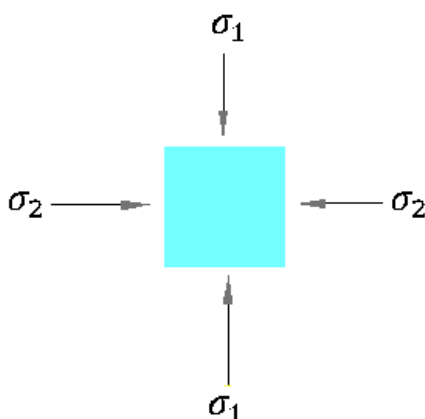


Fig. 2.1 Estado tensional plano de tensiones principales

Stanley-Wood¹⁹ consideró que:

- I. En la cercanía a la superficie del conducto, se genera un estado tensional plano de tensiones normales de compresión y tangenciales, provocado por la fricción de ésta con la biomasa que se densifica, y donde las tensiones principales se encuentran giradas un determinado ángulo.
- II. En las proximidades del eje de simetría de la biomasa densificada existe un estado tensional plano de tensiones principales de compresión. Este modelo se corresponde más con lo que realmente ocurre en un proceso uniaxial de deformación, y explica la estabilidad de la briqueta al salir del confinamiento, si se combina además con: la forma y dimensiones geométricas de la misma,

¹⁹ Betancourt, E. (1996). *Diseño de Briqueteadora Hidro-Mecánica de elevada capacidad*. Trabajo de diploma.

así como con la influencia que ejerce la temperatura durante el proceso de densificación.

2.2.1 Análisis del proceso de densificación²⁰

La figura 2.2, nos muestra las diferentes fases que experimenta la biomasa durante el proceso de densificación. En la figura 2.2.a se observa la primera fase, que se inicia a partir del momento en que la biomasa ocupa el espacio que comprende la carrera del émbolo y este se encuentra en su posición inicial; $P = 0$. En la figura 2.2.b se produce un incremento de la presión; $0 < P \leq P_{max}$. A partir de ese momento se produce el trabajo de compactación y de las fuerzas de fricción, como consecuencia del movimiento relativo que tiene lugar entre la paja de caña y la pared del conducto. Continuando su desplazamiento, figura 2.2c, el émbolo ha alcanzado el punto en que la biomasa adquiere su máxima densidad y presión de compactación; $P = P_{max}$. Es este el momento, en que se hace inminente el movimiento de toda la masa densificada para el inicio de la expulsión, cuando el émbolo ejerciendo su máxima presión, vence la fuerza de fricción que se opone al movimiento y continúa su carrera con una ligera disminución de la presión hasta el final de la misma (Fig. 2.2d); $P < P_{max}$

Cuando el émbolo, a partir de su posición inicial, comienza su desplazamiento con un movimiento cuasiestático, los elementos iésimos que se encuentran más cercano a este, comienzan a reducir su espesor desde $\delta_i = \delta_0$ hasta δ .

Cuando el émbolo en su desplazamiento alcanza una posición definida por $(L - L_B)$ todos los elementos iésimos en que se dividió el primer tramo pasaron de un espesor δ_0 a otro δ y prolongaron la región que posee el espesor (δ), en el segundo tramo, en una magnitud L_B (Fig. 2.2.c); a pesar de que al émbolo le falta por recorrer esta magnitud L_B para finalizar su carrera. Esto se logra al movimiento cuasiestático del émbolo, la compresión y compresibilidad de la biomasa, el trabajo de las fuerzas elásticas y de fricción generadas en el proceso de densificación. Esta fase, se conoce como compactación de la sustancia. Esta magnitud L_B , tal como se muestra

²⁰ Sánchez Pérez, Y. (1993). *Diseño de briqueteadora hidráulica para producir briquetas tubulares*.

Trabajo de Diploma, Universidad de Cienfuegos.

en la Fig.2.2.c, representa la longitud de la briketa formada durante el proceso de densificación.

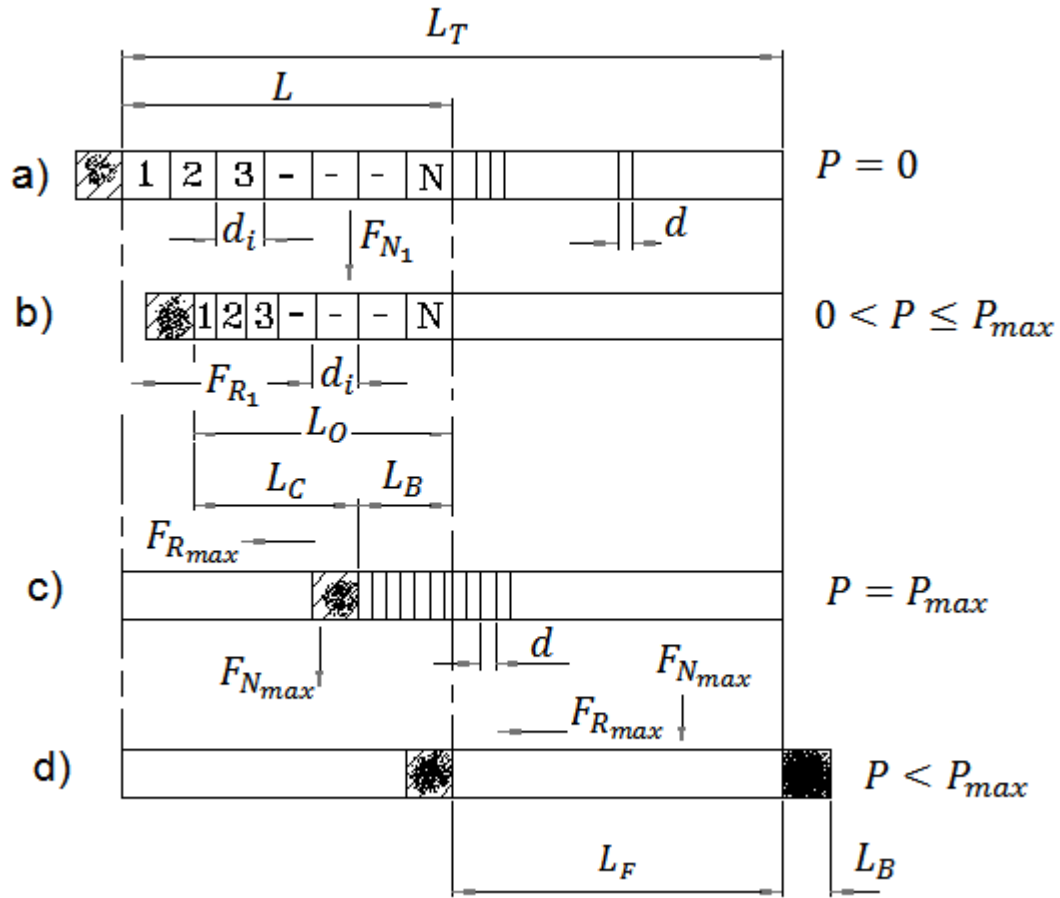


Figura 2.2 Fases del proceso de densificación de la biomasa

a. $P = 0$; b. $0 < P \leq P_{max}$; c. $P = P_{max}$; d. $P < P_{max}$

2.3 CARACTERÍSTICA DE LA BIOMASA EN EL PROCESO DE DENSIFICACIÓN

Los siguientes experimentos fueron realizados para determinar el comportamiento o características físicas de las biomasa con vista a la densificación, en la densificación y después de esta.

2.4 METODOLOGÍA PARA LA INVESTIGACIÓN

Con la finalidad de obtener un modelo matemático que se ajuste al comportamiento de la biomasa durante la densificación, se establecerá una metodología que garantice el desarrollo exitoso de la investigación y una mejor optimización durante la experimentación. Para ello se establecerá una serie de pasos y procedimientos que garantizarán la investigación.

2.4.1 Experimento para determinar la humedad de las biomosas

Teniendo en cuenta los resultados de otros trabajos se logró la optimización de la metodología de investigación, lo que permitirá ser más preciso durante la investigación.

Título: Determinación de la humedad de las biomosas.

Objetivo: Conocer que por ciento de humedad tiene la biomasa.

Tipo de biomasa: Paja de caña.

Condiciones iniciales de la biomasa:

En este caso solo interesa la humedad que presenta la paja de caña.

2.4.2 Técnica operatoria para determinar la humedad de la biomasa

- I. Pesar los crisoles con tapas en la balanza de 1g.
- II. Pesar los crisoles con las muestras, tomadas al azar del bulto.
- III. Introducir la muestra en la estufa, manteniendo la temperatura a 120 °C por espacio de dos horas.
- IV. Pasado dos horas extraer la muestra y colocarla en la campana de secado hasta su enfriamiento.
- V. Pesar en la balanza los crisoles con al muestras frías.
- VI. Determinar la diferencia de peso $\Delta m = m_i - m_f$
- VII. Introducir nuevamente en la estufa ambas muestras, durante 30 minutos.
- VIII. Finalizando el tiempo, extraer la muestra e introducirla en la campana de secado hasta su enfriamiento.
- IX. Pesar nuevamente los crisoles con la muestra, si el resultado no coincide con la anterior quiere decir que se evacuo toda al humedad y la misma se determina como:

$$H = \frac{m_i - m_f}{m_i} \cdot 100\% \quad (2.1)$$

Donde:

m_i Masa inicial

m_f Masa final expresada en gramos (g)

Instrumento de medición.

- I. Balance de precisión (1g).

Dispositivo utilizado.

- I. Estufa de secado.

Tabla 2.1 Resultados del experimento sobre la humedad en la biomasa.

Muestras	Masa inicial (m_i)				Masa final(m_f)				Humedad (%)
	1	2	3	Media	1	2	3	Media	
1	50	65,3	70,5	61,9	44	57,5	62,0	54,5	12
2	70,6	62,5	45,3	59,5	59,3	52,5	38,1	49,9	16
3	63,7	69,9	66,6	62,6	56,1	61,5	58,6	58,7	12
4	59,4	59,7	68,7	62,6	52,3	52,5	60,4	55,1	12

En los experimentos se utilizó la paja de caña con dos valores de densidad natural y la humedad, en ambos casos de 12 %.

2.4.3 Experimento para determinar la densidad natural de las biomosas

Título: Experimento para determinar la densidad natural de las biomosas.

Objetivo: Determinar la densidad inicial (natural) de paja de cana.

Tipo de biomasa: Paja de caña.

Condiciones iniciales de la biomasa: Se encuentra dentro de los parámetros recomendados (humedad, granulometría).

2.4.4 Técnica operatoria para determinar la densidad natural de las biomosas (paja de caña)

- I. Tomar las dimensiones del tubo.
- II. Colocar el tubo sobre la placa que sirve de base.
- III. Introducir la biomasa en el tubo sin presionar, hasta que esta alcance la altura H del tubo.
- IV. Tomar un recipiente, pesarlo en la balanza y tomar el valor de su masa (m_1).
- V. Descargar dentro del recipiente la biomasa ocupada en el tubo.
- VI. Pesar el recipiente cargado de biomasa, tomar este valor sumario de la masa ($m_t = m_1 + m_2$).
- VII. Determinar la diferencia de peso ($m_2 = m_t - m_1$)
- VIII. Determinar el volumen del tubo ($V = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot L$) en m^3 .

IX. Determinar la densidad natural de la biomasa ($\rho = \frac{m}{v}$) en kg/m^3

Donde:

m_2 Masa de la biomasa en (kg)

v Volumen del tubo en kg/m^3 .

Instrumento de medición

I. Balanza digital de precisión (0,1g).

Dispositivo utilizado

II. Tubo de acero.

Tab. 2.2 Resultado de la densidad natural (Paja de caña)

Muestras	Masa de la biomasa (Paja de caña)(kg)	Volumen del tubo m^3	Densidad natural (kg/m^3)	Densidad Promedio (kg/m^3)
1	0,138	0.001007531	23	24
2	0,136		25	
3	0,139		24	

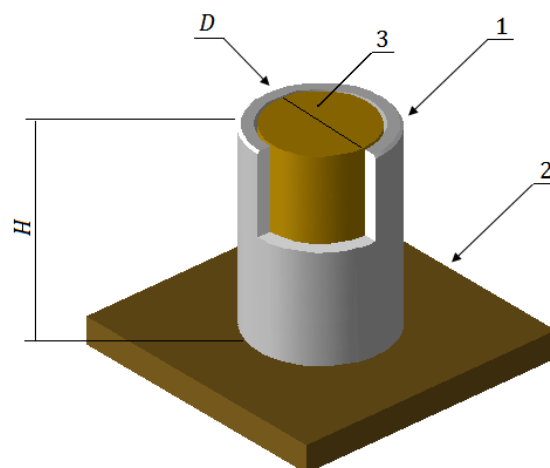


Fig. 2.3 Dispositivo para determinar la densidad natural de la biomasa

Tubo de acero de $D = 100$ mm y $H = 100$ mm; 2. Superficie de apoyo; 3. Biomasa.

2.4.5 Experimento para determinar el comportamiento de la densidad en un proceso uniaxial de deformación

2.4.5.1 Metodología para el experimento

Sustancia a densificar: Biomosas (Paja de caña con humedades de 12%). Para la medición de la humedad se utilizó la norma ASAE 5358.2 del 1995.

Parámetros a controlar: Presión.

Factores a medir: Densidad

El dispositivo para densificar biomosas (paja de caña), se muestra en la figura 2.4

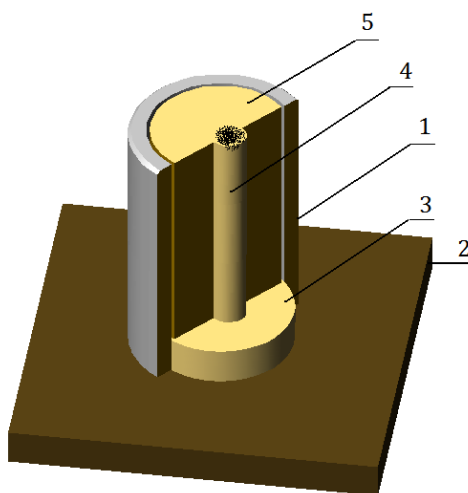


Fig.2.4 Dispositivo para densificar biomosas

1. Tubo de diámetro interior (70) mm, espesor 8mm y 100mm de longitud; 2. Placa metálica independiente; 3. Soporte del vástago; 4. Vástago; 5. Biomosas (paja de caña).

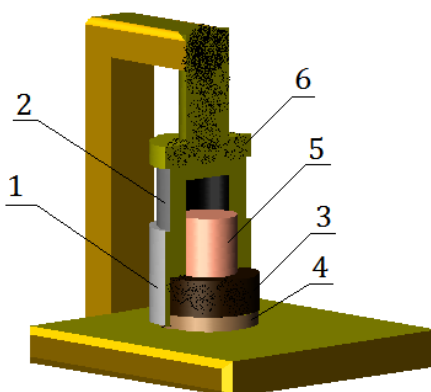


Fig. 2.5 Instalación experimental

1. Tubo de densificación de diámetro interior (70) mm y longitud 100
2. Embolo de densificación 3. Paja de caña 4. Soporte del vástago 5. Vástago para el conducto de la briqueta. 6. Husillo de la prensa

2.4.6 Descripción del experimento

El dispositivo de la figura 2.5, se apoya sobre una placa plana (siete) de más 25 mm de espesor, en una prensa hidráulica universal de un solo montante PG 302 B, (figura 2.5) con regulador de la presión y con émbolo tubular(4) colocado sobre la biomasa (3) y guiado por el vástago (5) que en su parte inferior presenta la dimensión deseada del conducto de la briqueta en una longitud que se corresponde aproximadamente con la posible longitud de la briqueta (Puede no existir el conducto en el experimento), en su parte superior es ligeramente inferior al diámetro del conducto de la briqueta, con vista a facilitar su extracción, en el dispositivo antes mencionado. Se midieron tres valores de la presión en el manómetro de la prensa, que fue convertida a presión sobre la biomasa, por la ecuación:

$$P_{briq} = \frac{P_{cil} \cdot D_{cil}^2}{D_{briq}^2 \cdot [1 - \left(\frac{d}{D_{briq}}\right)^2]} \quad (2.2)$$

Donde:

P_{briq} representa la presión sobre la biomasa, en MPa

P_{cil} la presión en el cilindro hidráulico de la prensa y registrada en el manómetro.

D_{briq} Diámetro exterior de la briqueta

d Diámetro del conducto de la briqueta

D_{cil} Diámetro interior del cilindro hidráulico

También se midió la longitud de la biomasa densificada en el interior del conducto para cada valor de la presión, todo lo cual hizo posible la determinación de la densidad para cada valor de la presión (2.5, 6, 10) MPa. Se realizaron 3 réplicas en cada medición.

Es importante señalar que para producir las briquetas cilíndricas en este tipo de instalación se hace imprescindible la utilización de varios dispositivos.

2.4.7 Máquinas y dispositivos utilizados

- I. Prensa hidráulica modelo PG 302 B universal
- II. Dispositivo para densificar (Fig. 2.7)

Instrumentos de medición

- I. Balanza digital -precisión 0,1 g.

II. Pie de Rey (precisión 0,05 mm).

Utilizando el procedimiento empleado para la definición del modelo de comportamiento de la densidad de la paja de caña sin preparación previa, con la presión de compactación; se procedió a la reducción de los experimentos a dos corridas experimentales, tal simplificación obedece al comportamiento lineal de la densidad de las biomosas respecto a la presión de compactación, en el rango de (0 a 10) MPa y a la coincidencia de los modelos lineales ($\rho_{(P)} = K.P + \rho_0$) con el modelo exponencial ($\rho_{(P)} = a - b.e^{-c.P}$) definido anteriormente, donde además son coincidentes los valores de la densidad $\rho_{(P)}$ cuando la variación de presión (P) es cero ($\rho_{(P)} = \rho_0$), que representa el intercepto del diagrama densidad – presión, para cualquiera de los dos modelos utilizados.

Partiendo de la ecuación de la recta que pasa por dos puntos coordenados de los correspondientes parámetros.

Se puede plantear.

$$\frac{\rho - \rho_1}{P - P_1} = \frac{\rho_2 - \rho_1}{P_2 - P_1} \quad (2.3)$$

Donde:

ρ_2 y ρ_1 - Representan las densidades medias determinadas para dos valores de la presión entre (0 – 10) MPa [kg/m^3]

P_2 y P_1 - Valores de las presiones correspondientes [MPa].

$$\rho_{(P)} = \left(\frac{\rho_2 - \rho_1}{P_2 - P_1} \right) . P + \left[\rho_1 - \left(\frac{\rho_2 - \rho_1}{P_2 - P_1} \right) . P_1 \right] \quad (2.4)$$

$$\rho_{(P)} = m . P + \rho_0$$

Donde:

$$m = \frac{\rho_2 - \rho_1}{P_2 - P_1} \quad (2.5)$$

$$\rho_0 = \rho_1 - m . P_1 \quad (2.6)$$

En el modelo exponencial

$$\rho_{(P)} = a - b . e^{-c.P} \quad (2.7)$$

Se definió: $\rho_0 = a - b$

Donde: a - Representa el límite máximo de la densidad de las biomosas.

La literatura considera:

$a = 1750 \text{ kg/m}^3$ para presiones hasta 200 MPa.

$b \dots \dots \dots$ Intervalo de definición de función exponencial (kg/m^3)

Si se utiliza en la definición de los modelos Físicos – Matemáticos de cualquier biomasa, el valor del límite máximo de la densidad que sugiere la literatura científica ; ($a = 1750 \text{ kg/m}^3$) y el valor de (ρ_0) definido por el modelo lineal, determinado según el experimento con dos presiones diferentes entre (0 – 10) MPa; ello permite determinar la constante dimensional (b) del modelo exponencial para cualquier biomasa, en las condiciones del experimento mostrado, si las dimensiones difieren de los experimentos, es necesario introducir un factor de cambio de dimensiones ($\psi = \frac{A_0}{A_x}$, A_0 sección transversal de la briqueta del experimento, sección transversal

De la briqueta deseada.

$$b = a - \rho_0 \dots \dots \dots \text{kg/m}^3 \quad (2.8)$$

Además la constante dimensional (c)

$$c = \frac{\ln\left(\frac{b}{a - \rho_1}\right)}{P_1} \dots \dots \dots \text{MPa}^{-1} \quad (2.9)$$

Para las condiciones de la sección transversal de las briquetas, diferentes a los experimentos.

$$b' = a - \psi \cdot \rho_0 \dots \dots \dots \text{kg/m}^3 \quad (2.10)$$

$$c' = \psi \cdot c$$

Los valores de las constantes dimensionales (a, b, c) para las biomosas satisfacen el modelo exponencial ($\rho_{(P)} = a - b \cdot e^{-c \cdot P}$).

2.5 ALGORITMO PARA LAS DIMENSIONES GEOMÉTRICAS DE LA CÁMARA DE ALIMENTACIÓN, NÚMERO DE CICLOS, NÚMERO DE ÉTAPAS REQUERIDO, SEGÚN LA CAPACIDAD DE PRODUCCIÓN

El siguiente algoritmo describe una metodología para el diseño (dimensionamiento) de las partes fundamentales de una briqueteadora hidráulica para producir briquetas multitubulares de biomosas.

2.5.1 Determinación de la masa potencial barrida en briqueteadoras hidráulicas

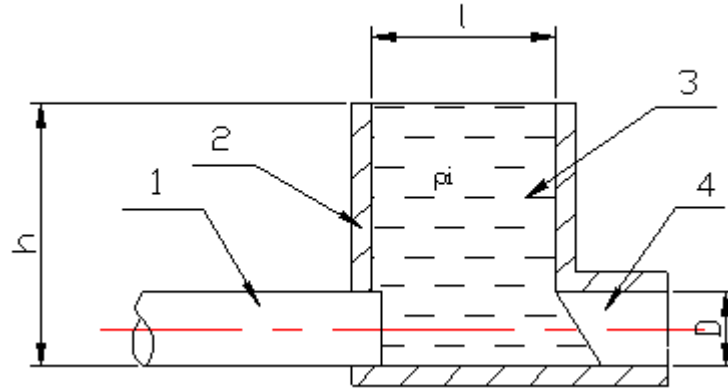


Fig. 2.6 Dispositivo que representa una briqueteadora de una sola etapa de densificación

1. Embolo cilíndrico 2. Tolva; 3. Biomasa (ρ_i) 4. Tubo de briquetado

De forma general la masa barrida para formar una briqueta a una presión conocida para cualquier cantidad de etapas de una briqueteadora hidráulica puede ser expresada como:

$$m_{briq}^{etapa} = \rho_i \cdot A_{disp} \cdot l_{ven}$$

Donde:

ρ_i Densidad natural de la briqueta (kg/m^3)

A_{disp} Área de la sección transversal del dispositivo de alimentación (mm^2).

l_{ven} Longitud de la ventana de alimentación (mm).

2.5.2 Briqueteadoras hidráulicas de una etapa densificación (fig. 2.6)

El área de una briqueta tubular ($A_{briq\ tub}^{una\ eta}$) de una etapa de alimentación puede ser expresado como:

Área transversal de una briqueta tubular ($A_{briq\ tub}^{una\ eta}$) de una etapa

$$A_{briq\ tub}^{una\ eta} = \frac{\pi \cdot D_{disp}^2}{4} (1 - \gamma^2)$$

Siendo:

$$\gamma = \frac{d}{D_{disp}}$$

Donde:

d Diámetro interior de la briqueta (mm)

Área transversal de una briqueta maciza (A_{briq}^{mac}) de una etapa

$$A_{briq}^{una\ eta\ mac} = \frac{\pi \cdot D^2}{4}$$

La masa de briquetas macizas ($m_{briq}^{una\ eta\ mac}$) y tubulares ($m_{briq}^{una\ eta\ tub}$) para un proceso de una etapa de densificación se calcula por las siguientes ecuaciones:

Masa de una briqueta tubular ($m_{briq}^{una\ eta\ tub}$) de una etapa

$$m_{briq}^{una\ eta\ tub} = 785 \cdot 10^{-6} \cdot D_{dis}^2 (1 - \gamma^2) \cdot l_{ven} \cdot \rho_i \dots \dots \dots kg$$

Masa de una briqueta maciza ($m_{briq}^{una\ eta\ mac}$) de una etapa

$$m_{briq}^{una\ eta\ mac} = 785 \cdot 10^{-6} \cdot D_{dis}^2 \cdot l_{ven} \cdot \rho_i \dots \dots \dots kg$$

2.5.3 Briqueteadora hidráulica de dos etapas densificación (fig. 2.7)

El área de una briqueta tubular y maciza de una briqueteadora hidráulica de dos etapas de alimentación se calcula por la siguiente formula:

Área transversal de una briqueta tubular ($A_{briq}^{dos\ eta\ tub}$) de dos etapas

$$A_{briq}^{dos\ eta\ tub} = \frac{\pi \cdot (D_{disp} - l_{car})}{2} \dots \dots \dots m^2$$

Área transversal de una briqueta maciza ($A_{briq}^{dos\ eta\ mac}$) de dos etapas

$$A_{briq}^{dos\ eta\ mac} = \frac{\pi \cdot D_{disp} \cdot l_{car}}{2} \dots \dots \dots m^2$$

Donde:

l_{car} Longitud de la carrera del carro alimentador (mm)

Masa de una briqueta tubular ($m_{briq\ tub}^{dos\ eta}$) de dos etapas

$$m_{briq\ tub}^{dos\ eta} = \frac{\pi \cdot D_{disp} \cdot l_{car} \cdot B_{car} \cdot \rho_i}{2} \dots \dots \dots kg$$

Donde:

$B \dots \dots \dots$ Ancho del carro de alimentación (mm)

Masa de una briqueta maciza ($m_{briq\ mac}^{dos\ eta}$) de dos etapas

$$m_{briq\ mac}^{dos\ eta} = 1,57 \cdot 10^{-9} \cdot D_{disp} \cdot l_{car} \cdot \rho_i \dots \dots \dots kg$$

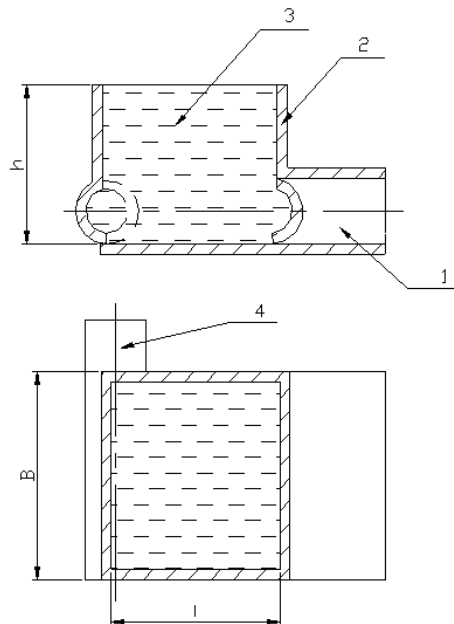


Fig. 2.7 Dispositivo que representa una briqueteadora de dos etapas de densificación

Carro de alimentación; 2. Tolva; 3. Biomasa (ρ_i); 4. Tubo de briqueteado.

2.5.4 Briqueteadoras hidráulicas de tres etapas densificación (fig. 2.8)

En este particular se analiza la masa contenida en el volumen de la primera etapa de alimentación.

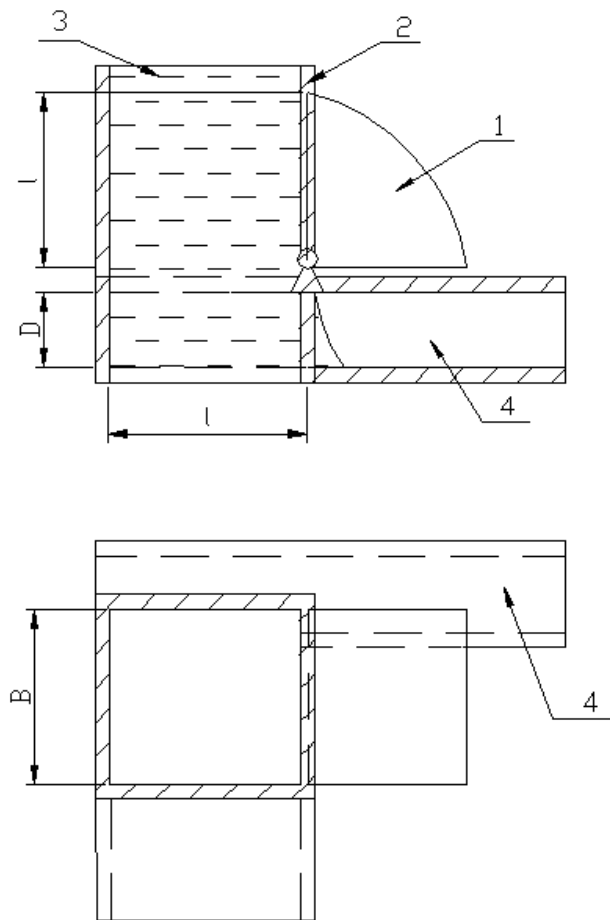


Fig. 2.8 Dispositivo que representa una briquetadora de tres etapas de densificación

1. Dispositivo alimentador basculante 2. Tolva 3. Biomasa; 4. Tubo de briquetado.

Área transversal de una briqueta maciza ($A_{briq\ mac}^{tres\ eta}$) de tres etapas

$$A_{briq\ mac}^{tres\ eta} = l_{car} \cdot B_{car} \dots \dots m^2$$

Volumen de una briqueta maciza ($V_{briq\ mac}^{tres\ eta}$) de tres etapas

$$V_{briq\ mac}^{tres\ eta} = l_{car} \cdot B_{car} \cdot (D_{disp} + B_{car}) \cdot 10^{-9} \dots \dots m^3$$

Masa de una briqueta maciza ($m_{briq\ tub}^{tres\ eta}$) de tres etapas

$$m_{briq\ mac}^{tres\ eta} = \rho_i \cdot V_{briq\ mac}^{tres\ eta} \dots \dots kg$$

$$m_{briq\ mac}^{tres\ eta} = \rho_i \cdot l_{car} \cdot B_{car} \cdot (D_{disp} + l_{car}) \dots \dots kg$$

2.6 CAPACIDAD DE PRODUCCIÓN (C_T) REAL DE BRIQUETEADORAS HIDRÁULICAS

La capacidad real de producción de una briqueteadora depende de la masa real barrida en la unidad de tiempo (m_b), del número de ciclos (n), y del número de briquetas por ciclo (z).

2.6.1 Capacidad de producción en briqueteadora hidráulica de una etapa de densificación

La capacidad de producción se determina por la siguiente ecuación:

$$C_{T1} = 60 \cdot n \cdot z \cdot \frac{D_x^2}{9025} (a_2 - b_2 \cdot e^{-c_2} [0,00709(1 - \gamma_x^2) \cdot l]) \cdot 10^{-3} \dots \dots \dots kg/h$$

Donde:

$z \dots \dots \dots$ Numero de briquetas por ciclo.

$$a_2 = -626,30 + 255,97 \cdot \ln \rho_i$$

$$b_2 = 229,22 \cdot \ln(\rho_i) - 556,7$$

$$c_2 = 0,033965 + 0,001778 \cdot \rho_i - 3,489 \cdot 10^{-6} \cdot \rho_i^2$$

2.6.2 Capacidad de producción en briqueteadora hidráulica de dos etapas de densificación

$$C_{T2} = 60 \cdot n \cdot z \cdot \frac{D_x \cdot l}{23750} (a_2 - b_2 \cdot e^{-c_2} [0,0746(1 - \gamma_x) \cdot 400]) \cdot 10^{-3} \dots \dots \dots kg/h$$

Donde:

$l \dots \dots \dots$ Carrera efectiva del carro de la última etapa de compactación o longitud axial de la base de la tolva (mm).

2.6.3 Capacidad de producción en briqueteadora hidráulica de tres etapas de densificación

$$C_{T3} = 60 \cdot \rho_i \cdot L \cdot B \cdot (D_{briq} + L) \cdot 10^{-9} \cdot n \cdot z \dots \dots \dots kg/h$$

Donde:

$L \dots \dots \dots$ Longitud de la carrera de la última etapa (tercera) (mm)

$B \dots \dots \dots$ Longitud del desplazamiento de la segunda etapa (mm)

D_{briq} Diámetro de la briqueta (mm)

2.6.4 Simulación experimental²¹

Una simulación experimental tomando como base las ecuaciones (2.11) y (2.12), resultado de los experimentos obtenidos, que:

Para briqueteadora hidráulicas de una etapa de densificación

$$m_{briq} = \frac{D_x^2}{9025} \cdot (a_2 - b_2 \cdot e^{-c_2} [0,00709(1 - \gamma_x^2) \cdot l]) \cdot 10^{-3} \dots \dots kg \quad 2.11$$

Para briqueteadora hidráulicas de dos etapas de densificación

$$m_{briq} = \frac{D_x \cdot l}{23750} (a_2 - b_2 \cdot e^{-c_2} [0,0746(1 - \gamma_x) \cdot 400]) \cdot 10^{-3} \dots \dots kg/h \quad 2.12$$

Considerando y evaluando en (2.16) y (2.17) la influencia de los parámetros independientes, diámetro exterior de la briqueta (D), diámetro del conducto de la misma (d), longitud de alimentación efectiva (L), la densidad natural de la biomasa (ρ_i), y el numero de etapas (et) y utilizando un diseño factorial completo 3^4 . 2.2 con un total de 324 simulaciones experimentales.

Donde:

$$d = (0:80) \text{ mm}; \quad L = (100:600) \text{ mm}; \quad \rho_i = (25:250) \text{ kg/m}^3; \quad et = (1:2); \\ D = (50:100) \text{ mm}$$

Se obtuvieron los resultados correspondientes que se organizaron en las matrices factoriales.

Los Resultados del diseño factorial precedente, fueron procesados con el programa "stat-graph" y se obtuvo la siguiente ecuación de correlación que constituye un modelo matemático, que satisface los parámetros anteriores en sus respectivos rangos de variación.

$$m_{briq} = 1,53 - 0,0078 \cdot D_{briq} - 0,0068 \cdot \rho_i - 0,74 \cdot et - 0,0039 \cdot L \\ + 0,000015 \cdot D_{briq} \cdot L + 0,000038 \cdot D_{briq} \cdot \rho_i + 0,0028 \cdot D_{briq} \cdot et \\ + 0,0000078 \cdot L \cdot \rho_i + 0,0018 \cdot L \cdot et + 0,0025 \cdot \rho_i \cdot et \quad (2.13)$$

Donde:

²¹ Ing. Dwight Abu, P. (2008). *Metodología del diseño de una maquina briqueteadora flexible multipropósito*.

$$R^2 = 92 \%$$

$$E = 0,19$$

Esta correlación asegura un acercamiento rápido a los parámetros que son importantes en el diseño geométrico de la briqueteadora hidráulica, partiendo de la ecuación de capacidad de producción deseada.

$$C_T = 60 \cdot n \cdot z \cdot m_b \dots \dots \dots kg/h$$

2.7 CALCULO ENERGÉTICO FUNDAMENTALES PARA LA SELECCIÓN DE LOS COMPONENTES DEL SISTEMA HIDRÁULICO A PARTIR DE LOS MAGNITUDES DESEADAS²²

Si se asume la capacidad de producción (C_T en kg/h) de una briqueteadora (de cualquier cantidad de etapas), el número de ciclos (N_c) por minuto de trabajo se determina por la siguiente ecuación:

$$N_c = \frac{C_T}{60 \cdot Z_{tubos} \cdot m_{briq}} \dots \dots \dots min^{-1} \quad (2.14)$$

Donde:

Z_{tubos} Número de tubos de briqueteado.

m_{briq} Masa media de una briqueta en kg .

Si se conoce Z_{tubos} , m_{briq} , ρ_o y ρ_f : estaremos en condiciones para definir las dimensiones geométricas de la tolva de recepción inicial de la biomasa, la necesidad de dos o más etapas de alimentación-compactación y la magnitud de las carreras de los cilindros utilizados.

La presión axial máxima necesaria sobre la briqueta se determina a partir de la densidad final deseada utilizando el modelo teórico experimental de Fundora. P. ^[5]

Sabemos:

$$(\rho_f = a - b \cdot e^{-c \cdot P_{briq}})$$

Entonces:

²² Dr. Fundora Beltrán, P. (2002). *Estudio de la densificación de la paja de caña sin preparación previa con tecnología hidráulica para el perfeccionamiento de su proceso tecnológico*. Tesis. Para optar para el grado científico de Máster en Ciencias Técnicas. Cienfuegos, Universidad de Cienfuegos.

$$P_{briq}^{max} = \frac{1}{c} \cdot \ln \left(\frac{b}{\left(a - \frac{\rho_f}{\xi}\right)} \right) \dots \dots \dots MPa \quad (2.15)$$

Donde:

La índice de retracción medio (ξ) = 0,7 – 0,85

2.7.1 Calculo teórico del trabajo en los distintos procesos en la formación de la briqueta (W_E)²³

La última etapa de densificación de una briqueteadora hidráulica determina los mayores gastos de energía y presión hidráulica. Si el accionamiento de las diferentes etapas se hace en serie, todo el flujo del aceite hidráulico disponible por la máquina se aplica en esta etapa. Se podría determinar entonces la potencia media del ciclo, a partir de considerar la energía real gastada (W_r) en esta etapa (final).

$$W_r = \frac{W_T}{\eta_m \cdot \eta_v} \dots \dots \dots MJ/kg \quad (2.16)$$

Donde:

W_T La energía teórica en la etapa final.

$$W_T = W'_c + W_{FR} + W_E$$

El trabajo de compactación (W'_c)

$$W'_c = \frac{1}{a \cdot c} \ln \left(\frac{a \cdot e^{c \cdot P} - b}{a - b} \right) - \frac{P}{a - b \cdot e^{c \cdot P}} \dots \dots \dots MJ/kg$$

El trabajo fricción en la sección anular del tubo de compactación (W_{FR})

$$W_{FR} = \frac{\mu \cdot Per_{briq} \cdot \lambda \cdot L_0}{4 \cdot A_{tubo}} \cdot Q_{(P)} \dots \dots \dots MJ/kg$$

$$Q_{(P)} = \left\{ \left[\frac{P \cdot (a - b)}{(a - b \cdot e^{-c \cdot P})^2} + \frac{b \cdot (1 - e^{-c \cdot P})}{a \cdot c \cdot (a - b \cdot e^{-c \cdot P})} + \frac{a - b}{a^2 \cdot c} \cdot \ln \left(\frac{a \cdot e^{-c \cdot P} - b}{a - b} \right) \right] \right\}$$

²³ Dr. Fundora Beltrán, P. (2002). *Estudio de la densificación de la paja de caña sin preparación previa con tecnología hidráulica para el perfeccionamiento de su proceso tecnológico*. Tesis. Para optar para el grado científico de Máster en Ciencias Técnicas. Cienfuegos, Universidad de Cienfuegos.

El trabajo de expulsión (W_E)

$$W_E = \frac{2 \cdot \mu \cdot \lambda \cdot P}{D - d} \cdot \left(\frac{2 \cdot L_{briq}}{a - b} + \frac{L_0}{a - b \cdot e^{-c \cdot P}} \right)$$

Donde:

Per_{briq} Perímetro de la briqueta

L_{briq} Longitud de la briqueta.

$Q_{(P)}$ Presión (MPa) aplicada a la briqueta.

L_0 Longitud constante del tubo de briqueteado, con briquetas de otros ciclos,

μ Coeficiente de fricción de la biomasa con el conducto.

λ Relación de presiones normal a la axial.

La potencia media del ciclo:

$$Pot_{med} = \frac{999,97 \cdot W_r \cdot Z_{tubos} \cdot m_{briq}}{T_u} \dots \dots \dots MPa \quad (2.17)$$

Donde:

$$T_u = (0,45 - 0,85)T \dots \dots \dots s \quad (2.18)$$

T El tiempo para completar un ciclo de trabajo.

$$T = \frac{60}{N_c} \dots \dots \dots s \quad (2.19)$$

La presión máxima en los cilindros de la última etapa de densificación es:

$$P_{cil} = \frac{Z_{tubos} \cdot A_{briq} \cdot P_{briq}^{max}}{N_{cil} \cdot A_{cil}} \dots \dots \dots MPa \quad (2.20)$$

Donde:

P_{briq}^{max} Presion máxima sobre la briqueta (MPa).

A_{briq} Area de la sección transversal de la briqueta (mm^2).

N_{cil} Numero de cilindros en la etapa final.

A_{cil} Area de sección transversal del cilindro hidráulico (mm^2).

El área del cilindro (A_{cil}) necesario es:

$$A_{cil} \geq \frac{Z_{tubos} \cdot A_{briq} \cdot P_{briq}^{max}}{N_{cil} \cdot P_{cil}} \dots \dots \dots mm^2 \quad (2.21)$$

Donde:

$$A_{briq} = \frac{D_{briq}^2}{4} \left(1 - z \cdot \left(\frac{d_{hueco}}{D_{briq}} \right)^2 \right) \dots \dots \dots mm^2 \quad (2.22)$$

Si el tiempo del vacío de la última etapa es la suma del tiempo de trabajo (T_t), y de vacío (T_v).

$$\Rightarrow T_u = T_t + T_v \dots \dots \dots s \quad (2.23)$$

$$\frac{T_v}{T_t} = \gamma = 0,60 - 0,85$$

Despejando T_v , tenemos:

$$T_v = \gamma \cdot T_t \dots \dots \dots s$$

Sustituyendo T_v en la ecuación 2.22 da:

$$T_t = \frac{T_u}{1 + \gamma} \dots \dots \dots s \quad (2.24)$$

Asumiendo la carrera H (en mm), de los cilindros de la última etapa, se determina la velocidad de trabajo como:

$$V_T = \frac{H}{T_t} \dots \dots \dots m/s \quad (2.25)$$

2.7.2 Calculo del flujo (Q_c) necesario en los cilíndricos hidráulicos

$$Q_c = 60\,000 \cdot V_T \cdot A_{cil} \dots \dots \dots cm^3/s \quad (2.26)$$

2.7.3 Selección de la bomba hidráulica

Para la elección de la bomba hidráulica se toma en consideración los siguientes parámetros:

Presión máxima alcanzable de la bomba (P_{max}^{bom}).

$$P_{max}^{bom} \geq \frac{Z_{tubos} \cdot A_{briq} \cdot P_{cil}}{N_{cil} \cdot A_{cil}} \dots \dots \dots MPa \quad (2.27)$$

Desplazamiento geométrico de la bomba (q_{bomba}).

$$q_{bomba} = \frac{1000 \cdot Q_c}{n_{bom} \cdot \eta_v} \dots \dots \dots cm^3/rev \quad (2.28)$$

Donde:

n_{bom} ... r.p.m de la bomba

Q_c ... Flujo volumétrico de la bomba (l/min)

Potencia media necesaria de la bomba (Pot_{med}^{bom}).

$$Pot_{med}^{bom} = \frac{999,97 \cdot W_r \cdot Z_{tubos} \cdot m_{briq}}{T_u} \dots \dots kW \quad (2.28)$$

Donde:

$$W_r = \frac{W_T}{\eta_m \cdot \eta_v} \dots \dots MJ/kg$$

Potencia máxima necesaria de la bomba (Pot_{max}^{bom}).

$$Pot_{max}^{bom} = \frac{q_{bomba} \cdot n \cdot P_{cil}}{60\,000 \cdot \eta_v \cdot \eta_{mec}} \dots \dots kW \quad (2.29)$$

2.7.4 Selección del motor

La selección del motor se toma en consideración a los valores de la potencia media y máxima de la bomba y se asume según la posibilidad de admitir sobrecarga instantánea superior al 50% de la potencia nominal.

$$Pot_{med}^{bom} < Pot_{mot} < Pot_{max}^{bom} \quad (2.30)$$

La velocidad del motor se corresponde con la velocidad de giro de la bomba pero se acepta $\pm 5\%$ de la diferencia respecto a la segunda.

$$n_{mot} = n_{bom} \pm 5\% \dots \dots rev/min \quad (2.31)$$

2.7.5 Las magnitudes geométricas de las briquetas multitubulares²⁴

La figura 2.9 representa un corte transversal de una briketa cilíndrica multitubular de biomasa, donde se distinguen las dimensiones geométricas, diámetro exterior de la briketa (D_{briq}), diámetros de los conductos (d_{hueco}), diámetro del conducto central (d_1), espesor entre los conductos, en la dirección radial y circunferencial ($2 \cdot \delta_{briq}$) y espesor de los conductos más alejados del centro de la briketa con su límite exterior (δ).

²⁴ Barriando, E. Dispositivo para producir briquetas cilíndricas tubulares de paja de caña de diferentes dimensiones./ E: Barriando; Fundora, P; Tutor. --Trabajo de Diploma. UCF (Cf), 2000.-52h.

Las briquetas tubulares y multitubulares presentan la dificultad de tener menor resistencia mecánica que sus similares macizas, por lo que es importante limitar las magnitudes de los diámetros de los conductos, su número z (en la multitubulares) y el espesor $\delta = (D_{briq} - d_{hueco})/2$ briqueta de múltiples conductos debe asegurar un espesor con el diámetro exterior (δ) inferior a (20 mm) que en briquetas tubulares de pequeño diámetro exterior $50 \leq D_{briq}^{tub} < 100$ mm se asegura con un solo conducto, sin embargo la garantía de este espesor puede afectar la resistencia mecánica de la briqueta. Es por ello que para diámetros iguales o superiores a 100 mm se recomiendan las briquetas tubulares de múltiples orificios con la condición que el diámetro de los conductos sea igual o superior al mínimo necesario $d \geq d_{min} = 100$ mm y en un número (Z) determinado, que aseguren adecuada distribución en la sección transversal de la briqueta y un espesor alrededor de los conductos inferior a 20 mm como si se tratara de un conjunto de briquetas tubulares inscritas dentro del perímetro de la circunferencia exterior de la briqueta multitubular de diámetro exterior (D_{briq}). Una distribución equidistante entre los conductos donde los espesores (δ_{briq}) son iguales en todas las direcciones con un número de conductos (Z) elevados y pequeños diámetros (d_{hueco}) es muy favorable desde el punto de vista de los índices de combustión, según reportes internacionales. No obstante presenta la dificultad tecnológica de producir las briquetas de forma productiva. Se demostrará, en el desarrollo del trabajo, que la distribución de los conductos según la consideración anterior resulta apropiada y no existen diferencias significativas en cuanto los índices de combustión, además de su factibilidad tecnológica.

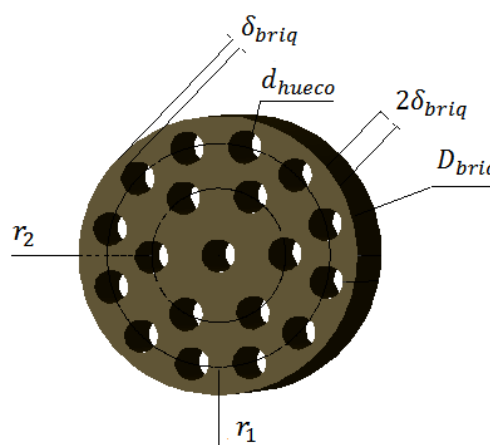


Fig. 2.9 Briketa cilíndrica multitubular de biomasa

El diámetro de la briqueta multitubular es una función del diámetro de los conductos, del espesor equivalente a una briqueta tubular (δ_{briq}) y del número de ubicación respecto al conducto central (n).

$$D_{briq} \geq 2n(d_{hueco} + 2\delta_{briq}) + (d_{hueco} + 2\delta_{briq}) \dots \dots \dots mm \quad (2.32)$$

$$D_{briq} \geq (d_{hueco} + 2\delta_{briq})(2n + 1) \dots \dots \dots mm$$

Donde:

d_{hueco} Diámetro del conducto (mm) de la briqueta.

δ_{briq} Espesor para una briqueta (mm) o alrededor de cada conducto.

n Número natural (1, 2, 3,... ubicaciones de los conductos respecto al conducto central).

Sí se dan las dimensiones d_{hueco} , δ_{briq} y n se determina el diámetro de la briqueta multitubular correspondiente.

Sí se conoce el diámetro (D_{briq}) de la briqueta multitubular, conviene determinar el número natural (n) de ubicaciones de los conductos así como el número de conductos por ubicaciones, para ello se debe asumir el diámetro de los conductos (d_{hueco}) y el espesor (δ_{briq}).

$$n = \frac{D_{briq} - (d_{hueco} + 2\delta_{briq})}{2(d_{hueco} + 2\delta_{briq})} \quad (2.33)$$

$$Z_{n-1} = \frac{2\pi \cdot R_n}{h} \quad (2.34)$$

Donde:

R_n Radio de las circunferencias de ubicaciones de los conductos (mm)

h Paso entre los conductos.

$$R_n = n(d_{hueco} + 2\delta_{briq})h = d_{hueco} + 2\delta_{briq} \quad (2.35)$$

$$Z_{n-1} = 2\pi \cdot n$$

Tanto n como Z_{n-1} deben ser redondeadas al inmediato inferior independientemente del resultado.

El número total de conductos (Z_{total}).

$$Z_{total} = \sum_{n=1}^n Z_{n-1} + 1 \quad (2.36)$$

Al redondear n y los diferentes números de conductos (Z_{n-1}) se debe recalcular el espesor.

$$\delta_{briq} = \frac{2 \cdot \pi \cdot R_n - Z_{n-1} \cdot d_{hueco}}{2(\pi + Z_{n-1})} \quad (2.37)$$

La ubicación más exacta de los conductos (Z_{n-1}) se garantiza cuando se determina el ángulo entre dos conductos.

$$\beta_{(n-1)} = \frac{2\pi}{Z_{(n-1)}} \dots \dots \dots rad \quad (2.38)$$

$$\theta = \frac{360}{Z_{(n-1)}} \dots \dots \dots ^\circ \quad (2.39)$$

2.8 CÁLCULO TEÓRICO DE LA RESISTENCIA MECÁNICA DE LOS COMPONENTES FUNDAMENTALES DE LA BRIQUETEADORA

2.8.1 Teoría del cálculo de la resistencia mecánica de los soportes de los cilindros hidráulicos de la última etapa de densificación

Primero, es necesario saber el valor máximo de la fuerza que ejerce el cilindro, la cual se determina por la siguiente ecuación:

$$F_{cil} = P_{cil} \cdot A_{cil} \dots \dots \dots kN$$

El cálculo de la fuerza normal que actúa sobre los tornillos y los tensores se realiza considerando que el soporte de los cilindros, al actuar ambos tenderá a pivotar respecto al punto A, como se muestra en la figura 2.2.

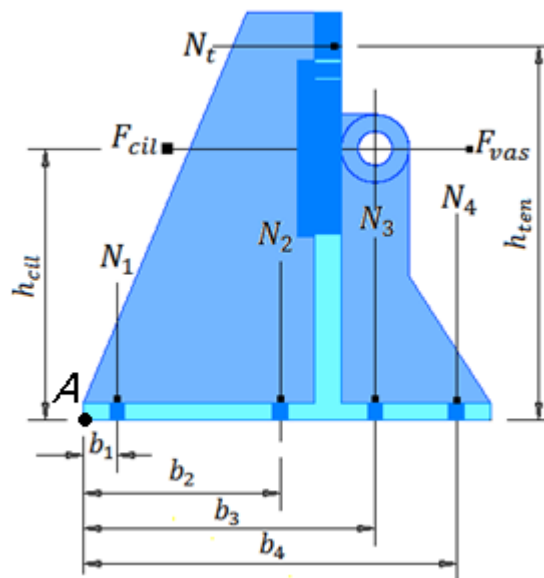


Figura 2.10 Esquema de deformación del soporte de los cilindros principales con un vástago y dos tensores colocados

Haciendo uso de las ecuaciones de equilibrio, se hace una sumatoria de momento respecto al punto A, eliminando la posible acción de las reacciones que puedan aparecer en dicho lugar.

$$\sum M_A = 0.$$

$$N_1 \cdot b_1 + N_2 \cdot b_2 + \dots + N_t \cdot h_{ten} - F_{cil} \cdot h_{cil} + F_{vas} \cdot h_{vas} = 0 \quad (2.40)$$

Como se puede ver se tiene una ecuación y cinco incógnitas, siendo el sistema hiperestático. Para su solución utilizaremos el método de las deformaciones, hallando la relación entre estas y transformándolas en ecuaciones de fuerza a través de la ley de Hooke, la cual plantea que:

$$\Delta L = \frac{N \cdot L}{A_{tor} \cdot E} \quad (2.41)$$

Donde:

N Fuerza normal sobre cada tornillo (kN)

L Longitud del elemento (tornillo) (cm)

E Modulo de elasticidad del material (kN/cm^2)

A_{tor} Área de la sección transversal del tornillo (cm^2).

De la figura 2.2 se obtiene que:

$$\frac{\Delta L_1}{b_1} = \frac{\Delta L_2}{b_2}$$

$$\frac{\Delta L_1}{b_1} = \frac{\Delta L_3}{b_3}$$

$$\frac{\Delta L_1}{b_1} = \frac{\Delta L_4}{b_4}$$

$$\frac{\Delta L_1}{b_1} = \frac{\Delta L_{ten}}{h_{ten}}$$

Si los diámetros de los tornillos y el modulo de elasticidad de la material son iguales se cumple que:

$$E_1 = E_2 = E_3 = E_4 = E_t$$

$$A_{tor1} = A_{tor2} = A_{tor3} = A_{tor4} = \frac{\pi \cdot d^2}{4}$$

Por lo tanto se obtiene que:

$$\frac{N_1 \cdot L_1}{E_1 \cdot A_{tor1}} = \frac{b_1 \cdot N_2 \cdot L_2}{b_2 \cdot A_{tor2} \cdot E_2}$$

$$N_2 = \frac{b_2 \cdot N_1}{b_1}$$

$$\frac{N_1 \cdot L_1}{E_1 \cdot A_{tor1}} = \frac{b_1 \cdot N_3 \cdot L_3}{b_3 \cdot A_{tor3} \cdot E_3}$$

$$N_3 = \frac{b_3 \cdot N_1}{b_1}$$

$$\frac{N_1 \cdot L_1}{E_1 \cdot A_{tor1}} = \frac{b_1 \cdot N_4 \cdot L_4}{b_4 \cdot A_{tor4} \cdot E_4}$$

$$N_4 = \frac{b_4 \cdot N_1}{b_1}$$

$$\frac{N_1 \cdot L_1}{E_1 \cdot A_{tor1}} = \frac{b_1 \cdot N_T \cdot L_T}{h_2 \cdot A_{Tor} \cdot E_T}$$

$$N_T = \frac{A_T \cdot h_2 \cdot L_{Tor}}{b_1 \cdot A_{Tor} \cdot L_{ten}} \cdot N_1 \quad (2.42)$$

Se determina la fuerza de cortante (Q) por la ecuación de equilibrio:

$$\sum F_x = 0 \dots \dots kN \quad (2.43)$$

El soporte de los cilindros principales está más cargado que el soporte de los tubos del briqueteado (esta afirmación se ha comprobado en varias máquinas diseñadas anteriormente. Los tornillos están sometidos a un estado tensión combinado, pues soportan una fuerza normal (N) y un cortante (Q).

La tensión normal será hallada por la siguiente ecuación:

$$\sigma_N = \frac{N_{eq}}{A_{tor}} = \frac{4 \cdot N_{eq}}{\pi \cdot d^2} \dots \dots kN/cm^2 \quad (2.44)$$

Donde:

$A_{tor} \dots \dots$ Área del tornillo a nivel de la raíz de la rosca. (cm).

$d \dots \dots$ Diámetro de la raíz de la rosca. (cm).

Por lo tanto:

La tensión tangencial provocada por la fuerza transversal Q se puede calcular por:

$$\tau = \frac{Q}{A_{tor}} \dots \dots kN/cm^2 \quad (2.45)$$

Donde:

Q Fuerza transversal (kN)

La tensión permisible para tornillos del acero al carbono puede ser calculada por:

$$[\sigma] = 0,4. \sigma_u \dots \dots \dots kN/cm^2 \quad (2.46)$$

Por la cuarta teoría de resistencia:

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma^2 + 3. \tau^2} \leq [\sigma] \dots \dots \dots kN/cm^2 \quad (2.47)$$

Si $\sigma_{eq} \leq [\sigma]$ el diseño esta bien, si el valor es más grande tiene que poner más tornillo en la zona de mayor tensión y recomprobar el cálculo.

2.8.2 Teoría del cálculo del espesor (δ_{tubo}) del tubo de compactación

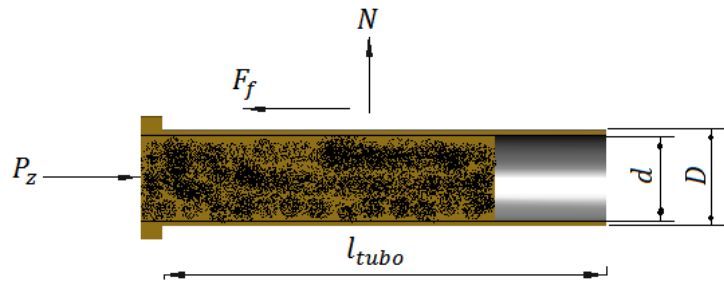


Fig.2.11 Tubo de briqueteado.

Consideramos un tubo empotrado por su brida y sometida a una fuerza axial (F_z) por su parte central y tiene una longitud (L). Si la fuerza F_z fue la ejercida por el émbolo, en el interior del tubo se equilibra con la fuerza de fricción (F_f).

Donde:

$$F_f = \pi. d. l. \mu. \lambda_{est}. P = P_z \dots \dots \dots kN \quad (2.48)$$

La tensión axial (σ_z) que se genera en la sección I- I, resulta a ser máxima y disminuye en la medida que se aleja a esta zona.

Donde:

$$\sigma_z = \frac{P_z}{A_{tubo}} = \frac{4. d. l. \mu. \lambda_{est}. P_{cil}}{D^2 - d^2} \dots \dots \dots kN/cm^2$$

$$\sigma_z = \frac{4. d. l. \mu. \lambda_{est}. P_{cil}}{D^2 - d^2} \leq [\sigma]_t \dots \dots \dots kN/cm^2 \quad (2.49)$$

Sabemos:

$$D^2 - d^2 = (D + d)(D - d)$$

El espesor (δ_{tubo}) también es igual:

$$\delta_{tubo} = \frac{D - d}{2} \dots \dots \dots mm \quad (2.50)$$

También:

$$D = d + 2 \cdot \delta_{tubo} \dots \dots \dots mm \quad (2.51)$$

Sustituyendo las ecuaciones da:

$$\delta_{tubo} \geq \sqrt{\frac{2 \cdot \mu \cdot \lambda_{est} \cdot r \cdot l \cdot P_{cil} + r^2 \cdot [\sigma]_t}{[\sigma]_t}} - \frac{D_{briq}}{2} \dots \dots \dots mm \quad (2.52)$$

Donde:

$\delta_{tubo} \dots \dots \dots$ Espesor de la pared del tubo de briqueteado (mm).

$r \dots \dots \dots$ Radio del conducto central del tubo de briqueteado (mm).

$l \dots \dots \dots$ Longitud efectiva del tubo con briquetas (mm).

$P_x \dots \dots \dots$ Presión axial máxima sobre la briqueta (MPa)

$\mu \cdot \lambda_{est} \dots \dots \dots$ Correlación estática, en función de la presión y en correspondencia con el estado de la biomasa (paja de caña).

$[\sigma]_t \dots \dots \dots$ Tensión permisible del material del tubo de briqueteado (MPa).

2.9 ELECCIÓN DE LOS COMPONENTES DEL SISTEMA HIDRÁULICO. SEGÚN TIPO Y CALIDAD DE BRIQUETAS Y CAPACIDAD DE PRODUCCIÓN DE LA MAQUINA²⁵

2.9.1 Calculo del mecanismo de accionamiento

Mecanismos de accionamiento (cilindros y pistones) de los sistemas hidráulicos.

En los elementos hidráulicos se utiliza el aceite para producir la presión para la alimentación de los mecanismos de accionamiento. La fuerza motriz esta generada por una bomba de aceite. Los cilindros hidráulicos tienen diámetros pequeños,

²⁵ Colectivo de autores. (1986). *Tecnología de construcción maquinaria*. Ciudad de la Habana: Pueblo y Educación.

debido a que la presión del aceite en el circuito de alimentación es muy alta. Esta característica radica la ventaja principal de los mecanismos hidráulicos.

2.9.2 Calculo de los mecanismos de accionamiento con cilindros y pistones

El objetivo principal del cálculo de los mecanismos consiste en determinar el valor del diámetro del cilindro para el diseño partiendo de la fuerza sobre el vástago. Sin embargo el cálculo para los elementos del sistema hidráulico no va a ser realizado en este trabajo. Eso fue posible por la contribución de los fabricantes de los sistemas hidráulicos. Partiendo de la presión necesaria para el diseño, la empresa Oleohidráulica de Cienfuegos tiene un software que deduce las dimensiones geométricas de todos los elementos. Sin embargo se ha realizado cálculos preliminares para el análisis del sistema y hacer los esquemas a escala. En la figura 2.12 se muestra el balance para un análisis.

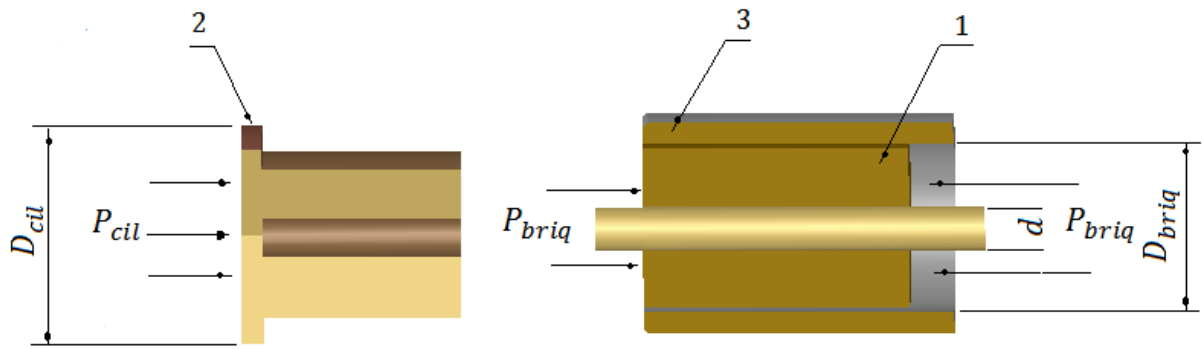


Fig. 2.12 Balance de fuerzas en el proceso de densificación

1. Briquetas; 2. Cilindro hidráulico; 3. Tubo de Briqueteado.

$$k \cdot F_{cil} \geq z \cdot F_{briq} \quad (2.53)$$

$$k \cdot P_{cil} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot D_{cil}^2 \geq z \cdot P_{briq} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot D_{briq}^2 \left(1 - \left(\frac{d_{hueco}}{D_{briq}} \right)^2 \right) \quad (2.54)$$

$$k \cdot P_{cil} \cdot D_{cil}^2 \geq z \cdot P_{briq} \cdot D_{briq}^2 (1 - \gamma^2) \quad (2.55)$$

$$P_{cil} \cdot D_{cil}^2 \geq \frac{z \cdot P_{briq} \cdot D_{briq}^2 (1 - \gamma^2)}{k} \quad (2.56)$$

A partir de la ecuación 2.54 se puede determinar también el diámetro mínimo de los cilindros hidráulicos necesarios para el proceso de densificación. Es decir:

$$D_{cil}^2 \geq \frac{z \cdot P_{briq} \cdot D_{briq}^2 (1 - \gamma^2)}{P_{cil} \cdot k} \quad (2.57)$$

Donde:

k Numero de cilindros hidráulicos en la segunda etapa de densificación.

$$\gamma = \frac{d_{hueco}}{D_{briq}} \quad (2.58)$$

Los estudios realizados²⁶ demuestran que para cualquier biomasa, se requiere de presiones superiores a 40 MPa sobre la briqueta que se densifica, para que estas tengan un mínimo de retracción y con ello la densidad final, después de un número de horas después del proceso de densificación, asegura valores de la densidad superiores a 700 kg/m³.

2.10 METODOLOGÍA DEL CÁLCULO DEL DIMENSIONAMIENTO GEOMÉTRICO DE LA BRIQUETeadORA

Caso: Se necesita saber las especificaciones técnicas de una briqueteadora hidráulica multitubular para satisfacer las condiciones abajo:

Datos Iniciales:

- I. Paja de caña sin fragmentar, con humedad de 12%, densificada a temperatura ambiente (30°C).
- II. Diámetro de la briqueta. ($D_{briq} = 250 \text{ mm}$.)
- III. Diámetro de hueco en la briqueta ($d_{hueco} = 30 \text{ mm}$).
- IV. Densidad inicial de la briqueta ($\rho_i = 25 \text{ kg/m}^3$).
- V. Presión de cada cilindro hidráulico en la etapa dos ($P_{cil} = 30 \text{ MPa}$).
- VI. Diámetro de los cilindros hidráulicos ($D_{cil} = 160 \text{ mm}$).
- VII. Carera de los cilindros de la primera etapa ($H_1 = 1\,000 \text{ mm}$).
- VIII. Carera de los cilindros de la segunda etapa ($H_2 = 375 \text{ mm}$).
- IX. Cantidad de tubos del briquetado ($Z_{tubos} = 1$).
- X. Cantidad de etapas ($n_{eta} = 3$).

²⁶ Ing. Dwight Abu, P. (2008). *Metodología del diseño de una maquina briqueteadora flexible multipropósito*. Trabajo de diploma, Universidad de Cienfuegos.

2.10.1 Magnitudes geométricas de la briqueta multitubular

Calculo del número de niveles de conductos (n) en la briqueta

$$n = \frac{D_{briq} - (d_{hueco} + 2 \cdot \delta_{briq})}{2(d_{hueco} + 2 \cdot \delta_{briq})} = \frac{250 - (30 + 2 \cdot 10)}{2 \cdot (30 + 2 \cdot 10)} = 2$$

Observación: La briqueta tiene dos niveles de conductos. En cada nivel esta ubicado un cierto cantidad de conductos. El siguiente cálculo demuestra la cantidad de orificios en cada nivel de ubicación.

Calculo del radio efectivo de los conductos en el primero nivel de ubicación

$$r_1 = \frac{D_{briq}}{2} - \left(\delta_{briq} + \frac{d_{hueco}}{2} \right) = \frac{250}{2} - \left(10 + \frac{30}{2} \right) = 100 \text{ mm}$$

Calculo del número de conductos en el primero nivel de ubicación

$$Z_{n-1} = 2\pi \cdot n = 2\pi \cdot 2 = 12,57$$

El número total de conductos (Z_{total}) en el primer nivel

$$Z_{total} = 13$$

La ubicación más exacta de los conductos (Z_{n-1}) se garantiza cuando se determina el ángulo entre los conductos. Son 13 huecos en total, se recomiendo 12 en el primer nivel y uno en el centro de la briqueta.

$$\theta = \frac{360}{Z_{(n-1)}}$$

$$\theta = \frac{360}{12} = 30^\circ$$

Observación: El primer nivel lleva 12 orificios con un radio efectivo de 100 mm y un ángulo de separación de 30°.

2.10.2 Calculo del número de conductos en el segundo nivel de ubicación

El diámetro efectivo para construir los orificios es D'_{briq}

$$D'_{briq} = D_{briq} - 2(d_{hueco} + \delta_{briq}) = 250 - 2(30 + 10) = 170 \text{ mm}$$

Calculo del radio efectivo de los conductos en el segundo nivel de ubicación

$$r_2 = r_1 - (d_{hueco} + \delta_{briq}) = 100 - (30 + 10) = 60 \text{ mm}$$

Calculo del número de conductos en el segundo nivel de ubicación

$$Z_{n-1} = 2\pi \cdot n = 2\pi \cdot 1 = 6,3$$

El número total de conductos (Z_{total}) en el segundo nivel

$$Z_{total} = 6$$

Calculo del ángulo entre los conductos del segundo nivel:

$$\theta = \frac{360}{Z_{(n-1)}}$$

$$\theta = \frac{360}{6} = 60^\circ$$

Observación: El segundo nivel de la briqueta tiene un radio efectivo de 60 mm y lleva 6 orificios con un ángulo de separación de 60° .

El sistema de tenedor para la perforación de los huecos de la briqueta se calcula en función de la cantidad de huecos y su ubicación; como es mostrado en el cálculo anterior.

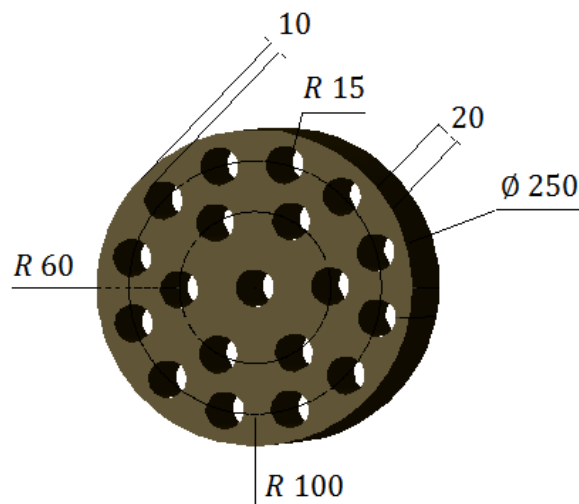


Fig. 2.13 Parámetros geométricos de la briqueta

2.10.3 Calculo de la masa de la briqueta

Masa de la briqueta de dos etapas de densificación ($m_{briq}^{dos\ eta}$)

$$m_{briq\ tub}^{dos\ eta} = \frac{\pi \cdot D_{disp} \cdot l_{car} \cdot B_{car} \cdot \rho_i}{2} \dots \dots \dots kg$$

$$m_{briq\ tub}^{dos\ eta} = \frac{\pi \cdot 0,25\ m \cdot 0,7\ m \cdot 0,75\ m \cdot 25\ kg/m^3}{2} = 5,15\ kg$$

Masa de la briqueta de tres etapas de densificación ($m_{briq}^{tres\ eta}$)

$$m_{briq}^{tres\ eta} = (2 \cdot H_2 \cdot 0,7 \cdot H_1 \cdot D_{briq} + 0,49 \cdot H_1^2) \cdot \rho_i \dots \dots \dots kg$$

$$m_{briq}^{tres\ eta} = (2 \cdot 0,375\ m \cdot 0,7 \cdot 1\ m \cdot 0,25\ m + 0,49 \cdot 1^2 m \cdot m) \cdot 25\ kg/m^3$$

$$= 15,53\ kg$$

2.10.4 Capacidad de producción deseada (C_T)

Capacidad de producción para dos etapas de densificación

$$C_{T\ 2} = 60 \cdot n_{eta} \cdot m_{briq} \cdot 0,9 \dots \dots \dots kg/h$$

$$C_{T\ 2} = 60 \cdot 2,5 \cdot 5,15\ kg \cdot 0,9 = 556,2\ kg/h$$

Capacidad de producción para tres etapas de densificación

$$C_{T\ 3} = 60 \cdot n_{eta} \cdot m_{briq} \cdot 0,9 \dots \dots \dots kg/h$$

$$\Rightarrow C_{T\ 3} = 60 \cdot 3 \cdot 15,53 \cdot 0,9 = 2\ 430\ kg/h$$

2.10.5 Determinación de la fuerza mínima aplicada (F_{cil}^{min}) a la briqueta por el embolo

La fuerza mínima aplicada a la briqueta es igual a la fuerza de resistencia (reacción) de la misma según la tercera ley de Newton.

De la ecuación 2.49 y 2.50 tenemos:

$$F_{cil}^{min} \cdot k \geq F_{briq} \cdot z$$

$$F_{cil}^{min} \geq \frac{P_{briq} \cdot A_{briq} \cdot z}{k}$$

$$F_{cil}^{min} \geq \frac{P_{briq} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot D_{briq}^2 \left(1 - \left(\frac{d_{hueco}}{D_{briq}} \right)^2 \cdot z \right)}{k}$$

$$F_{cil}^{min} \geq \frac{6 \text{ kN/cm}^2 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot 25^2 \text{ cm} \cdot \text{cm} \cdot \left(1 - \left(\frac{3 \text{ cm}}{25 \text{ cm}} \right)^2 \cdot 19 \right)}{2} = 1069,72 \text{ kN}$$

2.10.6 Determinación de la fuerza máxima (F_{max}) aplicada a la briqueta por el embolo

La fuerza máxima aplicada a la briqueta es equivalente a la fuerza de empuje de los cilindros hidráulicos principales.

$$F_{max} = P_{cil} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot D_{briq}^2$$

$$F_{max} = 6 \text{ kN/cm}^2 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot 25^2 \text{ cm} \cdot \text{cm} = 2\,945,24 \text{ kN}$$

Comprobación

La fuerza entregada por la maquina tiene que ser mayor que la fuerza de resistencia de la briqueta. Satisfaciendo esta condición garantiza la densificación de la biomasa.

$$F_{max} \gg F_{briq}$$

$$2\,945,24 \text{ kN} \gg 1\,069,72 \text{ kN}$$

Observación: La maquina es capaz a generar la cantidad de energía necesaria para densificar la briqueta.

2.10.7 Número de ciclos (N_c) por minuto de trabajo de la maquina

$$N_c = \frac{C_T}{60 \cdot Z_{tubos} \cdot m_{briq}} \dots \dots \dots \text{min}^{-1}$$

$$N_c = \frac{2\,430}{60 \cdot 1 \cdot 15,53} = 2,61 \text{ min}^{-1}$$

2.10.8 Tiempo de un ciclo (T)

$$T = \frac{60}{N_c}$$

$$T = \frac{60}{2,61 \text{ min}^{-1}} = 23 \text{ s}$$

2.10.9 Densidad teórica final de la briqueta

Se determina usando los valores de los experimentos.

Diámetro de la briqueta experimental $D_o = 63 \text{ mm}$.

$c \dots \dots 0,0316$

$a \dots \dots 1\,750 \text{ kg/cm}^3$

$b \dots \dots 919,52 \text{ kg/cm}^3$

$$\rho_{exp} = \psi(a - b) \cdot e^{-\psi \cdot c \cdot P_{cil}}$$

Donde:

$\psi \dots \dots$ Factor de tamaño.

$$\psi = \frac{A_0}{A_x}$$

$A_0 \dots \dots$ Sección transversal de experimento.

$A_x \dots \dots$ Sección transversal real de la briqueta.

También se calcula la densidad final de la briqueta como:

$$\rho_f = 315 + 8,89 \cdot P_{cil} + 294,11 \cdot \left(\frac{d_{hueco}}{D_{briq}} eq \right) + 2,97 \cdot T$$

Donde:

$$T = 30 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\frac{d_{hueco}}{D_{briq}} eq = \sqrt{z} \cdot \frac{d_0}{D}$$

$$\frac{d_{hueco}}{D_{briq}} eq = \sqrt{19} \cdot \frac{30}{250} = 0,52$$

$$\Rightarrow \rho_f = 315 + 8,89 \cdot 60 + 294,11 \cdot (0,52) + 2,97 \cdot 30 = 1\,090,44 \text{ kg/cm}^3$$

2.10.10 Diámetro necesaria de los cilindros hidráulicos (D_{cil})

Conociendo la presión máxima entregada por los cilindros hidráulicos, se puede calcular el diámetro mínimo necesario de los cilindros hidráulicos a partir de la fórmula 2.54.

Sin embargo los parámetros geométricos y los elementos de los cilindros ya están calculados por la empresa Oleohidráulica (por catálogo).

Tab. 2.3 Características técnicas fundamentales de los cilindros hidráulicas.

Tipo de cilindro	Presión Nominal (MPa)	Fuerza de empuje (kN)	Fuerza de tiro (kN)	Recorrido (mm)	Diámetro de tubo (mm)	Diámetro de vástago (mm)
Doble efecto	20	110	80	375	140	100
Doble efecto	30	603	450	1000	200	140

2.10.11 Determinación del tiempo del ciclo de la última etapa de densificación

$$T_u = (0,45 - 0,85)T$$

Donde:

$$T = 23 \text{ s}$$

Asumiendo

$$T_u = 0,85.T = 0,85.23 = 19,55 \text{ s}$$

2.10.12 Determinación del tiempo de la carrera de trabajo de la última etapa

$$T_t = \frac{T_u}{1 + \gamma} \dots \dots \dots (s)$$

Donde:

$$\gamma = 0,60 - 0,85$$

Considerando $\gamma = 0,75$ da:

$$T_t = \frac{19,55 \text{ s}}{1 + 0,75} = 11,17 \text{ s}$$

2.10.13 Cálculo del flujo necesario en los cilíndricos hidráulicos

$$Q_c = 60\,000.V_T.A_{cil}$$

Donde:

$$V_T = \frac{H}{T_t}$$

$$V_T = \frac{1 \text{ m}}{11,17 \text{ s}} = 0,1 \text{ m/s}$$

$$A_{cil} = 0,02 \text{ m}^2$$

$$\Rightarrow Q_c = 60\,000 \cdot 0,1 \cdot 0,02 = 120 \text{ l/min.}$$

2.10.14 Calculo del desplazamiento geométrico de la bomba en cm^3

$$q_{bomba} = \frac{1000 \cdot Q}{n \cdot \eta_v}$$

Donde:

$$n = 1\,750 \text{ rev/min}$$

$$\eta_v = 0,92$$

$$q_{bomba} = \frac{1\,000 \cdot 120}{1\,750 \cdot 0,92} = 74,53 \text{ cm}^3/\text{rev}$$

2.10.15 Potencia máxima necesaria de la bomba

$$Pot_{max}^{bom} = \frac{q_{bomba} \cdot n \cdot P_{cil}}{60\,000 \cdot \eta_v \cdot \eta_{mec}} \dots \dots \dots kW$$

Donde:

$$\eta_{mec} = 0,9$$

$$\eta_v = 0,92$$

Sustituyendo los valores da:

$$Pot_{max}^{bom} = \frac{74,53 \text{ cm}^3/\text{rev} \cdot 1\,750 \text{ r.p.m.} \cdot 30 \text{ MPa}}{60\,000 \cdot 0,92 \cdot 0,9} = 78,76 \text{ kW}$$

2.10.16 Selección del motor

Ya sabemos:

$$\eta_{mot} = 1\,750 \text{ r.p.m}$$

$$Pot_{max}^{bom} < 78,76 \text{ kW}$$

La potencia del motor a utilizar: $Pot_m = (65 - 78,76) \text{ kW}$

Con sobre carga instantánea de (0,40-0,86), la velocidad del motor coincidente con la velocidad de la bomba (bomba conectada directamente al motor).

2.10.17 Selección de la bomba hidráulica

Velocidad de rotación de la bomba:

$$\eta_{bomba} = 1\,750 \text{ r.p.m}$$

Desplazamiento geométrico de la bomba:

$$q_{bomba} = 74,53 \text{ cm}^3/\text{rev}$$

Presión máxima de trabajo de la bomba:

$$P_{max}^{bom} = 30 \text{ MPa}$$

Demanda máxima de potencia de la bomba:

$$Pot_{max}^{bom} = 78,76 \text{ kW}.$$

2.10.18 Análisis de la etapa de compactación

Los elementos fundamentales que serán sujetos al cálculo de resistencia son:

- I. Los tornillos de la base del soporte.
- II. Los tensores que unen los soportes.
- III. El tubo de briqueteado.

2.10.18.1 Calculo de la resistencia mecánica de los tornillos de la base del soporte principal

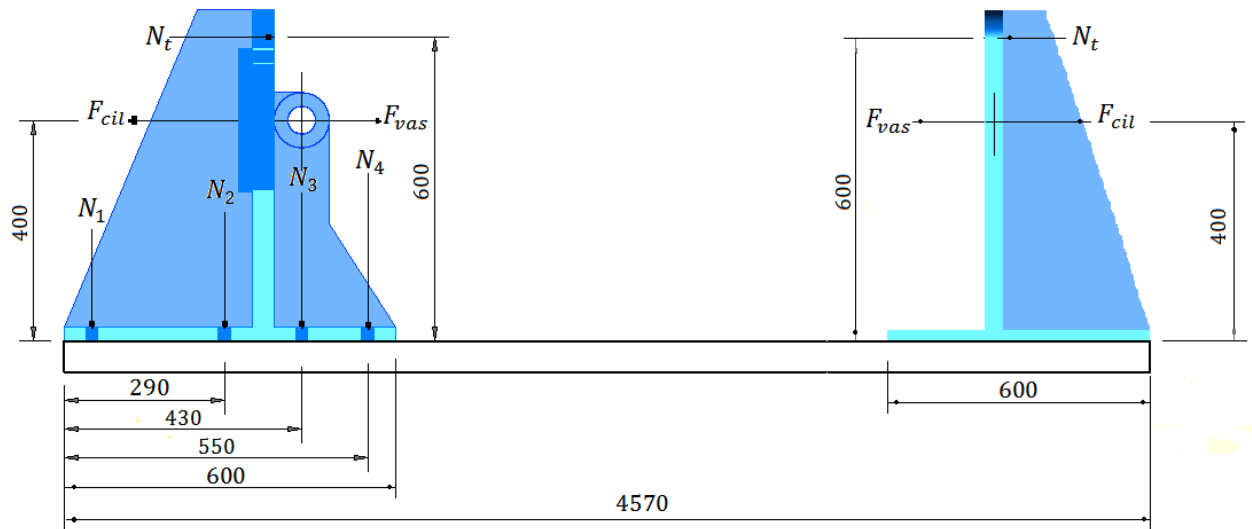


Fig. 2.14 Esquema de análisis de la etapa de compactación

Donde:

1. Soporte de los cilindros hidráulicos.
- 2.- Bastidor de la máquina de vigas canales ISO 657/11- CH 270 x 95.
- 3.- Soporte de los tubos de briqueteado.
- 4.- Tubos de briqueteado.

N_t - Representa la tensión de un tensor.

$N_{1...4}$ Representa la fuerza en los tornillos respectivamente.

Datos

La presión en cada cilindro es 30 MPa. Entonces, para los dos cilindros es:

$$60 \text{ MPa} = 600 \text{ kgf/cm}^2 = 6 \text{ kN/cm}^2$$

$$1 \text{ kgf} = 0,01 \text{ kN}$$

Sabemos:

$$F_{cil} = P_{cil} \cdot A_{cil}$$

Donde:

$$\Rightarrow F_{max \text{ cil}} = 3 \text{ kN/cm}^2 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot 25^2 \text{ cm} \cdot \text{cm} = 1472,5 \text{ kN}$$

$$F_{vas} = P_{vas} \cdot A_{vas}^{total} = 3 \text{ kN/cm}^2 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot 3^2 \text{ cm} \cdot \text{cm} \cdot 19 = 403 \text{ kN}$$

Para realizar el cálculo de las fuerzas normales en los tornillos, se toma el momento del sistema respecto al punto A, como se muestra en la figura.

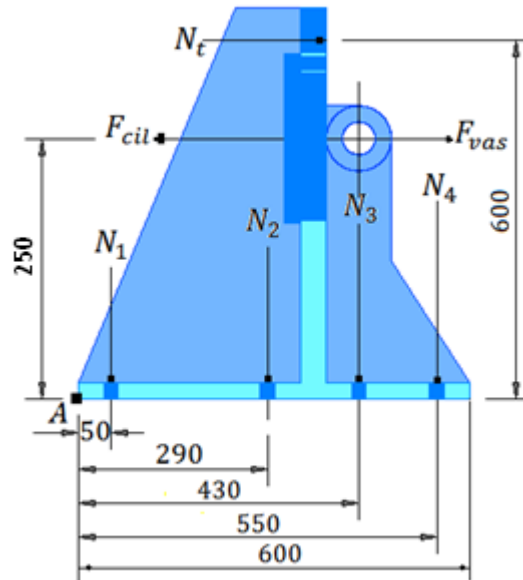


Fig. 2.15 Esquema de análisis de los tornillos del soporte de los cilindros

$$b_1 = 50 \text{ mm}, b_2 = 290 \text{ mm}, b_3 = 430 \text{ mm}, b_4 = 550 \text{ mm},$$

$$h_{ten} = 600 \text{ mm}, h_{cil} = 250 \text{ mm}, h_{vas} = 250 \text{ mm}$$

Usando la ecuación de equilibrio da:

$$\sum M_A = 0.$$

$$4 \cdot N_1 \cdot b_1 + 4 \cdot N_2 \cdot b_2 + 6 \cdot N_3 \cdot b_3 + 6 \cdot N_4 \cdot b_4 + 2 \cdot N_t \cdot h_{ten} - 2 \cdot F_{max \text{ cil}} \cdot h_{cil} + F_{vas} \cdot h_{vas} = 0$$

$$4 \cdot N_1 \cdot 5 + 4 \cdot N_2 \cdot 31,5 + 6 \cdot N_3 \cdot 44 + 6 \cdot N_4 \cdot 55 + 2 \cdot N_{ten} \cdot 60 - 2.1472,5 \cdot 25 + 403,18 \cdot 25 = 0$$

El sistema es hiperestático y la ecuación de equilibrio tiene 5 incógnitas.

Para resolver la ecuación se utiliza el método de deformación:

$$\Delta L = \frac{N \cdot L}{A_{tor} \cdot E}$$

Donde:

$$L \dots \dots \dots 8 \text{ cm}$$

$$E \dots \dots \dots \text{Modulo de elasticidad del acero (kgf/cm}^2\text{)}$$

Los diámetros de los tornillos y el material son iguales, así que se cumple que:

$$A_{tor_1} = A_{tor_2} = A_{tor_3} = A_{tor_4} = A_{tor_5} = A_{tor_6} = \frac{\pi \cdot d^2}{4} = \frac{\pi \cdot 2,2^2}{4} = 3,8 \text{ cm}^2$$

$$E_1 = E_2 = E_3 = E_4 = E_t = 2,1 \cdot 10^6 \text{ kgf/cm}^2 = 0,0206 \cdot 10^6 \text{ kN/cm}^2$$

$$A_{ten} = \frac{\pi \cdot d^2}{4} = \frac{\pi \cdot 3,5^2}{4} = 9,6 \text{ cm}^2$$

Por lo tanto se obtiene que:

$$N_2 = \frac{b_3 \cdot N_1}{b_1} = \frac{31,5 \cdot N_1}{5} = 6,3 \cdot N_1$$

$$N_3 = \frac{b_4 \cdot N_1}{b_1} = \frac{44 \cdot N_1}{5} = 8,8 \cdot N_1$$

$$N_4 = \frac{b_6 \cdot N_1}{b_1} = \frac{55 \cdot N_1}{5} = 11 \cdot N_1$$

$$N_T = \frac{A_{ten} \cdot h_2 \cdot L_{Tor}}{b_1 \cdot A_{Tor} \cdot L_{ten}} \cdot N_1 = \frac{9,62 \cdot 60,8 \cdot N_1}{3,8 \cdot 400,5} = 0,61 \cdot N_1$$

Sustituyendo los valores en la ecuación de equilibrio da:

$$20 \cdot N_1 + 116,5,8 \cdot N_1 + 258,8,6 \cdot N_1 + 330,11 \cdot N_1 + 120,0,61 \cdot N_1 - 63 \, 545,5 \text{ kN} = 0$$

$$20 \cdot N_1 + 672,8 \cdot N_1 + 2218,8 \cdot N_1 + 3630 \cdot N_1 + 73,2 \cdot N_1 - 63 \, 545,5 \text{ kN} = 0$$

$$6 \, 614,8 N_1 = 63 \, 545,5 \text{ kN}$$

$$\Rightarrow N_1 = 9,6 \text{ kN}$$

Sustituyendo $N_1 = 4,86 \text{ kN}$ en las siguientes ecuaciones da:

$$N_2 = 5,8 \cdot N_1 = 5,8 \cdot 9,6 \text{ kN} = 55,7 \text{ kN}$$

$$N_3 = 8,6 \cdot N_1 = 8,6 \cdot 9,6 \text{ kN} = 82,62 \text{ kN}$$

$$N_4 = 11 \cdot N_1 = 11 \cdot 9,6 \text{ kN} = 105,67 \text{ kN}$$

$$N_T = 0,61 \cdot 9,6 \text{ kN} = 5,86 \text{ kN}$$

Se determina la fuerza de cortante (Q) por la ecuación de equilibrio:

$$\sum F_x = 0 \dots \dots kN$$

$$20. Q + 2. F_{cil} - 2. N_T - F_{vas} = 0$$

$$\Rightarrow Q = \frac{2. N_T - 2. F_{max cil} + F_{vas}}{30}$$

$$Q = \frac{2.5,86 kN - 2.1472,5 kN + 403 kN}{30} = - 84,34 kN$$

$$Q = 84,34 kN$$

Así, los tornillos están sometidos a un estado tensionar y soportan una fuerza normal (N) y uno de cortante (Q). Los tornillos más cargado son de la cuarta fila, por lo que para garantizar su resistencia se realizará el siguiente cálculo de comprobación.

Comprobación:

Este tipo de unión (tensado previo) no es de tipo hermética, el tensado previo debe garantizar una compresión mínima después de aplicar la carga de trabajo lo cual es alrededor de 10 % de la fuerza de trabajo.

$$N_{eq} = (N_4 + 0,1. N_4) = (105,67 kN + 0,1.105,67 kN) = 116,23 kN$$

La tensión normal será hallada por la siguiente ecuación:

$$\sigma_N = \frac{N_{eq}}{A_{tor}} = \frac{116,23 kN}{3,8 cm^2} = 30,59 kN/cm^2$$

Por lo tanto:

La tensión tangencial provocada por la fuerza transversal Q se puede calcular por:

$$\tau = \frac{Q}{A_{tor}}$$

$$\tau = \frac{84,34 kN}{3,8 cm^2} = 22,19 kN/cm^2$$

Según la norma cubana NC 57-76:85 para tornillos de acero 45 templado:

$$\sigma_u = 10\ 400 kgf/cm^2 = 102 kN/cm^2.$$

La tensión permisible para tornillos del acero 45 templado puede ser calculada por:

$$[\sigma] = 0,86. \sigma_u = 0,86.102 \text{ kN/cm}^2 = 88 \text{ kN/cm}^2$$

Por la cuarta teoría de resistencia:

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma_N^2 + 3. \tau^2} \leq [\sigma]$$

$$\sigma_{eq} = \sqrt{30,59^2 + 3. 22,19^2} = 49,12 \text{ kN/cm}^2.$$

$$49,12 \text{ kN/cm}^2 \leq 88 \text{ kN/cm}^2$$

$$\sigma_{eq} \leq [\sigma]$$

Los tornillos en la base del soporte pueden soportar la fuerza resultante de la fase de densificación, es decir, cuando la maquina esta actuado por la fuerza máxima, el soporte no se pierda su estabilidad.

2.10.18.2 Calculo de la resistencia de los tensores

Los tensores en su extremo presentan una unión roscada no pretensada, la tuerca es apretada bajo carga en el montaje, por lo que se ve sometida las tensiones tangenciales adicionales debido al momento torsor al apretar, lo que adiciona un 30% más de la tensión normal equivalente que la de trabajo.

Para calcular la tensión normal equivalente:

$$N_{eq} = 1,3. N_T = 1,3.5,86 \text{ kN} = 7,68 \text{ kN}$$

La tensión normal se determina por:

$$\sigma_N = \frac{N_{eq}}{A_{ten}}$$

Donde:

$$A_{ten} = \frac{\pi. 3,5^2}{4} = 9,62 \text{ cm}^2$$

$$\sigma_N = \frac{7,68 \text{ kN}}{9,62} = 0,79 \text{ kN/cm}^2$$

La tensión permisible para tornillos del acero al carbono es 32 kN/cm^2 .

$$0,79 \text{ kN/cm}^2 \leq 32 \text{ kN/cm}^2$$

$$\sigma_{eq} \leq [\sigma]$$

Observación: Los tensores son capaces de aguantar la carga.

2.10.18.3 Análisis del tubo de compactación

Calculo de la fuerza de perforación (F_{vas}^{per}) de la briqueta

La fuerza de perforación en realidad es la fuerza que debe suministrar el vástago para crear los huecos en la briqueta.

$$F_{vas}^{per} = \mu \cdot \lambda \cdot z \cdot \pi \cdot d_{pun} \cdot l_{briq} \cdot P_{vas}$$

Donde:

d_{pun} Diámetro de un punzón

$\mu \cdot \lambda$ Correlación de coeficiente de proporcionalidad.

$$\mu \cdot \lambda_{est} = 0,0127$$

Sabemos:

$$l_{briq} = \frac{m_{briq}}{\rho_{briq} \cdot A_{briq}}$$

Donde:

$$A_{briq} = \frac{\pi}{4} \cdot 25^2 \text{ cm} \cdot \text{cm} \cdot \left(1 - \left(\frac{3 \text{ cm}}{25 \text{ cm}} \right)^2 \cdot 19 \right) = 356,57 \text{ cm}^2 = 0,0357 \text{ m}^2$$

$$l_{briq} = \frac{15,53 \text{ kg}}{1090,44 \text{ kg/m}^3 \cdot 0,0357 \text{ m}^2} = 0,398 \text{ m} = 39,8 \text{ cm}$$

$$\Rightarrow F_{vas}^{per} = 0,0127 \cdot 19 \cdot \pi \cdot 3 \text{ cm} \cdot 39,8 \text{ cm} \cdot 3 \text{ kN/cm}^2 = 271,54 \text{ kN}$$

2.10.19 Calculo de la fuerza de fricción (F_f) mínima desarrollada por la briqueta en el conducto

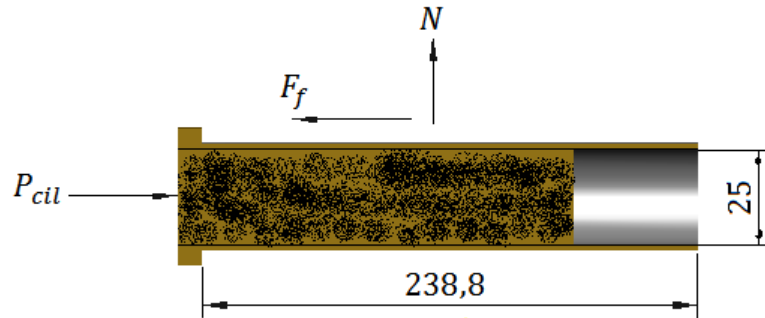


Fig. 2.16 Fuerza de fricción en tubo de salida.

$$F_f = \mu \cdot N$$

Donde:

N Fuerza normal de la biomasa en el conducto

$$N = \pi \cdot D_{briq} \cdot l_{tubo} \cdot \lambda \cdot P_{cil}$$

$$F_f = \mu \cdot \lambda \cdot \pi \cdot D_{briq} \cdot l_{tubo} \cdot P_{cil}$$

Donde:

$$l_{tubo} = \text{numero de briquetas en el tubo} \cdot l_{briq}$$

$$l_{tubo} = 6.39,8 = 39,8 \text{ cm}$$

$$\Rightarrow F_f = 0,0127 \cdot \pi \cdot 25 \text{ cm} \cdot 238,8 \text{ cm} \cdot 6 \text{ kN/cm}^2 = 1\,429,15 \text{ kN}$$

Comprobación:

$$F_{vas}^{per} < F_f < F_{cil}$$

$$271,54 \text{ kN} < 1\,429,15 \text{ kN} < 2\,945 \text{ kN}$$

Observación: La fuerza de fricción de las briquetas en el tubo de salida tiene que ser superior a la fuerza de perforación del vástago, (si no, las briquetas van a salir empujadas por la acción del vástago sin la formación de los orificios), a la misma vez tiene que ser inferior a la fuerza de empuje del embolo garantizando la salida de las briquetas. Ojo, la fuerza responsable para la densificación de la biomasa es la misma que garantiza la expulsión de las briquetas.

2.10.20 Calculo del espesor mínimo del tubo de compactación

Se determina el espesor (δ_{tubo}) del tubo a partir de la ecuación 2.48:

$$\delta_{tubo} \geq \sqrt{\frac{2 \cdot \mu \cdot \lambda_{est} \cdot r \cdot l \cdot P_{cil} + r^2 \cdot [\sigma]_t}{[\sigma]_t}} - \frac{D_{briq}}{2} \dots \dots \dots mm$$

Donde:

Material del tubo: Acero 20 normalizado

$$\sigma_F = 42 MPa$$

$$\Rightarrow [\sigma]_t = \frac{\sigma_F}{n} = \frac{42}{1,8} = 23 MPa$$

$$(\mu \cdot \lambda_{est})_{briq} = \mu \cdot \lambda_{est} \left(1 - \frac{d}{D} eq\right)$$

Donde:

$$\mu \cdot \lambda_{est} \dots \dots \dots 0,0127$$

$$(\mu \cdot \lambda_{est})_{briq} = 0,0127 \cdot (1 - 0,52) = 0,0061$$

$$l = l_{briq} = 398 mm$$

Sustituyendo los valores en la ecuación 2,52 da:

$$\delta_{tubo} \geq \sqrt{\frac{2 \cdot 0,0061 \cdot 125 \cdot 398 \cdot 60 + 125^2 \cdot 23}{23}} - \frac{250}{2} = 6,2 mm$$

Observación: Se necesita un tubo con un espesor mínimo de 6,2 mm. Además de esto, se colocan nervios transversales y laterales en el tubo, que a su propósito incrementan la resistencia mecánica del tubo. Ver comprobación en el epígrafe 3.4 y el diseño final en el anexo 13.

2.10.21 Calculo de parámetros geométricos de la maquina

El diseño de la maquina lleva muchos factores que el diseñador debería tomar en consideración para lograr su pieza final. El siguiente análisis muestra los elementos los cuales prestan atención para obtener las respectivas dimensiones físicas de la máquina.

2.10.21.1 Longitud mínimo del bastidor (L_{bas})

$$L_{bas} = l_{sop\ long\ 1} + l_{cil\ long\ 1,2} + \delta_{acop} + H_1 + 0,7.H_1 + l_{sop\ long\ 2} + l_{tubo\ briq}$$

Donde:

$l_{sop\ long}$ Longitud del soporte longitudinal

$l_{cil\ long\ 1,2}$ Longitud de los cilindros principales.

δ_{acop} Espacio libre para acoplamientos.

$$L_{bas} = 4672\ mm$$

2.10.21.2 Ancho mínimo de la tolva (A_{tolva})

$$A_{tolva} = 0,7.H_1$$

$$A_{tolva} = 0,7.1000 = 700\ mm$$

2.10.21.3 Distancia entre centros mínimo de los cilindros principales (D_{cil}^{cen})

$$D_{cil}^{cen} = \frac{D_{cil\ 1}}{2} + D_{tubo\ briq} + \frac{D_{cil\ 2}}{2} + \delta_{acop}$$

$$D_{cil}^{cen} = 600\ mm$$

2.10.21.4 Ancho mínimo entre las bastidores longitudinales ($A_{bas.long}$) de la maquina

$$A_{bas.long} = D_{cil\ 1} + \delta_{acop} + D_{tubo\ briq} + D_{cil\ 2}$$

Donde:

$D_{tubo\ briq}$ Diámetro del tubo de compactación

$$A_{bas.long} = 1\ 300\ mm$$

2.10.21.5 Ancho mínimo del bastidor transversal (A_{tran})

$$A_{tran} = l_{sop\ trans} + H_2 + \frac{D_{tubo\ briq}}{2} + \delta_{acop}$$

$$A_{tran} = 800\ mm.$$

2.10.21.6 Longitud mínimo del sistema transversal (L_{tran})

$$L_{tran} = 0,7H_1 + \delta_{acop}$$

$$L_{tran} = 800\ mm$$

2.10.21.7 Ancho mínimo total de la maquina (A_{total})

$$A_{total} = 2. \left(l_{sop\ trans} + H_2 + \frac{D_{tubo\ briq}}{2} \right) + A_{bas.long} + \delta_{acop}$$

Donde:

$l_{sop\ trans}$ Longitud del soporte transversal.

$l_{cil\ trans}$ Longitud del cilindro transversal.

$$A_{total} = 2. A_{tran} + A_{bas.long}$$

$$A_{total} = 2\ 540\ mm.$$

Conclusiones parciales

1. Las características geométricas de una briqueteadora hidráulica multitubular, se calcula en función o en base de las dimensiones de la briqueta y de la capacidad de producción de la misma. Estas características son las básicas y fundamentales para diseñar tal máquina.
2. La metodología describe una secuencia general de fórmulas que permiten extraer valores en términos de magnitudes físicas de los elementos críticos de cualquier máquina que se quiera diseñar. Se puede seguir la estructura del calculo del caso presentado y lograr un resultado definitivo.
3. Los cálculos de las piezas fueron realizados considerando las condiciones críticas. En realidad ninguno de ellos están sometido a estos valores extremos. Es de concluir entonces, que si resisten estas circunstancias, se puede confiar en sus dimensiones geométricas.

CAPITULO 3: CÁLCULO DE LA RESISTENCIA MECÁNICA DE CONJUNTOS FUNDAMENTALES DE LA MÁQUINA BRIQUETEADORA

3.1 INTRODUCCIÓN

En la ingeniería, especialmente en el campo de diseño, la mayoría de cálculos hecha por mano están siendo sustituidos por cálculo electrónico que normalmente utilizan un algoritmo complejo que permiten obtener soluciones de los problemas. Esta nos permite obtener productos de calidad superior a menor coste, o para mejorar procesos existentes, o para estudiar el fallo de un componente estructural o un equipo.

Los programas de AEF (análisis por elementos finitos) facilitan el proceso de cálculo y da resultados favorables. La transformación de un sistema de ingeniera (con infinitas incógnitas a un modelo de elementos finitos requiere un conocimiento profundo del programa. En realidad dicho modelo es una idealización matemática de un sistema real, si analiza por otro modo puede ser muy laborosa o imposible.

El termino elemento finito resume el concepto básico del modelo: la transformación de un sistema físico, con un número infinito de incógnitas, a uno que tiene un numero finito de incógnitas relacionado entre si por elementos de un tamaño finito. Un nudo es una localización en el espacio de un punto en el que se considera que existen ciertos grados de libertad (desplazamiento, potenciales, temperatura, etc) y acciones (fuerzas, corrientes, condiciones de contorno...) del sistema físico.

Un elemento es una representación matemática matricial, denominada matriz de rigidez, de la interacción entre los grados de libertad de un conjunto de nudos. Los elementos pueden ser puntuales, lineales, superficiales, volumétricos,... y pueden estar en espacio bi o tres dimensiones.

Cada nudo tiene ciertos grados de libertad (GDL) que caracterizan la respuesta del campo (las ecuaciones diferenciales que representan el problema que se requiere resolver). La información se pasa de un elemento a otro por los nodos comunes.

Los GDL en un nudo dependen de los elementos que se conectan en dicho nudo.

Las condiciones de análisis estructurales incluyen:

- I. Restricciones de desplazamiento
- II. Fuerzas aplicadas en nudos
- III. Presión sobre elementos
- IV. Temperaturas en nudos
- V. Carga volumétricas o de inercia (gravedad)

3.2 CALCULO DE LA RESISTENCIA MECÁNICA DEL BASTIDOR

El bastidor principal fue analizado utilizando los programas de computación Autodesk inventor y el Ansys. La pieza fue sometida a condiciones extremas o críticas para ver si aguantaba la carga máxima, es decir, fue analizada sin los acoplamientos, ya que la presencia de estos aumenta su resistencia mecánica. Se supone que la pieza será capaz de resistir la carga máxima de los cilindros principales, sino se vuelve al principio, se conecta la tapa y se reevalúa de nuevo. En el caso en que la pieza siga dando valores no favorables se realizan los cálculos nuevamente con las vigas laterales.

Este método es nuevo en su aplicación al diseño de las briqueteadoras en general. Anteriormente se calculaba la resistencia del bastidor basado en la metodología para dar solución a vigas apoyadas sobre el suelo, empleando el concepto de resorte elástico²⁷. Según los resultados de otros estudios utilizando el mismo programa se puede suponer que su autenticidad dará resultados favorables.

En los siguientes análisis utilizando los programas Autodesk inventor y el Ansys se demuestran los resultados del cálculo del bastidor después de aplicar la carga máxima de los cilindros en sus respectivos puntos de acción de las fuerzas.

²⁷ Dr. Fundora Beltrán, P. (2002). *Estudio de la densificación de la paja de caña sin preparación previa con tecnología hidráulica para el perfeccionamiento de su proceso tecnológico*. Tesis. Para optar para el grado científico de Máster en Ciencias Técnicas. Cienfuegos, Universidad de Cienfuegos.

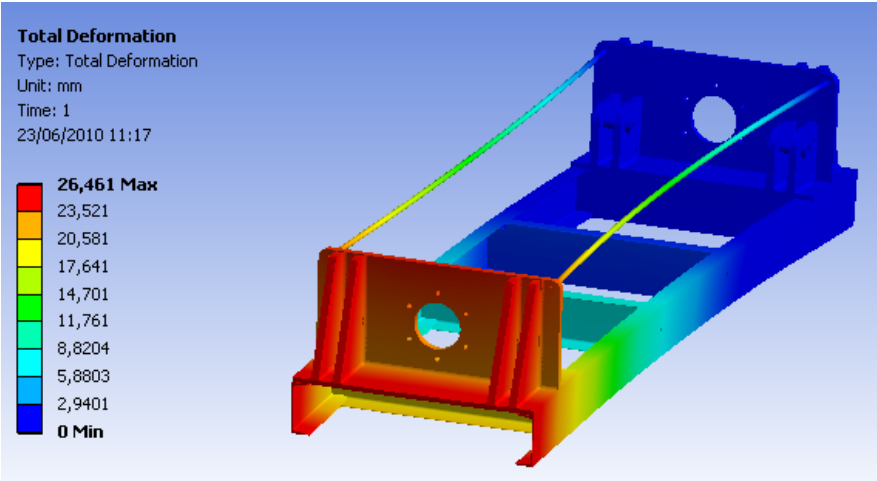


Fig. 3.1 Deformación en el bastidor

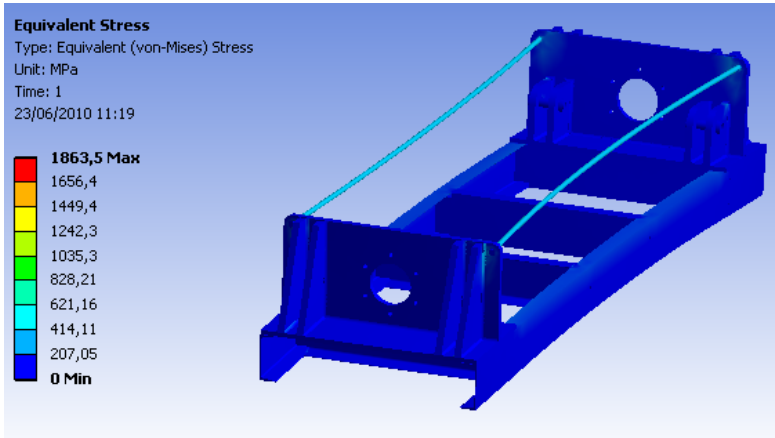


Fig. 3.2 Tensión máxima en el bastidor

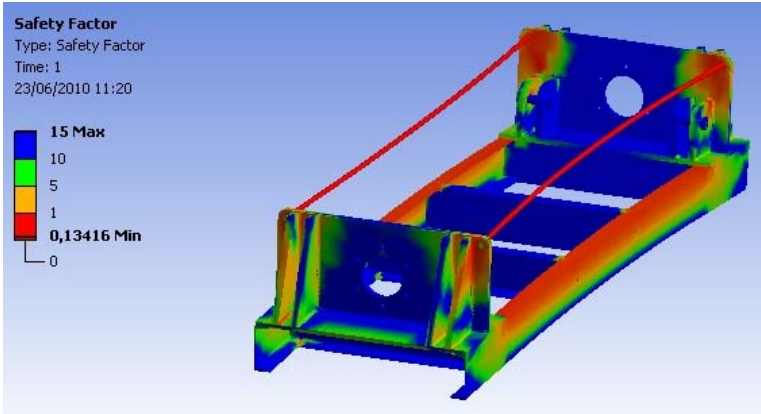


Fig. 3.3 Factor de seguridad en el bastidor

Tab. 3.1 Resultados del análisis del bastidor

Análisis del bastidor		
Cálculo realizado	Resultado final	
	Valor máximo	Valor mínimo
Deformación	26,421 mm	0 mm
Tensión	1863,5 MPa	0 MPa

Factor de seguridad	15	0,134
---------------------	----	-------

Observación: El valor numérico de la deformación del bastidor y el factor de seguridad del conjunto son muy grandes y bajos respectivamente. Razón que, no se había tomado en consideración la presencia de los otros acoplamientos del diseño, por ejemplo, el soporte transversal, la tapa etc. Es decir el elemento fue considerado bajo las condiciones extremas o críticas. Para más profundizar el comportamiento del sistema se acopla la tapa (acercando más todavía al diseño real) y se repite el análisis como esta mostrado en el siguiente paso. Ver anexo 5 para detalles del bastidor.

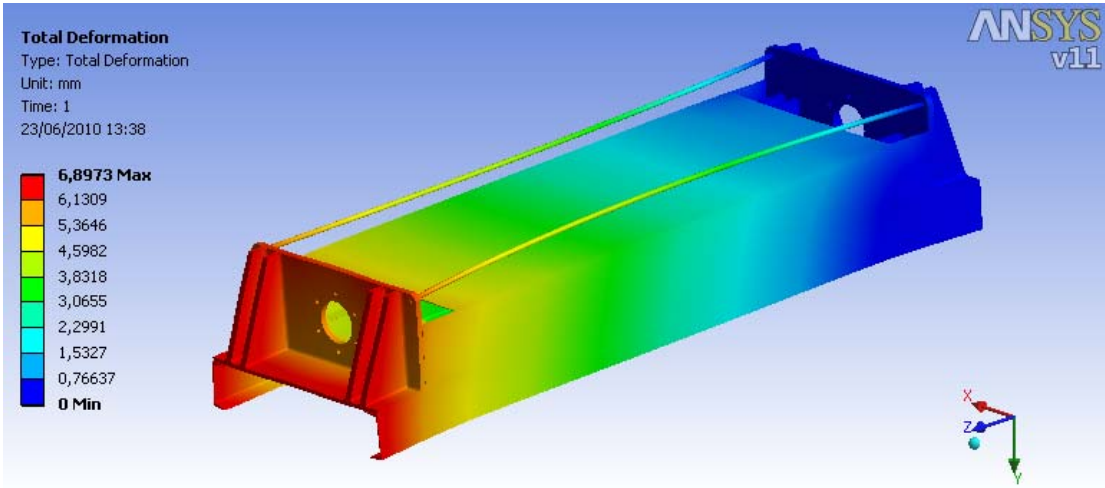


Fig. 3.4 Deformación del bastidor con tapa

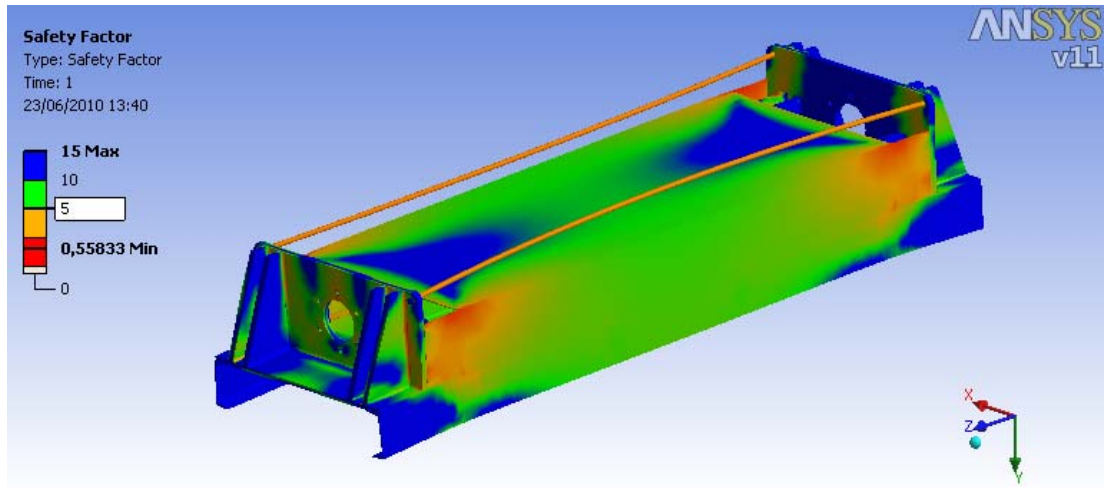


Fig. 3.5 Factor de seguridad de bastidor con tapa

Observación:

Tab. 3.2 Resultados del análisis del bastidor con tapa

Análisis del bastidor con tapa

Cálculo realizado	Resultado final	
	Valor máximo	Valor mínimo
Deformación	6,9 mm	0 mm
Factor de seguridad	15	0,6

El bastidor no se deforma y la presencia de la tapa sola incrementó el factor de seguridad a valores aceptables para el diseño.

3.3 CALCULO DE LA RESISTENCIA MECÁNICA DEL SOPORTE PRINCIPAL

El soporte es uno de los elementos más importantes en el diseño. Se solda encima de una placa base y se acopla por tornillos (M 20) al bastidor. A el se acoplan los cilindros principales (que tiene una fuerza máxima de empuje de 3 kN/cm^2 cada uno) por el pasador mostrado en la figura 3.6. En el medio se fija otro cilindro por tonillos para el sistema de punzones con una fuerza de empuje de 2 kN/cm^2 y en los puntos extremos se ponen los tensores. Los tensores resisten una fuerza de tracción y compresión de $7,68 \text{ kN}$.

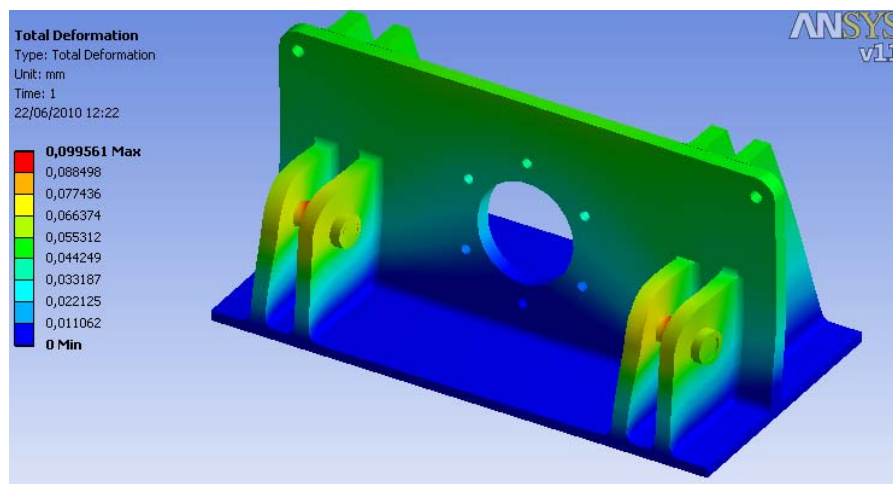


Fig. 3.6 Deformación en el soporte principal

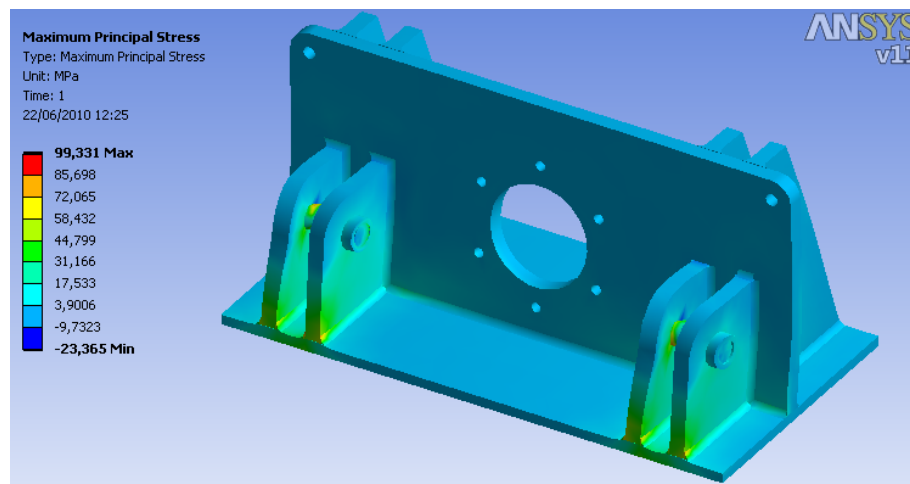


Fig. 3.7 Tensión máxima en el soporte principal

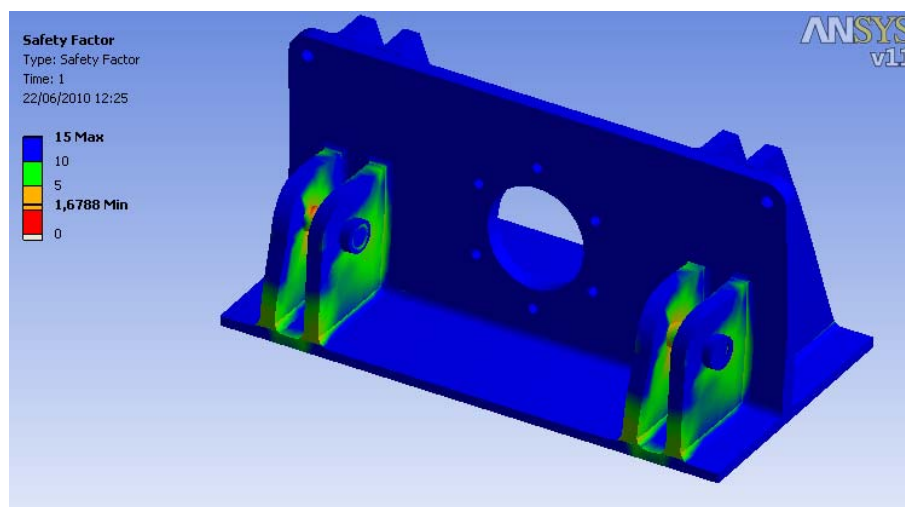


Fig. 3.7 Factor de seguridad en el soporte principal

Observación: La pieza es capaz de resistir las condiciones críticas durante su funcionamiento. Además de esto se tiene que tomar en consideración que la carga aplicada es instantánea-no es permanente y la presencia de los otros elementos aumenta la rigidez de la pieza. Se puede ver las dimensiones de la pieza en el anexo 6.

Tab. 3.3 Resultados del análisis del soporte principal

Análisis del soporte principal		
Cálculo realizado	Resultado final	
	Valor máximo	Valor mínimo
Deformación	0,099 mm	0 mm
Tension	99,331 MPa	-23,36 MPa
Factor de seguridad	15	1,7

3.4 CALCULO DE LA RESISTENCIA MECÁNICA DEL TUBO DE COMPACTACIÓN

El tubo de compactación es una de las piezas mas importante en la maquina. Se actúa como un conducto para la salida de las briquetas formadas. Por las paredes internas de ella las briquetas ejercen una fuerza radial generada por la acción de los cilindros principales. La fuerza radial es un componente de la fuerza de fricción generada por el movimiento de las briquetas. El valor de esta fuerza es 1 429,15 *kN*.

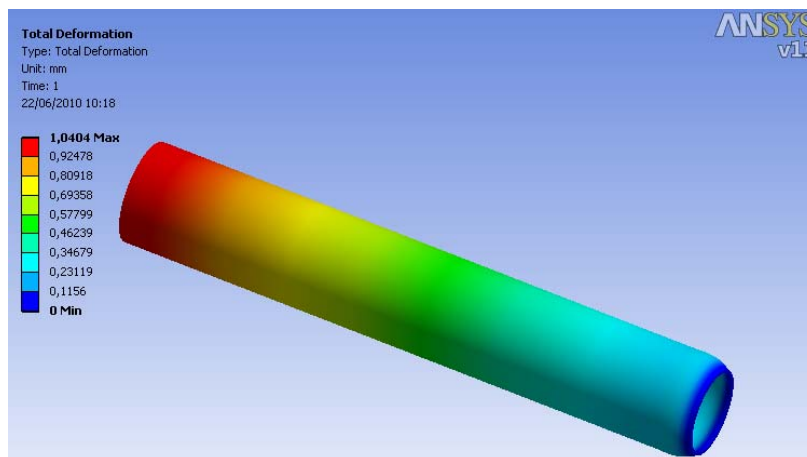


Fig. 3.9 Deformación en el tubo de compactación

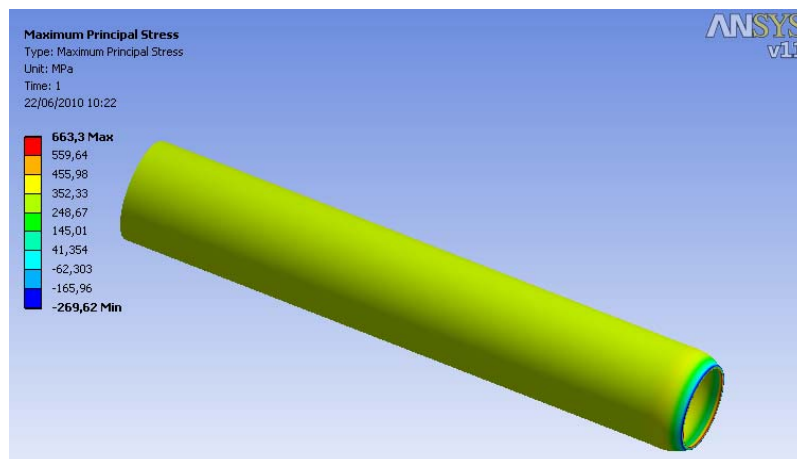


Fig. 3.10 Tensión máxima en el tubo de compactación

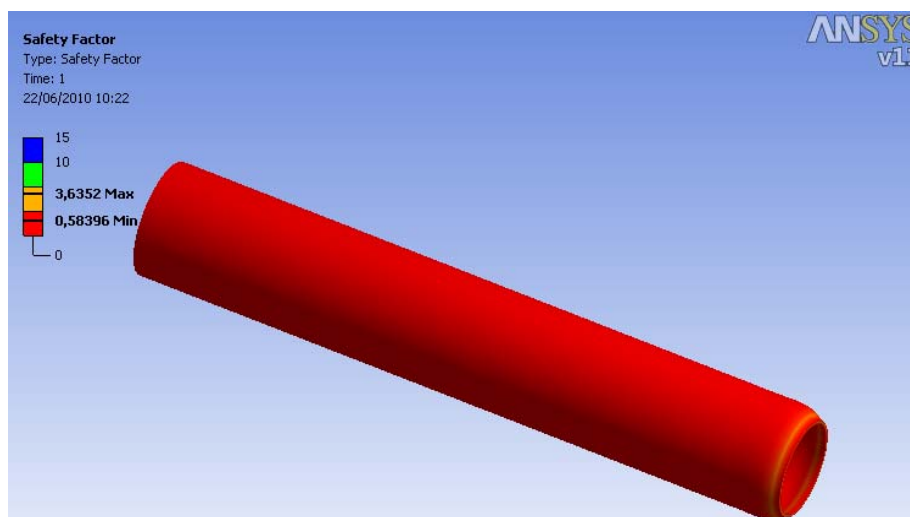


Fig. 3.11 Factor de seguridad en el tubo de compactación

Observación:

Tab. 3.4 Resultados del análisis del tubo de compactación

Análisis del tubo de compactación		
Cálculo realizado	Resultado final	
	Valor máximo	Valor mínimo
Deformación	1,04 mm	0 mm
Tension	666,3 MPa	-269,62 MPa
Factor de seguridad	3,64	0,58

El factor de seguridad es bajo con tensiones alta. Sin embargo no afectará el diseño final, siendo que el tubo será reforzado con elementos laterales y longitudinales como es mostrado en el anexo 15. Además, en la zona de las tensiones alta esta ubicada una brida, la cual sirve para acoplar el tubo al cuerpo de la máquina. Este acoplamiento con las otras modificaciones de su geometría aumentara la resistencia mecánica del sistema.

3.5 CALCULO DEL PASADOR

El propósito de este elemento de fijación es acoplar los cilindros principales al soporte principal. Cada cilindro ejerce una fuerza de 3 kN/cm^2 . Se puede ver la pieza en su detalle en el anexo 15.

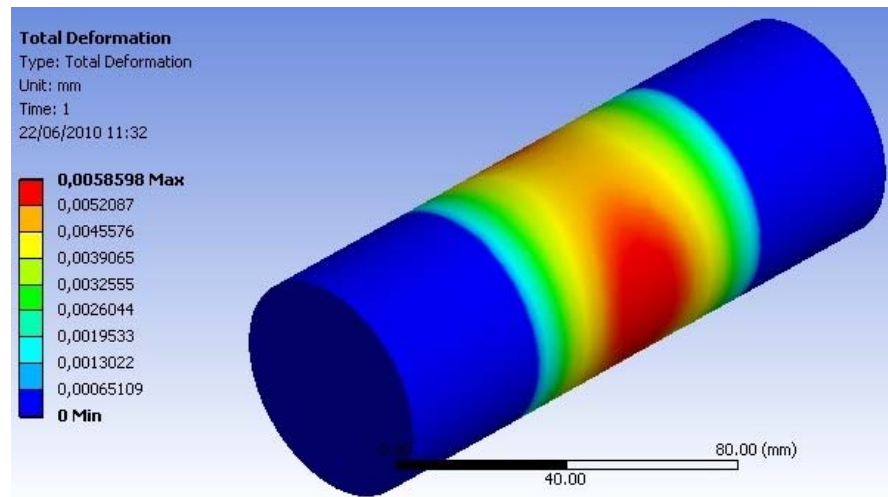


Fig. 3.12 Deformación en el pasador

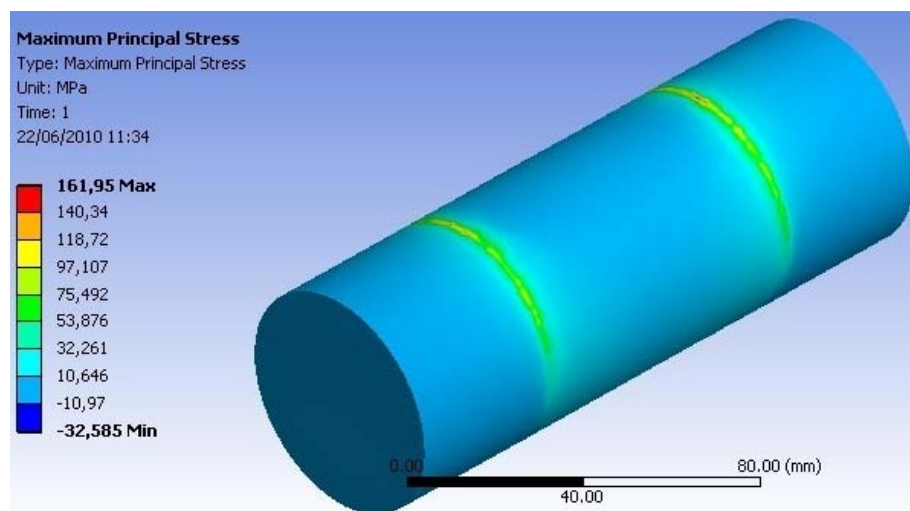


Fig. 3.13 Tensión máxima en el pasador

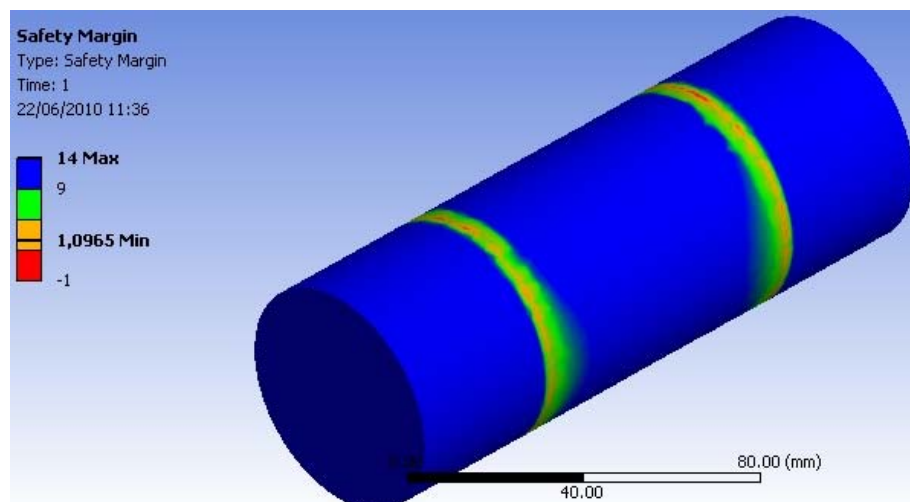


Fig. 3.14 Factor de seguridad en el pasador

Observación:

Tab. 3.5 Resultados del análisis del pasador de los cilindros principales

Análisis del pasador de los cilindros principales		
Cálculo realizado	Resultado final	
	Valor máximo	Valor mínimo
Deformación	0,0059 mm	0 mm
Tension	161,95 MPa	-32,59 MPa
Factor de seguridad	14	1,09

El pasador no va a presentar ningún problema durante su operación. Es capaz resistir la fuerza aplicada por el cilindro principal durante su operación.

Conclusiones parciales

1. El uso de un algoritmo electrónico facilita el proceso del diseño, de tal manera, que si lo dicho esta hecho a escala, permite al diseñador ver en el espacio la pieza o el conjunto de piezas en su totalidad, haciendo posible corregir errores geométricos de acoplamiento de un elemento y sus agregados.
2. El uso de programas certificadas para diseñar permite obtener piezas de calidad superior a menor costo también se puede mejorar procesos existentes y estudiar el fallo de un componente estructural con sus componentes.
3. Cada pieza fue analizada tomando en consideración las condiciones extremas del diseño y a la misma vez acercándose a sus comportamientos en la situación real de su funcionamiento. Se tiene que destacar que las acciones de las fuerzas en estas condiciones es cíclica, por lo tanto más alta todavía es la resistencia mecánica de los elementos.

CAPITULO 4: PREDETERMINACIÓN DEL COSTO DE FABRICACIÓN DE LA MAQUINA BRIQUETEADORA HIDRÁULICA²⁸

4.1 GENERALIDADES DEL COSTO

El costo de producción constituye un instrumento de control y de vital importancia, ya que el análisis del mismo refleja el conjunto de gastos incurridos en la fabricación del producto o prestación de servicio. Es también la expresión monetaria de los gastos de producción, es decir, los gastos corrientes de las empresas en la elaboración de la producción. En ella se incluyen los gastos de materias primas y materiales auxiliares empleados en cualquier tipo de fabricación, los gastos de trabajo humano que representamos por salario, la parte de los activos fijos tangibles que se transfieren al producto en forma de depreciación, el valor de la energía consumida, los gastos por concepto de seguridad social, así como otros gastos necesarios que apoyan indirectamente todo tipo de fabricación.

El costo como categoría económica expresa la eficiencia en el trabajo, constituye un indicador generalizador de la calidad y permite comparar la producción obtenida y la magnitud de los gastos incurridos en su fabricación, reflejando en el ahorro de los recursos materiales, humanos y financieros.

Los principales elementos del costo de producción expresado en forma monetaria son:

- I. El valor de las materias primas.
- II. Materiales auxiliares empleados en la fabricación de la maquina.
- III. Los gastos relacionados con el trabajo humano, que compensa los valores de los productos para sí, representándolo por el salario.
- IV. La parte de los activos fijos tangibles que se transfieren en al producto en forma de depreciación.
- V. El valor de la energía consumida.
- VI. Los gastos indirectos y otros gastos.

²⁸ Dr. Fundora Beltrán, P. (2002). *Estudio de la densificación de la paja de caña sin preparación previa con tecnología hidráulica para el perfeccionamiento de su proceso tecnológico*. Tesis. Para optar para el grado científico de Máster en Ciencias Técnicas. Cienfuegos, Universidad de Cienfuegos.

4.2 CALCULO DE LAS MATERIAS PRIMAS Y LOS DISPOSITIVOS

En el diseño de la máquina se utilizo varios materiales primas y dispositivos. Para simplificar el cálculo económico del dicho se las analiza en una forma tabular expresando el costo total por unidad o por tonelada métrica precediendo la deducción de la cantidad y precio.

Tab.4.1 Listado de dispositivos del sistema hidráulica

SISTEMA DE TRES ETAPAS						
Componentes			Código	Precio Actual	Cantidad	Costo total (USD)
Bomba de engranaje			PLP30.73	168,08	1	168,08
Distribuidor manual			SD20	551,11	1	551,11
Cilindro hidráulico 1; con carrera	375	mm	12,125/70.375	789,30	2	1578,60
Cilindro hidráulico 2; con carrera	1000	mm	12,160/80.1000	1010,30	2	2020,60
Cilindro hidráulico 3 colisa	1000	mm	12,080/40.1000	505,15	2	1010,30
Manómetro			MGS10/13/A-300 bar	10,50	1	10,50
Filtros			OMTF 150	43,00	1	24,00
Tubería de presión			SAE 100 R2 AT (-12)	22,83	12	274,00
Tubería de succión			SAE 100 R2 AT (-24)	45,79	2	91,57
Tubería de retorno			SAE 100 R2 AT (-20)	38,22	1	38,22
Niveles de aceite visuales			LV2T OMT	19,20	1	19,20
Tapones de llenado			TR-2 OMT	6,00	1	6,00
Deposito de aceite			Constructivo	36,00	1	36,00
Motor de la bomba			M280S	5060,17	1	10882,35
Costo total 1						\$16 710,53

Tabla 4.1 Listado de materiales

No.	Designación	Material	UM	USD	Cantidad utilizada	Costo total (USD)
1	Viga canal (N:27) (20')	AC-20(CT3)	TM	\$5,14/pie	92'	472,88
4	Plancha 40x4000x6000 mm	AC-20(CT3)	TM	632,00	1,5	948,00
5	Plancha 25x4000x6000 mm	AC-20(CT3)	TM	632,00	1,2	758,00
6	Plancha 8x4000x6000 mm	AC-20(CT3)	TM	450,00	5,37	2416,5
6	Tubo sin costura	AC-35	UN	173,16	0,6	103,89

	250x6000 mm					
7	Barra cuadrada 40x40 mm	AC-35	TM	65,00	1	65,00
8	Tornillo M24x100	AC	UN	1,07	36	38,52
	Tuerca M24	AC	-	0,85	36	30,6
	Arandela M24		-	0,45	36	16,2
9	Tornillo M20x110	AC		1,44	50	72,00
	Tuerca M20		UN	0,85	50	42,50
	Arandela M20			0,32	50	25,00
10	Tornillo M12x75	AC		0,535	48	25,68
	Tuerca M12		UN	0,425	48	20,4
	Arandela M12			0,225	48	10,8
10	Caja de bola 6206	-	UN	15,5	4	62,00
11	Muelle vagón ferrocarril Ø180x230	-	UN	25,75	2	51,5
15	Acero angular 25x25x6000 mm	-	UN	15,75	7,5	118,125
16	Barras rectangulares 25x100x6000 mm	-	UN	40,05	3,68	147,38
Costo total 2						\$5 424,98

4.3 COSTOS DE MATERIALES AUXILIARES UTILIZADOS

Los bienes materiales son los materiales más importantes del costo de producción, desde el punto de vista cuantitativo-monetario. Esto representa el valor de todas las materiales primas y materiales que se integran y consumen en el proceso de producción.

En la fabricación de esta máquina se utilizaron materiales auxiliares, cuyo precio fue necesario investigar en las entidades correspondientes. El costo de materiales fue determinado tomando en cuenta su precio de adquisición y la cantidad de unidades utilizadas.

Durante el proceso de soldadura se utilizaron:

Tabla 4.2 Costo de electrodos

Designación	Unidades	UM	USD/kg	Cantidad utilizada (kg)	Costo total (USD)
Electrodo	Ac	TM	3,75	20	75,00
Recargo 10%	-	-	-	-	7,5
Costo Total	-	-	-	-	\$82,5

En el corte de materiales fueron utilizados el oxigeno y el acetileno. La siguiente tabla refleja el costo por unidad y el total de estos materiales.

Tabla 4.3 Costo del oxigeno y acetileno

Materiales	Unidades	Costo por unidad (USD)	Costo total (USD)
Balón de oxigeno	6	50,00	300,00
Balón de acetileno	3	65,00	195,00
Recargo 10%			49,5
Costo Total	-	-	\$544,50

4.4 LOS GASTOS RELACIONADOS CON EL TRABAJO HUMANO

El salario es la expresión monetaria de la parte fundamental del producto necesario que se crea en las empresas, y se destina al consumo individual de los trabajadores, incluyendo las remuneraciones que se realicen a los obreros, a partir del fondo de salario.

La seguridad social incluye los gastos originados por la aplicación al salario de la tasa aprobada para ella. En la realización del cálculo se desglosa por los operarios que intervienen en la fabricación de cada pieza, teniendo en cuenta la tarifa horaria correspondiente a cada uno, las horas trabajadas y el gasto de salario según las mismas.

Para determinar el gasto de salario se multiplicaron las tarifas horarias por las horas que debe trabajar cada obrero, dado el salario devengado por cada trabajador, y este se multiplica por el coeficiente empleado para vacaciones (9,09%) y el

coeficiente empleado para la seguridad social que representa el 14% sobre la suma del salario y las vacaciones.

El gasto total en salario y seguridad social se determinó por la suma del salario, las vacaciones y la seguridad social. Esto se representa en la siguiente tabla.

Tabla 4.4 Gastos de salarios y seguridad social

Obreros	Horas de trabajo	Tarifa horario (\$)	Gasto de salario (\$)
Soldador A	64,02	0,0675	4,321
Soldador B	101,39	0,0554	5,617
Pailero	69,32	0,065	4,506
Tornero B	41,5	0,0717	2,976
Tornero C	12,65	0,0456	0,577
Fresador B	55,98	0,0542	3,034
Ayudante	70,11	0,0333	2,334
Taladrador B	42,43	0,0358	1,519
Cortador de materiales	11,57	0,0379	0,43
Total de salario			25,322
Total de vacaciones			2,532
Total de seguridad			3,899
Total			\$31,75

4.4 GASTO GENERADO POR LA AMORTIZACIÓN DE LOS EQUIPOS

La amortización es el traspaso gradual del valor de los medios de trabajo, a medida que se desgastan, a los productos que se elaboran y la utilización de ese valor para la reproducción ulterior de los fondos fijos de producción.

Los descuentos de amortización representan el valor en forma monetaria de los fondos fijos en funcionamiento, traspasado a la producción elaborada y se incluye en el costo de producción. Con la amortización se persigue acumular recursos para reponer el gasto de los fondos fijos durante su tiempo de explotación, así como restituirlos totalmente cuando se les da de baja en la producción.

La amortización incluye los gastos calculados a partir del valor inicial de los activos fijos tangibles, aplicándole las tasas de amortización establecidas para cada equipo.

Para la realización del cálculo que se refleja en la tabla siguiente, se tomaron en cuenta los precios de los equipos, el porcinito establecido para cada uno y el tiempo efectivo de utilización de los mismos.

Tabla 4.5 Amortización de los Equipos

Maquina	País	Precio(USD)	Amortización actual (USD)	Amortización por horas(USD)	Tiempo efectivo (h)	Gasto total (USD)
Taladro 2 M 55	URSS	2131,82	42,64	0,018	43,43	0,78
Rectificador de soldadura	URSS	1748,48	34,97	0,015	172,43	2,59
Torno 16K20	URSS	35178,00	703,56	0,305	54,41	16,59
Segueta mecánica	URSS	850,00	17,00	0,007	9,57	0,07
Fresadora 6 P12 y 13	URSS	7054,77	141,10	0,061	55,98	3,41
Rectificador 3Y132	URSS	4100,00	82,00	0,036	18,00	0,65
Equipo de oxicorte	URSS	13860	693,00	0,301	86,00	25,89
Costo total						\$47,98

4.5 COSTO POR EL CONSUMO DE ENERGÍA ELÉCTRICA

Fue necesario determinar la energía eléctrica necesaria de acuerdo del consumo de las maquinas herramientas utilizadas y la cantidad de horas trabajadas por cada uno de ellas y teniendo en cuenta los datos aportados por la empresa eléctrica del costo kWh. = \$0.09

En la siguiente tabla se muestra dichos cálculos.

Tabla 4.6 Costo de la energía eléctrica

Equipos	Horas de trabajo	Gasto en una hora (kW)	Energía Consumida (kWh)	Costo Total (USD)
Taladro	22,15	8,4	186,06	16,74
Rectificador de soldadura	100,3	32,0	3209,6	288,864
Torno	30,00	12,97	389,1	35,019
Segueta mecánica	8,00	1,5	12,00	1,08
Fresadora	35,00	13,62	476,70	42,84
Rectificadora	10,00	10,53	105,30	9,477
Costo total				\$394,02

4.6 Costo total de la fabricación

Después de tener valoración de los costos, analizando diversos gastos que se tendrá en la fabricación de la maquina, se refleja en la siguiente tabla el costo preliminar en las tablas anteriores.

Tabla 4.7 Costo total de fabricación

Gasto total	USD
Dispositivos y materiales	22 135,51
Materiales auxiliares	627,00
Gastos en salarios y seguridad social	31,75
Amortización de equipos	47,98
Energía eléctrica	394,02
Total	\$23 236,26

4.7 Análisis de los resultados

Como se observa en la tabla anterior, el costo total de fabricación de la maquina es de \$23 236,26 USD.

Si incorporamos un 50% para las ganancias de la empresa productora, el costo (venta) de la maquina es de \$34 854,39 USD.

El precio de venta de la tonelada de briqueta, en el lugar de consumo oscila entre \$10,3 USD Y \$15,4 USD²⁹. Se considera el mejor precio de la tonelada de briqueta,

²⁹ Dr. Fundora Beltrán, P. (2002). *Estudio de la densificación de la paja de caña sin preparación previa con tecnología hidráulica para el perfeccionamiento de su proceso tecnológico.*

como el gasto en producirla, incluyendo el salario, gasto de energía, amortización de equipos etc. Una tonelada de petróleo es aproximadamente equivalente a tres toneladas de briquetas. El precio actual de la tonelada de petróleo es de \$74,93 USD/Barril (549,84 USD/T). Por equivalencia energética, una tonelada de briqueta vale \$183,28 USD; si restamos el costo en producirla, ahorraremos \$366,56 USD, si empleamos las briquetas como combustible alternativo y sustituyendo del petróleo en aplicaciones específicas. La briqueteadora diseñada puede producir briquetas a capacidades mayores de 2,43 t/h. Si trabajamos 8 horas al día, 24 días al mes y 10 meses al año, se producen 4 665,6 toneladas de briquetas al año, que representa un ahorro de equivalente de \$1 710 222,34 USD.

Conclusiones parciales

1. El incremento de los precios del petróleo y su abastamiento fortalece la necesidad de usar las briquetas de biomasa como fuente de energía alternativa y renovable.
2. Los resultados precedentes confirman la perspectiva técnico-económica de la densificación con briqueteadoras hidráulicas y posibilitan asegurar que constituye la tecnología de densificación apropiada para las características de y condiciones de las biomasa.
3. Se asume un precio de venta de la briqueteadora elevado e igual a 50 % superior al costo de fabricación, resulta comparable con el precio unitario casi igual de las tecnologías afines. La ganancia, al utilizar briquetas de biomasa además de ser económica, también es medioambiental.
4. El análisis demostró que es factible, desde el punto de vista económico, que resulta ventajosa densificar las biomasa. Para Cuba y los países del tercer mundo y muchos países desarrollados carentes de petróleo esta resulta una alternativa obligada.

CONCLUSIONES

1. El valor técnico y socio-económico del uso de las briquetas se ve más claro cuando estas sustituyen a otros combustibles no-renovables, como por ejemplo el petróleo o el carbón; incrementando la cantidad de máquinas en funcionamiento y/o sus capacidades de producción se favorece la factibilidad y fiabilidad de dichas máquinas.
2. La metodología ilustrada para el diseño de una briqueteadora multitubular es una herramienta útil para cualquier ingeniero/técnico que desee construir una máquina. Es clara, concisa y sistemática, mostrando los pasos necesarios para el desarrollo de un equipo partiendo de la capacidad de producción y dimensiones físicas de la briqueta.
3. La briqueteadora hidráulica produce briquetas multitubulares, tiene además la posibilidad de producir briquetas tubulares y macizas de diferentes dimensiones y en número que se corresponda con la sección transversal de las mismas.
4. La briqueteadora hidráulica multitubular es flexible y sirve para compactar biomasa de diferentes densidades y granulometría. Su empleo es una respuesta definitiva e ideal a la producción de combustible sólido utilizando las biomásas.
5. La máquina diseñada tiene el potencial de producir briquetas a capacidades mayores de $2,43 \text{ t/h}$ (4 665,6 toneladas de briquetas al año). El precio actual de la tonelada de petróleo es de \$74,93 USD/Barril (549,84 USD/T). Por equivalencia energética, una tonelada de briquetas vale \$180,13 USD, si restamos el costo en producirla, ahorraremos \$369,71 USD. Si empleamos las briquetas como combustible alternativo y sustituyendo el petróleo en aplicaciones específicas se logra un ahorro anual de \$1 724 918,98 USD.
6. Las inversiones para construir una máquina y los resultados del análisis del costo demuestran que es económicamente factible, además, desde el punto de vista del desarrollo sostenible, la ausencia de esta tecnología en la sociedad es poner en riesgo las necesidades energéticas del pueblo.

RECOMENDACIONES

1. Promocionar el uso de las briquetas a través de los medios de comunicaciones como un combustible sólido útil para hogares e industrias según sus aplicaciones.
2. Informar a la población (doméstico e industrial) sobre la importancia de utilizar esta tecnología (briquetas) para satisfacer sus demandas energéticas no solo en tiempos de crisis tradicionales, sino también en la vida cotidiana.
3. Utilizar la metodología en conjunto con el ejemplo mostrado como una guía en el diseño de otra briqueteadora hidráulica multitubular de capacidad distinta.
4. Diseminar localmente e internacionalmente los logros de este trabajo.

BIBLIOGRAFÍA

Arrechea, J. (1996). *Construcción y evaluación de dispositivos para la determinación de la presión transversal en la compactación de la paja de caña*. Trabajo de diploma, Universidad de Cienfuegos.

Barriando, E. (2000). *Dispositivo para producir briquetas cilíndricas tubulares de paja de caña de diferentes dimensiones*. Trabajo de Diploma, Universidad de Cienfuegos.

Betancourt, E. (1996). *Diseño de Briqueteadora Hidro-Mecánica de elevada capacidad*. Trabajo de diploma.

Bhattacharya, S (n.d.). *Biomass energy and densification: A Global Review with Emphasis on Developing Countries Energy Program*. Asian Institute of Technology

Bhattacharya, S. Augustus Leon, M., & Rahman, M. (2004). *A Study on Improved Biomass Briquetting. Energy Program, School of Environment, Resources and Development*. Asian Institute of Technology.

Castex, I. (1992). *Proyecto Constructivo de briqueteadora Hidráulica para paja de caña*. Trabajo de diploma, Universidad de Cienfuegos.

Colectivo de autores. (1986). *Tecnología de construcción maquinaria*. Ciudad de la Habana: Pueblo y Educación.

Díaz Torres, J., & Bravo Nunez, J. (1997). *Diseño de la maquina empacadora briqueteadora hidráulica de paja de cana*. Trabajo de diploma.

Dr. Fundora Beltrán, P. (2002). *Estudio de la densificación de la paja de caña sin preparación previa con tecnología hidráulica para el perfeccionamiento de su proceso tecnológico*. Tesis. Para optar para el grado científico de Máster en Ciencias Técnicas. Cienfuegos, Universidad de Cienfuegos.

Elementos de fijación; tornillos, tuerca, arandelas, y pasadores; selección. (1986).

Energy Working Group. (2008, November). (p.17,35)

Ensuring increasing and sustainable biomass production: The importance for international bioenergy trade. (2007). (p. 4, 14, 21). 15th European Biomass Conference & Exhibition in Berlin, Germany. (p.15)

Executive Committee of IEA Bioenergy. (n.d.). (p.2)

Feodosiev, V. (1980). *Resistencia de materiales* (Tercera.). Impreso en la URSS: Mir. (p.579)

Fernández Levy. (n.d.). *Resistencia de materiales* (1º ed.). Ciudad de la Habana Pueblo y Educación. (p.303-349)

- Granada Álvarez, E. (1999). *Estudio de la influencia de los parámetros humedad, temperatura y presión en el proceso de densificación, mediante auto-aglomeración, de biomasa ligneocelulósica residual*. Tesis Doctoral, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y Minas. Universidad de Vigo (España).
- Hernández Sampier, R. (n.d.). *Metodología de la Investigación* (1º ed.). San Miguel No.1111, Ciudad de la Habana, Cuba: Félix Varela.
- High efficiency bagasse cogeneration can meet up to 25% of national power demand*. (n.d.). .
- Ing. Dwight Abu, P. (2008). *Metodología del diseño de una maquina briqueteadora flexible multipropósito*. Trabajo de diploma, Universidad de Cienfuegos.
- Ing. Przybylski, J. (n.d.). *Dispositivos especiales para el maquinado* (Vol. 1). Ciudad de la Habana: Pueblo y Educación. (p.760)
- Jens Bo Holm, N. (n.d.). *Predicted energy crop potentials for bioenergy worldwide regions*. (p.4,6,13).
- Mani, Tabil, L., & Sokhansanj, S. (n.d.). *Evaluation of compaction equations applied to four biomass species*.(p.5)
- O'Dogherty, M., & Wheeler, J. (1984). *Compression of straw to high densities in closed cylindrical dies*.
- Pardillo, Y., & Polin, J. (1996). *Diseño y construcción de la briqueteadora hidráulica para paja de caña*. Trabajo de diploma, Universidad de Cienfuegos.
- Patente No. 1193011. *Prensa de residuos agrícolas*. 30 de junio, 1987. SU
- Patente No. 1232497. *Prensa de residuos agrícolas*. 14 de enero, 1985. SU
- Patente No. 1232497. *Briqueteadora para residuos de madera*.
- Patomsok, W. (n.d.). *Physical Characteristics of Maize Cob Briquette under Moderate Die Pressure* Mechanical Engineering Department. Engineering Faculty, Naresuan University, Phitsanulok 65000, Thailand.
- Peraza, L., & Pascual, N. (1994). *Modelo físico-matemático para la compactación de la paja de caña*. Universidad de Cienfuegos.
- Pisarenko. (1979). *Manual de resistencia de materiales*. la república socialista de Rumania.
- Reed, G. J. (1979). *Biomass densification energy requirements*. Washington D.C. (p.3,7)
- Reshetov, D. (1990b). *Elementos de Maquinas*. La Habana: Pueblo y Educación. (p.31-67,88, 643).

Sánchez Pérez, Y. (1993). *Diseño de briqueteadora hidráulica para producir briquetas tubulares*. Trabajo de Diploma, Universidad de Cienfuegos.

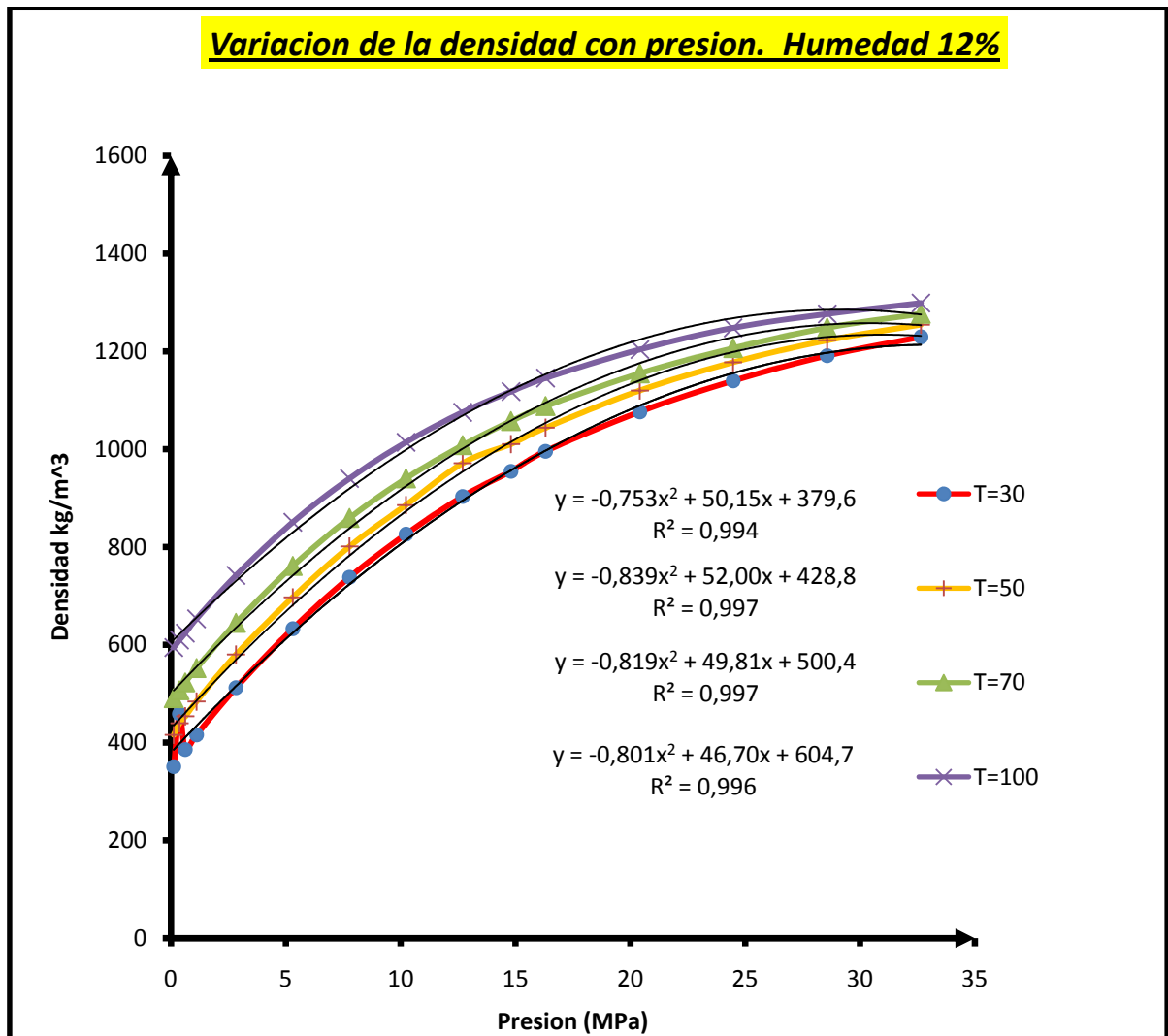
Sánchez, Y. (2001). *Diseño de briqueteadora Multipropósito para producir briquetas macizas y tubulares de paja de caña*. Trabajo de diploma, Universidad de Cienfuegos.

Sokhansanj, S., & Turhollow, A. (2004). *Biomass densification-Cubing operation and cost for corn stower*. (p.11).

World Bank. Mauritius. *Sugar Bio-Energy Technology*. (n.d). (p.1).

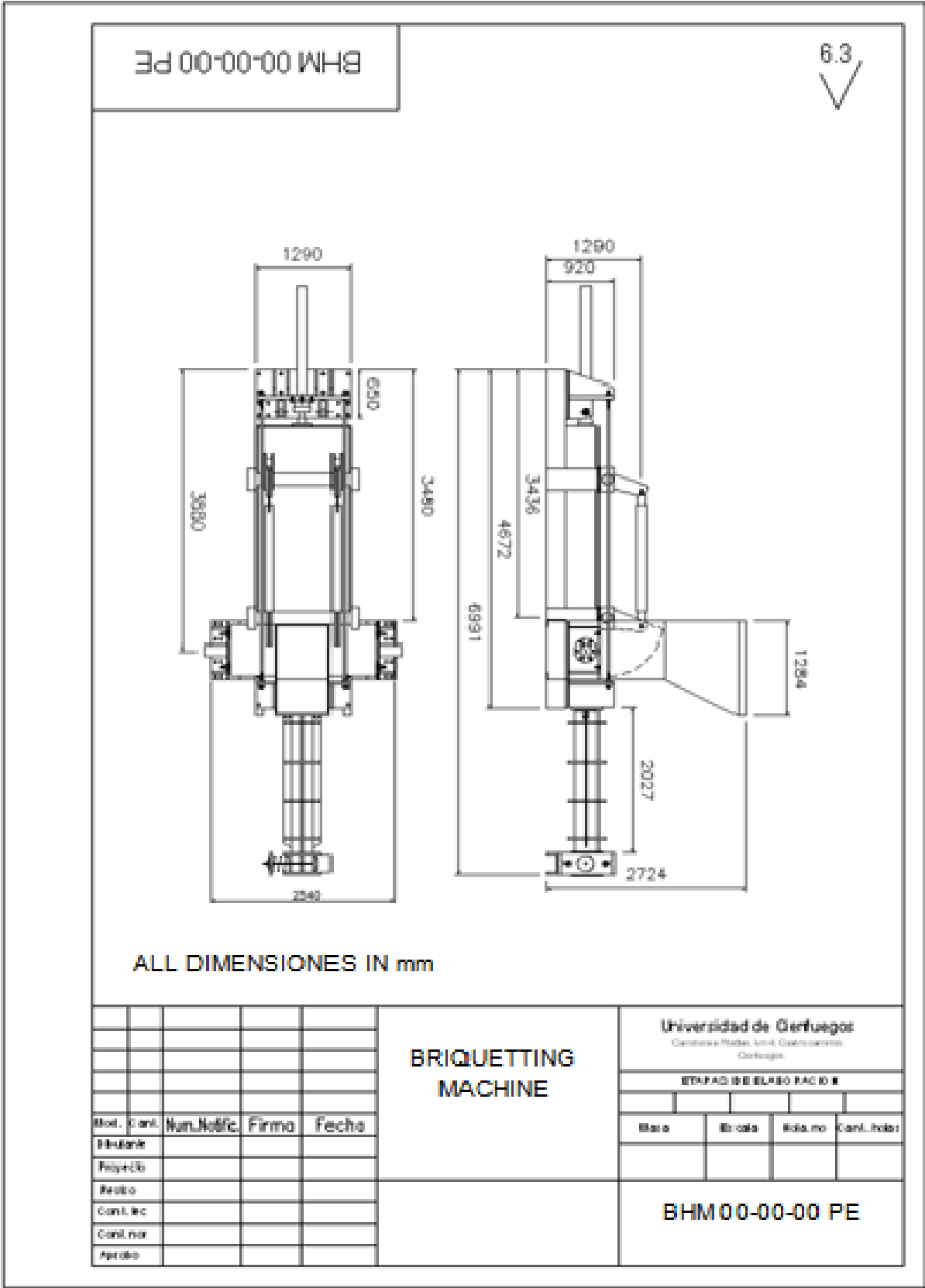
World Bank/UNDP/Bilateral Aid. (n.d.). (p. 1-3).

XIV Reunión del Foro de Ministros de Medio Ambiente de América Latina y el Caribe Ciudad de Panamá. (2003). (p. 1)



FORMATO	ZONA	POSICION	CODIGO		DENOMINACION	CANT.	OBS.
1	2	3	4		5	6	7
					DOCUMENTACION		
A4			BHM 00-00-00 PE		PLANOS ENSAMBLES	3	
					UNIDADES ENSAMBLES		
A4			BHM 01-00-00 PE		CHASIS	1	
A4			BHM 02-00-00 PE		MAIN SUPPORT	1	
A4			BHM 03-00-00 PE		TAIL END SUPPORT	1	
A4			BHM 04-00-00 PE		SECONDARY SUPPORT	2	
A4			BHM 05-00-00 PE		MAIN CARRIAGE	1	
A4			BHM 06-00-00 PE		PUNCH HEAD	1	
A4			BHM 07-00-00 PE		DOOR	1	
A4			BHM 08-00-00 PE		TOLVA	1	
A4			BHM 09-00-00 PE		COMPACTATION PIPE	1	
A4			BHM 00-00-01 PE		PRESSURE PLATE	1	
A4			BHM 00-00-02		SUPPORT PIN	1	
A4			BHM 00-00-03		SCHEMATIC DOOR MEC	1	
					ARTICULOS. NORM		
					TORNILLOS M24X100	36	
					NC 57-76:85		
					PLANO DE ENSAMBLE DE LA MAQUINA ETAPAS DE ELABORACION HOJA NO. CANT.HOJAS BHM 00-00-00		
MOD	CANT	NO.NOTIF	FIRMA	FECHA			
ELAB			A.T.J	3/07/10			
REV.							
CONT. TEC							
CONT. NOR							
APROB							

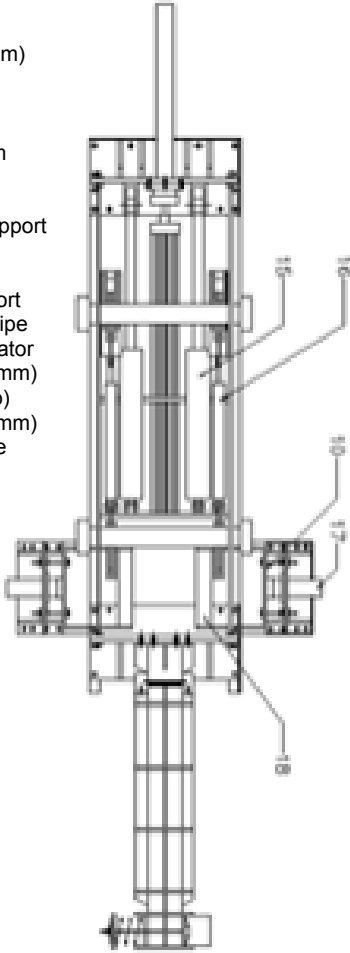
FORMATO	ZONA	POSICION	CODIGO			DENOMINACION	CANT.	OBS.
1	2	3	4			5	6	7
						ART. NORM.CONT'D		
						TORNILLOS M20X110	50	
						NC 57-76:85		
						TORNILLOS M12X75	48	
						NC 57-76:85		
						TUERCA M24 .NC 57-76:85	36	
						TUERCA M20 .NC 57-76:85	50	
						TUERCA M12.NC 57-76:85	48	
						ARANDELA M24 NC 57-76:85	36	
						ARANDELA M20 NC 57-76:85	50	
						ARANDELA M12 NC 57-76:85	48	
						OTROS ARTICULOS		
			12-140/70			CILINDRO HIDRAULICO	2	
			11.200/140.800			CILINDRO HIDRAULICO	2	
						RODAMIENTO 6206	4	
						MUELLE DE COCHE		
						DE FERROCARRIL 180X230	2	
			12-140/70			CILINDRO HIDRAULICO VACIO	2	
						MATERIALES		
			SAE 6013			ELECTRODOS		CANT.POR
								TECNOLOGIA
						HOJA NO.	CANT. HOJAS	
						BHM 00-00-00		
MOD	CANT	NO.NOTIF	FIRMA	FECHA				

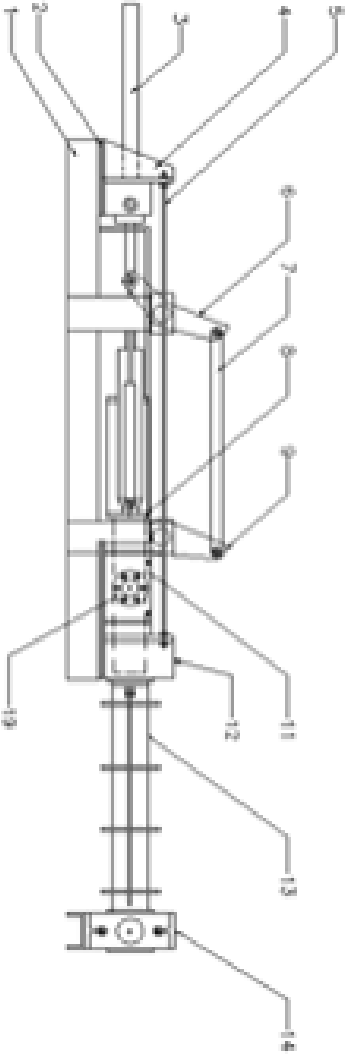


BHM 00-00-00 PE

6.3

1.Chasis
2.Placa base
3.Cilindro (140 mm)
4.Main support
5.Tensor
6.Arm
7.Connecting arm
8.Main carriage
9.Pin
10.Secondary support
11.Compression chamber
12.Tail end support
13.Compaction pipe
14.Tension regulator
15.Cilindro (200 mm)
16.Cilindro (vacio)
17.Cilindro (140 mm)
18. No.2 Carriage
19.Flange

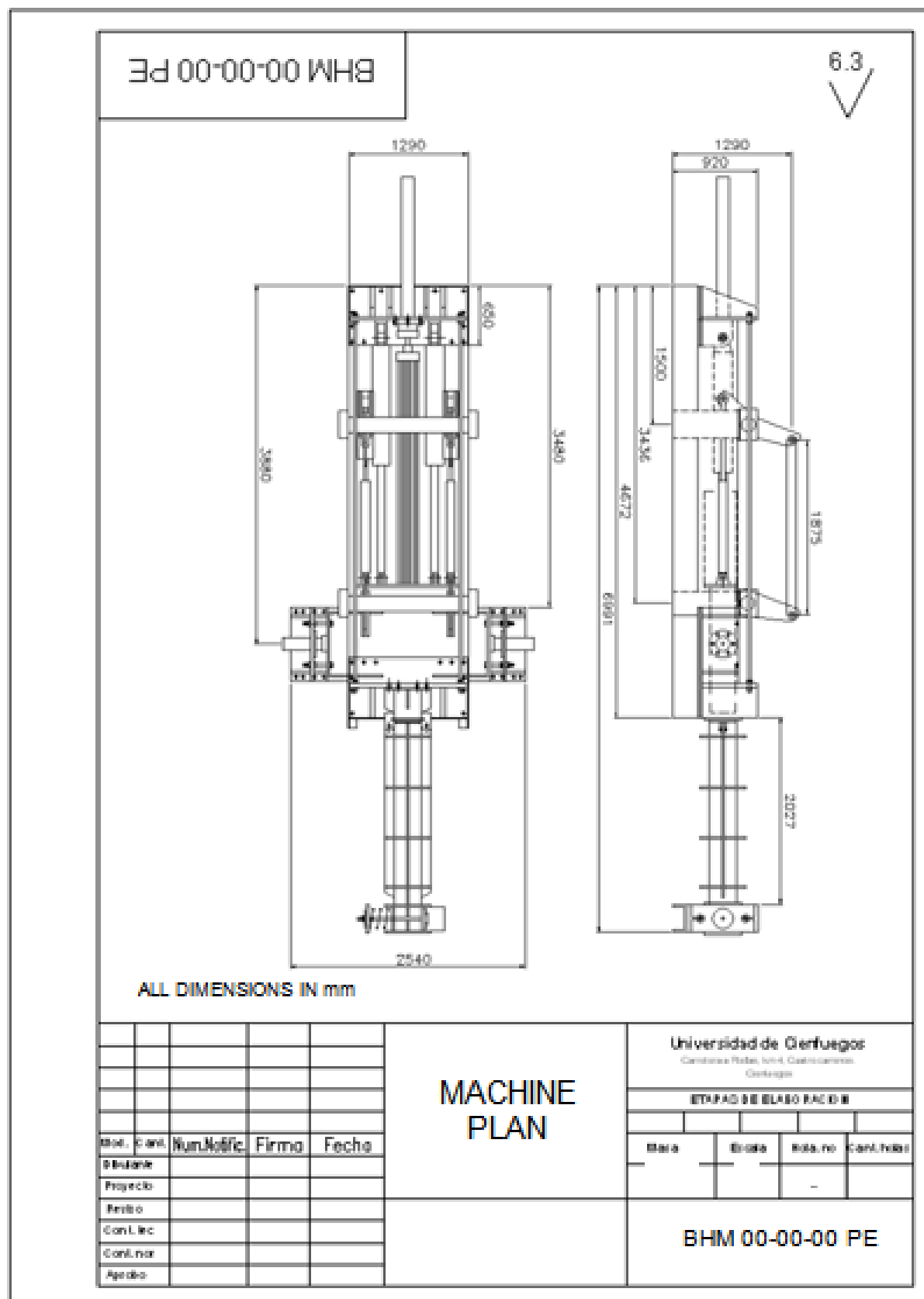


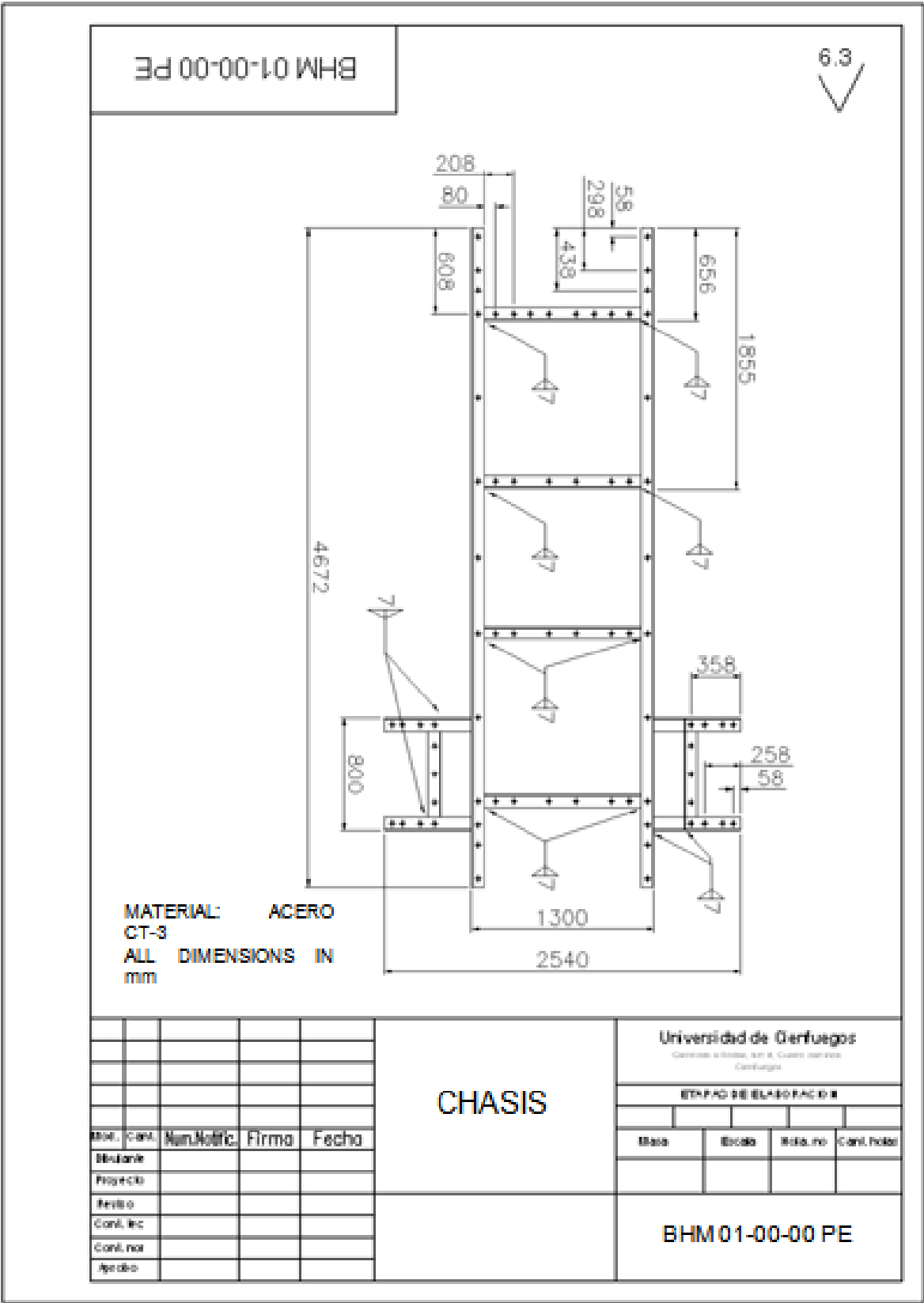


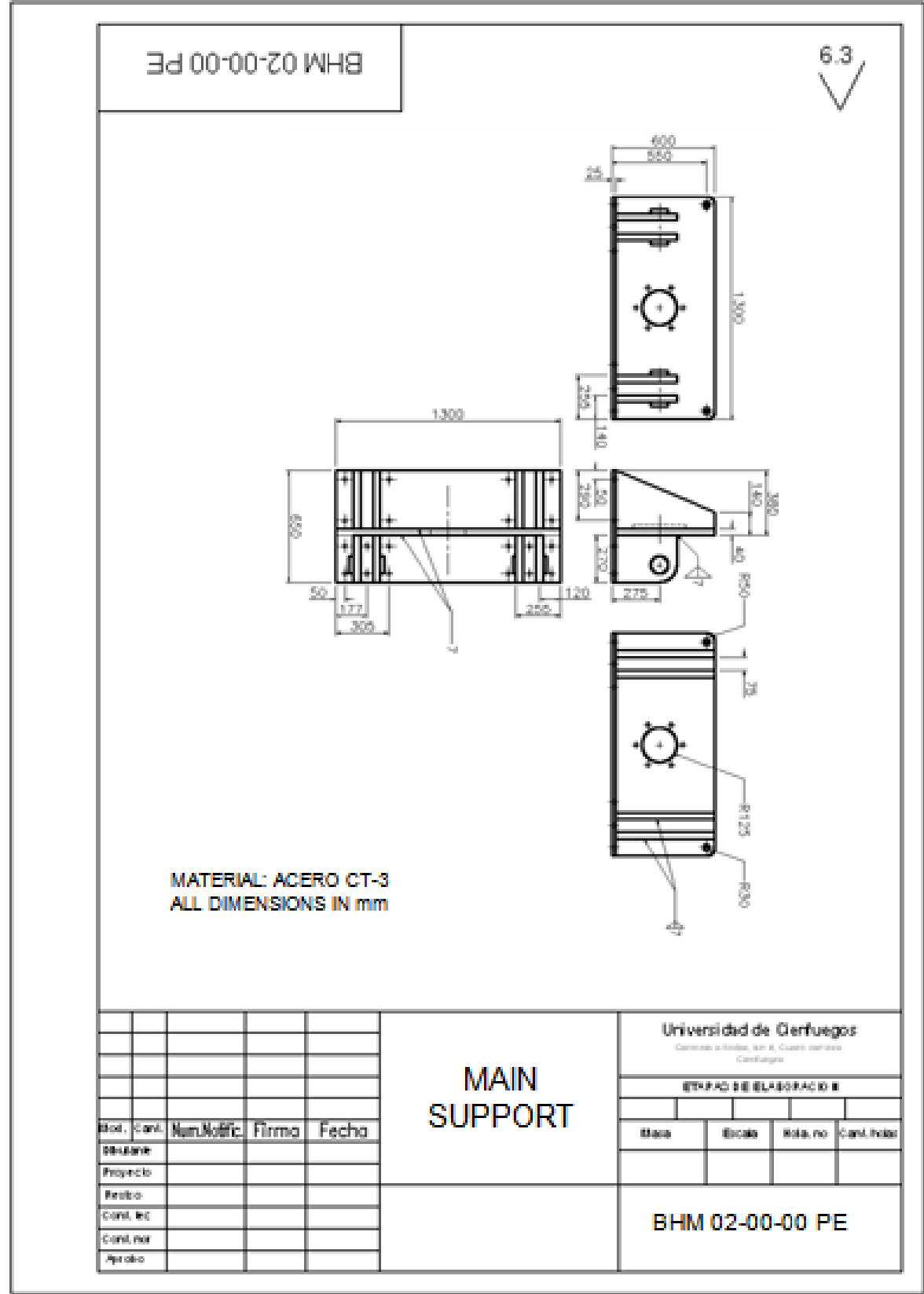
ALL DIMENSIONS IN mm

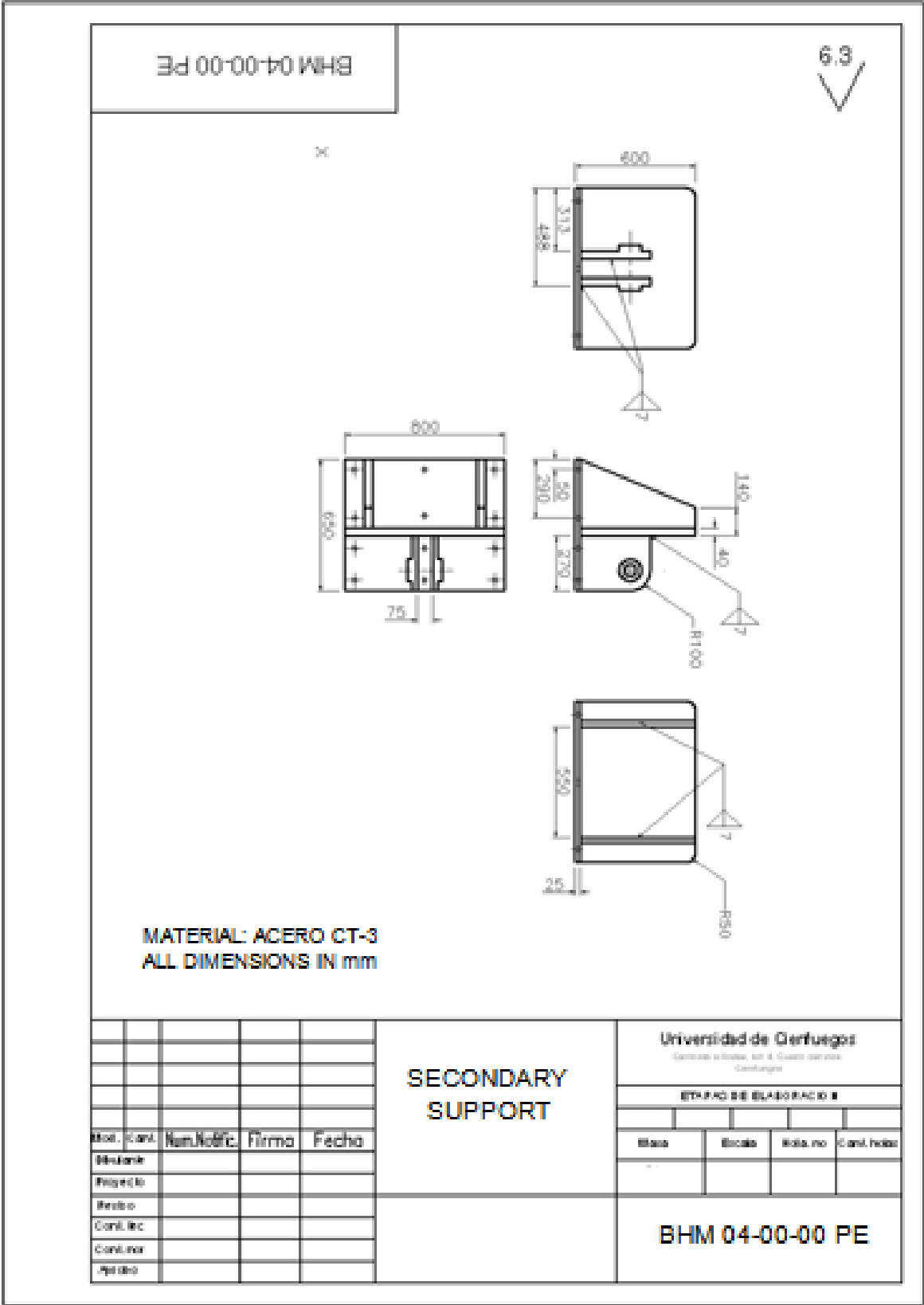
					MACHINE COMPONENTS	Universidad de Querfuagos Carbónes Rollos Unit, Gashuacamas, Cortagosa			
						ETAPAS DE ELABORACION			
Mod.	Carb.	Nun.	Notific.	Firma	Fecha				
Elaborar									
Proyecto									
Revisar									
Contr. Ing.									
Contr. mar									
Aprobado									

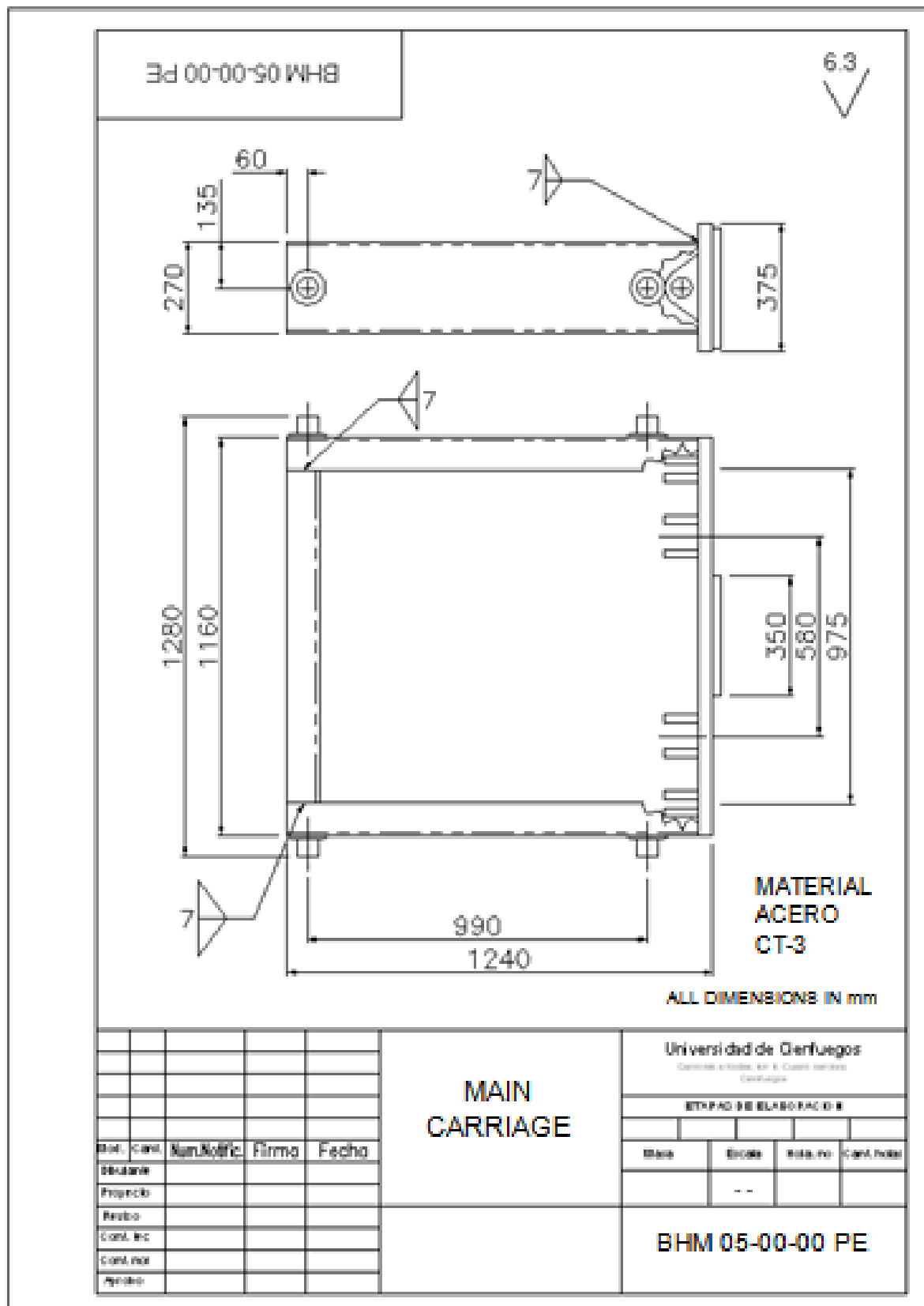
BHM 00-00-00 PE

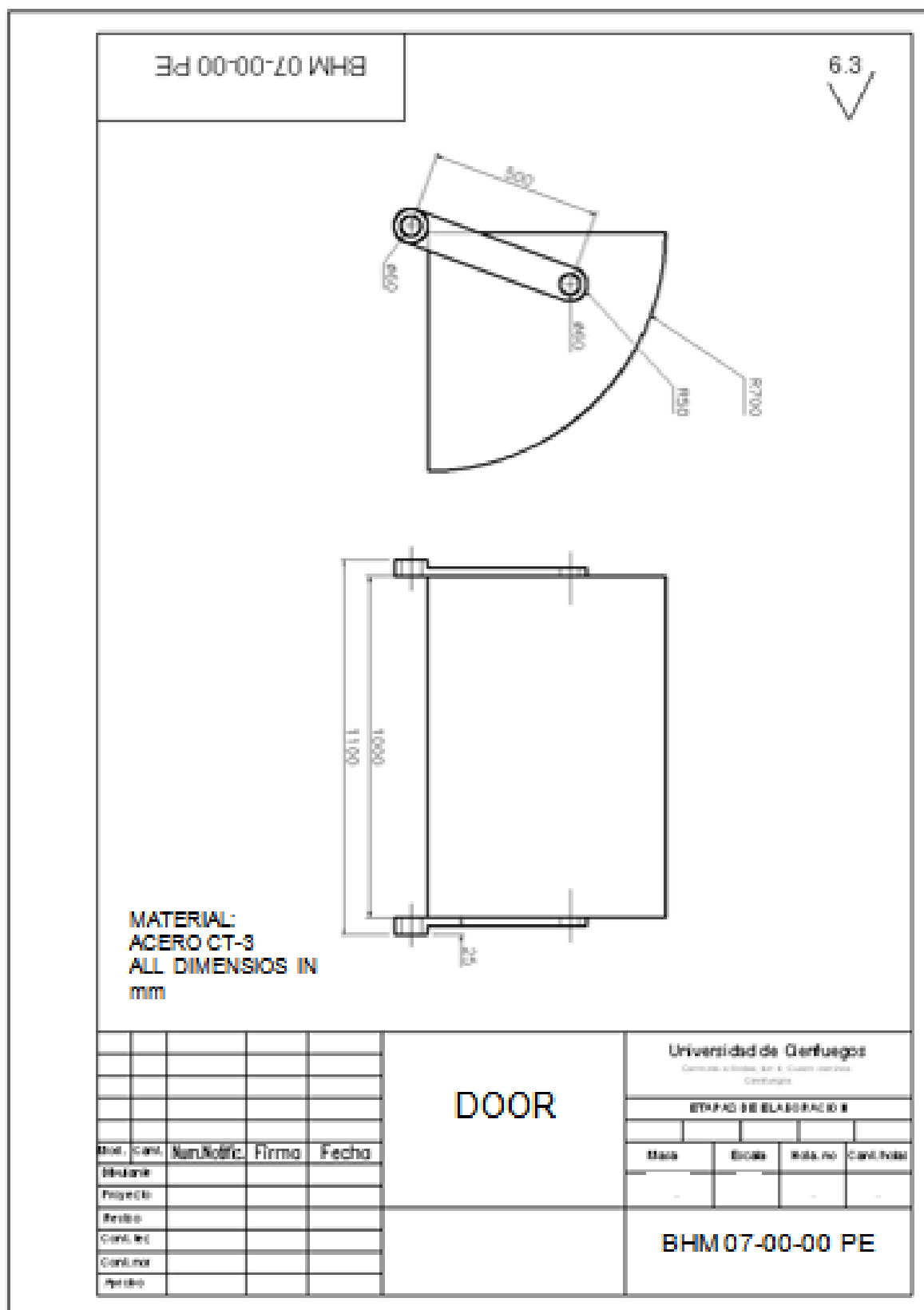


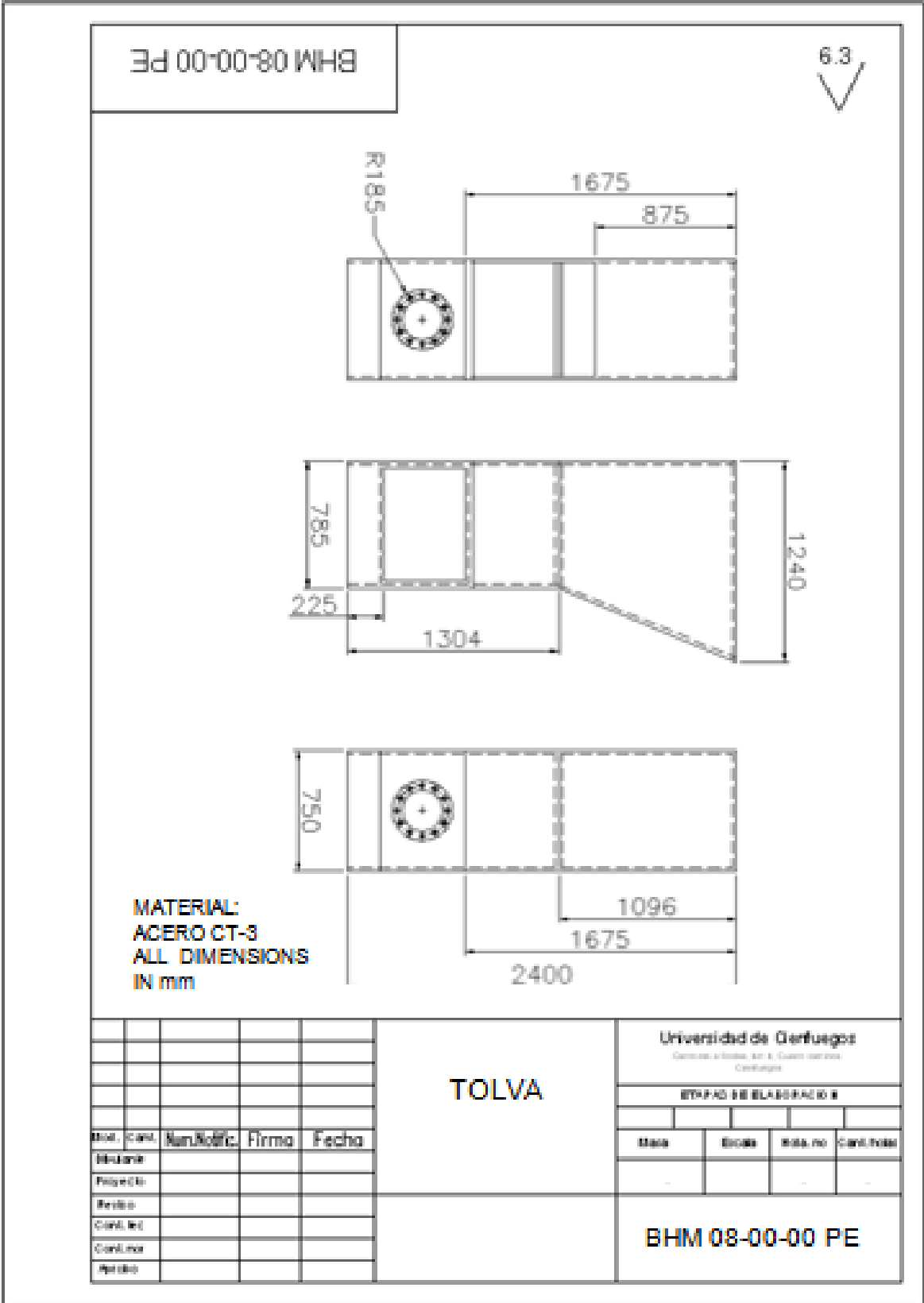




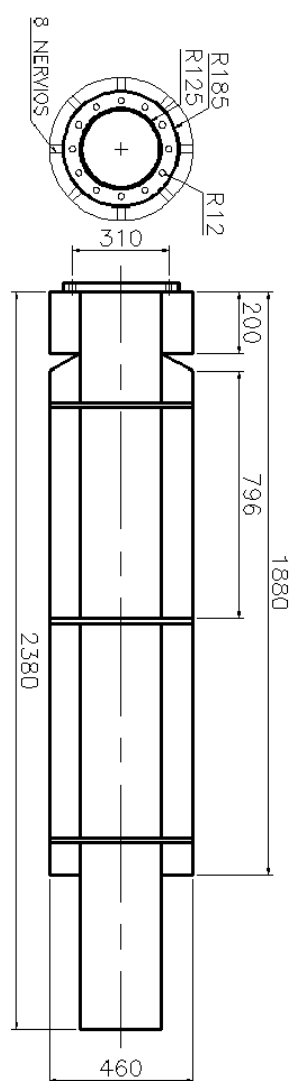








6.3



MATERIAL: ACERO CT-3
ALL DIMENSIONS IN mm

[illegible]

BHM 00-00-01

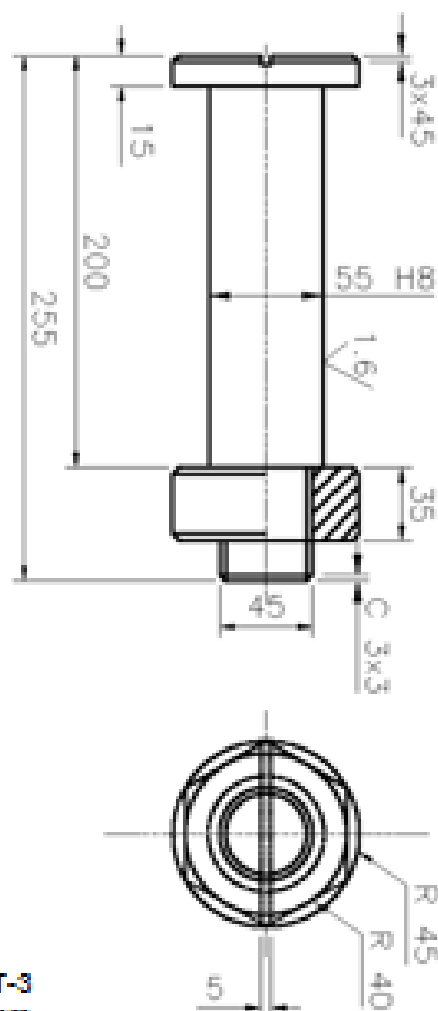
6.3

V

MATERIAL: ACERO CT-3

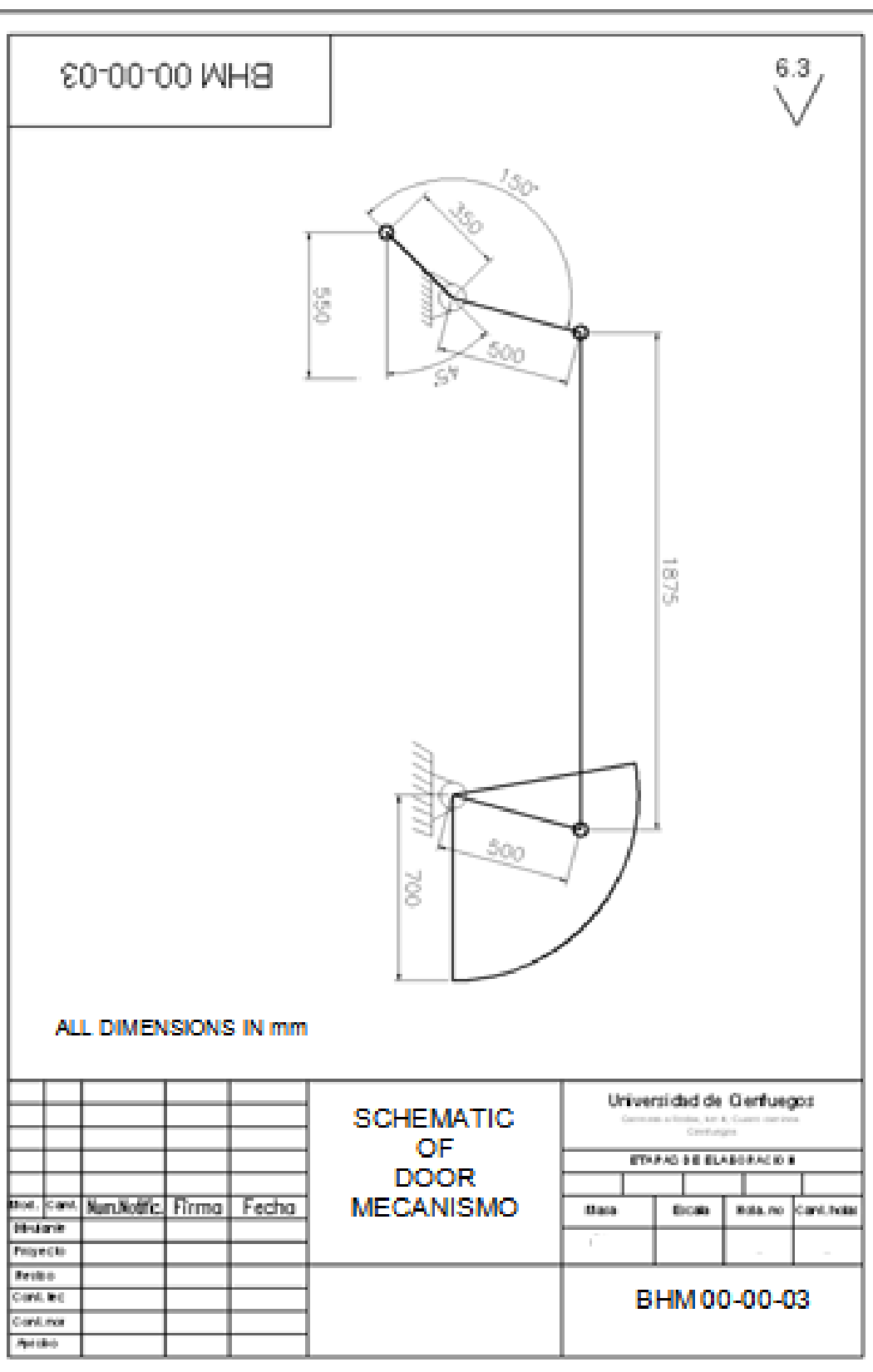
					PRESSURE PLATE	Universidad de Gerfuegos Generado a través del S. Control de Calidad Gerfuegos
						ETAPAS DE ELABORACIÓN
Mod.	Cant.	Num.	Notific.	Firma	Fecha	
Bólson						
Proyecto						
Revisión						
Control						
Control						
Control						
Aprobado						

BHM 00-00-01

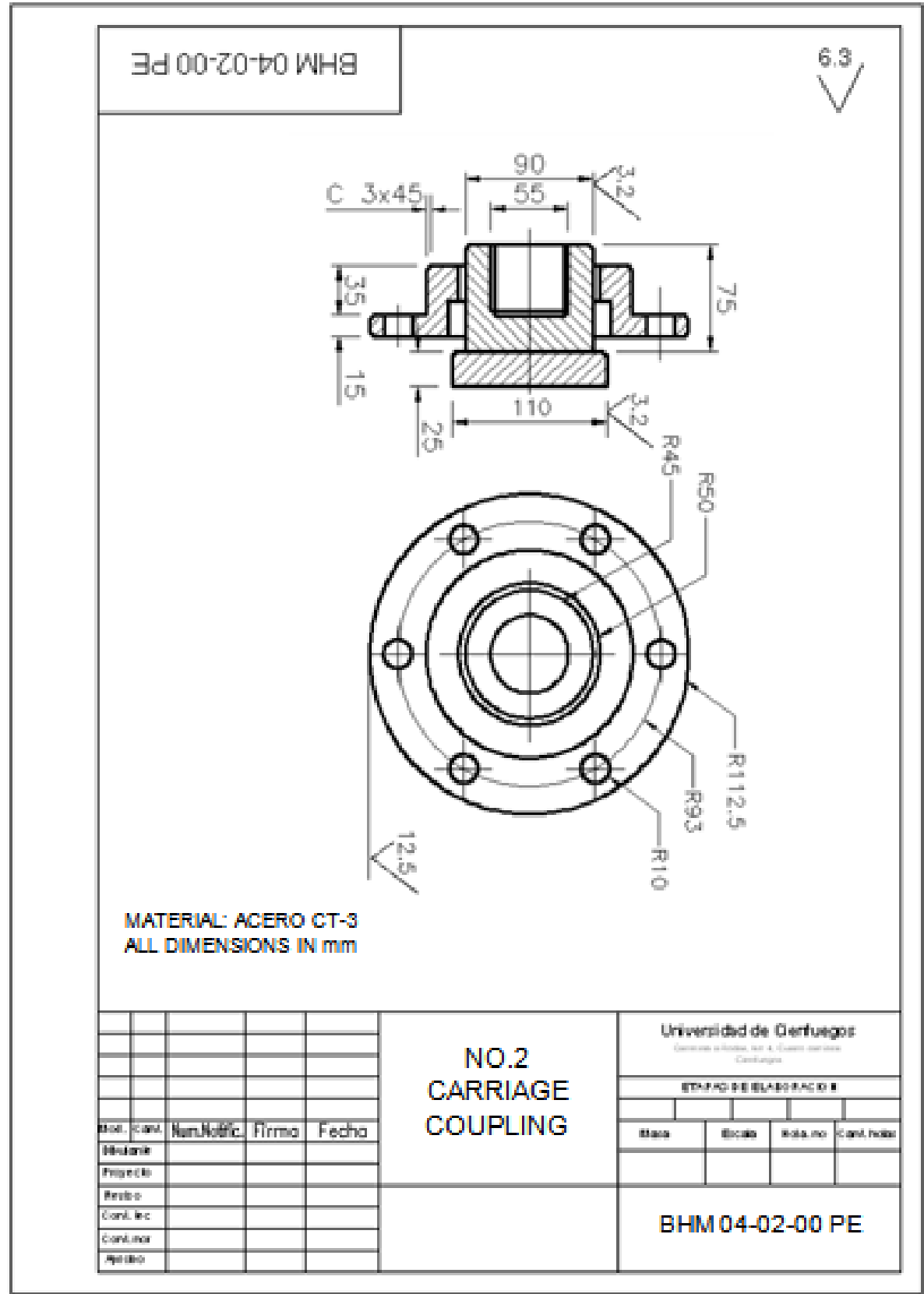
6.3
V

MATERIAL: ACERO CT-3
ALL DIMENSIONS IN mm

[illegible]



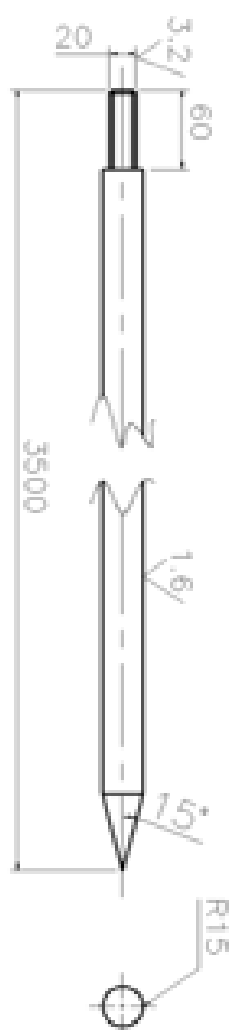
[illegible]



[illegible]

[illegible]

6.3



MATERIAL: ACERO CT-3
ALL DIMENSIONS IN mm

[illegible]

[illegible]

BHM 07-01-00 PE					6.3 V				
									
MATERIALES: ACERO CT-3 -ESPESSOR DE PLACA 25 mm -DIAMETRO DE TUBO 100 mm									
					ARM EXTENSION FOR DOOR	Universidad de Cienfuegos Carretera a San Juan, km 4, Cienfuegos			
						ESTADO DE ELABORACIÓN			
						Mesa	Escala	Nota no	Contenido
						-	-	-	-
Mod.	Cont.	Num.	Notif.	Firma	Fecha				
Elaboró									
Revisó									
Controló									
Construyó									
Acabó									
						BHM 07-01-00 PE			