

**DESARROLLO Y EVALUACIÓN ENERGÉTICA DE UN SISTEMA PARA
COMPACTACIÓN DE RESIDUOS DE COSECHA DE CAÑA DE AZÚCAR (RAC)**

JHONATHAN ALEXANDER DUQUE OROBIO

PROGRAMA ACADÉMICO:

MAESTRÍA EN INGENIERÍA “ÉNFASIS EN INGENIERÍA MECÁNICA”-7718

SEDE CALI



UNIVERSIDAD DEL VALLE

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

SANTIAGO DE CALI

2021

**DESARROLLO Y EVALUACIÓN ENERGÉTICA DE UN SISTEMA PARA
COMPACTACIÓN DE RESIDUOS DE COSECHA DE CAÑA DE AZÚCAR (RAC)**

JHONATHAN ALEXANDER DUQUE OROBIO

**GRUPO DE INVESTIGACIÓN EN MEJORAMIENTO INDUSTRIAL
GRUPO DE INVESTIGACIÓN DE BIOMECÁNICA**

DIRECTORES

GONZALO FERNANDO CASANOVA GARCÍA, Ph.D.

JOSÉ JAIME GARCÍA ÁLVAREZ, Ph.D.



**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
SANTIAGO DE CALI**

2021

Contenido

RESUMEN	8
1. INTRODUCCIÓN.....	10
1.1 Justificación.....	12
1.2 Objetivos	13
1.2.1 Objetivo general.....	13
1.2.2 Objetivos específicos.....	13
2. Fundamentos teóricos	14
2.1 Biomasa	14
2.2 Tecnologías para el aprovechamiento de la biomasa	15
2.2.1 Métodos bioquímicos.....	15
2.2.2 Métodos termoquímicos	16
2.3 Transporte de biomasa	18
2.4 Técnicas de densificación mecánica	19
2.4.1 Compactación con tornillo de extrusión	19
2.4.2 Compactación con pistón	20
2.4.3 Compactación con rodillos.....	21
2.4.4 Enfardado o embalado	22
2.5 Generalidades del RAC de caña de azúcar	24
3. Selección del mecanismo de densificación.....	27
4. Diseño del sistema de compactación	29
4.1 Diseño del mecanismo de compactación	30
4.1.1 Eje de potencia	33
4.1.2 Manivela	34
4.1.3 Biela.....	34
4.1.4 Pistón.....	35
4.2 Selección del motorreductor y sistema de transmisión de potencia.....	38
4.3 Diseño de la cámara de compactación y la estructura de soporte del sistema de compactación	40
5. Construcción del sistema de compactación y procedimiento de ensayos	42
5.1 Instrumentación para pruebas de campo	44
5.2 Metodología de pruebas de compactación	45

6. Resultados de densidad y energía	50
6.1 Discusión	55
7. Viabilidad energética y económica del enfardado de RAC de caña de azúcar	60
8. Conclusiones y recomendaciones	63
9. Bibliografía.....	66
10. Anexos	71

Lista de tablas

Tabla 1. Análisis elemental del RAC de caña de azúcar [39]	25
Tabla 2. Análisis proximal del RAC de caña de azúcar [39]	26
Tabla 3. Matriz de decisión [11] [27] [28] [29] [30][40]	27
Tabla 4. Requerimientos del sistema de compactación	32
Tabla 5. Condiciones de operación	32
Tabla 6. Factores y niveles del diseño estadístico	47
Tabla 7. Consumo de combustible equivalente	61

Lista de figuras

Figura 1. Ciclo de la biomasa.....	14
Figura 2. Tornillo de extrusión [27]	20
Figura 3. Compactación con pistón [29]	20
Figura 4. Prensa de rodillos [29].....	21
Figura 5. Operación de enfardado de pacas redondas [32]	23
Figura 6. Enfardadora de pacas rectangulares [34]	23
Figura 7. Partes de la caña de azúcar [38].....	25
Figura 8. Operación de enfardadora de pacas rectangulares [43]	29
Figura 9. Cinemática del mecanismo manivela-biela-pistón.....	31
Figura 10. Ensayos de compresión de RAC de caña de azúcar [44]	32
Figura 11. Montaje del eje de potencia y las manivelas	34
Figura 12. Biela	35
Figura 13. Interrupción de la alimentación del RAC	36
Figura 14. Ensamble del pistón	36
Figura 15. Condiciones de borde para simulación del pistón	37
Figura 16. Esfuerzo de Von Mises en la placa frontal del pistón	38
Figura 17. Esfuerzo de Von Mises en el soporte de la celda de carga.....	38
Figura 18. Motor y reductor seleccionados	39
Figura 19. Sistema de embrague	40
Figura 20. Cámara de compactación	41
Figura 21. Estructura de soporte	41
Figura 22. Mecanizado de biela, manivela y ejes.....	42
Figura 23. Construcción de tolva y cámara de compactación	42
Figura 24. Montaje del mecanismo de compactación	43
Figura 25. Montaje del pistón	43
Figura 26. Montaje de sistema de transmisión de potencia	43
Figura 27. Sistema telemétrico para adquisición de torque.....	44
Figura 28. Montaje del encoder incremental	45
Figura 29. Montaje del laboratorio de pruebas	46
Figura 30. Tamaños de partícula.....	47

Figura 31. Amarrado manual de fardos.....	49
Figura 32. Pesaje de fardos	49
Figura 33. Densidad aparente promedio por tratamiento	50
Figura 34. Resultados del análisis estadístico para la densidad aparente con respecto al nivel de humedad. Se observa que la densidad del grupo alta humedad es estadísticamente mayor que la de los otros dos grupos	51
Figura 35. Resultados del análisis estadístico para la densidad aparente con respecto a los tamaños de partícula	52
Figura 36. Resultados del análisis estadístico para la densidad aparente con respecto a las interacciones entre factores.....	52
Figura 37. Consumo energético en la producción de fardos	53
Figura 38. Resultados del análisis estadístico para el consumo de energía con respecto a los tamaños de partícula.....	54
Figura 39. Resultados del análisis estadístico para el consumo de energía con respecto a las interacciones entre factores	55
Figura 40. Densidad aparente BS promedio por tratamiento	56
Figura 41. Resultados del análisis estadístico para la densidad aparente BS con respecto al tamaños de partícula	56
Figura 42. DCL del mecanismo de compactación	74
Figura 43. Diagramas de cortante y momento del eje de potencia	76
Figura 44. Factor de concentración de esfuerzos para eje con cambio de sección [58]	77
Figura 45. Curva de Euler para columnas [50]	78
Figura 46. Placa con agujero sometida a flexión.....	79

RESUMEN

Los residuos agrícolas de corte (RAC) producidos por el cultivo de caña de azúcar representan una atractiva fuente de energía renovable para el sector energético colombiano, debido a su gran disponibilidad y sus múltiples rutas de aprovechamiento.

No obstante, existen algunos desafíos logísticos que deben superarse para viabilizar el aprovechamiento de dicha biomasa. El alto contenido de humedad, la baja densidad aparente, la poca homogeneidad y la gran dispersión geográfica, son factores que incrementan los costos logísticos de transporte y almacenamiento.

Estos factores adversos pueden ser reducidos considerablemente mediante procesos de secado y densificación. En esta dirección, en el presente trabajo se evaluó la operación de enfardado como método de densificación de RAC de caña de azúcar para su aprovechamiento energético.

El objetivo de esta investigación fue desarrollar un sistema de densificación de RAC de caña de azúcar y evaluar el gasto energético durante su operación. Se diseñó y construyó un prototipo de enfardadora de pacas rectangulares, y se ejecutaron ensayos de compactación de RAC con tres diferentes tamaños de partícula y tres niveles de humedad. Las densidades aparentes del RAC enfardado fueron semejantes a las reportadas en la literatura, lo que indicó un funcionamiento exitoso del prototipo.

La mayor densidad aparente (270 kg/m^3) y el mayor consumo energético (9.13 kJ/kg) se alcanzaron con el RAC de cosecha manual de alta humedad. Estos resultados fueron 3.1 y 5.3 veces, respectivamente mayores a los encontrados para el RAC picado de baja humedad. Asimismo, la mayor densidad aparente encontrada fue entre 17% y 24% mayor a las reportadas en la literatura para RAC de caña de azúcar.

El gasto energético del prototipo de enfardadora fue entre 5.9 y 6.25 veces menor a los reportados para enfardadoras comerciales. Esto se explica porque las enfardadoras comerciales consumen energía en múltiples funciones con las que no cuenta el prototipo, como el desplazamiento por el campo, la recolección de RAC y el amarrado de fardos.

El análisis en base seca arrojó que un mayor tamaño de partícula y una menor humedad favorecen la densificación y mejoran la eficiencia del transporte de RAC enfardado.

La eficiencia energética de la operación de enfardado, se estimó en 77.6%. Mientras que, la rentabilidad bruta calculada para la comercialización de los fardos fue de 23.4%.

Por último, se encontró que la densidad aparente del RAC presenta una relación lineal e inversamente proporcional a las emisiones de CO₂ y al costo del transporte. De esta forma, una mayor densidad aparente de los fardos aumenta la viabilidad económica y ambiental del enfardado como método de densificación.

Palabras clave: Residuos agrícolas de corte, caña de azúcar, enfardado, energía renovable.

1. INTRODUCCIÓN

Los grandes yacimientos de petróleo encontrados el siglo pasado en diferentes países del mundo permitieron la producción de combustibles fósiles a bajo costo [1], lo que favoreció avances en ciencia y tecnología, y a su vez, propició el crecimiento poblacional y el aumento de la demanda energética. No obstante, al tratarse de fuentes de energía no renovables (carbón, gas y petróleo) su agotamiento e incremento de costos es inevitable [2].

A lo anterior se suman las graves consecuencias medioambientales ocasionadas por la quema de combustibles fósiles, en la que se liberan agentes contaminantes como el dióxido de carbono, que es uno de los responsables directos del efecto invernadero y del cambio climático [3].

Esta situación ha llevado a la exploración de fuentes alternativas de energía que puedan ser ampliamente aprovechadas, para suplir la demanda energética a corto y mediano plazo [4].

Una de las fuentes alternativas de energía más atractiva en la actualidad es la biomasa, la cual es la cuarta fuente de energía más usada en la Unión Europea [5]. Asimismo, representa una potencial fuente de energía para Colombia debido a sus privilegiados ecosistemas y a su extensa actividad en agricultura.

En particular, el cultivo de caña de azúcar, que es el segundo más extenso en el país después del café [6], representa una valiosa fuente de biomasa. Esto se hace evidente en el Valle del Cauca, que posee un área cultivada de alrededor de 240 mil hectáreas, con un rendimiento promedio de 125 toneladas de caña/ha y un desperdicio de 50 t/ha [7].

Aproximadamente del 30% al 40% de este residuo agrícola de cosecha debe quedar en el campo para recuperar el suelo [8], mientras que el resto puede ser aprovechado mediante rutas físicas, bioquímicas o termoquímicas para obtener aceites vegetales, carbón vegetal, combustibles líquidos, gas de síntesis y/o energía calórica [9].

Estas rutas de aprovechamiento presentan diversas dificultades logísticas y un problema común que es la baja densidad aparente del RAC en el campo [10], lo cual dificulta su manipulación, transporte y almacenamiento. Por esta razón, suelen emplearse técnicas de densificación que buscan aumentar la energía por unidad de volumen del material y reducir los costos de transporte, brindando mejores oportunidades para su aprovechamiento.

Una de las técnicas más usadas para mejorar la manipulación y transporte de diversos tipos de RAC es el embalado o enfardado, el cual consiste en compactar y organizar el residuo en bloques o “fardos” normalmente de sección rectangular o circular [11].

Este método se encuentra en una etapa de investigación y adopción para el RAC de caña de azúcar. Por lo cual, se genera la necesidad de evaluar la viabilidad energética y económica para el aprovechamiento de estos residuos mediante alguna de las rutas existentes.

Por lo expuesto anteriormente, en este proyecto se plantea el desarrollo de un sistema de compactación de RAC de caña de azúcar, que funja como banco de pruebas para la evaluación energética del proceso de enfardado bajo diferentes condiciones de humedad y tamaños de partícula.

1.1 Justificación

Con la presente investigación se busca determinar la viabilidad del enfardado como método de densificación del RAC de caña de azúcar, para su transporte eficiente y su aprovechamiento energético. Con lo cual, se pretende incentivar una mayor participación de esta fuente de energía alternativa en la satisfacción de la demanda energética del departamento del Valle del Cauca y posteriormente del resto del país, y a su vez, disminuir los efectos adversos ocasionados por el uso de combustibles fósiles.

Por otra parte, los resultados de esta investigación serán el punto de partida para trabajos posteriores relacionados con el aprovechamiento del RAC de caña de azúcar y su transporte eficiente desde el campo.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Desarrollar un sistema para compactación de RAC de caña de azúcar y evaluar su consumo energético.

1.2.2 Objetivos específicos

Proponer y evaluar al menos dos mecanismos para compactación del RAC y seleccionar el más factible.

Construir, instrumentar y poner a punto el mecanismo de compactación y los demás componentes del sistema.

Determinar el consumo energético del sistema durante la compactación del RAC.

Evaluar la viabilidad económica y energética del proceso de embalado de RAC para diferentes contenidos de humedad y tamaños de partícula.

2. Fundamentos teóricos

En este capítulo se presentan los conceptos y consideraciones generales que deben tenerse en cuenta para el abordaje y desarrollo de la temática en estudio.

2.1 Biomasa

La biomasa se define como la fracción de material orgánico contenido en los productos y residuos de la agricultura, la forestación y de otras actividades económicas. Ésta tiene la denominación de fuente renovable de energía y mantiene el concepto de carbono neutral, pues los productos resultantes de su combustión (energía, agua y gases de combustión) provienen del proceso fotosintético de las plantas (Figura 1) [12].

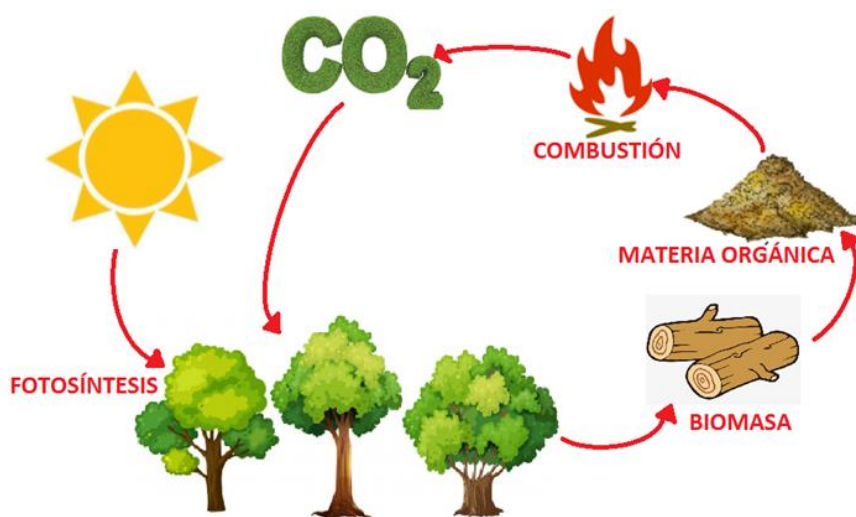


Figura 1. Ciclo de la biomasa

La biomasa fue el primer combustible usado por el hombre. En un principio se empleó para cocinar alimentos y calentar hogares. Sin embargo, años más tarde, durante la revolución industrial, fue usada para la producción de metales y alimentación de máquinas de vapor. No obstante, con el aumento de la demanda energética para el abastecimiento de productos y servicios, la biomasa fue desplazada por el carbón debido a su mayor poder calorífico [13]. Posteriormente, con la explotación de los derivados del petróleo y la producción de combustibles fósiles de bajo costo, la biomasa fue cada vez más relegada. Sin embargo, debido a su denominación de fuente renovable de energía, ésta nuevamente se ha presentado como una fuente de energía atractiva para prácticas industriales y domésticas [9].

2.2 Tecnologías para el aprovechamiento de la biomasa

El posicionamiento de la biomasa como fuente de energía alternativa ha ocasionado la necesidad de implementar diferentes tecnologías para su aprovechamiento. Estos procesos, que buscan extraer energía en diferentes formas, pueden clasificarse en métodos bioquímicos y termoquímicos [14].

2.2.1 Métodos bioquímicos

Relleno sanitario

Es un método muy usado para el tratamiento de residuos urbanos, que consiste en enterrar los desechos sólidos bajo suelo previamente impermeabilizado, en el cual se alternan capas de basura y tierra, hasta cubrir completamente los residuos. Estos vertederos, presentan una alta actividad microbiana anaeróbica que ocasiona la síntesis de un gas, principalmente compuesto de metano y dióxido de carbono, y también de lixiviados o agua contaminada [15]. El metano producido en los rellenos sanitarios, es primordialmente usado para la generación de electricidad. Algunos estudios indican que en el año 2008 las poblaciones de aproximadamente 250 mil habitantes, presentaron un potencial de generación eléctrica de 112 MW a partir de rellenos sanitarios [14].

Digestión anaeróbica

Consiste en un conjunto de transformaciones bioquímicas causadas por la descomposición de la materia orgánica. La transformación comienza con el proceso de hidrólisis, en el cual las grasas, hidratos y proteínas se convierten en monómeros por una acción enzimática. Luego, estos monómeros son transformados en cadenas de ácidos que posteriormente se descomponen en hidrógeno, dióxido de carbono y acetato, y finalmente los subproductos se convierten en metano y dióxido de carbono. Generalmente, este proceso es realizado y controlado mediante un equipo llamado digestor anaeróbico [16].

2.2.2 Métodos termoquímicos

Gasificación

Es un proceso de combustión incompleta, en el cual se eleva la temperatura de sólidos y líquidos carbonatados por encima de los 600°C en una atmósfera pobre en oxígeno [17], para la producción de combustibles gaseosos como el metano y el hidrógeno, que pueden ser usados en motores de combustión interna y en celdas de combustible. La gasificación también produce aceites, alquitranes y materiales sólidos como cenizas [18].

Torrefacción

Proceso termoquímico en el que se produce biomasa relativamente homogénea, seca y de alto poder calorífico. Esto se logra calentando lentamente la biomasa a temperaturas de entre 200 °C y 300 °C, bajo presión atmosférica y preferiblemente en ausencia de oxígeno, hasta lograr degradar la hemicelulosa. De superar este rango de temperaturas, se puede perder la lignina del material, lo que dificultaría su posterior densificación mediante briqueteado o peletización [19].

Pirólisis

Consiste en la descomposición de grandes moléculas de hidrocarburos complejos de la biomasa en moléculas más simples y aprovechables. Este proceso se lleva a cabo mediante un calentamiento rápido de la biomasa en un rango de temperaturas de entre 300 °C y 650 °C, en ausencia de oxígeno. Después de llegar a la temperatura de pirólisis, esta se mantiene hasta obtener gases no condensables como el CO y el CO₂, carbón sólido y algunos bioaceites [19].

Combustión

Es el proceso más comúnmente usado para obtener energía a partir de biomasa. Sin embargo, puede considerarse de alta complejidad pues su mala aplicación puede llevar a problemas medioambientales más severos que los ocasionados por la combustión de combustibles fósiles [20]. La combustión es aplicable a biomásas con contenido de humedad menor al 60%, y preferiblemente con bajo contenido de cenizas y nitrógeno, para evitar la formación de óxidos de nitrógeno (NO_x). Asimismo, algunos constituyentes de la biomasa como carbono, hidrógeno y oxígeno no son deseables, pues están estrechamente relacionados con la formación de incrustaciones, contaminantes y corrosión [21].

La combustión de biomasa es un conjunto de procesos fisicoquímicos, que pueden generalizarse en tres etapas principales. El secado, en el que se elimina la humedad contenida en la biomasa y que ocurre a temperaturas de entre 70°C y 200°C, la pirólisis, que se lleva a cabo alrededor de los 350°C, en la cual se liberan gases volátiles, alquitranes y carbón sólido, y la oxidación, en la cual reaccionan los combustibles sólidos y gaseosos con el oxígeno para la liberación de energía en forma de calor. Este último tiene lugar por encima de los 800°C [22].

2.3 Transporte de biomasa

La biomasa cuenta con gran potencial para suplir la demanda energética emergente, debido a su característica de fuente renovable, su extensa disponibilidad, y su flexibilidad para almacenamiento y uso [23]. Sin embargo, en su estado primario, la biomasa presenta algunas particularidades poco atractivas para el sector energético como alto contenido de humedad, bajo poder calorífico, baja densidad, poca homogeneidad y gran dispersión geográfica, lo que incrementa los costos logísticos de transporte y almacenamiento [24].

El contenido de humedad de la biomasa se puede reducir mediante una fuente externa de calor, o más comúnmente, mediante secado pasivo al ambiente. Este último es un método de bajo costo que requiere grades áreas de almacenamiento, y elementos que protejan la biomasa contra la precipitación atmosférica y las aguas subterráneas. Las demás características indeseables de la biomasa usualmente se pueden disminuir mediante procesos de densificación termoquímica como la torrefacción, pirólisis y gasificación. Asimismo, la peletización y el briqueteado son procesos mecánicos de densificación, ampliamente conocidos que aprovechan el efecto aglutinante de la lignina bajo altas presiones y temperaturas para obtener biomasa con gran densidad de masa y energía [25].

Estos métodos de densificación suelen emplearse una vez la biomasa en estado primario ya ha sido transportada desde el campo hacia un centro de pretratamiento y almacenamiento, en el cual se obtiene el biocombustible que debe ser nuevamente transportado hasta las centrales de potencia o usuario final. Sin embargo, la baja densidad y la forma irregular de la biomasa en el campo representan un reto en aspectos logísticos y económicos del transporte.

Esto tiene tal relevancia, que los costos de transporte para trasladar la biomasa a través de grandes distancias podrían superar los demás costos de la cadena de suministro del biocombustible terminado.

Por ejemplo, para pellets de madera forestal con densidad de masa de 680 kg/m³ y densidad de energía de 12 GJ/m³, los costos logísticos de transporte pueden representar entre el 34% y el 77% del costo total que llega al usuario final [25].

2.4 Técnicas de densificación mecánica

La densificación de la biomasa juega un importante rol para su implementación como fuente de energía sostenible. Por tal razón, se utilizan sistemas de densificación que emplean fuerzas compresivas, fricción y altas temperaturas para aprovechar las propiedades adhesivas del material, con el fin de aumentar su densidad, reducir su contenido de humedad, y estandarizar su forma y tamaño [26].

2.4.1 Compactación con tornillo de extrusión

En este método se emplea un tornillo de sección transversal variable para empujar el residuo contra las paredes de una matriz, también de sección variable (Figura 2), desde una tolva de alimentación hasta la salida de la matriz, provocando la densificación del material hasta un rango de 1000 kg/m³ a 1400 kg/m³.

En ocasiones, este sistema está acompañado por una serie de calentadores que reducen la humedad de residuo y activan el efecto aglomerante de la lignina, facilitando la compactación. Según el diámetro a la salida de la matriz, se pueden obtener briquetas o pellets [27].

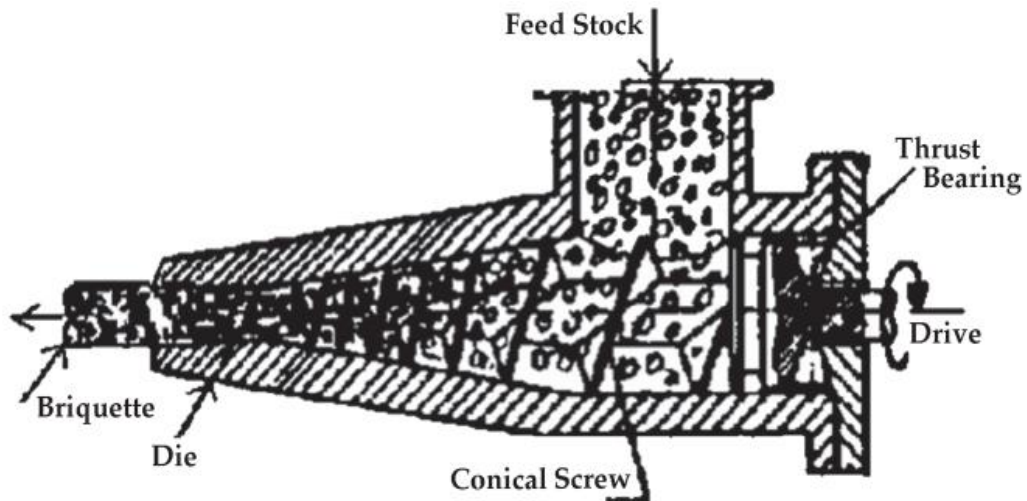


Figura 2. Tornillo de extrusión [27]

2.4.2 Compactación con pistón

Este método es comúnmente usado para obtener briquetas a partir de residuos agrícolas u otros tipos de biomasa. Además, suele ser una solución más atractiva que la del tornillo extrusor por su menor consumo energético y la obtención de densidades hasta de 1200 kg/m^3 . Este tipo de compactación se puede llevar a cabo mediante un pistón mecánico o hidráulico (Figura 3) [28].

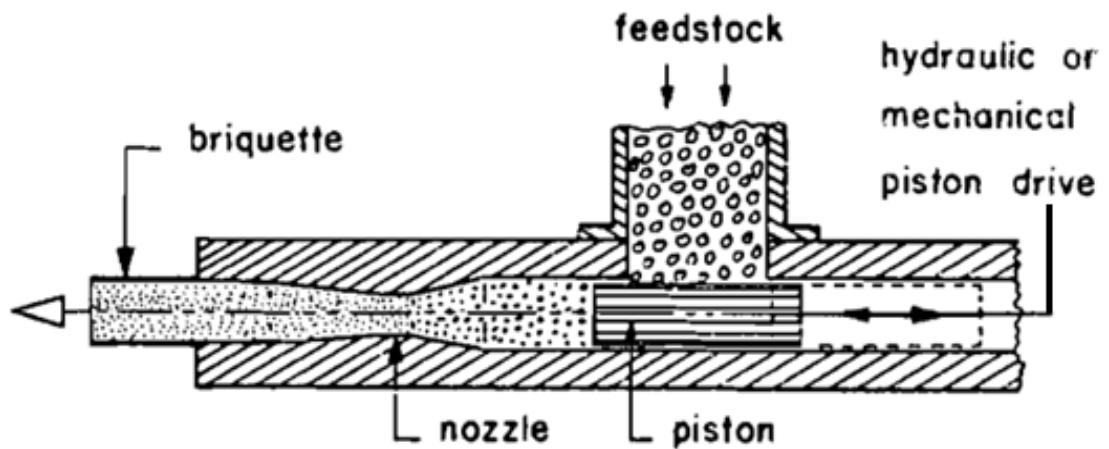


Figura 3. Compactación con pistón [29]

Sistema de pistón hidráulico

En este sistema un motor eléctrico alimenta una unidad hidráulica de alta presión, que acciona el pistón a lo largo del cilindro o cámara de compactación. Al ser un proceso de baja velocidad, la producción es relativamente baja y la densidad de las briquetas no supera los 1000 kg/m^3 . No obstante, este sistema admite residuos con altos contenidos de humedad [28].

Sistema de pistón mecánico

La compactación con pistón mecánico se usa para producciones hasta de 2500 kg/h . El sistema cuenta con un mecanismo de rotación continua que empuja el material constantemente a través de una matriz. Este método, depende de los efectos del impacto del pistón y la fricción en las paredes de la matriz para obtener las briquetas [28].

2.4.3 Compactación con rodillos

En la compactación con prensa de rodillos el material es sometido a una pre-compresión por el efecto de un tornillo que transporta el material a través de una cámara o carcasa (Figura 4). Después, el material pasa por un par de rodillos que giran en sentido opuesto, formando briquetas en forma de almohadas. Este proceso requiere de tamaños de partícula pequeños y aglutinantes externos para lograr buenos resultados [29].

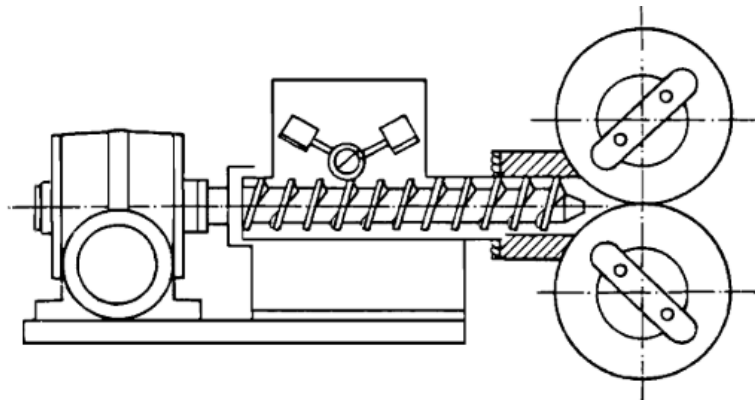


Figura 4. Prensa de rodillos [29]

2.4.4 Enfardado o embalado

Este método de compactación se lleva a cabo mediante equipos llamados enfardadoras o embaladoras que pueden ejecutar la densificación directamente en el campo. El parámetro más importante para estos sistemas es la densidad final del material, pues de ésta depende el número de vehículos, el volumen de almacenamiento y la mano de obra a utilizar, lo que se traduce en costos operativos. La viabilidad de toda la cadena de suministro del biocombustible final puede depender de estos costos operativos y de la densidad de energía del material transportado.

Esto se debe a que la energía invertida en el transporte podría ser mayor que la energía aprovechable del residuo [30] si estos tienen una densidad muy baja.

En general, las enfardadoras se pueden clasificar como móviles o estacionarias. Las enfardadoras móviles pueden producir pacas redondas o rectangulares y usualmente son conducidas por un tractor que paralelamente le suministra la potencia para el enfardado [31][32].

Enfardadora de pacas redondas

Las enfardadoras de pacas redondas (Figura 5) recogen el residuo y lo envían a una cámara equipada con rodillos y bandas elásticas, que aplican compresión radial y enrollan el material hasta obtener un cilindro de gran tamaño. Después, la enfardadora interrumpe la alimentación del material y el cilindro es envuelto con cintas poliméricas o fibras naturales para ser liberado en el campo.

Estas enfardadoras pueden clasificarse según el tamaño del fardo. Las enfardadoras pequeñas producen fardos cilíndricos de alrededor de 200 kg, y las grandes, de aproximadamente 750 kg. Además, éstas pueden tener cámara de compactación constante o variable. Con el primer tipo, se obtienen núcleos sueltos y capas exteriores compactas, con altos requerimientos de energía hacia el final del proceso. Mientras que con las de cámara variable se obtienen núcleos compactos con menor gasto energético [33].

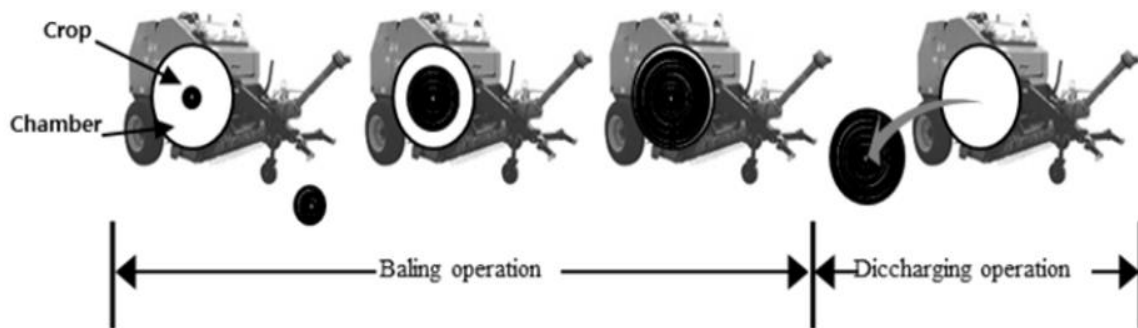


Figura 5. Operación de enfardado de pacas redondas [32]

Enfardadora de pacas rectangulares

Este sistema utiliza un mecanismo de pistón recíprocante para compactar el material de forma continua. Por lo cual, no requiere detenerse para liberar los fardos en el campo. Usualmente, este tipo de enfardadora (Figura 6) se acopla al PTO de un tractor para obtener potencia. Además, cuentan con un carrete de recolección de residuos, el mecanismo de compactación, dispositivos de control de longitud y densidad del fardo, un mecanismo de amarre con aguja y un sistema de embrague que protege la transmisión de posibles sobrecargas [34].

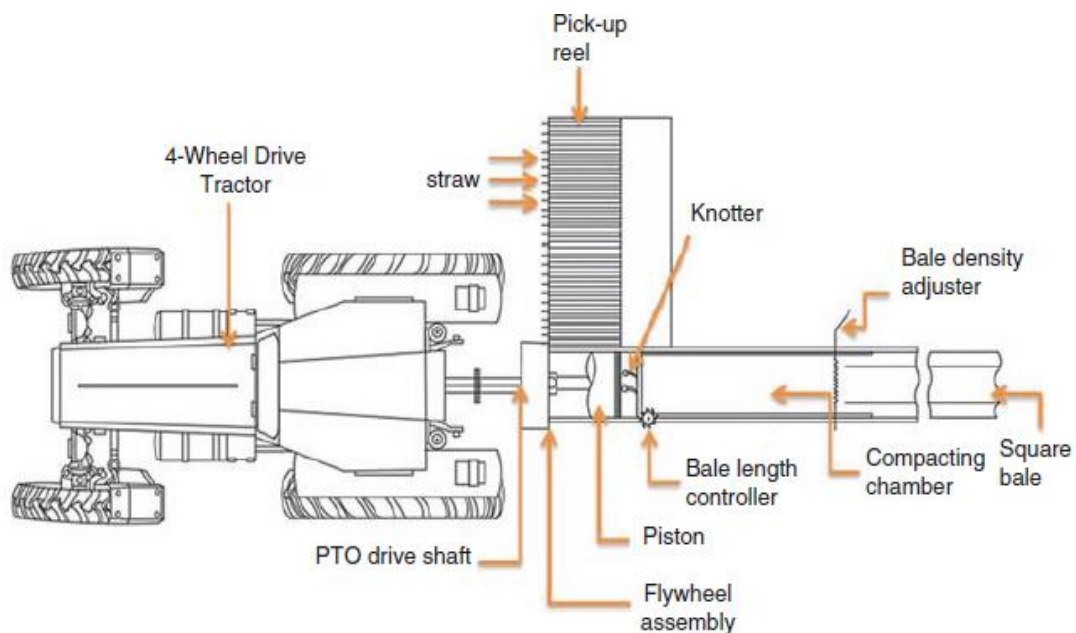


Figura 6. Enfardadora de pacas rectangulares [34]

2.5 Generalidades del RAC de caña de azúcar

La caña de azúcar es un producto agrícola cultivado en más de 100 países, que presenta mayor eficiencia fotosintética que cualquier otro cultivo en el mundo. Esto implica una gran capacidad de fijación de dióxido de carbono y de producción de biomasa.

La caña de azúcar se compone principalmente de agua, sólidos solubles y fibras lignocelulósicas, de los cuales la sacarosa y la celulosa se encuentran en mayor proporción. Esta composición depende de factores climáticos, del tipo de suelo, la topografía, las prácticas de siembra, la variedad, el tipo de fertilización y las técnicas de cosecha [35].

Este cultivo es de gran importancia para los países tropicales como Brasil, India y Colombia, pues es la principal materia prima para la producción de azúcar y de etanol. Por otro lado, los RAC de caña de azúcar y el bagazo producto del postprocesamiento de la caña, son empleados para la cogeneración de electricidad y vapor [36].

El RAC de caña de azúcar corresponde al material remanente en el campo después de la cosecha y se compone principalmente de hojas secas, hojas verdes y cogollos [37]. En la Figura 7, se pueden visualizar las partes mencionadas de la caña. Este residuo puede emplearse para generación de potencia, producción de etanol, alimentación de ganado y también como material de construcción, proporcionando aislamiento térmico y acústico.

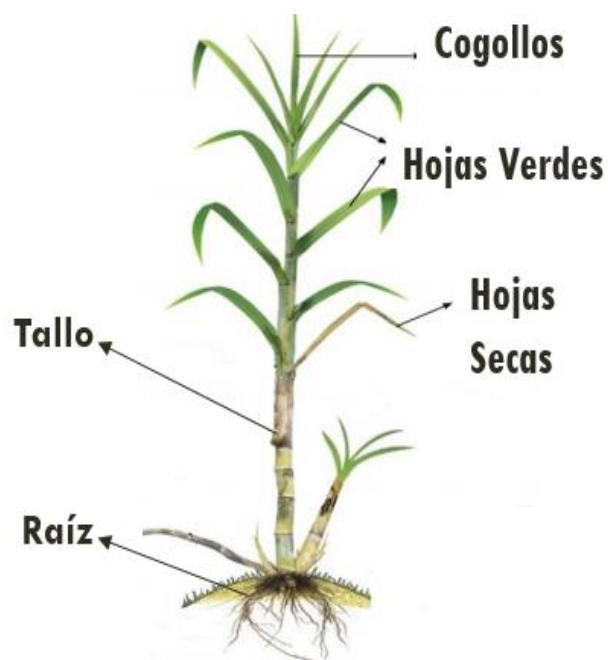


Figura 7. Partes de la caña de azúcar [38]

Se han realizado diversos estudios al RAC de caña de azúcar para conocer su composición química mediante análisis elemental (Tabla 1) y sus propiedades fisicoquímicas por medio de análisis proximal (Tabla 2).

Tabla 1. Análisis elemental del RAC de caña de azúcar [39]

Componentes (%)	Graba et. al (2001)	Peláez (2007)	Linero (2005)
C	44.2	41.58	46.2
H	5.4	5.8	6.2
N	0.6	0.45	0.5
O	38.7	-	43
S	0.1	0.08	0.1
CL	0.3	-	0.1

Tabla 2. Análisis proximal del RAC de caña de azúcar [39]

Propiedad (%)	Gómez et al. (1999)	Hassuani et al. (2005)	Linero (2005)	Peláez (2007)
Humedad	9.72	10.05	29.4	9.92
Ceniza	7.66	8.15	3.9	11.7
Volátiles	71.34	76.23	83.3	81.55
Carbono fijo	20.99	15.62	12.8	6.9
Poder calorífico superior (MJ/kg)	-	16.98	17.4	17.74
Poder calorífico Inferior (MJ/kg)	-	-	15.6	16.51

Se han realizado algunas investigaciones sobre la viabilidad económica y ambiental del enfardado con el RAC de caña de azúcar. En éstas, se demostró que el transporte de RAC enfardado presenta grandes ventajas frente al RAC sin enfardar, pues se reduce el volumen muerto en los vehículos de carga, así como el número de viajes. Esto conduce a una disminución significativa de costos operativos y a una reducción de emisiones de CO₂ hasta en un 82% [38].

Por otro lado, se estimó el costo de la energía invertida para el enfardado de RAC de caña de azúcar. Se calculó un consumo energético de 25.6 kWh/t y un costo asociado de \$1.38 USD/t, para un precio reglamentado de energía de \$50 USD/MWh [40].

3. Selección del mecanismo de densificación

El mecanismo de compactación fue seleccionado mediante una matriz de decisión (Tabla 3), en la que se compararon aspectos técnicos y logísticos de los sistemas mencionados con anterioridad.

Tabla 3. Matriz de decisión [11] [27] [28] [29] [30][40]

Mecanismo de densificación	Producto	Peso (kg)	Densidad final (kg/m³)	Consumo de energía (kWh/t)	Operación en campo
Tornillo extrusor	Pellet	<0.2	1000 - 1400	84 -128	No
Pistón hidráulico	Briqueta	<0.7	<1000	80	No
Pistón mecánica	Briqueta	<0.7	900 - 1200	53	No
Prensa de rodillos	Briqueta	<0.5	-	-	No
Enfardadora pequeña de pacas redondas	Fardo redondo	230	153	-	Si
Enfardadora grande de pacas redondas	Fardo redondo	500 - 1000	140 -180	19	Si
Enfardadora pequeña de pacas rectangulares	Fardo rectangular	24	160	-	Si
Enfardadora grande de pacas rectangulares	Fardo rectangular	435	210 - 255	25.6	Si

Actualmente, se están estudiando mecanismos de peletización y briqueteado en campo. Sin embargo, estos sistemas aún no están estandarizados ni son de amplio uso industrial [25]. Por esto, deben ser descartados, al igual que todos aquellos mecanismos de densificación que no cumplan con operación en campo.

Por otro lado, considerando que los fardos producidos durante el proyecto deben ser de fácil manipulación, se debe prescindir de las enfardadoras de pacas redondas y rectangulares de gran tamaño.

Por último, las enfardadoras pequeñas de pacas redondas producen fardos con pesos considerablemente grandes respecto a las enfardadoras pequeñas de pacas rectangulares. Asimismo, como el mecanismo de compactación de las enfardadoras de pacas redondas se compone de múltiples rodillos, bandas, sprockets y cadenas [41], el diseño y construcción de su prototipo puede ser de mayor complejidad y costo que el de una enfardadora de pacas rectangulares.

Por lo anterior, se seleccionó el mecanismo de densificación usado por las enfardadoras pequeñas de pacas rectangulares, cuyo modo de operación y diseño se describen en el siguiente capítulo.

4. Diseño del sistema de compactación

En este capítulo se presenta el diseño del prototipo de la enfardadora de pacas rectangulares.

Comercialmente, estas enfardadoras (Figura 8) son alimentadas por un eje con unión cardánica (1) acoplado a un volante de inercia (2) que transmite potencia a través un reductor de velocidad (3), hasta el mecanismo biela-manivela (4) y finalmente al pistón reciprocante (5). Paralelamente, un sistema de recolección de residuos levanta el material y lo traslada a un canal de suministro. Este sistema consta de un carrete de recolección (6) y un brazo de dosificación (7). El material es comprimido por el pistón en la cámara de compactación (8), luego es amarrado y dirigido hacia la salida de la cámara [42].



Figura 8. Operación de enfardadora de pacas rectangulares [43]

Para simplificar la operación del prototipo y el trabajo de campo, el diseño se concentró sólo en los subsistemas indispensables para la compactación del RAC. De esta manera, el diseño cuenta con un mecanismo manivela-biela-pistón, un sistema de alimentación y transmisión de potencia, una cámara de compactación y una bancada o estructura de soporte.

En primer lugar, se definieron las longitudes principales del mecanismo en función de las dimensiones finales de fardo y del recorrido del pistón. Luego, se determinaron las ecuaciones de cinemática y cinética del mecanismo, se calcularon las cargas críticas de diseño y se dimensionaron los componentes del mecanismo y las cuñas de transmisión de potencia.

Paralelamente, se seleccionaron los soportes y rodamientos del mecanismo, así como el motorreductor y el acoplamiento mecánico.

Por último, se diseñó la cámara de compactación y la estructura de soporte, las cuales fueron chequeadas a fluencia, fatiga y pandeo mediante un software de elementos finitos.

4.1 Diseño del mecanismo de compactación

El mecanismo manivela-biela-pistón se puede modelar como un mecanismo de cuatro barras, como se aprecia en la figura 9.a. Para analizar la cinemática del mecanismo (Anexo A), se definieron las longitudes de la manivela ($R = 350 \text{ mm}$) y la biela ($L = 1400 \text{ mm}$), así como la velocidad angular de la manivela ($w = 40 \text{ rpm}$), en función de los parámetros reales encontrados para enfardadoras comerciales.

Luego, se dedujeron las ecuaciones de movimiento y se estudió el desplazamiento, la velocidad y la aceleración del pistón en función de la posición angular de la manivela (Figura 9).

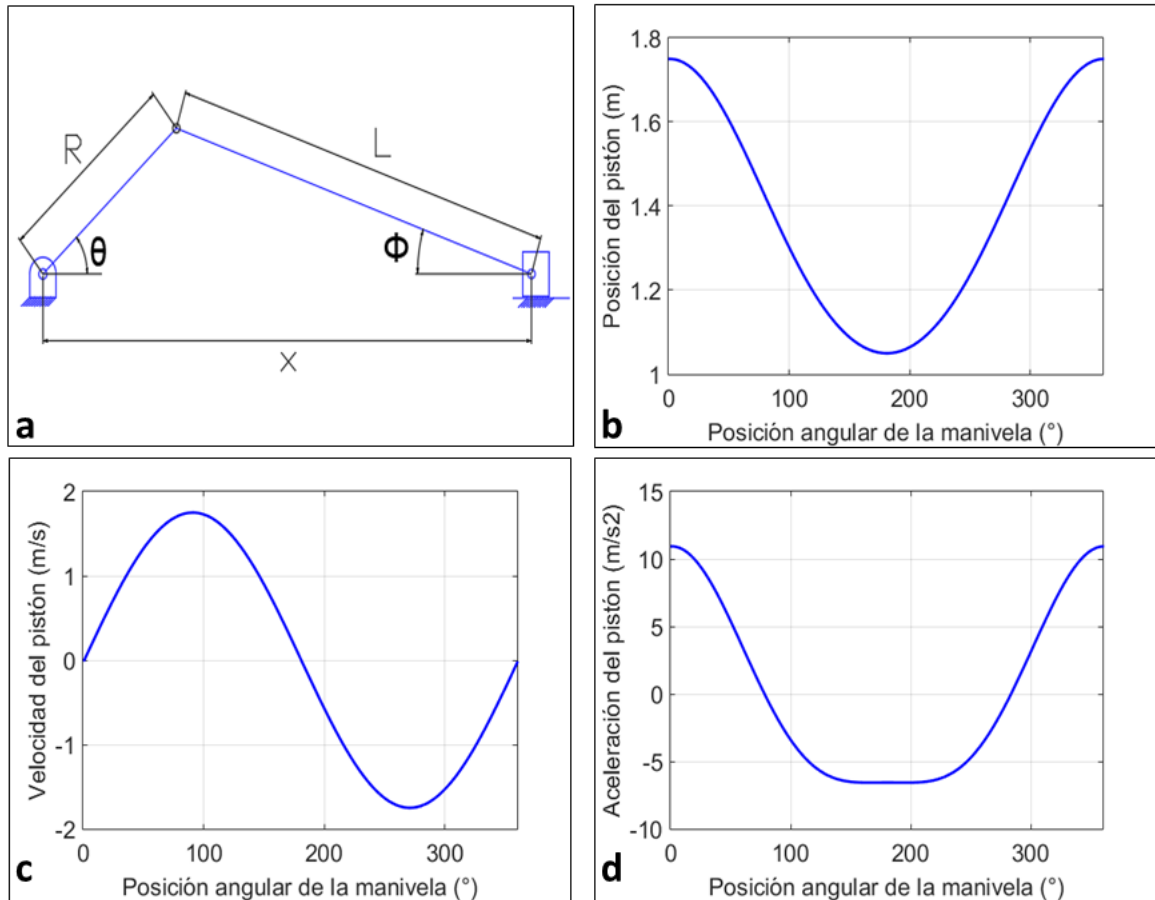


Figura 9. Cinemática del mecanismo manivela-biela-pistón

Asimismo, se calcularon las aceleraciones de los centros de masa de la manivela y la biela, y se hallaron las fuerzas actuantes en el mecanismo. Para esto, se realizó un proceso iterativo en el cual se variaron las dimensiones de la sección transversal de los componentes en función de su resistencia.

Por otra parte, en el análisis cinético se tuvo en cuenta la carga necesaria para compactar RAC de caña de azúcar. Este parámetro se tomó de una investigación anterior [44], en la cual se realizaron ensayos de compresión de RAC de caña de azúcar de cosecha mecanizada con distintos contenidos humedad y se obtuvieron curvas de densidad en función de la presión aplicada.

Estas curvas (Figura 10) se aproximaron mediante funciones potenciales logrando buenos ajustes. De estos resultados se puede observar que, a menor contenido de humedad se requiere mayor presión para cambiar la densidad del residuo.

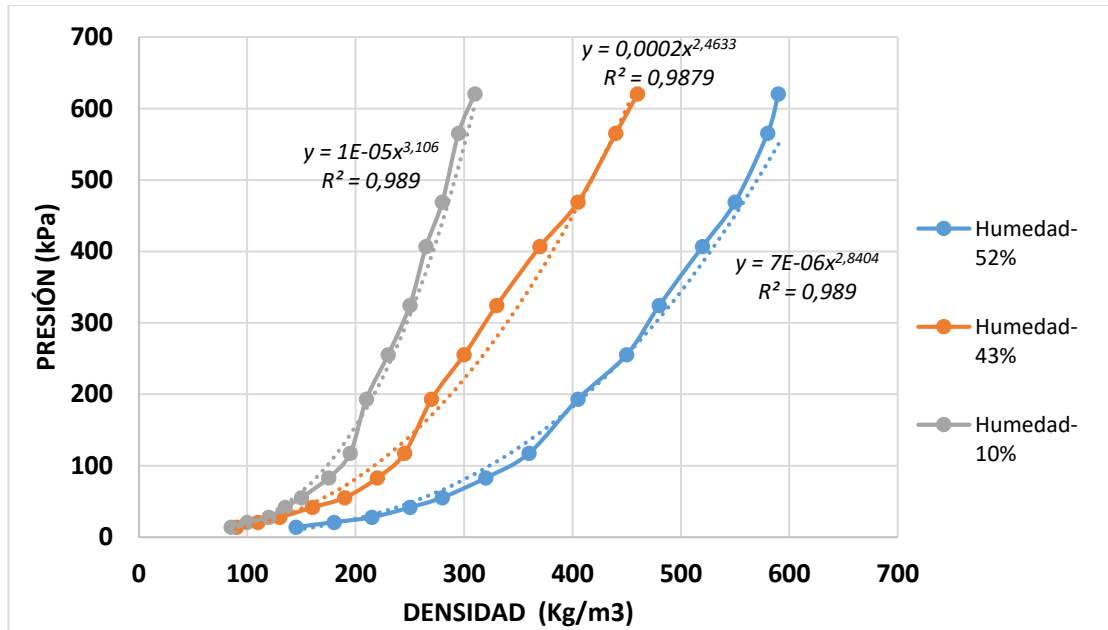


Figura 10. Ensayos de compresión de RAC de caña de azúcar [44]

Tanto el rango de densidades de entre 150 kg/m³ y 200 kg/m³ como otros parámetros de funcionamiento de las enfardadoras comerciales [45], se tomaron para definir los requerimientos del sistema y las condiciones de operación (Tablas 4 y 5).

Tabla 4. Requerimientos del sistema de compactación

Requerimientos del sistema de compactación	
Sección transversal del fardo (mm x mm)	400 x 400
Longitud del fardo (mm)	500 - 800
Densidad máxima del fardo (kg/m³)	200
Tipo de movilidad	Portátil en campo
Tipo de alimentación del RAC	Manual

Tabla 5. Condiciones de operación

Condiciones de operación	
Humedad mínima del RAC (%)	10
Tipo de cosecha	Manual -mecanizada
Tamaño de partícula (mm)	300 - 1000
Velocidad angular de entrada (RPM)	40 - 60

A partir de estos requerimientos y condiciones de operación, se procedió a realizar el dimensionamiento y la selección de los componentes del mecanismo de compactación, tal como se describe a continuación.

4.1.1 Eje de potencia

El eje de potencia (Figura 11), fabricado de acero AISI 4340, se acopla por uno de sus extremos al reductor de velocidades mediante un acople flexible de cadena C60-22 y una chaveta de sección rectangular, y del otro extremo, está unido a la manivela de potencia mediante soldadura y una chaveta de posicionamiento. Por otra parte, este eje se apoya en un rodamiento autoalineable de rodillos esféricos TIMKEN 22213-EJW33, que a su vez está soportado en una chumacera bipartida SNL 513. Por su parte, el eje conducido, también de AISI 4340, está soportado mediante los mismos componentes mencionados anteriormente.

Para el cálculo de sus dimensiones, el eje de potencia se modeló como una viga apoyada simplemente, bajo cargas combinadas de flexión y torsión (Anexo B). Los puntos críticos de diseño fueron los chaveteros.

Los factores de seguridad mínimos a fatiga (1.8) y a fluencia (2.9) se presentaron en el chavetero que une al eje de potencia con el acople de cadena. La deflexión máxima (0.027 mm) se presentó en el hombro que restringe el desplazamiento lateral de la manivela de potencia.

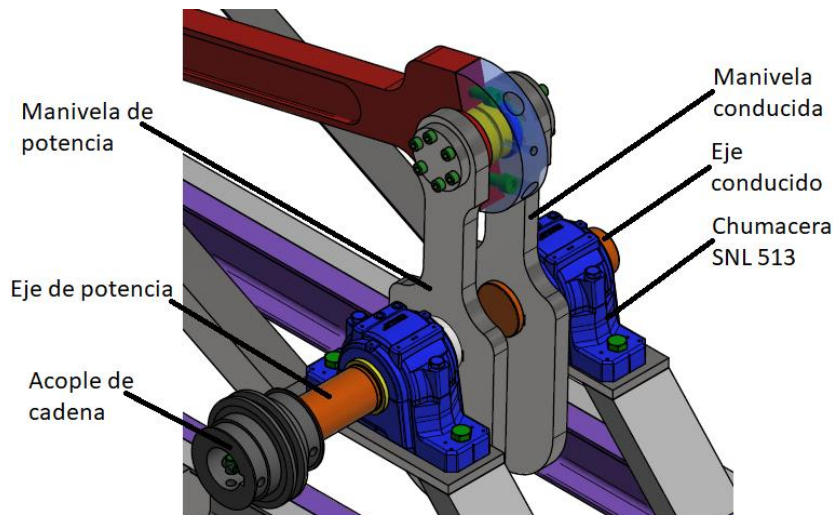


Figura 11. Montaje del eje de potencia y las manivelas

4.1.2 Manivela

Las manivelas (ver figura 11), maquinadas en acero ASTM A36, fueron chequeadas como columnas cortas, pues presentan una esbeltez muy baja (17.3) en comparación con la esbeltez límite para columnas de acero ASTM A36 (88.85). De esta manera, se empleó el modelo de Johnson [46] para determinar la carga crítica de pandeo, la cual fue 20 veces mayor que la carga de diseño. Por otro lado, para considerar una condición de carga crítica de las manivelas, este componente se modeló como una viga empotrada de un extremo y simplemente apoyada del otro, sometida a una carga de compresión y a un momento flector ejercido por el eje de potencia (ver Anexo B).

Los factores de seguridad mínimos a fluencia (3.5) y a fatiga (2.7) se presentaron en el chavetero de acople con el eje de potencia.

4.1.3 Biela

Este componente, de acero ASTM A36, se une por un extremo a las manivelas mediante un eje de acero AISI 1045, apoyado en un par de rodamientos de rodillos cónicos de una hilera TIMKEN 32010X. Por el otro extremo, la biela se conecta al soporte de la celda de carga por medio otro eje de AISI 1045, que está soportado por una rótula GE-45-ES (Figura 12).

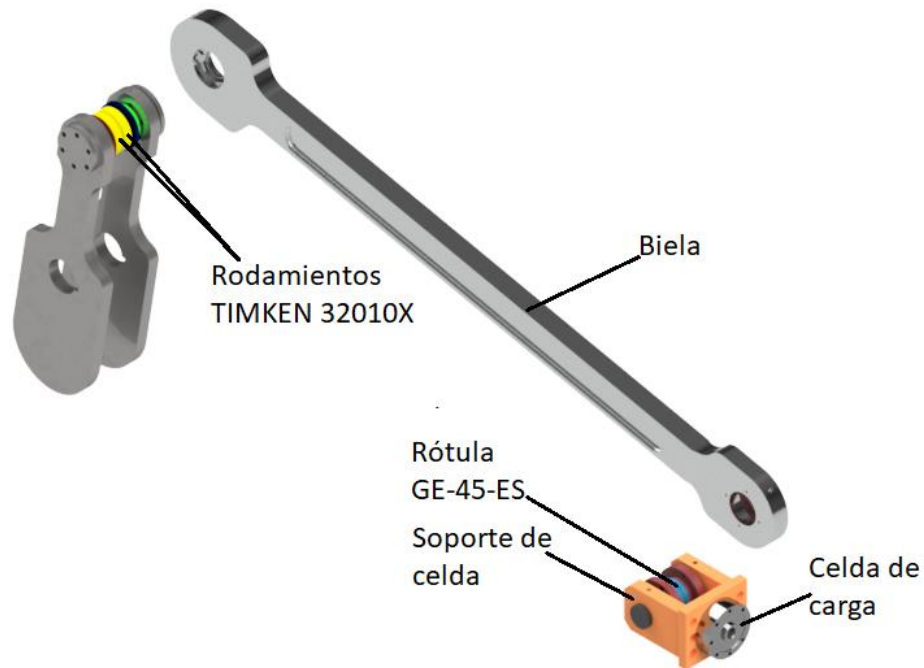


Figura 12. Biela

La biela se calculó como una columna simplemente apoyada, sometida a compresión. Debido a su baja esbeltez (60.6), también se usó el modelo de Johnson para determinar la carga crítica de pandeo, la cual fue 41 veces mayor que la carga de diseño. Los factores de seguridad mínimos a fluencia y fatiga fueron 10.7 y 6.7, respectivamente.

4.1.4 Pistón

El pistón consta de una placa frontal y dos laterales de acero ASTM A36, unidas por soldadura. En su parte superior se ensambló una cuchilla de acero AISI 5160 y una cubierta de ASTM A36 que restringe el paso de RAC hacia la cámara de compactación cuando el pistón pasa por la tolva (Figura 13). En las placas laterales se ensamblaron ocho ruedas de acero AISI 1045 (Figura 14), cada una soportada en dos rodamientos de rodillos cónicos NTN 30204. Estas ruedas se apoyan sobre guías laterales que permiten el desplazamiento lineal del pistón a lo largo de la cámara de compactación.

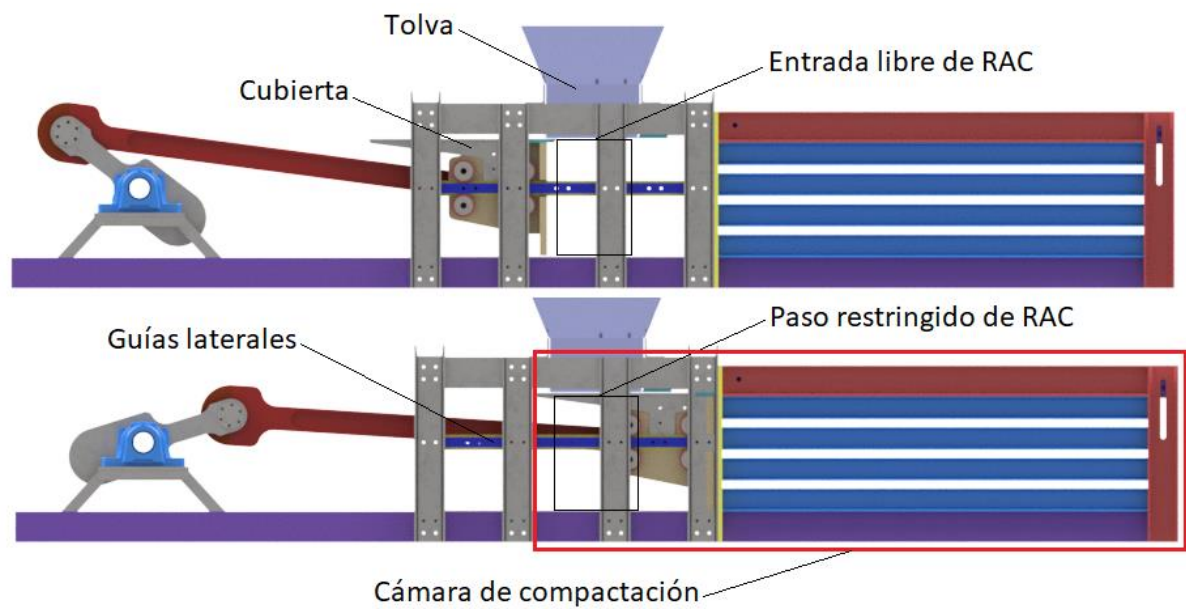


Figura 13. Interrupción de la alimentación del RAC

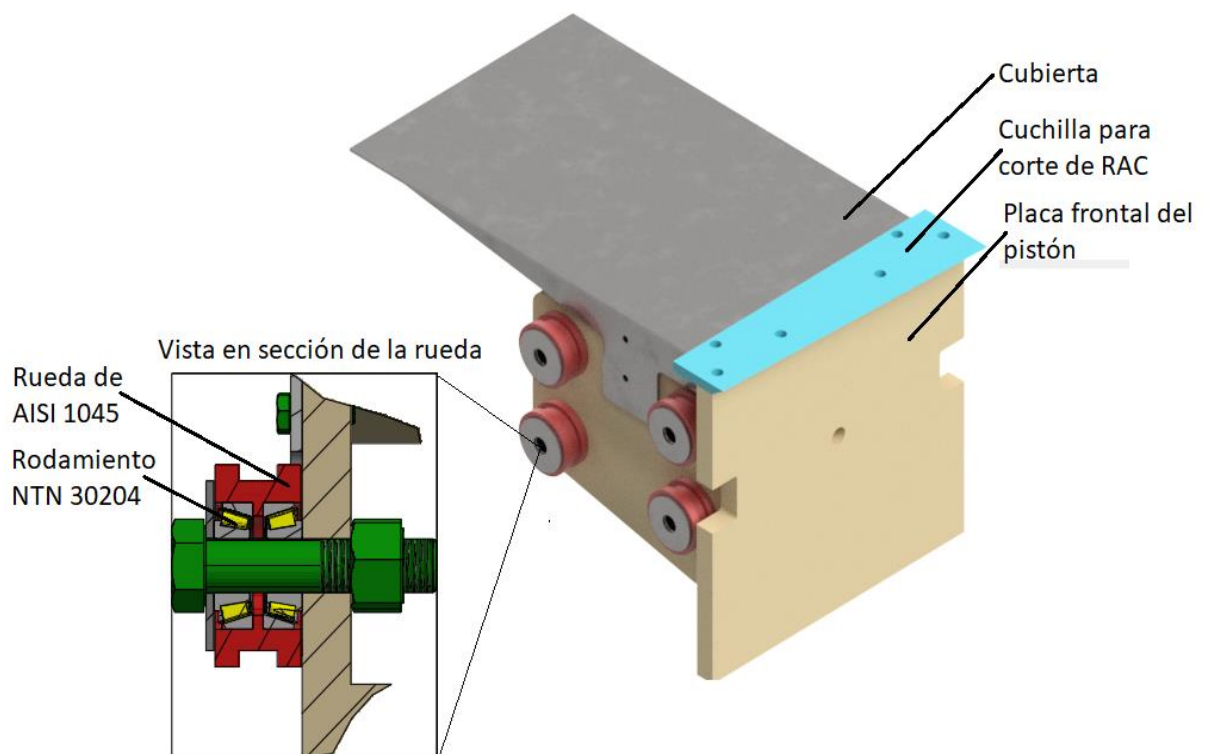


Figura 14. Ensemble del pistón

La resistencia del pistón y el soporte de la celda de carga se chequearon mediante un software de elementos finitos. En la simulación, todos los contactos se definieron como “bonded”.

Se estableció un soporte cilíndrico en la superficie de contacto entre el eje y el soporte de la celda de carga, y se restringió el desplazamiento en direcciones Y y Z de las placas laterales del pistón.

Adicionalmente, se aplicó una carga de 21460 N en dirección X, en la superficie de la placa frontal del pistón (Figura 15). Esta carga fue la obtenida en el análisis cinético descrito en el anexo A.

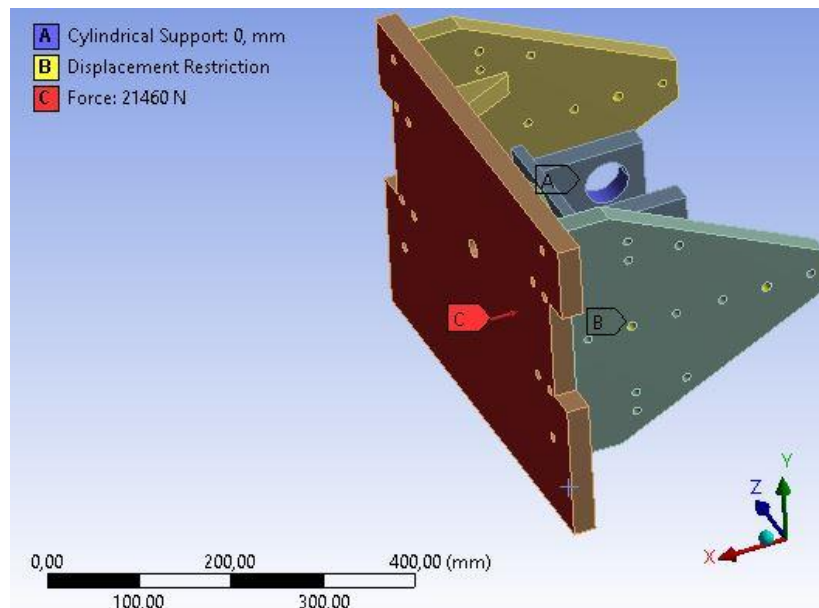


Figura 15. Condiciones de borde para simulación del pistón

Se realizó un análisis de convergencia para obtener resultados independientes de la malla. El esfuerzo equivalente de Von Mises (Figura 16) y el desplazamiento máximo en la placa frontal fueron de 83.5 MPa y 0,1 mm, respectivamente. Mientras que, en el soporte de la celda de carga se obtuvo un esfuerzo equivalente (Figura 17) y un desplazamiento máximo de 22.7 MPa y 0.008 mm, respectivamente. Estos resultados se obtuvieron para una malla con 257960 elementos y 1001337 nodos.

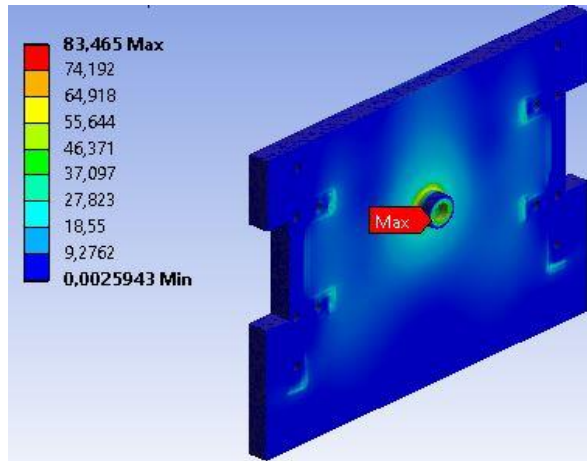


Figura 16. Esfuerzo de Von Mises en la placa frontal del pistón

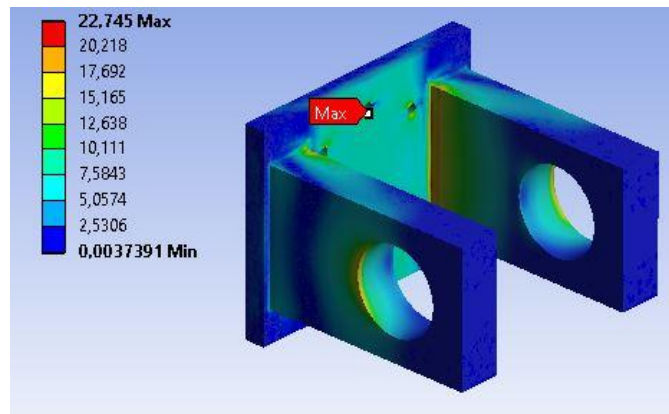


Figura 17. Esfuerzo de Von Mises en el soporte de la celda de carga

4.2 Selección del motorreductor y sistema de transmisión de potencia

A partir del torque obtenido en el análisis cinético ($T = 2016 \text{ N} \cdot \text{m}$) y la velocidad angular de operación ($40 \text{ rpm} \approx 4.19 \text{ rad/s}$), se calculó la potencia requerida por el sistema ($P \approx 8.45 \text{ kW} \approx 11.33 \text{ hp}$).

Luego, considerando que las enfardadoras convencionales operan sin una fuente cercana de energía eléctrica, se seleccionó un motor a gasolina. Este motor (Figura 18.a), de marca Panther, con relación de compresión 8:1 y velocidad variable, tiene 20 hp de potencia nominal y 41 N·m de torque de salida a 3600 rpm, y además cuenta con encendido manual y eléctrico.

Para disminuir la velocidad del eje de salida del motor hasta la velocidad de giro requerida por el sistema de compactación, se emplearon dos etapas de reducción. En la primera etapa, en la cual usó una transmisión con poleas de cuatro canales y cuatro correas trapezoidales B54, se alcanzó una reducción de 2.5:1.

Posteriormente, se usó un reductor de velocidades de engranajes helicoidales de 20 hp con relación de transmisión 32:1 (Figura 18.b). De esta forma, la relación de transmisión total fue de 80:1, logrando una velocidad de 45 rpm y 3280 N·m de torque a la salida del reductor.

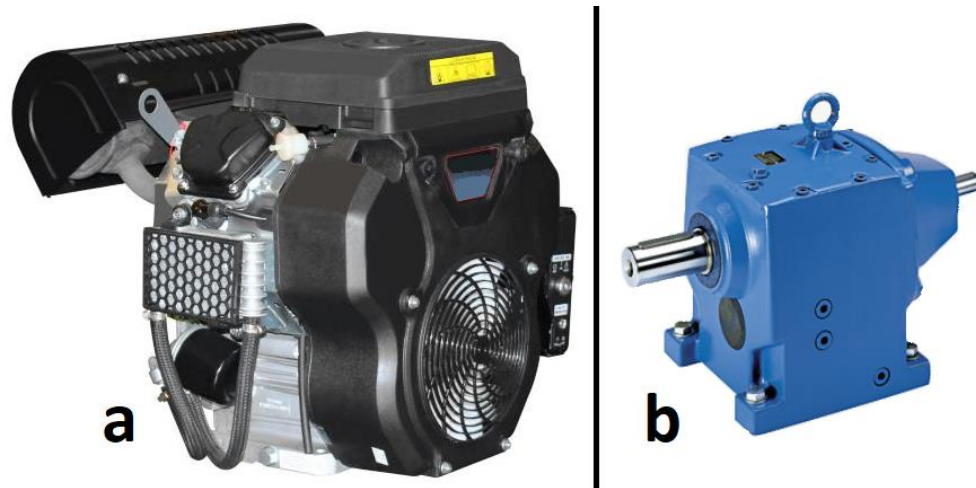


Figura 18. Motor y reductor seleccionados

Para asegurar que el arranque del motor siempre se pueda realizar sin carga, es decir, sin altos requerimientos de torque, se diseñó un sistema de embrague que cuenta con un eje de transmisión de acero AISI 1045, arandelas de presión de AISI 1070 templado, tres ruedas dentadas de asbesto que aportan fricción y tres uñas de accionamiento que comprimen y liberan todo el conjunto de ruedas-arandelas para embragar y desembragar, respectivamente.

Todos los elementos mencionados son accionados mediante una palanca que consta de una barra cromada de $\varnothing 1 \frac{1}{2}$ " y platinas de acero ASTM A36 de 15 mm de espesor (Figura 19).

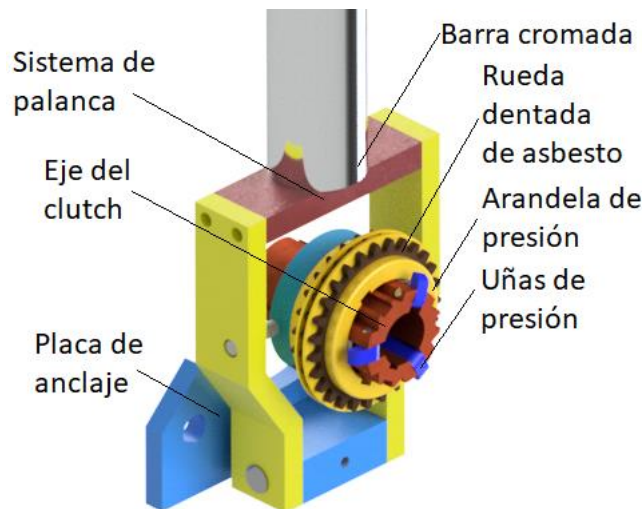


Figura 19. Sistema de embrague

4.3 Diseño de la cámara de compactación y la estructura de soporte del sistema de compactación

La cámara de compactación y la estructura base que soporta al sistema de compactación (Figura 20) constan principalmente de perfiles de acero estructural ANSI C 4" x 5.4. La cámara de compactación se compone de una estructura pernada sobre la cual se anclan las guías laterales que dirigen al pistón, láminas de ASTM A36 de 1/8" que cubren su parte superior y lateral, y una tolva de ASTM A36 que permite la alimentación del RAC.

Además, mediante una platina de anclaje, la estructura pernada se une a otra estructura soldada, en la cual se genera la fricción que permite la aglomeración del RAC para la producción de fardos.

La pared superior de la estructura soldada, fabricada con perfiles L 2 ½" x 3/16", puede variar su ángulo de inclinación gracias a un pivote y una ranura de deslizamiento, con lo cual se pretende variar la sección transversal de salida del fardo y así aumentar o reducir la densidad final de éste.

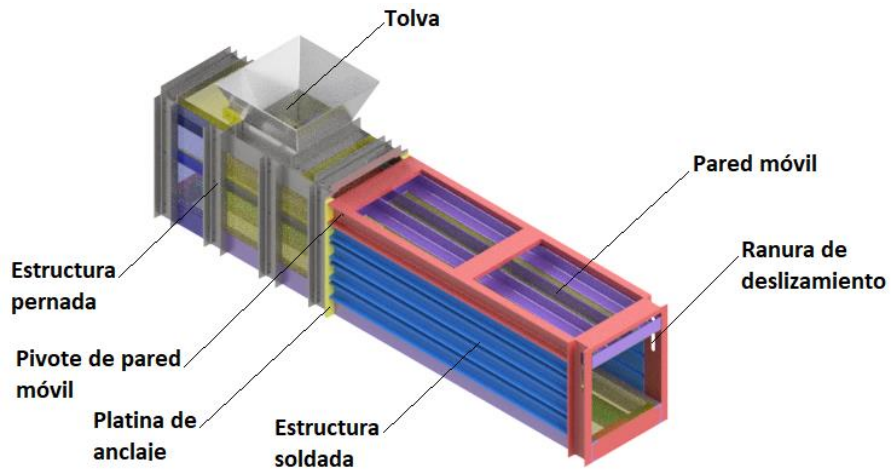


Figura 20. Cámara de compactación

Por su parte, la estructura de soporte del sistema de compactación cuenta con dos perfiles principales que se ubican a lo largo de todo el sistema de compactación (Figura 21), sobre los cuales se anclan los demás componentes. Adicionalmente, cuenta con dos soportes sobre los cuales se montan las chumaceras, una base sobre la cual se sueldan las placas ASTM A36 de 3/4" del motor y el reductor, un tren trasero que permite la fácil traslación y dos patas que permiten posicionar y darle estabilidad al sistema de compactación. Los planos del prototipo se pueden visualizar en el Anexo C.

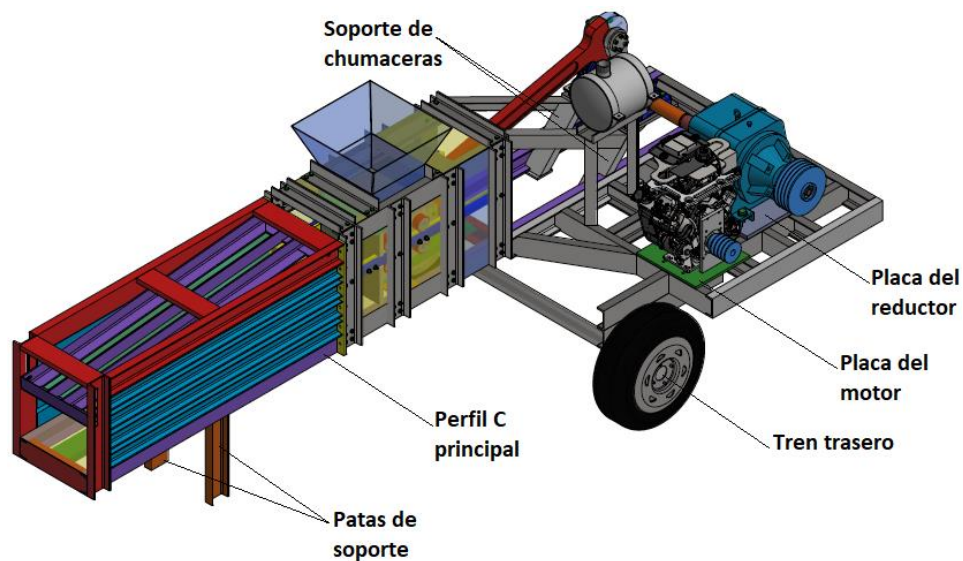


Figura 21. Estructura de soporte

5. Construcción del sistema de compactación y procedimiento de ensayos

La construcción de los componentes y ensamblaje del prototipo de enfardadora, se llevó a cabo en una empresa de metalmecánica de la ciudad de Cali. De la Figura 22 a la 26, se muestran algunos pasos del proceso constructivo.



Figura 22. Mecanizado de biela, manivela y ejes



Figura 23. Construcción de tolva y cámara de compactación



Figura 24. Montaje del mecanismo de compactación



Figura 25. Montaje del pistón



Figura 26. Montaje de sistema de transmisión de potencia

5.1 Instrumentación para pruebas de campo

Con el fin de obtener la energía requerida por la enfardadora durante el proceso de compactación del RAC, se realizaron mediciones de torque y posición angular en el eje de potencia. Para esto, se instaló una roseta de deformación con cuatro strain gauges ubicados a 45° respecto a la dirección longitudinal del eje, la cual se conectó en puente completo de Wheatstone para maximizar la señal de salida y eliminar interferencias en la medición.

La señal de salida, correspondiente al torque requerido por la enfardadora, se obtuvo mediante un sistema telemétrico Binsfeld Torque Track 10k (Figura 27) que cuenta con un transmisor inalámbrico alimentado con baterías de 9 V y un receptor de señales.



Figura 27. Sistema telemétrico para adquisición de torque

Por su parte, la velocidad angular se obtuvo mediante un encoder rotativo incremental E40S (Figura 28) alimentado con baterías de 9 V, que permite registrar el desplazamiento angular de la manivela, el cual es igual al desplazamiento angular del eje de potencia. Este encoder está conectado a una tarjeta de adquisición USB 1208FS - Measurement Computing alimentada a 5 V por el computador en el cual se registra la señal.

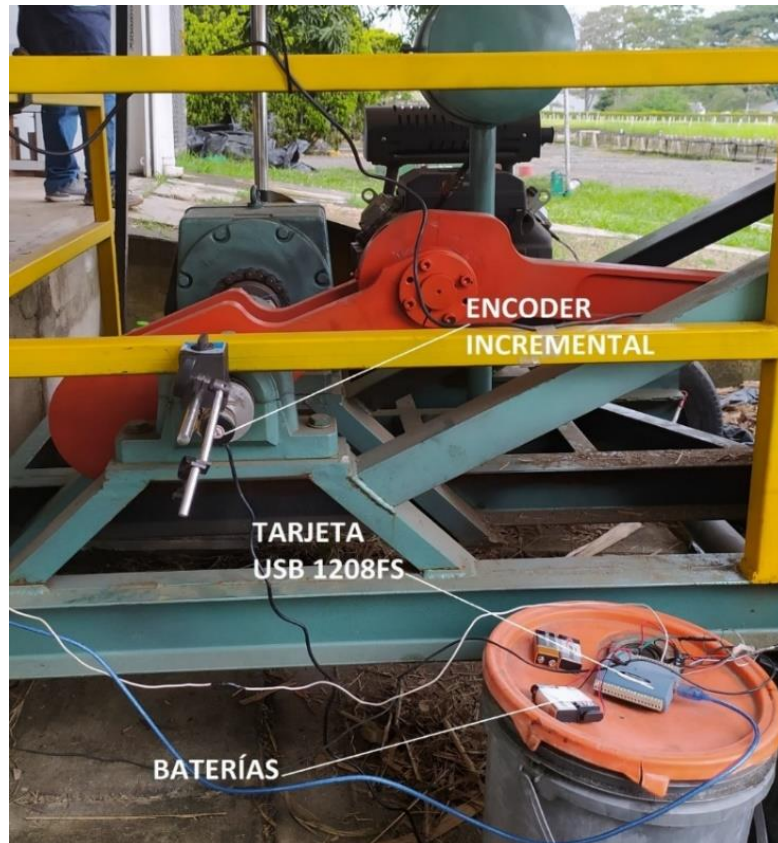


Figura 28. Montaje del encoder incremental

5.2 Metodología de pruebas de compactación

Los experimentos se llevaron a cabo en el Centro de Investigación de la Caña de Azúcar (CENICAÑA). Se adecuó un espacio para la ejecución de los ensayos y el almacenamiento del RAC (Figura 29), el cual fue obtenido de una suerte cercana a CENICAÑA.

Se siguió un diseño estadístico en el cual se evaluaron 3 niveles de humedad y 3 tamaños de partícula, con 3 repeticiones por tratamiento, para un total de 27 ensayos en los que se usaron alrededor de 420 kg de RAC. Las pruebas se llevaron a cabo con una velocidad promedio de la manivela de 41.5 RPM.



Figura 29. Montaje del laboratorio de pruebas

Para determinar la humedad del RAC, antes de cada tanda de pruebas se separaron dos muestras de RAC de 100 g y se llevaron a un horno BINDER FD-260 donde se secaron a 105°C por 4 horas. Luego, se pesaron nuevamente las muestras y se calculó la humedad mediante la diferencia de pesos.

Los tamaños de partícula durante las recolecciones en el campo, corresponden a los tamaños de RAC de cosecha manual y RAC de cosecha mecanizada, los cuales fueron en promedio 924.1 mm y 348.7 mm, respectivamente. Para obtener un tercer tamaño de partícula, se tomó RAC de cosecha manual y se cortó mediante una picadora Penagos - TP 32, a la cual se le retiraron las cribas para evitar una granulometría muy reducida. Este último, presentó un tamaño promedio de 125.5 mm.

Para caracterizar los tamaños de partícula obtenidos (Figura 30), se tomaron 4 muestras de RAC de 500 g de diferentes zonas del material, y se midieron las longitudes de los distintos elementos del residuo (hojas verdes, hojas secas, cogollos, etc.). En la Tabla 6, se aprecian los niveles de humedad y los tamaños de partícula obtenidos.



Figura 30. Tamaños de partícula

Tabla 6. Factores y niveles del diseño estadístico

Humedad		
Nivel	(%)	CV (%)
Alta	47.20	3.99
Intermedia	29.53	14.75
Baja	18.70	10.10
Tamaños de partícula		
Nivel	(mm)	CV (%)
RAC cosecha manual	924.1	49.12
RAC cosecha mecanizada	348.7	23.73
RAC picado	125.5	15.22

Antes de cada prueba, se verificó que el recorrido del pistón y las guías laterales estuviesen libres de obstáculos, que el nivel de gasolina del tanque fuese el adecuado, que el embrague no estuviese accionado, y que los transductores de torque y desplazamiento estuviesen conectados correctamente al sistema de adquisición.

Después, se procedió a encender el motor y se esperó alrededor de un minuto hasta que alcanzara la temperatura de operación y la lubricación de sus partes móviles. Posteriormente, se inició el registro de datos con el sistema de adquisición y se accionó la palanca del embrague para transmitir el movimiento del motor al reductor y luego al mecanismo manivela-biela-pistón.

A continuación, se alimentó el RAC manualmente por la tolva. Para comenzar la compactación del RAC de forma inmediata, en los primeros ensayos se colocó RAC en la cámara de compactación, al final del recorrido del pistón. Este RAC restringe el desplazamiento del RAC recién alimentado y brinda soporte para la formación de los fardos.

Por último, cuando el fardo llegó a una longitud de entre 500 y 700 mm, se apagó el motor, se detuvo el sistema de adquisición y se procedió a amarrar el fardo de forma manual. Para esto, se atravesó el material compactado con un hilo de fibra sintética guiado con una varilla de acero en forma de aguja a través de las ranuras longitudinales de la cámara de compactación (Figura 31). Este procedimiento se repitió en cada uno de los ensayos.



Figura 31. Amarrado manual de fardos

Los fardos fueron pesados en una balanza inalámbrica DF-6185 (Figura 32) con capacidad de 200 kg y sus dimensiones fueron medidas con un flexómetro. Como las dimensiones fueron ligeramente irregulares, se tomaron dos mediciones por lado y se calculó el promedio. Lo anterior, con el fin de estimar el volumen del fardo y su densidad aparente.



Figura 32. Pesaje de fardos

6. Resultados de densidad y energía

La densidad aparente final de los fardos (Figura 33) presentó incrementos de 2.6 a 9 veces, respecto a su densidad aparente inicial (30 kg/m^3). La mayor densidad aparente (270.4 kg/m^3) se obtuvo con el RAC de cosecha manual de alta humedad. Mientras que, la menor densidad aparente (88 kg/m^3) se consiguió con el RAC picado de baja humedad.

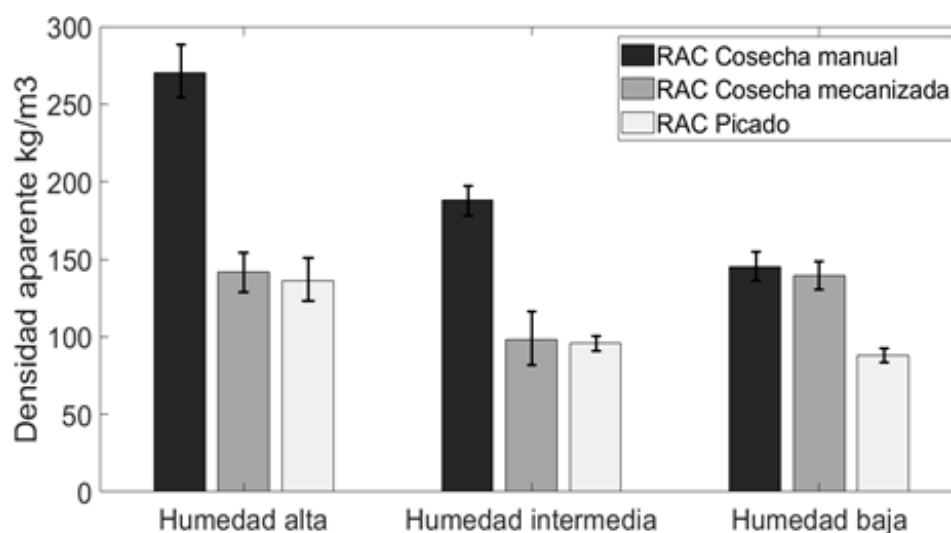


Figura 33. Densidad aparente promedio por tratamiento

El análisis de varianza de la densidad aparente arrojó diferencias significativas para los dos factores y su interacción. La interacción corresponde al efecto de sinergia de los factores evaluados sobre el parámetro de estudio. Para conocer los niveles de cada factor con diferencias significativas, se realizó un análisis de comparación múltiple. En éste (Figura 34) se encontró que la densidad aparente promedio para el nivel de humedad alto es cerca de un 45% significativamente mayor que la densidad obtenida con los otros contenidos de humedad.

En los gráficos mostrados a continuación, los grupos intersectados o contenidos entre las líneas negras verticales, corresponden a grupos que no presentaron diferencias estadísticas significativas.

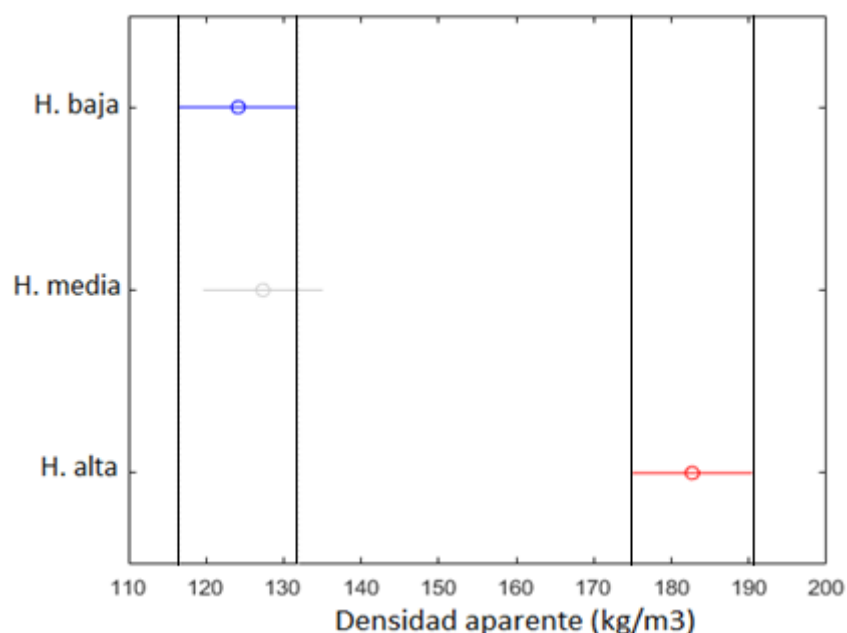


Figura 34. Resultados del análisis estadístico para la densidad aparente con respecto al nivel de humedad. Se observa que la densidad del grupo alta humedad es significativamente mayor que la de los otros dos grupos

Por otro lado, se encontraron diferencias entre los tres tamaños de partícula (Figura 35). La densidad aparente promedio para el RAC de cosecha manual, fue alrededor de un 60% y un 88% mayor que las del RAC de cosecha mecanizada y el RAC picado, respectivamente.

Por su parte, en la comparación entre interacciones (Figura 36), se puede ver que los grupos de RAC picado de baja humedad, RAC de cosecha mecanizada de baja humedad y RAC de cosecha mecanizada de media humedad, no presentan diferencias significativas. Lo mismo ocurre para los grupos de RAC picado de media humedad, RAC picado de alta humedad, RAC de cosecha manual de baja humedad y RAC de cosecha manual media humedad. Sólo los grupos de RAC de cosecha mecanizada de alta humedad y RAC de cosecha manual de alta humedad, fueron significativamente diferentes del resto.

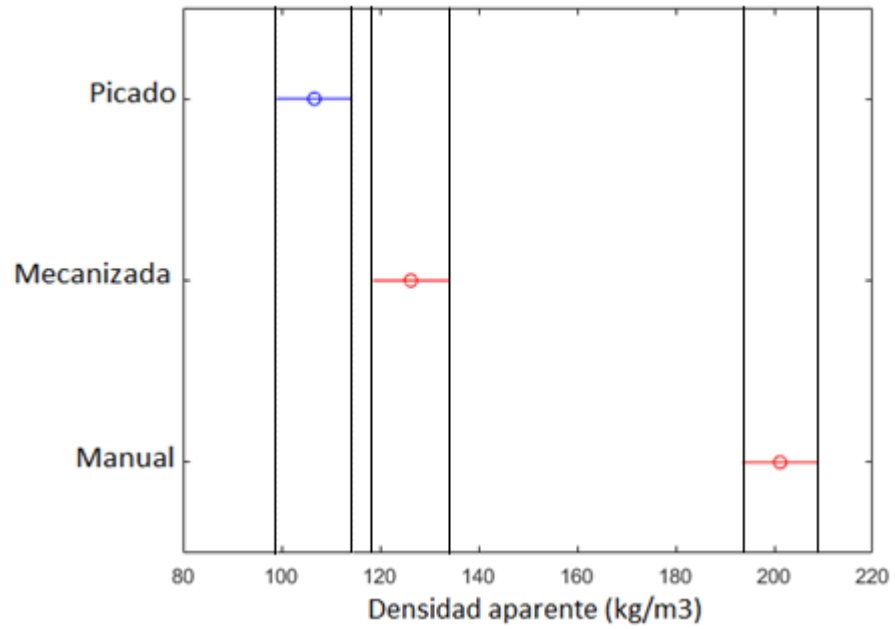


Figura 35. Resultados del análisis estadístico para la densidad aparente con respecto a los tamaños de partícula

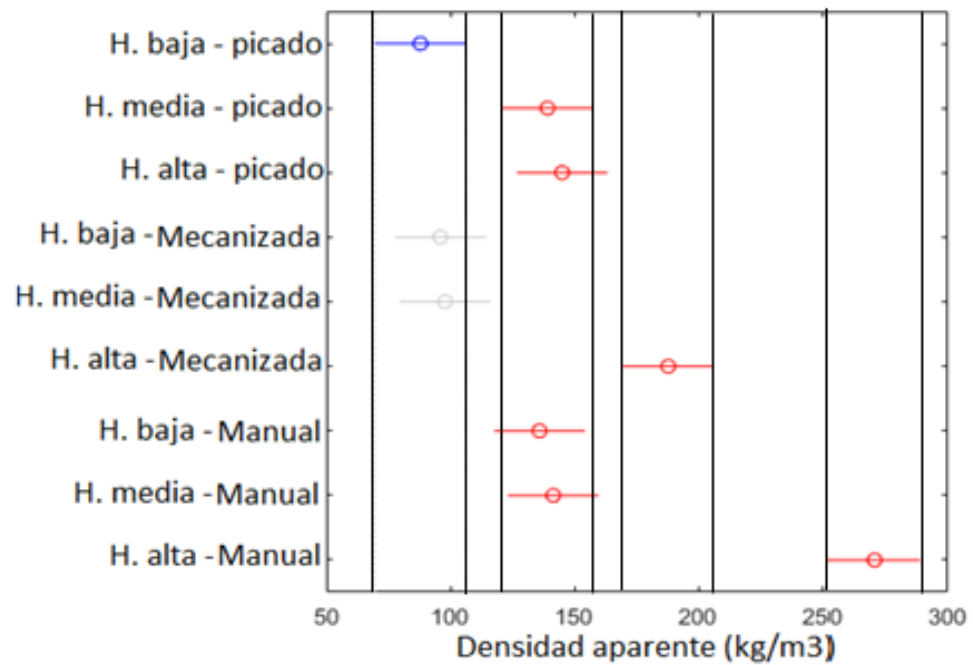


Figura 36. Resultados del análisis estadístico para la densidad aparente con respecto a las interacciones entre factores

Se puede observar que la densidad aparente obtenida para el RAC de cosecha manual de alta humedad fue un 44% mayor que la del RAC de cosecha mecanizada de alta humedad (ver Figura 36). Asimismo, fue un 96.4% mayor que el grupo con la segunda menor densidad y unas tres veces mayor que el grupo con la menor densidad aparente. Por una parte, esto se debe a que un mayor contenido de humedad en los fardos representa un peso adicional que se relaciona directamente con el incremento de densidad aparente. Por otro lado, un mayor tamaño del residuo puede favorecer el entrelazamiento de las partículas de RAC durante la compactación cíclica, y por ende, una mayor adhesión del fardo.

La energía consumida durante la producción de fardos se puede visualizar en la Figura 37. El gasto máximo de energía (9.13 kJ/kg (2.54 kWh/t)) se alcanzó para el RAC de cosecha manual de alta humedad y el mínimo (1.72 kJ/kg (0.48 kWh/t)) para el RAC picado de baja humedad.

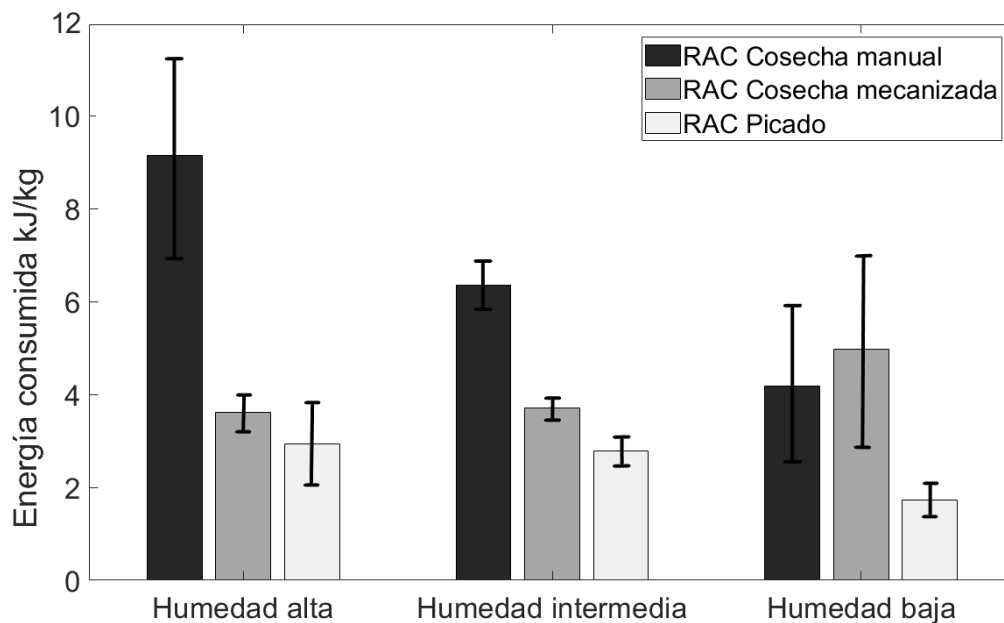


Figura 37. Consumo energético en la producción de fardos

El ANOVA de energía mostró diferencias significativas en el consumo de energía con respecto al tamaños de partícula e interacciones entre tamaños de partícula y humedad. En la comparación entre grupos (Figura 38) se encontró que el consumo promedio de energía con el RAC de cosecha manual, es alrededor de dos veces significativamente mayor que la energía para los otros dos tamaños, entre los cuales no hubo diferencias significativas.

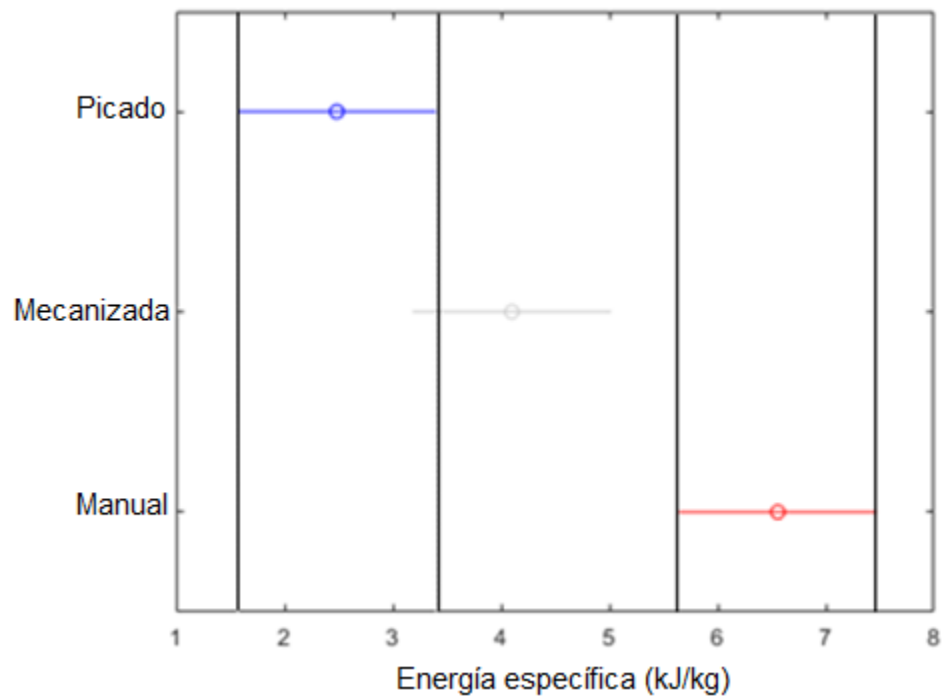


Figura 38. Resultados del análisis estadístico para el consumo de energía con respecto a los tamaños de partícula

Además, no se observaron diferencias estadísticas entre los RAC picado de alta, media y baja humedad, RAC de cosecha mecanizada de media y baja humedad, y RAC de cosecha manual de media y baja humedad. Estos mismos grupos (Figura 39), a excepción del RAC picado de baja humedad, no presentaron diferencias estadísticas con respecto al RAC de cosecha mecanizada de alta humedad. Por lo cual, sólo el consumo de energía del RAC de cosecha manual de alta humedad fue alrededor de 3.5 veces significativamente mayor que el del RAC picado de baja humedad.

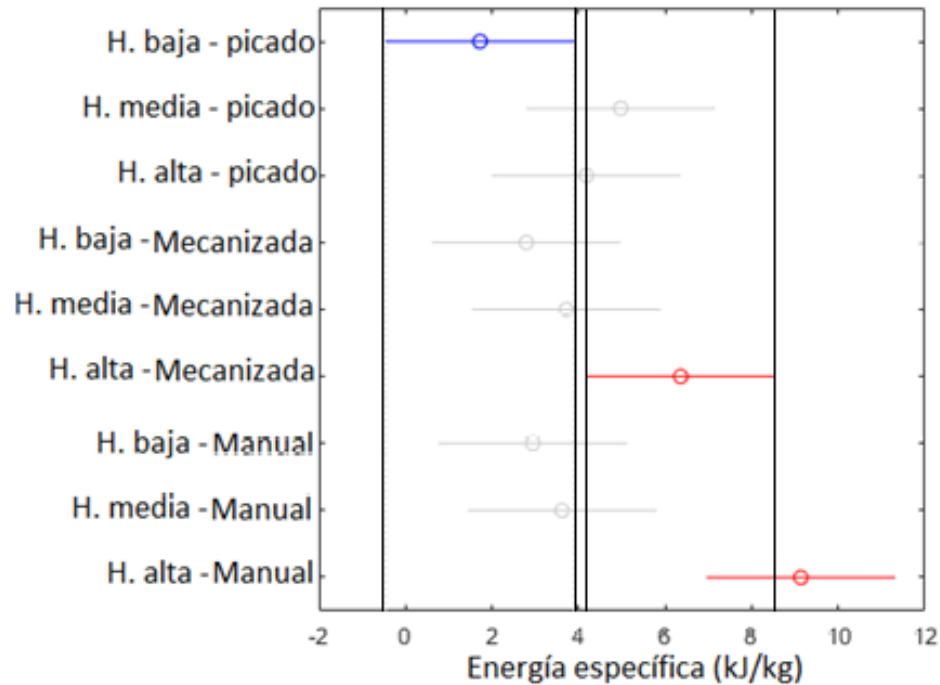


Figura 39. Resultados del análisis estadístico para el consumo de energía con respecto a las interacciones entre factores

Se realizó un análisis teórico calculando la masa y la densidad de los fardos en base seca (BS), pues finalmente, la humedad le resta energía disponible al residuo debido a su menor poder calórico. Por lo cual, un mayor contenido de humedad en los fardos transportados, representa menor eficiencia y mayores costos de transporte. Para calcular la masa BS, se restó la masa correspondiente a la humedad de la masa total del fardo. Luego, la densidad aparente BS (Figura 40) se calculó como masa BS sobre volumen.

Estadísticamente, no hubo diferencias significativas entre los niveles de humedad ni entre las interacciones de sinergia para la densidad aparente BS. No obstante, la densidad aparente BS fue significativamente diferente para los tres tamaños de partícula (Figura 41). Este resultado se extiende en la discusión.

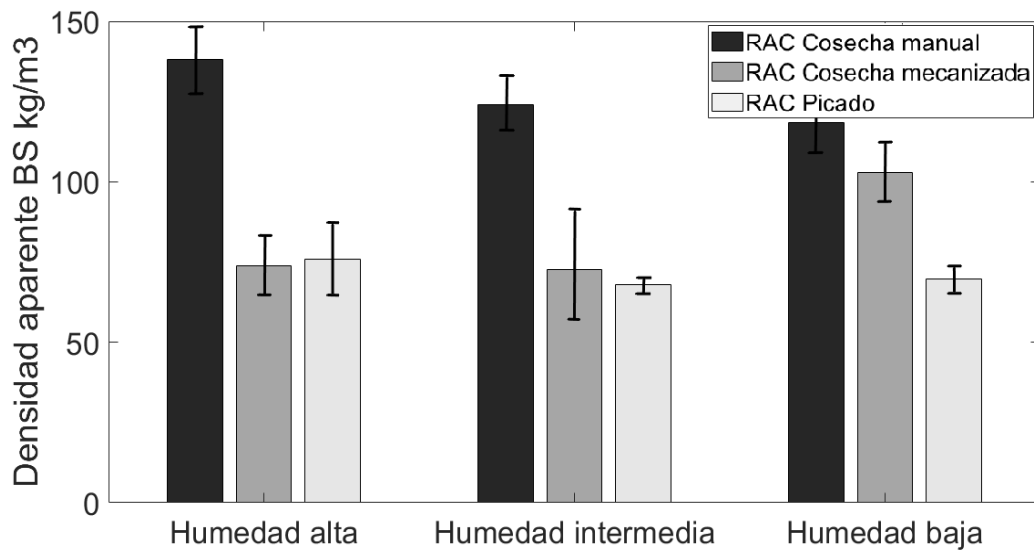


Figura 40. Densidad aparente BS promedio por tratamiento

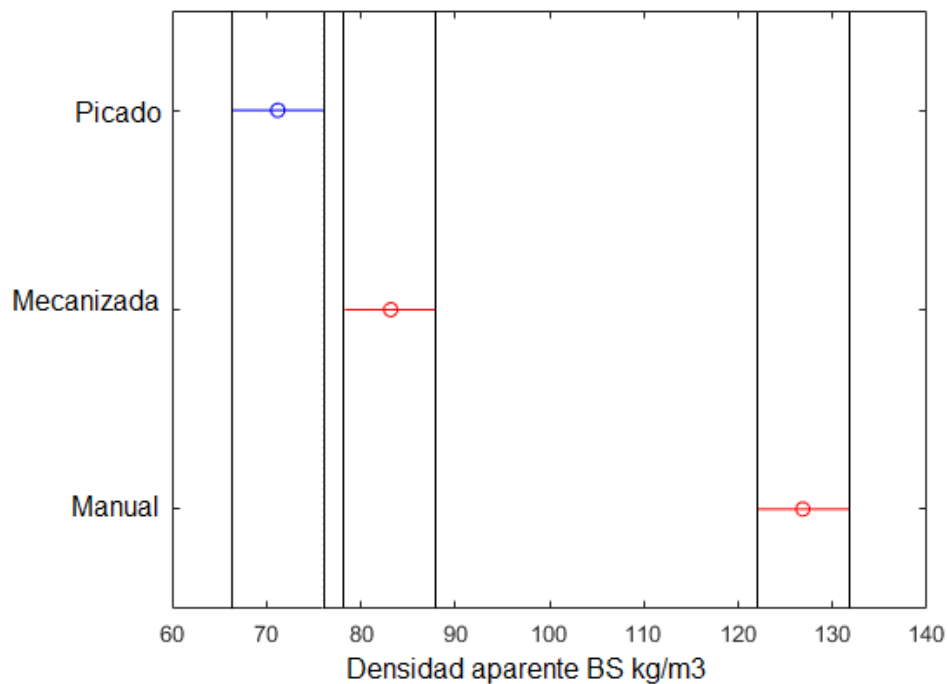


Figura 41. Resultados del análisis estadístico para la densidad aparente BS con respecto al tamaños de partícula

6.1 Discusión

Ripoli et al. (2004) realizaron un estudio de enfardado de RAC de caña de azúcar de cosecha mecanizada con 69.9% de hojas, 21.4% de tallos, 2.3% de cogollos, 6.4% de materia extraña y un contenido de humedad de 22.8% (CV = 31%) . En éste se usó una enfardadora de pacas rectangulares New Holland BB940, conducida por un tractor New Holland TM120 a través de hileras de RAC previamente realizadas [47]. La densidad promedio de los fardos fue de 211.7 kg/m^3 (CV = 3%). El consumo promedio de diésel durante la operación fue de 1.42 L/t (CV = 3.6%), equivalente a 15.02 kWh/t. Comparativamente, la densidad reportada por Ripoli et al. (2004), es 21.7% menor que la densidad máxima obtenida con el prototipo del presente proyecto. Por su parte, el máximo consumo energético de nuestro prototipo de enfardadora fue 5.9 veces menor que la reportada en el estudio de Ripoli et al. (2004),. Esto último se debe principalmente a que el prototipo del presente proyecto no se translada por el campo, no levanta el RAC del suelo, y tampoco cuenta con un dispositivo de amarrado automático, por lo que su consumo de energía debe ser menor.

S.J. Hassuani et al. (2013) tambien ejecutaron ensayos semejantes con una enfardadora de pacas rectangulares de gran tamaño CASE 8575, operando sobre hileras de RAC de caña de azúcar de distintas características dimensionales [48]. Reportan una mayor densidad promedio de 231 kg/m^3 , la cual es un 17.1% menor que la obtenida en la presente investigación. Por otro lado, estos autores reportan un consumo de diésel promedio de 1.5 L/t, equivalentes a 15.87 kWh/t. Este gasto energético fue 6.25 veces mayor al del prototipo de enfardadora. Nuevamente, esto se debe a los procesos ejecutados por el equipo comercial, que el prototipo no realiza.

M.L. Cunali (2002) estudió el enfardado de RAC de caña de azúcar con contenidos de humedad de entre 14.7% y 30.5%, utilizando una enfardadora New Holland BB940 de pacas grandes rectangulares y una enfardadora de pacas cilíndricas New Holland 658 [49]. En esta investigación, se encontraron densidades para las enfardadoras NH BB940 y NH 658 de 218.4 kg/m³ y 166.5 kg/m³, respectivamente. Las cuales fueron, 23.8% y 62.4% menores que la densidad máxima alcanzada con el prototipo de enfardadora.

T. Cardoso, O. Cavalett et al. (2016) realizaron una evaluación técnico-económica de la recuperación de RAC de caña de azúcar para producción de bioenergía. Para esto, evaluaron seis escenarios donde combinaron factores como recolección de RAC mediante cosecha integral y enfardado, con porcentajes de recolección del 30%, 50% y 70% del RAC dispoble en el campo, y los compararon con un séptimo escenario sin recolección de residuos [50]. En este trabajo se concluyó que, con un rendimiento de caña de azúcar de 80 t/ha y una distancia de transporte promedio de 30 km, la recuperación de RAC mediante enfardado representa mayores costos por unidad de masa que la recuperación por cosecha integral. Sin embargo, la tasa interna de retorno con sistema de enfardado es 30% mayor que el de cosecha integral para el proyecto bioenergético global. Este resultado sugiere que se deben analizar la mayor cantidad de variables posibles para tener una buena estimación de la viabilidad económica del enfardado como método de densificación.

H. Vincent & M. Krishnamurthi (2007) realizaron un estudio comparativo sobre enfardadoras pequeñas de pacas rectangulares y redondas. Para esto, formaron hileras de RAC de caña de azúcar de forma manual y mecánica, que luego serían enfardadas [51]. Encontraron rendimientos de producción similares para ambos sistemas, pero mayor eficiencia de transporte para fardos rectangulares debido a su facilidad de manipulación y aprovechamiento del espacio.

Por su parte, la recolección y transporte de los fardos redondos implicó equipos de carga especializados y de mayor tamaño.

Al analizar los diferentes estudios sobre enfardado de RAC de caña de azúcar, se evidencia que la densidad aparente y el consumo de energía obtenidos con el prototipo desarrollado están en los mismos rangos de valores. En particular, las densidades aparentes, en algunos casos, son mayores a los reportados en la literatura. Esto se debe resaltar, pues la densidad aparente es el parámetro más importante a la hora de viabilizar el transporte del RAC densificado. Por otra parte, aspectos logísticos como el aprovechamiento eficiente del espacio y la facilidad de manipulación, pueden jugar un papel importante a la hora de evaluar los aspectos logísticos de un proyecto bio-energético con biomasa.

El análisis teórico de densidad aparente BS presenta resultados destacables. En primer lugar, se dan indicios de que el contenido de humedad del RAC a enfardar debe ser lo más bajo posible, pues éste no tiene un efecto significativo sobre la densidad final del fardo, en cambio, puede afectar negativamente la operación de transporte y de aprovechamiento energético. Esto pues, a mayor contenido de humedad menor la masa efectiva y menor densidad de energía del RAC transportado. Por otra parte, se observó que la operación de enfardado se beneficia de un mayor tamaño del residuo debido al posible entrelazamiento entre partículas de RAC que proporciona una mayor adhesión.

7. Viabilidad energética y económica del enfardado de RAC de caña de azúcar

La viabilidad energética se puede evaluar como la comparación entre la energía invertida para transformar el RAC y llevarlo hasta un usuario final, con el potencial energético del residuo en un proceso de combustión. La energía invertida se puede cuantificar mediante el gasto de combustible empleado en la formación de hileras de RAC en el campo, el enfardado, la carga y transporte de fardos y la descarga en el lugar de aprovechamiento, que puede ser una planta de peletización y briqueteado, o una planta de generación de potencia.

La comparación energética mencionada se puede llevar a cabo mediante el cálculo de la eficiencia energética [47]. Esta se define a continuación.

$$EE = \left(1 - \frac{CCE}{PER}\right) \cdot 100$$

Donde,

EE (%) = *Eficiencia energética*

CCE (MJ/kg) = *Consumo de combustible equivalente*

PER (MJ/kg) = *Potencial energético del residuo*

La energía durante el proceso de enfardado se consideró igual al consumo máximo de energía obtenido en los ensayos, el cual fue 2.54 kWh/t, equivalente a 0.24 L/t (Tabla 7). Ya que sólo se consideró la energía invertida durante la compactación, el consumo de combustible para los procesos no efectuados por el prototipo fueron extraídos de la literatura [52].

Tabla 7. Consumo de combustible equivalente

Operación	Consumo de diésel	Unidad
Hilerado	0.49	L/t
Enfardado	0.24	L/t
Levantamiento	0.92	L/t
Transporte	1.6	L/km·t
Descarga	0.91	L/t

Así, considerando una distancia de transporte de 30 km [50], el consumo de combustible equivalente total es de 50.56 L/t (1.92 MJ/kg). Por otro lado, el potencial energético del residuo se tomará como el poder calorífico inferior mínimo reportado en la tabla 2 (15.6 MJ/kg). Sin embargo, al considerar la eficiencia promedio (55%) de una caldera que opera con biomasa [53] la energía disponible del RAC es cercana a 8.58 MJ/kg.

Luego, la eficiencia energética del enfardado RAC de caña de azúcar es de 77.6%. Esto indica que, energéticamente el enfardado de RAC de caña de azúcar tiene viabilidad, pues sólo el 22.4% de la energía disponible en el fardo equivale a la energía empleada para transformar el RAC en un producto bio-energético aprovechable. Estos porcentajes pueden variar para una enfardadora comercial con más funciones que el prototipo. Sin embargo, esta variación no afecta en mayor medida la viabilidad energética.

Por su parte, la evaluación económica del proceso de enfardado se puede realizar comparando los costos del combustible equivalente consumido durante toda la cadena de suministro, con el precio al que se pueden comercializar los fardos.

Para 2022, el precio del diésel en Colombia llegó a los \$0.58 USD/L [54]. Lo que indica que el costo asociado a la cadena de suministro de fardos de RAC de caña de azúcar, para una distancia de transporte de 30 km, es de alrededor de \$29.33 USD/t de RAC enfardado.

Algunos autores han reportado que el RAC de caña de azúcar se puede comercializar en un precio de \$38.3 USD/t [55]. Con lo cual, se podría obtener una rentabilidad bruta de alrededor del 23.4% con la venta de fardos.

Para obtener una rentabilidad neta y un análisis completo de viabilidad económica se debe considerar un panorama más general en el que se tengan en cuenta los costos asociados al proceso de enfardado, el costo de adquisición de la enfardadora, la vida útil de ésta y las horas productivas, el costo del operario, las variación en las distancias de transporte, los intereses anuales asociados a la inversión y la ruta de aprovechamiento de los residuos [45]. Esto depende de múltiples variables que no fueron evaluadas en el presente proyecto.

Por otra parte, considerando que un vehículo de carga con rendimiento de combustible promedio de 3.4 km/L, emite 1.6 kg CO₂/km [38], se puede estimar que para una distancia de transporte de RAC de 30 km la emisión total de CO₂ será de 48 kg. Comparando dos escenarios en los que se transporte RAC sin densificar, con densidad aparente 30 kg/m³, y RAC enfardado a la máxima densidad obtenida en el presente proyecto (270.4 kg/ kg/m³), se hace evidente que para transportar la misma cantidad de RAC, se requieren 9 veces más viajes para el RAC sin densificar. Volviendo al escenario de transporte con distancia de 30 km, la comparación mencionada implicaría unas emisiones de CO₂ de 48 kg para el RAC enfardado y de 432 kg para el RAC sin densificar.

Esta misma proporción aplica para los costos de transporte de RAC. Para un costo de \$0.2 USD/km·t [56], transportar 1 tonelada de RAC enfardado a una distancia de 30 km, costaría \$6 USD. Mientras que, este mismo escenario de transporte tendría un costo de \$54 USD para el RAC sin densificar.

8. Conclusiones y recomendaciones

Se realizó la evaluación cualitativa de ocho sistemas de densificación que se usan convencionalmente, los cuales cuentan distintos mecanismos de compactación y características de operación. Se seleccionó el sistema usado por las enfardadoras de pacas rectangulares de menor tamaño, pues pueden operar en el campo y presentan ventajas en cuanto a facilidad de análisis y diseño, así como de maniobrabilidad de los fardos producidos.

Se diseñó y construyó un prototipo de enfardadora que representa de buena manera la operación de densificación de las enfardadoras comerciales, pues en los ensayos de compactación se lograron magnitudes de densidad aparente y energía similares a las reportadas en la literatura.

Para la ejecución de los ensayos, se usó RAC de caña de azúcar con tres tamaños de partícula y tres niveles de humedad. El RAC de cosecha manual de alta humedad presentó la mayor densidad aparente (270 kg/m^3) y el mayor consumo energético (9.13 kJ/kg) durante las pruebas. Mientras que, los valores mínimos de densidad aparente y consumo de energía fueron para el RAC picado de baja humedad. Estos fueron 3.1 y 5.3 veces, respectivamente menores, comparados con el RAC de cosecha manual de alta humedad.

Los análisis de varianza mostraron que la densidad aparente es significativamente mayor para el RAC de alta humedad con respecto a los otros dos niveles. Por otra parte, los tamaños de partícula evaluados presentaron diferencias estadísticamente significativas.

En el análisis de varianza se observó que el consumo de energía con RAC de cosecha manual es aproximadamente dos veces significativamente mayor que el consumo de energía para los otros dos tamaños.

Los consumos de energía obtenidos en la presente investigación para la operación de enfardado fueron considerablemente menores a los reportados en la literatura. Esto se debe a que el prototipo de enfardadora desarrollado no cuenta con sistemas de recolección y amarrado de RAC, ni tampoco se desplaza a lo largo del campo, como si lo hacen las enfardadoras comerciales con asistencia de un tractor.

La densidad aparente máxima alcanzada con el prototipo de enfardadora (270 kg/m^3), fue entre 17% y 24% mayor a la reportada por algunos autores.

Del análisis en base seca se puede concluir que la mejor combinación de parámetros de entrada en función de la densidad aparente final, es decir, la densidad que alcanza el fardo después de perder su humedad con el paso del tiempo, es un mayor tamaño de partícula y una menor humedad del residuo. Estos dos factores permiten mejores resultados en la densificación y un transporte más eficiente por una mayor masa efectiva y densidad de energía transportada, respectivamente. Esto indica que preferiblemente se debe dejar secar el RAC en el campo el mayor tiempo posible.

A partir del consumo de energía máximo obtenido y algunos valores tomados de la literatura, se estimó una eficiencia energética del 77.6% de la operación de enfardado, la cual compara la energía invertida para transformar el RAC en producto bioenergético, con la energía disponible en el residuo. Asimismo, se estimó que con la operación de enfardado se puede alcanzar una rentabilidad cercana al 23.4% al comercializar los fardos de RAC de caña de azúcar.

Se estudió el efecto de la densidad aparente de los fardos sobre las emisiones de CO_2 y el costo asociado al transporte de la biomasa mediante un escenario teórico de 30 km de desplazamiento del camión de carga. Se evidenció que tanto las emisiones de CO_2 como el costo del transporte tienen una relación lineal e inversamente proporcional con la densidad aparente de la biomasa transportada. De esta manera, al aumentar nueve veces la densidad de la biomasa, las emisiones de CO_2 y el costo del transporte se reducirán en la misma proporción.

Como trabajo futuro se propone implementar un mecanismo de recolección de RAC y un dispositivo de amarre, para evaluar su consumo energético. Asimismo, se sugiere evaluar la energía invertida por la cuchilla de corte de RAC ubicada en la entrada a la cámara de compactación, pues es un sistema con el que cuentan algunas enfardadoras comerciales.

Adicionalmente, se propone medir los consumos de combustible de forma directa, para estimar la eficiencia del prototipo y tener otro punto de comparación con los resultados reportados en la literatura.

9. Bibliografía

- [1] R. A. Barreto, "Fossil fuels, alternative energy and economic growth," *Econ. Model.*, vol. 75, no. February, pp. 196–220, 2018, doi: 10.1016/j.econmod.2018.06.019.
- [2] D. F. Cobo, "Pirólisis de residuos de cosecha de caña de azúcar (RAC) como alternativa de aprovechamiento en procesos de cogeneración," Universidad del Valle, 2012.
- [3] J. ho Choi, "Strategy for reducing carbon dioxide emissions from maintenance and rehabilitation of highway pavement," *J. Clean. Prod.*, vol. 209, pp. 88–100, 2019, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.10.226.
- [4] E. Michaelides, *Alternative energy sources*. Springer, 2012.
- [5] N. Bilandzija et al., "Evaluation of Croatian agricultural solid biomass energy potential," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 93, pp. 225–230, Oct. 2018, doi: 10.1016/J.RSER.2018.05.040.
- [6] J. Gonzalo, L. Lopera, and Á. Tamayo Vélez, "Agroindustrial performance of sugarcane varieties for panela in Antioquia, Colombia," *Rev.Fac.Nac.Agron.*, vol. 70, no. 3, pp. 8303–8310, 2017, doi: 10.15446/rfna.v70n3.66329.
- [7] ASOCAÑA, "Sector Agroindustrial de la Caña," *Sector Agroindustrial de la Caña*, 2017. <https://www.asocana.org/publico/info.aspx?Cid=215>.
- [8] J. L. Castillo and J. E. Lucuara, "USO DE RESIDUOS AGRÍCOLAS DE COSECHA (RAC) COMO COMBUSTIBLE NO CONVENCIONAL PARA GENERAR ENERGÍA ELÉCTRICA EN CALDERAS DE POTENCIA," 2016, Accessed: Jul. 09, 2019. [Online]. Available: <http://www.ceaca.com/wp-content/uploads/2016/06/7-USO-DE-RESIDUOS-AGRÍCOLAS-DE-COSECHA-COMO-COMBUSTIBLE.pdf>.
- [9] Secretaría de Energía and Ministerio de Agricultura, "PROBIOMASA - Proyecto para la promoción de la energía derivada de biomasa," 2020. <http://www.probiomasa.gob.ar/sitio/es/biomasa.php> (accessed Jan. 05, 2022).
- [10] D. Gonzales, E. M. Searcy, and S. D. Ekşioğlu, "Cost analysis for high-volume and long-haul transportation of densified biomass feedstock," *Transp. Res. Part A Policy Pract.*, vol. 49, pp. 48–61, Mar. 2013, doi: 10.1016/J.TRA.2013.01.005.
- [11] S. Clarke and F. Preto, "Biomass Densification for Energy Production," 2011.

Accessed: Jul. 10, 2019. [Online]. Available:
<https://pdfs.semanticscholar.org/35f4/d038813b88b3536ed80741dbdd6d2b0db33e.pdf>.

- [12] EPEC, “Energía renovable: la biomasa,” Córdoba, Argentina, 2018.
Accessed: Apr. 18, 2019. [Online]. Available:
<https://www.epec.com.ar/docs/educativo/institucional/biomasa.pdf>.
- [13] Secretaría de Energía, “Energía Biomasa,” República de Argentina, 2008.
Accessed: Jul. 10, 2019. [Online]. Available:
http://www.energia.gov.ar/contenidos/archivos/publicaciones/libro_energia_biomasa.pdf.
- [14] L. Rafati *et al.*, “Waste to Energy: Challenges and Opportunities in Iran,” *J. Environ. Heal. Sustain. Dev. Iran. J Env. Heal. Sustain Dev*, vol. 1, no. 3, pp. 175–84, 2016, Accessed: Jul. 11, 2019. [Online]. Available:
<https://pdfs.semanticscholar.org/f1f2/586bb7c011c4671a437eef02214950faaf96.pdf>.
- [15] J. Ulloa, “LOS RELLENOS SANITARIOS,” *Rev. Ciencias la Vida*, vol. 4, pp. 2–17, 2006, Accessed: Jul. 15, 2019. [Online]. Available:
<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=476047388001>.
- [16] I. Ramatsa, E. Akinlabi, D. Madyira, and R. Huberts, “Design of the Bio-digester for Biogas Production: A Review,” San Francisco, 2014. doi: 10.1016/0961-9534(91)90004-V.
- [17] N. Tangri and M. Wilson, “Gasificación y pirólisis de residuos: procedimientos de alto riesgo y baja rentabilidad para el tratamiento de residuos,” 2017. [Online]. Available: <http://www.no-burn.org/wp-content/uploads/Gasificación-y-pirólisis-2017-ESP.pdf>.
- [18] California Energy Commission, “Biomass Gasification-DRAFT,” 2015.
Accessed: Jul. 15, 2019. [Online]. Available: www.energy.ca.gov/research/.
- [19] P. Basu, *Biomass gasification, pyrolysis and torrefaction*. San Diego, 2013.
- [20] S. Khovanskyi, “Biomass Combustion Control in Small and Medium-Scale Boilers on Low Cost Sensing the Trend of Carbon Monoxide Emissions,” 2021.
- [21] T. Nussbaumer, “Combustion and Co-combustion of Biomass : Fundamentals , Technologies , and Primary Measures for Emission Reduction,” pp. 1510–1521, 2003, [Online]. Available:
http://www.verenum.ch/Publikationen/comb_cocomb.pdf.
- [22] S. Sadaka and D. Johnson, “Biomass Combustion,” *Agric. Nat. Resour.*, 2000.
- [23] Z. Yingying, J. Bryan, K. Kurt, and T. Chresten, “Optimization under uncertainty of a biomass-integrated renewable energy microgrid with energy storage,” *Renew. Energy*, vol. 123, pp. 204–217, 2018, doi:

10.1016/j.renene.2018.01.120.

- [24] L. J. R. Nunes, T. P. Causer, and D. Ciolkosz, "Biomass for energy: A review on supply chain management models," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 120, p. 109658, Mar. 2020, doi: 10.1016/J.RSER.2019.109658.
- [25] WBA fact sheet, "Biomass Supply Chains Harvesting & Collection, Pre-Treatment And Upgrading, Storage, Transportation & Handling," *World Bioenergy Assoc.*, no. June, pp. 1–9, 2018, [Online]. Available: <http://www.worldbioenergy.org/uploads/Factsheet - Biomass Supply Chains.pdf>.
- [26] H. Laura, F. Carlos, and S. Fabio, "Biomass Densification: A Review of the Current State-of-the-Art of the Pellet Market and Analysis of New Research Trends," *Tecciencia*, vol. 12, no. 23, pp. 81–92, 2017, [Online]. Available: <http://www.scielo.org.co/pdf/tecci/v12n23/1909-3667-tecci-12-23-00081.pdf>.
- [27] I. N. Manickam, D. Ravindran, and P. Subramanian, "Biomass Densification Methods and Mechanism," *Cogener. Distrib. Gener. J.*, vol. 21, pp. 33–45, 2009, doi: 10.1080/15453660609509098.
- [28] C. T. Wright, K. L. Kenney, and J. R. Hess, "A Technical Review on Biomass Processing: Densification, Preprocessing, Modeling and Optimization," *ASABE*, 2010, [Online]. Available: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/15453660609509098>.
- [29] P. Taylor, S. C. Bhattacharya, S. Sett, R. A. M. M. Shrestha, and R. A. M. M. Shrestha, "State of the Art for Biomass Densification," *Energy Sources*, vol. 11, pp. 161–182, 2007, [Online]. Available: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00908318908908952>.
- [30] S. Sokhansanj, "Baling Biomass," *ASABE*, 2020.
- [31] S. Pascuzzi, A. S. Guerrieri, F. Vicino, and F. Santoro, "Assessment of required torque and power by big square baler during the wrapping and baling process," *Eng. Rural Dev.*, pp. 298–302, 2021, doi: 10.22616/ERDev.2021.20.TF061.
- [32] A. Feng, K. Sudduth, E. Vories, M. Zhang, and J. Zhou, "Development of working mode for an agricultural tractor during baler operation," *ASABE*, pp. 2–14, 2018.
- [33] J. Hahn and A. Herrmann, "BALING, TRANSPORTATION, AND STORAGE OF STRAW," *Agric. Mech. Autom.*, vol. II, 2009, [Online]. Available: <https://www.eolss.net/sample-chapters/c10/E5-11-05-03.pdf>.
- [34] C. Balingbing *et al.*, *Sustainable Rice Straw Management*. 2020.
- [35] J. E. White, W. J. Catallo, and B. L. Legendre, "Biomass pyrolysis kinetics: A comparative critical review with relevant agricultural residue case studies," *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, vol. 91, no. 1, pp. 1–33, May 2011, doi: 10.1016/J.JAAP.2011.01.004.

- [36] J. Moncada, M. M. El-Halwagi, and C. A. Cardona, "Techno-economic analysis for a sugarcane biorefinery: Colombian case," *Bioresour. Technol.*, vol. 135, pp. 533–543, May 2013, doi: 10.1016/J.BIORTECH.2012.08.137.
- [37] M. B. W. Saad, L. R. M. Oliveira, R. G. Cândido, G. Quintana, G. J. M. Rocha, and A. R. Gonçalves, "Preliminary studies on fungal treatment of sugarcane straw for organosolv pulping," *Enzyme Microb. Technol.*, vol. 43, no. 2, pp. 220–225, Aug. 2008, doi: 10.1016/J.ENZMICTEC.2008.03.006.
- [38] J. C. Vergara, G. Rojas, and K. Ortegon, "Sugarcane Straw Recovery for Bioenergy Generation : A Case of an Organic Farm in Colombia," *ACS Omega*, vol. 5, pp. 7950–7955, 2020, doi: 10.1021/acsomega.9b04340.
- [39] L. A. B. Cortez, E. O. Gómez, R. T. G. de Souza, G. J. de M. Rocha, E. de Almeida, and L. A. B. Cortez, "SUGARCANE TRASH AS FEEDSTOCK FOR SECOND GENERATION PROCESSES," in *Sugarcane bioethanol — R&D for Productivity and Sustainability*, Editora Edgard Blücher, 2014, pp. 637–660.
- [40] P. Mantelatto, D. Carvalho, and M. Regis, "Sugarcane Straw Processing and Burning," 2019. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/339401062_Sugarcane_Straw_Processing_and_Burning.
- [41] John Deere, "Round balers." p. 44, 2017, [Online]. Available: <https://www.deere.com.au/assets/pdfs/common/products/hay-forage/baling/jdl1336-round-baler-brochure.pdf>.
- [42] A. S. Guerrieri, A. S. Anifantis, F. Santoro, and S. Pascuzzi, "Study of a Large Square Baler with Innovative Technological Systems that Optimize the Baling Effectiveness," *Agriculture*, vol. 9, pp. 7–14, 2019, [Online]. Available: <chrome-extension://dagcmkpagjlhakfdhnbomgmjdpkdklff/enhanced-reader.html?pdf=https%3A%2F%2Fbrxt.mendeley.com%2Fdocument%2Fcontent%2F65187d45-1d02-34bd-9a89-badfd91c0a44>.
- [43] Massey Ferguson, "Centre-Line Small Rectangular Baler," *MASSEY FERGUSON*, 2022. https://www.masseyferguson.com/en_au/product/balers/mf-1840.html (accessed Jan. 15, 2022).
- [44] D. Astaiza, "Manejo de los residuos de cosecha de caña de azúcar y su valor energético," Universidad Nacional de Colombia, 1998.
- [45] S. Lemos, M. Denadai, S. Guerra, M. Esperancini, O. Bueno, and I. Takitane, "Economic efficiency of two baling systems for sugarcane straw," *Ind. Crop. Prod.*, vol. 55, pp. 97–101, 2014, doi: 10.1016/j.indcrop.2014.02.010.
- [46] M. Ferrer, M. Guandulay, G. Ramos, and J. Ledesma, "Análisis experimental de columnas cortas para aceros," 2017. Accessed: Jul. 22, 2019. [Online]. Available: www.ecorfan.org/bolivia.

- [47] H. F. Torrezan, T. C. Ripoli, and C. A. Gamero, "Windrowing and Prismatic Baling of Sugar Cane Vegetal Residues : Some Operational Parameters and Energetic Efficiency," *ASAE*, pp. 1–12, 2004.
- [48] S. . Hassuani, J. . da Silva, and J. . Neves, "Sugarcane trash recovery alternatives for power generation," *Proc. ISSCT*, vol. 25, 2005.
- [49] M. Cunali, "MAPEAMENTO DO PALHIÇO ENFARDADO DE CANA-DE-AÇÚCAR (*Saccharum spp.*) E DO SEU POTENCIAL ENERGÉTICO," Universidade de Sao Paulo, 2002.
- [50] T. Cardoso *et al.*, "Technical and economic assessment of trash recovery in the sugarcane bioenergy production system," *Sci. Agric.*, vol. 70, no. 5, pp. 353–360, 2013.
- [51] H. VINCENT and M. KRISHNAMURTHI, "SUGARCANE TRASH COLLECTION AT THE SMALL FARMS IN SOUTHERN INDIA," *Proc. Int. Soc. Sugar cane Technol*, vol. 26, pp. 114–120, 2007.
- [52] D. Jos Carvalho, ao Paulo Soto Veiga, and W. Antonio Bizzo, "Analysis of energy consumption in three systems for collecting sugarcane straw for use in power generation," 2017, doi: 10.1016/j.energy.2016.12.067.
- [53] A. Munir, J. Z. Alvi, S. Qasim, and A. Ghafoor, "Performance evaluation of a biomass boiler on the basis of heat loss method and total heat values of steam," *Pakistan J. Agric. Sci.*, vol. 51, no. 1, pp. 209–215, 2014, [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/268817205_Performance_evaluation_of_a_biomass_boiler_on_the_basis_of_heat_loss_method_and_total_heat_values_of_steam.
- [54] Global Petrol Prices, "Precios del diesel en Colombia," 2022. https://es.globalpetrolprices.com/Colombia/diesel_prices/ (accessed Jan. 13, 2022).
- [55] USDA NASS, "Crop values 2020 summary," 2021. [Online]. Available: <https://usda.library.cornell.edu/concern/publications/k35694332?locale=en>.
- [56] R. Golecha and J. Gan, "Biomass transport cost from field to conversion facility when biomass yield density and road network vary with transport radius," *Appl. Energy*, vol. 164, pp. 321–331, 2016, doi: 10.1016/j.apenergy.2015.11.070.
- [57] W. D. Pilkey, *Formulas for stress, strain, and structural matrices*, 2nd editio. University of Virginia, 2005.
- [58] B. Richard G. and N. J. Keith, *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley*, 8va edición. México DC., 2008.

10. Anexos

Anexo A: Análisis cinemático del mecanismo manivela-biela-pistón

Las posiciones angulares de la biela (Φ) y la manivela (θ), se relacionan por medio de la siguiente expresión.

$$\text{sen}(\Phi) = \frac{R}{L} \text{sen}(\theta)$$

R: longitud de la manivela [m]

L: longitud de la biela [m]

θ : posición angular de la manivela respecto a la horizontal [°]

Φ : posición angular de la biela respecto a la horizontal [°]

Luego, mediante una suma vectorial se puede obtener la posición del pistón en función de θ .

$$x = R\cos(\theta) + L\sqrt{1 - \left[\frac{R}{L}\text{sen}(\theta)\right]^2}$$

x: posición del pistón en función de θ [m]

De la primera y segunda derivada en función del tiempo de esta expresión, se obtienen la velocidad y aceleración del pistón en función de θ .

$$v = -R\omega \left(\text{sen}(\theta) + \frac{\frac{R}{2L}\text{sen}(2\theta)}{\sqrt{1 - \left[\frac{R}{L}\text{sen}(\theta)\right]^2}} \right)$$

$$a_{4x} = -Rw^2 \left(\cos(\theta) + \frac{\frac{R}{L^3} \cos(2\theta) [L^2 - R^2 \sin^2(\theta)]}{\sqrt{1 - \left[\frac{R}{L} \sin(\theta)\right]^2}} - \left(\frac{\frac{R^3}{4L^3} \sin^2(2\theta)}{\sqrt{1 - \left[\frac{R}{L} \sin(\theta)\right]^2}} \right) \right)$$

w : velocidad angular de la manivela = **constante** [rad/s]

v : velocidad lineal del pistón en función de θ [m/s]

a_{4x} : aceleración del pistón en función de θ [m/s²]

Luego, mediante análisis vectorial se determinan las expresiones correspondientes a las aceleraciones de los centros de masas de la manivela y la biela.

$$a_{2x} = \frac{-Rw^2}{2} \cos(\theta)$$

$$a_{2y} = \frac{-Rw^2}{2} \sin(\theta)$$

$$w_3 = \frac{-wR \cos(\theta)}{L \sqrt{1 - \left[\frac{R}{L} \sin(\theta)\right]^2}}$$

$$\alpha_3 = - \left(\frac{a_{4x} + Rw^2 [\cos(\theta) + \sin(\theta)]}{L \left[\frac{R}{L} \sin(\theta) + \sqrt{1 - \left[\frac{R}{L} \sin(\theta)\right]^2} \right]} \right)$$

$$a_{3x} = - \left(Rw^2 \cos(\theta) - \frac{R}{2} [\alpha_3 \sin(\theta)] - \frac{L}{2} w_3^2 \left[\sqrt{1 - \left[\frac{R}{L} \sin(\theta)\right]^2} \right] \right)$$

$$a_{3y} = - \left(Rw^2 \sin(\theta) + \frac{L}{2} \alpha_3 \left[\sqrt{1 - \left[\frac{R}{L} \sin(\theta)\right]^2} \right] - \frac{R}{2} w_3^2 [\sin(\theta)] \right)$$

a_{2x} : aceleración del centro de masa de la manivela en dirección x [m/s²]

a_{2y} : aceleración del centro de masa de la manivela en dirección y [m/s²]

w_3 : velocidad angular de la biela [rad/s]

α_3 : aceleración angular de la biela [rad/s²]

a_{3x} : aceleración del centro de masa de la biela en dirección x [m/s²]

a_{3y} : aceleración del centro de masa de la biela en dirección y $[m/s^2]$

a_{4x} : aceleración del pistón en función de θ $[m/s^2]$

La carga crítica de diseño, depende de la resistencia que ofrece el RAC a la compactación. Esta resistencia está relacionada con el contenido de humedad en la biomasa y se puede determinar mediante las siguientes expresiones [44]:

$$Pr = 7 \times 10^{-6} (Df)^{2.8404} [kPa] \quad (\text{Humedad del 52\%})$$

$$Pr = 2 \times 10^{-4} (Df)^{2.4633} [kPa] \quad (\text{Humedad del 43\%})$$

$$Pr = 1 \times 10^{-5} (Df)^{3.106} [kPa] \quad (\text{Humedad del 10\%})$$

Donde,

Pr : presión aplicada $[kPa]$

Df : densidad del fardo $[kg/m^3]$

Para nuestro caso de estudio, la densidad del RAC viene dada por:

$$Df = \frac{mf}{sf * (l + lf)} [kg/m^3]$$

Donde,

mf : masa del fardo $[kg]$

sf : sección transversal del fardo $[m^2]$

lf : longitud del fardo $[m]$

$l = -x + R + L$: carrera del pistón $[m]$

Luego, la fuerza de compactación será:

$$Fr = Pr * sf : \text{resistencia del RAC a la compactación} [N]$$

Partiendo de esta fuerza y de las fuerzas de inercia presentes en el mecanismo, se determinaron las reacciones en cada una de las barras, en función de la posición angular de la manivela (Figura 42).

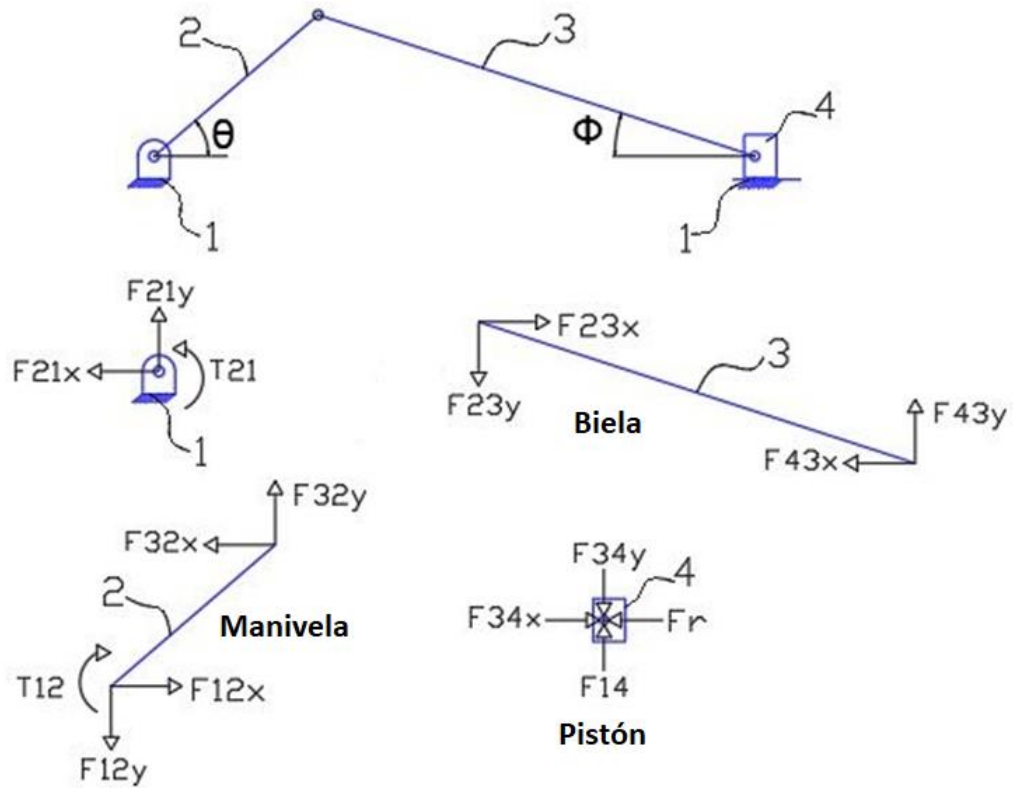


Figura 42. DCL del mecanismo de compactación

Las reacciones en cada barra del mecanismo vienen dadas por:

$$T_{12} = F_{34y} - m_3(g + a_{3y})$$

$$F_{12x} = F_{23x} + m_2(a_{2x})$$

$$F_{12y} = F_2 - m_2(g + a_{2y})$$

$$F_{23x} = F_{43x} + m_3(a_{3x})$$

$$F_{23y} = F_{43y} - m_3(g + a_{3y})$$

$$F_{43x} = m_4(a_{4x}) + Fr + \mu F_{14}$$

$$F_{43y} = F_{14} + m_4g$$

$$F_{14} = \frac{I_3(\alpha_3) + L \cos \phi [m_4g + \frac{1}{2}m_3(g + a_{3x})] + L \sin \phi [m_4a_{4x} + Fr + \frac{1}{2}m_3a_{3x}]}{L[\cos \phi - \mu \sin \phi]}$$

Donde,

$$m_2 = R * sm * \rho_A : \text{masa de la manivela [kg]}$$

$$m_3 = L * sb * \rho_A : \text{masa de la biela [kg]}$$

$$m_4 = c * sc * \rho_A : \text{masa del pistón [kg]}$$

$$sm: \text{sección transversal de la manivela [m}^2\text{]}$$

$$sb: \text{sección transversal de la biela [m}^2\text{]}$$

$$c: \text{espesor del pistón [m]}$$

$$sc: \text{sección transversal del pistón [m}^2\text{]}$$

$$\rho_A: \text{densidad del acero [kg/m}^3\text{]}$$

$$I_3 = \frac{1}{12} m_3 * L^2 : \text{Inercia de la biela respecto a su centro de masa [kg \cdot m}^2\text{]}$$

$$\mu: \text{coeficiente de fricción}$$

A continuación, se presentan las cargas de diseño en cada barra del mecanismo, que se obtuvieron a partir del modelamiento cinético. El estado de cargas críticas se presenta cuando el pistón llega al final de carrera y el fardo alcanza su densidad máxima.

$$Fr = 20670 \text{ N}$$

$$F_{12x} = 21460 \text{ N}$$

$$F_{12y} = 7415 \text{ N}$$

$$F_{23x} = 21510 \text{ N}$$

$$F_{23y} = 7538 \text{ N}$$

$$F_{43x} = 21790 \text{ N}$$

$$F_{43y} = 7525 \text{ N}$$

$$F_{14} = 7809 \text{ N}$$

$$T_{12} = 2016 \text{ N} \cdot m$$

Anexo B: Dimensionamiento de componentes mecánicos

Diseño del eje de potencia

El eje de potencia del sistema se modeló como una viga sometida a flexión y torsión. La carga de diseño corresponde a la mitad de la carga F_{12x} , pues ésta se divide en partes iguales entre el eje de potencia y el eje de apoyo. Mediante el cálculo de las reacciones se plantearon los diagramas de momento y cortante (Figura 43).

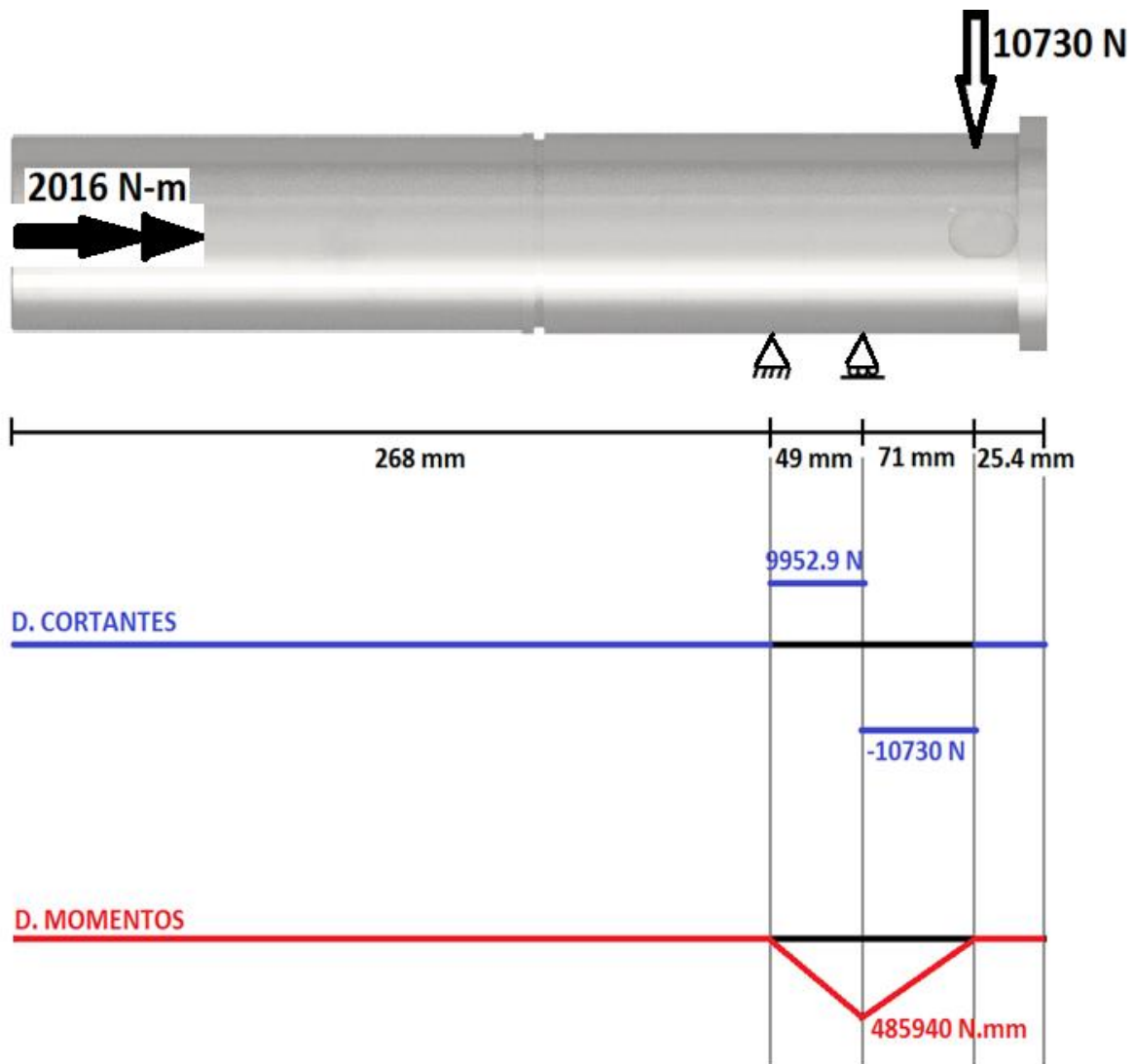


Figura 43. Diagramas de cortante y momento del eje de potencia

Luego, se calcularon los momentos flectores y torsores medios y alternos, asumiendo que los flectores y torsores mínimos son cero. Posteriormente, se determinaron los factores de seguridad a fatiga y fluencia empleando el criterio de Soderberg, y comparando el esfuerzo equivalente de Von Mises con la resistencia del material, respectivamente. La deflexión del eje se calculó a partir del método de doble integración.

ED. Soderberg

$$\frac{1}{n} = \frac{16}{\pi d^3} \left\{ \frac{1}{S_e} \left[4(K_f M_a)^2 + 3(K_{fs} T_a)^2 \right]^{1/2} + \frac{1}{S_{yt}} \left[4(K_f M_m)^2 + 3(K_{fs} T_m)^2 \right]^{1/2} \right\}$$

ED. Von Mises

$$\sigma'_{max} = [(\sigma_m + \sigma_a)^2 + 3(\tau_m + \tau_a)^2]^{1/2}$$

Factor de seguridad a fluencia

$$n_y = \frac{S_y}{\sigma'_{max}}$$

Los factores de concentración de esfuerzos usados para calcular los esfuerzos en los chaveteros fueron de 1.6 para flexión y 3.4 para torsión [57]. Por otra parte, el factor de concentración de esfuerzos en el cambio de sección (1.4) se determinó a partir de la Figura 44.

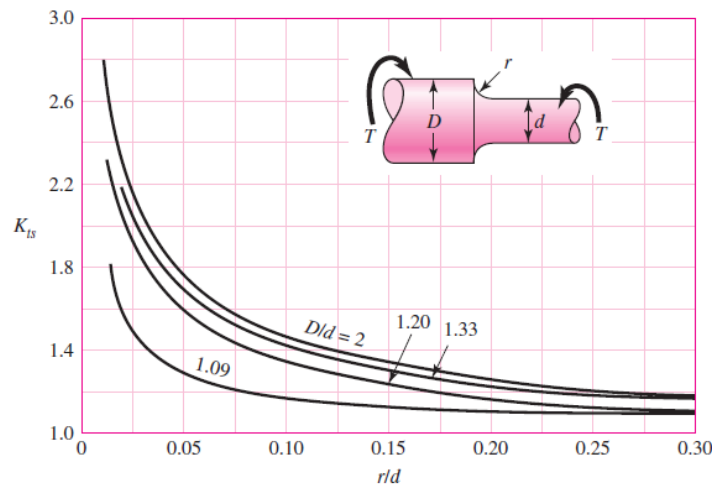


Figura 44. Factor de concentración de esfuerzos para eje con cambio de sección [58]

Para determinar la resistencia a la fatiga del material, se calcularon los factores de corrección considerando acero AISI 4340 con superficie maquinada ($S_y = 689 \text{ MPa}$, $S_{ut} = 1227 \text{ MPa}$), trabajando a temperatura ambiente y con 99.9% de confiabilidad.

Diseño de la manivela y la biela

Por otra parte, la manivela y la biela del mecanismo se calcularon como columnas de acero A36, pues están principalmente sometidas a compresión. Para simular una situación crítica de pandeo, la manivela se modeló como una columna empotrada de un extremo y libre del otro extremo, para lo cual se tiene una longitud efectiva de dos veces la longitud total. Mientras que, la biela se analizó como una columna simplemente apoyada en ambos extremos. Se calculó la esbeltez de cada componente dividiendo la longitud efectiva entre el radio de giro de la sección y se comparó con la esbeltez límite calculada para columnas de acero A36.

$$\lambda_{lim} = \sqrt{\frac{\pi^2 E}{S_y}}$$

Como la esbeltez de la manivela (17.3) y de la biela (60.6) es menor que la esbeltez límite calculada para columnas de acero A36 (88.85), no se puede emplear la curva de Euler (Figura 45) para determinar la carga crítica de pandeo.

Por tal razón, se empleó el modelo de Johnson para columnas medianas [46]

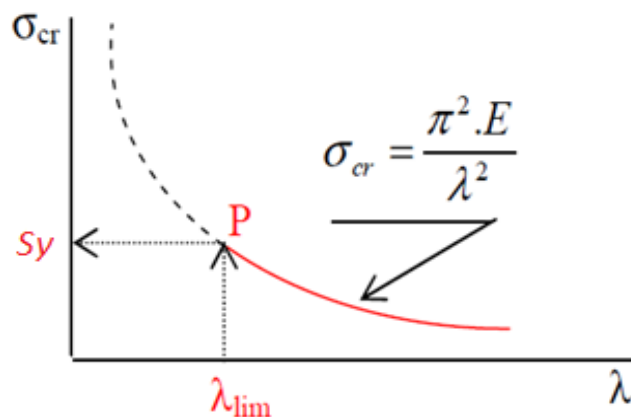


Figura 45. Curva de Euler para columnas [50]

ED. Johnson

$$P_{cr} = AS_y \left[1 - \frac{S_y (Le/r)^2}{4\pi^2 E} \right]$$

Las zonas críticas de esfuerzos en la manivela y la biela, están ubicadas en la cercanía a los agujeros de los extremos. Estos esfuerzos se calcularon considerando a la manivela y la biela como placas con agujeros (Figura 46), sometidas a flexión.

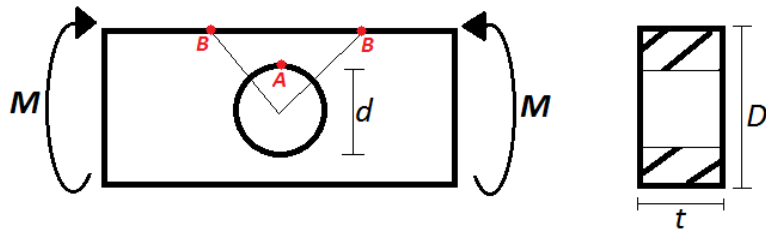


Figura 46. Placa con agujero sometida a flexión

El esfuerzo nominal y los factores de concentración de esfuerzos en los puntos A y B se pueden calcular de la siguiente manera [57]:

$$\sigma_A = \frac{6MD}{t(D^3 - d^3)}$$

$$\sigma_B = \frac{6Md}{t(D^3 - d^3)}$$

$$K_{tA} = 2 \quad (\text{No depende de } d/D)$$

$$K_{tB} = \frac{2d}{D}$$

Anexo C: Planos de ensamble y fabricación

