



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

Centro Mexicano para la Producción más Limpia

TESIS

“Diseño y simulación estática de un prototipo de descascarado y extracción mecánica de aceite de semilla de *Jatropha curcas* L.”

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

Maestro en Ingeniería en Producción más Limpia

PRESENTA:

I.M. Miguel Fernando Altamirano Muratalla

DIRECTORES DE TESIS:

Dr. Raúl Hernández Altamirano

Dr. Juan Carlos Paredes Rojas



Enero 2021



**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO**

SIP-14
REP 2017

ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

En la Ciudad de siendo las horas del día del mes de del se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de la Tesis, designada por el Colegio de Profesores de Posgrado de: para examinar la tesis titulada:

Diseño y simulación estática de un prototipo de descascarado y extracción mecánica de aceite de semilla de *Jatropha curcas* L.

del (la) alumno (a):

Apellido Paterno:	Altamirano	Apellido Materno:	Muratalla	Nombre (s):	Miguel Fernando
-------------------	------------	-------------------	-----------	-------------	-----------------

Número de registro:

Aspirante del Programa Académico de Posgrado:

Una vez que se realizó un análisis de similitud de texto, utilizando el software antiplagio, se encontró que el trabajo de tesis tiene 4 % de similitud. **Se adjunta reporte de software utilizado.**

Después que esta Comisión revisó exhaustivamente el contenido, estructura, intención y ubicación de los textos de la tesis identificados como coincidentes con otros documentos, concluyó que en el presente trabajo SI NO **SE CONSTITUYE UN POSIBLE PLAGIO.**

JUSTIFICACIÓN DE LA CONCLUSIÓN:

El porcentaje de similitud corresponde a fragmentos de la metodología y de los antecedentes ambos debidamente citados en el documento.

****Es responsabilidad del alumno como autor de la tesis la verificación antiplagio, y del Director o Directores de tesis el análisis del % de similitud para establecer el riesgo o la existencia de un posible plagio.**

Finalmente, y posterior a la lectura, revisión individual, así como el análisis e intercambio de opiniones, los miembros de la Comisión manifestaron **APROBAR** **SUSPENDER** **NO APROBAR** la tesis por **UNANIMIDAD** o **MAYORÍA** en virtud de los motivos siguientes:

El documento de tesis cumple con los requisitos de originalidad y estructura establecidos en los artículos 33 y 34 del Reglamento de Estudios de Posgrado del Instituto; aportando elementos de valor en el diseño de prototipos mecánicos para el aprovechamiento de cultivos oleaginosos para producción de biodiésel.

COMISIÓN REVISORA DE TESIS

Dr. Raúl Hernández Altamirano
Director de Tesis

Dra. Violeta Yasmín Mena Cervantes

Dr. Fabián Salvador Mederos Nieto

Dr. Juan Carlos Paredes Rojas
2º Director de Tesis

Dr. Christopher René Torres San Miguel

Dr. Abelardo Irineo Flores Vela
PRESIDENTE DEL COLEGIO DE PROFESORES





INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

CARTA CESIÓN DE DERECHOS

En la Ciudad de México, siendo el día 29 del mes de enero del año 2021, el que suscribe Miguel Fernando Altamirano alumno del Programa de Maestría en Ingeniería en Producción más Limpia con número de registro A190707, adscrito al Centro Mexicano para la Producción más Limpia, manifiesto que es el autor intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección del Dr. Raúl Hernández Altamirano y el Dr. Juan Carlos Paredes Rojas cede los derechos del trabajo titulado *Diseño y simulación estática de un prototipo de descascarado y extracción mecánica de aceite de semilla de Jatropha curcas L.*, al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o directores del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a las siguientes direcciones miguel150995@hotmail.com, rhaltamirano@gmail.com, paredesrojasic@gmail.com. Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

Miguel Fernando Altamirano Muratalla



Agradecimientos

Quisiera agradecer al Dr. Raúl Hernández Altamirano y al Dr. Juan Carlos Paredes Rojas por toda la orientación, apoyo y confianza brindada a lo largo de la realización de este trabajo. Por el profesionalismo mostrado en todo momento y la contagiosa tenacidad para que pudiese concluir mi investigación, a pesar de las dificultades presentadas en estas épocas de pandemia. Aprecio inmensamente su predisposición a transmitir conocimiento, a trabajar con ánimo de desarrollar la tecnología y conservo como ejemplo sus valores.

Al Instituto Politécnico Nacional (IPN), que ha sido mi casa por más de 7 años y que me ha brindado la oportunidad de desarrollarme profesionalmente a lo largo de mi etapa de licenciatura y posgrado, además de aportar a mi crecimiento como ser humano a través de su historia, profesores, profesoras y entrañables amigas y amigos con los que he convivido.

Al Centro Mexicano para la Producción más Limpia (CMP+L), por permitirme realizar en sus instalaciones mi trabajo de investigación, por las facilidades brindadas y por el trato recibido a lo largo de mis estudios de posgrado.

Al Laboratorio Nacional de Desarrollo y Aseguramiento de la Calidad de Biocombustibles (LaNDACBio), por el apoyo entregado a mi trabajo de investigación y, sobre todo, por la apertura y dedicación de todos los que lo integran para impulsar el área de los biocombustibles en México.

Al Centro de Innovación en Insumos para Bioenergéticos y Coproductos (CIBIOC) por las materias primas proporcionadas para la realización de este trabajo y por el acercamiento permitido a sus instalaciones.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por el otorgamiento de la beca de estudios del PNPC (Programa Nacional de Posgrados de Calidad), así como al programa BEIFI (Beca de Estímulo Institucional de Formación de Investigadores) del IPN.

A los profesores y profesoras que tuve a lo largo de este periodo de estudios de maestría, por el conocimiento compartido y dedicación mostrada para la enseñanza de nuevos conceptos, además de su adaptación y comprensión durante esta modalidad de enseñanza a larga distancia, derivada de la contingencia sanitaria.



A los amigos y amigas que he tenido la dicha de conocer a lo largo de mi estancia en el CMP+L, por compartir conmigo sus consejos, apoyo, humildad y solidaridad, dentro y fuera del área profesional. Les agradezco por el tiempo compartido y por todas las experiencias vividas.



Dedicatorias

Dedico este trabajo de tesis a mi madre, Yanina Muratalla Juárez, y a mi padre, Aquiles Altamirano Martínez. No puedo más que agradecerles por su incansable apoyo hacia mí, por todo el tiempo, paciencia, amor y esfuerzo que han invertido en mi formación humana y profesional. Gracias por permitirme vivir una vida llena de cariño y valores, los admiro y son mi ejemplo e inspiración para seguir adelante con mis objetivos. Este trabajo representa un gran logro para mí, lleva consigo muchas horas de dedicación, esfuerzo, frustraciones, alegrías, enojos, deseos, desvelos y aprendizajes, por lo que quiero que sepan que son parte esencial de este, pues ustedes siempre están ahí para aconsejarme, reconfortarme, guiarme y volver a salir adelante en cualquier situación. Les dedico este trabajo, del cual son parte esencial pues no podría estar aquí sin ustedes, los amo.

A mis abuelos, Aquiles Altamirano Cabrera y Lucio Muratalla Vercian, así como a mis abuelas, Luisa Fernanda Juárez Gómez y María Isabel Martínez Labias, por todo el amor y cuidado que me regalan y regalaron en vida. Todas las horas compartidas con ustedes, sus historias y conversaciones son un recuerdo que guardo para siempre en mi memoria. Me ayudan a entender mi presente a través del pasado y a recordar de donde vengo y hacia donde voy. Les estaré eternamente agradecidos y solo me queda recordarles cuanto los quiero.

A todos mis tías y tíos, a quienes considero igualmente padres y madres. Gracias por siempre tener un lugar en su corazón para mí y todos mis primos por igual. Por cuidarme, amarme y permitirme disfrutar de una familia unida, de la que me siento orgulloso, que admiro y disfruto al máximo cada vez que compartimos momento. Sin duda, siempre tendré presente su ejemplo como seres humanos y por siempre tendrán mi amor y agradecimiento.

A todos mis primos y primas, con los que he crecido y he podido ver crecer. Les agradezco por todo el apoyo y los momentos de alegría que he pasado junto a ustedes. Por todo el tiempo que hemos compartido, por los lugares que he conocido gracias a ustedes y por todas las alegrías compartidas. Siempre me ayudan a replantear mi concepción de la vida y del mundo a través de sus ideas y conversaciones. Son hermanos y hermanas para mí y los amo.



A todos mis amigos y amigas de Coatzacoalcos, Veracruz. Por su larga amistad, por su incansable alegría, por siempre estar para mí a pesar de la distancia, por su sinceridad a toda costa, porque nos conocemos de toda la vida y jamás ha existido obstáculo entre nosotros para convivir y disfrutar de nuestra amistad. Ustedes siempre logran sacar de mí una sonrisa en los días más tristes, son mi permanente recuerdo de ese amor pueril que no pide nada a cambio y que solo se alimenta a través del apoyo y de la confianza. Son el indeleble recuerdo de lo que fui y el eterno presente que me evoca a casa. Los quiero mucho.

A mis amigos y amigas de la ESIME Culhuacán, por el apoyo brindado a lo largo de nuestros estudios. No hubiese sido tan fácil y ameno el vivir 5 años fuera de casa sin su compañía y amistad. Fueron muy importantes en el aprendizaje conseguido durante mi formación como ingeniero mecánico y una parte de todos nosotros está en este trabajo. Gracias por los consejos y ayuda brindada en el pasado y en el presente para que este trabajo se realizara. Los quiero.

A mis amigos y amigas de la Universidad del País Vasco. Por las inagotables horas de discusión e intercambio de ideas que significa convivir con ustedes, por todo el aprendizaje que me comparten y por sus puntos de vista. Por dotarme intensamente de aliento, por conseguir recordarme que aún tiene sentido luchar por los ideales y que la sustentabilidad es una utopía por la que merece la pena trabajar. Este trabajo condensa un poco de lo que mucho que vivimos, compartimos y conversamos en la distancia y en el infumable pero inolvidable Éibar. *Eskerrik asko.*



Resumen

En el presente trabajo se realizó el diseño mecánico de un prototipo de descascarado y extracción mecánica de aceite de semilla de *Jatropha curcas* L. proveniente del estado de Morelos. Dicho diseño se comprobó estáticamente por medio de la simulación (método de elementos finitos) y teoría de fallas mecánicas, analizándose los mecanismos de compresión por rodetes y el doble tornillo sin fin para la extracción de aceite.

El objetivo de implementar los mecanismos de descascarado y extracción mecánica de aceite es el de dar un uso integral a la semilla de JCL, reduciendo la cantidad de contaminantes generados y valorizando los subproductos resultantes (cáscaras y pasta proteica).

El dibujo mecánico de las piezas diseñadas y los planos de manufactura se realizaron en el software CATIA V5. La simulación estática de los mecanismos de descascarado y extracción de aceite se realizó por medio del software ANSYS Workbench 2020 R2 y cada analizando cada mecanismo por medio de la teoría de fallas mecánicas, específicamente por la teoría de energía de distorsión de Von Mises.

De acuerdo con los resultados entregados por la simulación estática, utilizando un acero inoxidable AISI 316 para el análisis, se pudo determinar el correcto funcionamiento de los elementos mecánicos, sometidos a cargas estáticas constantes, siendo los factores de seguridad obtenidos para el rodete dinámico de 32, para el rodete estático de 272 y 18.79 para el mecanismo extruder. Estos resultados permiten observar que los elementos mecánicos trabajarán por debajo de su límite elástico, evitando fallas mecánicas estáticas por fractura o cedencia.

Finalmente, el trabajo reporta el cálculo teórico de métricas verdes para el sistema completo, con lo que se busca resaltar la reducción de residuos contaminantes que se tendría con la implementación de este prototipo, la alta eficiencia de conversión de materias primas a productos y el beneficio energético del proceso. Se obtuvieron valores de TRE positiva del 1.1, una EMR del 91%, una IMP de 1.09 y un factor ambiental del 0.08.



Abstract

In the present work, the mechanical design of a prototype of dehulling and mechanical extraction of *Jatropha curcas* L. seed oil from the state of Morelos was carried out. The design was statically verified through simulation (Finite Elements Method) and mechanical failure theory, analyzing the compression mechanism and the twin extruder mechanism.

The goal of implementing the mechanisms for dehulling and the mechanical oil extraction is to give an integral use for the JCL seed, reducing the amount of pollution wastes, generated by the process, and valuing the resulting by-products (shells and protein paste).

The mechanical drawing of the designed parts and the manufacturing drawings were generated by the CATIA V5 software. The static simulation of the dehulling and oil extraction mechanisms was carried out by the ANSYS Workbench 2020 R2 software, analyzing each mechanism by means of the mechanical failure theory, specifically by the Von Mises energy distortion theory.

According to the results delivered by the static simulation, using an AISI 316 stainless steel for the analysis, it is possible to determine the correct operation of the mechanical elements, subjected to constant static loads, being the safety factor for the dynamic impeller, 32, for the static impeller, 272, and 18.79 for the extruder mechanism. These results allow us to observe that the mechanical elements will work below their elastic limit, avoiding static mechanical failures due to fracture or yield.

Finally, the work reports the theoretical calculation of green metrics for the complete system, which seeks to highlight the reduction of polluting waste that would be obtained by the implementation of this prototype, the high efficiency of conversion for raw materials to products and the energy profit of the process. Positive EROI value of 1.1, PME value of 91%, PMI value of 1.09 and an E-Factor value of 0.08, were obtained



Contenido

Resumen	viii
Abstract	ix
Introducción.....	1
Justificación.....	2
Hipótesis.....	2
Objetivo	2
Objetivos específicos.....	2
Capítulo I: Antecedentes	3
1.1. Matriz energética	4
1.2. Biomasa	5
1.3. Biodiésel	6
1.4. <i>Jatropha curcas</i> L.	7
1.5. Extracción de aceite.....	8
1.6. Descascarado y extracción mecánica de aceite.....	10
1.6.1. Descascarado mecánico.....	10
1.6.2. Caracterización de la semilla de <i>Jatropha curcas</i> L.....	15
1.6.3. Extracción mecánica de aceite.....	19
Capítulo II: Desarrollo del prototipo	23
2.1 Metodología general del proceso.....	24
2.2 Diseño mecánico de los elementos	24
2.3 Dibujo asistido por computadora.....	25
2.4 Simulación por medio del método de elementos finitos.....	25
2.5 Desarrollo de la descascaradora.....	26
2.5.1 Diseño de tolva de alimentación.....	26
2.5.2 Procedimiento general para el diseño de la tolva de alimentación.....	26
2.5.3 Cálculo de ángulo de la tolva	26
2.5.4 Cálculo de ángulo de fricción interna (δw)	26
2.5.5 Cálculo de ángulo efectivo de fricción interna (δe)	27
2.5.6 Cálculo de ángulo de inclinación para las paredes de la tolva (θ).....	28



2.5.7	Cálculo del factor de flujo (ff)	29
2.5.8	Cálculo del esfuerzo crítico (fc)	30
2.5.9	Cálculo del diámetro mínimo de apertura (B)	32
2.5.10	Cálculo de altura de la tolva (h)	33
2.5.11	Diámetro superior de la tolva (Dsup)	34
2.5.12	Volumen de la tolva (V)	34
2.5.13	Velocidad de flujo (Uo)	34
2.5.14	Caudal de salida de la tolva (Q)	35
2.5.15	Caudal másico (m)	35
2.6	Diseño de rampa de deslizamiento	35
2.7	Diseño de rodetes compresores de alimentación	36
2.7.1	Energía necesaria para fracturar la cáscara	36
2.7.2	Potencia necesaria para fracturar la semilla	37
2.7.3	Potencia del soplador	38
2.8	Desarrollo del mecanismo de extracción de aceite	41
2.8.1	Diseño de tolva de alimentación	41
2.8.2	Diseño de doble tornillo sin fin	42
2.9	Simulación estática	44
2.10	Métricas verdes	45
2.10.1	Eficiencia Másica de la Reacción (EMR)	46
2.10.2	Factor Ambiental (factor E)	46
2.10.3	Intensidad Másica del Proceso (IMP)	46
2.10.4	Tasa de Retorno Energético (TRE)	46
Capítulo III:	Análisis de resultados	47
3.1	Parámetros utilizados para el diseño de maquinaria	48
3.2	Dibujos y planos mecánicos de los elementos diseñados	51
3.2.1	Dibujos mecánicos y planos de la tolva de alimentación	52
3.2.2	Rampa de deslizamiento	52
3.2.3	Tambores compresores para el descascarado	53
3.2.4	Soplador y ducto de aire	55
3.2.5	Mecanismo de doble tornillo sin fin para extracción de aceite	57



3.3 Ensamble de los elementos mecánicos	59
3.3.1 Ensamble del soplador	59
3.3.2 Ensamble de la máquina descascaradora	59
3.3.3 Ensamble de la máquina extractora de aceite.....	61
3.4 Resultados de la simulación estática.....	63
3.4.1. Simulación estática de los rodets compresores	63
3.4.2 Simulación estática del doble tornillo sin fin.....	66
3.5 Resultados de las métricas verdes.....	68
3.5.1 Eficiencia Másica de la Reacción (EMR)	69
3.5.2 Intensidad Másica del Proceso (IMP)	69
3.5.3 Factor Ambiental (E-Factor)	69
3.5.4 Tasa de Retorno Energético	69
Conclusiones	71
Bibliografía.....	73



Índice de figuras

Figura 1. Estructura de la producción de energía primaria en México 2017.....	5
Figura 2. Clasificación de la biomasa para uso energético.....	6
Figura 3. Mallas rotatorias.....	11
Figura 4. Triturador por tolvas.....	11
Figura 5. Tolva rotatoria de varillas.....	11
Figura 6. Rodetes giratorios para compresión.....	12
Figura 7. Sistema de aire comprimido para separación de cascara de semillas.....	14
Figura 8. Separación de cascara y núcleo por medio de aire comprimido.....	14
Figura 9. Aplicación de cargas de deformación y fractura a semillas en sus tres ejes.....	14
Figura 10. Dimensiones promedio de la <i>Jatropha curcas</i> L.....	15
Figura 11. Máquina universal de compresión "INSTRON3382".....	16
Figura 12. Máquinas de extracción de aceite a partir de un solo eje.....	20
Figura 13. Máquina de extracción de aceite a partir de un tornillo sin fin gemelo.....	20
Figura 14. Máquina de extracción de aceite a partir de prensa hidráulica.....	20
Figura 15. Metodología del proceso de diseño del prototipo.....	24
Figura 16. Proceso de diseño de tolvas de acuerdo con el método Jenike.....	26
Figura 17. Determinación del ángulo interno de fricción.....	27
Figura 18. Determinación gráfica del ángulo máximo de la tolva.....	28
Figura 19. Nomenclatura de tolva cónica de acuerdo con el método Jenike.....	29
Figura 20. Determinación gráfica del factor de flujo.....	29
Figura 21. Nomenclatura para el cálculo del diámetro menor de la tolva de alimentación.....	32
Figura 22.. Determinación del ángulo interno de fricción.....	39
Figura 23. Soplador Vortex power fan.....	39
Figura 24. Configuración del mecanismo de separación cascara-núcleo.....	40
Figura 25. Análisis CFD con respecto a la densidad de los núcleos y cáscaras.....	41
Figura 26. Análisis CFD con respecto al tiempo de residencia en el proceso.....	41
Figura 27. Nomenclatura general del tornillo sin fin.....	42
Figura 28. Vistas del dibujo mecánico de la tolva de alimentación.....	52
Figura 29. Plano mecánico de tolva de alimentación.....	52
Figura 30. Dibujo mecánico de rampa de deslizamiento.....	53
Figura 31. Vistas del dibujo mecánico de rodete compresor dinámico.....	53
Figura 32. Plano mecánico de rodete compresor dinámico.....	54
Figura 33. Vistas de dibujo mecánico del rodete compresor estático.....	54
Figura 34. Plano mecánico de rodete compresor estático.....	55
Figura 35. Vistas del dibujo mecánico del ducto de aire.....	55
Figura 36. Dibujo mecánico del ducto de aire.....	56
Figura 37. Vistas del dibujo mecánico del aditamento para el ducto de aire del soplador.....	56
Figura 38. Vistas del dibujo mecánico del soplador.....	57
Figura 39. Vistas del dibujo mecánico del motor acoplado para el soplador.....	57
Figura 40. Vista isométrica del dibujo mecánico del tornillo sin fin para la extracción de aceite.....	58
Figura 41. Planos tornillo sin fin extractor de aceite.....	58
Figura 42. Vistas del ensamble mecánico del soplador y el motor.....	59
Figura 43. Vista frontal del ensamble de la máquina de descascarado.....	60



<i>Figura 44. Vista lateral del ensamble de la máquina de descascarado</i>	<i>60</i>
<i>Figura 45. Vista isométrica del ensamble de la máquina de descascarado, con carcasas y base sobrepuestas.....</i>	<i>61</i>
<i>Figura 46. Vista superior del mecanismo de doble tornillo sin fin</i>	<i>62</i>
<i>Figura 47. Ensamble mecánico del mecanismo de extracción de aceite.....</i>	<i>62</i>
<i>Figura 48. Ensamble mecánico del mecanismo de extracción de aceite con carcasas y bases sobrepuestas.....</i>	<i>63</i>
<i>Figura 49. Mallado del rodete dinámico y resultados de la simulación.....</i>	<i>64</i>
<i>Figura 50. Mallado del rodete estático y resultados de la simulación.....</i>	<i>65</i>
<i>Figura 51. Mallado del tornillo sin fin y resultados de la simulación.....</i>	<i>67</i>



Índice de tablas

<i>Tabla 1. Panorama de la biomasa como materia prima en la producción de biodiesel en México.</i>	7
<i>Tabla 2. Rendimientos típicos de la extracción química de aceite</i>	9
<i>Tabla 3. Rendimientos típicos de la extracción mecánica de aceite.....</i>	9
<i>Tabla 4. Maquinaria e investigación existente para descascarado mecánico de Jatropha curcas L.</i>	13
<i>Tabla 5. Dimensiones de la semilla de Jatropha curcas L.</i>	16
<i>Tabla 6. Pruebas en el eje "x" para caracterización mecánica de semilla de Jatropha curcas L....</i>	17
<i>Tabla 7. Pruebas en el eje "y" para caracterización mecánica de semilla de Jatropha curcas L....</i>	17
<i>Tabla 8. Pruebas en el eje "z" para caracterización mecánica de semilla de Jatropha curcas L....</i>	18
<i>Tabla 9. Caracterización de la semilla de Jatropha curcas L. del estado de Morelos.....</i>	18
<i>Tabla 10. Maquinaria e investigación existente para la extracción mecánica de aceite utilizando sistemas continuos.....</i>	22
<i>Tabla 11. Proceso de diseño detallado para los mecanismos adaptados.....</i>	24
<i>Tabla 12. Valores de esfuerzo normal vs esfuerzo cortante.....</i>	31
<i>Tabla 13. Esfuerzo crítico de las semillas de JCL en la tolva cónica.....</i>	31
<i>Tabla 14. Número mínimo de dientes para el engrane para diferentes ángulos de presión.....</i>	43
<i>Tabla 15. Dimensiones obtenidas para las semillas de JCL con 6% de humedad</i>	48
<i>Tabla 16. Propiedades mecánicas de la semilla de JCL con 6% de humedad</i>	48
<i>Tabla 17. Propiedades bioquímicas de la semilla de JCL con 6% de humedad.....</i>	49
<i>Tabla 18. Parámetros seleccionados para el cálculo y diseño de la tolva de alimentación.....</i>	49
<i>Tabla 19. Parámetros seleccionados para el diseño del mecanismo de rodetes compresores.....</i>	50
<i>Tabla 20. Parámetros seleccionados para el cálculo y diseño del mecanismo de extracción de aceite</i>	50
<i>Tabla 21. Flujos máxicos y energéticos del proceso global de descascarado y extracción mecánica de aceite</i>	51
<i>Tabla 22. Resultados obtenidos de la simulación para el rodete dinámico.....</i>	64
<i>Tabla 23. Resultados obtenidos de la simulación para el rodete estático</i>	66
<i>Tabla 24. Resultados obtenidos de la simulación para el doble tornillo sin fin.....</i>	68



Introducción

Debido a el creciente problema del calentamiento global, a la evidente dependencia de la producción de energía primaria a partir de combustibles fósiles y la tendencia de estos a agotarse, es necesaria la búsqueda de fuentes alternas de energía, tanto para diversificar la matriz energética del país, como para propiciar el aprovechamiento de diversas fuentes renovables de energía que generen un bajo impacto ambiental, promoviendo el desarrollo de insumos bioenergéticos, a partir de las diferentes actividades agropecuarias, forestales, biotecnológicas y de cultivos de algas, sin poner en riesgo la seguridad y soberanía alimentaria del país (Ley de Transición Energética, 2015)

México debe cumplir con tratados internacionales que lo obligan a contribuir en la reducción de emisiones contaminantes a la atmósfera y gases de efecto invernadero, además de que cuenta con leyes nacionales que contemplan metas específicas de generación de energías limpias (Ley General de Cambio Climático, 2018). Dicha transición energética debe ser benéfica para la sociedad y para el medio ambiente, de manera que se busque garantizar el bienestar económico regional y nacional, que no impacte indebidamente a la calidad del aire, el agua y el suelo y que ayude a la reducción neta de gases de efecto invernadero.

Del amplio abanico de materias primas renovables disponibles como fuente alterna de energía, una de las opciones más atractivas es la biomasa. Específicamente la producción de energía a partir de aceites vegetales provenientes de cultivos oleaginosos no comestibles para la producción de biodiésel (SENER, 2017.). La *Jatropha curcas* L. es una semilla de endémica de México, la cual contiene un alto porcentaje de aceite ($\approx 50 \pm 5\%$), es resistente a sequias, crece muy rápidamente, se adapta a diferentes condiciones climatológicas y de suelo, se cosecha con rendimientos de 2 Ton/Ha y no es de uso comestible. Esto la convierte en una materia prima adecuada para su explotación en la producción de biodiésel y en un potencial cultivo para fines alimenticios.

La falta de desarrollo tecnológico y de infraestructura en el campo mexicano es uno de los retos que se necesitan sobrepasar ya que esta falta de maquinaria e investigación limita la explotación de los recursos naturales. Es por esto que toma una gran relevancia el desarrollar tecnología e innovación para la producción en masa de estas materias primas renovables, tomando como eje principal de diseño mecánico al desarrollo sostenible, aplicando metodologías como la producción más limpia para apuntalar el desarrollo energético del país con procesos que incluyan el uso eficiente de la energía, la no generación de residuos contaminantes, bajas emisiones al ambiente y que en su construcción se seleccionen materiales adecuados para los fines y ambientes en los que se desempeñará.



Justificación

En México existe un incipiente desarrollo de maquinaria agroindustrial para el procesamiento de biomasa como materia prima en la producción de biocombustibles debido al rezago tecnológico y a la poca productividad del campo. Para el desarrollo de cultivos energéticos se tienen identificadas ciertas necesidades como la creación de paquetes tecnológicos en la generación de cultivos oleaginosos y el desarrollo de métodos y procesos adaptados a cultivos energéticos para la producción de aceites.

Por lo tanto, en la presente propuesta de tesis, se busca diseñar y validar un prototipo de descascarado y extracción mecánica de aceite de semilla de *Jatropha curcas* L. nativa de nuestro país para el aprovechamiento integral de esta semilla.

Hipótesis

Es posible diseñar y validar mecánicamente, por medio del método de elementos finitos, un prototipo de descascarado y extracción mecánica de aceite de semilla de *Jatropha curcas* L. para la obtención de aceite útil en la generación de biodiésel, además de cáscaras y pasta proteica que puedan ser utilizadas para la producción de alimentos.

Objetivo

Diseñar, adaptar y simular estáticamente esfuerzos mecánicos de un prototipo de descascarado y extracción mecánica para la obtención de aceite útil en la producción de biodiesel, cáscaras y pasta proteica a partir de semilla de *Jatropha curcas* L. del estado de Morelos.

Objetivos específicos

1. Caracterización fisicoquímica y mecánica de la semilla de *Jatropha curcas* L. del estado de Morelos
2. Diseñar y dibujar mecánicamente un prototipo de bajo impacto ambiental para el descascarado y extracción mecánica de aceite de semilla de *Jatropha curcas* L. y obtención de cáscaras y pasta proteica.
3. Simular estáticamente los elementos mecánicos principales por medio del método de elementos finitos para la validación mecánica del prototipo de descascarado y extracción mecánica de aceite de semilla de *Jatropha curcas* L.



Capítulo I: Antecedentes



1.1. Matriz energética

La producción total de energía primaria en el mundo se ve representada principalmente por los combustibles fósiles (gas natural, petróleo y carbón). Estas fuentes de energía no renovables equivalen al 81.1% de la producción energética mundial.

Para el caso particular de México, se produjeron 7,027.22 PJ de energía primaria durante el 2017, de los cuales, el 89% recae sobre cuatro combustibles fósiles: petróleo crudo (62%), gas natural (21.6%), carbón (4.4%), y condensados (1%). Si se toma en cuenta que de los 4354.89 PJ obtenidos a partir de petróleo crudo, se exportaron 2609.26 PJ y que, a finales del 2017, México contaba con un índice de independencia energética equivalente a 0.76, lo cual significa que el consumo total de energía en el país superó en un 31.6% a la producción de energía primaria, es evidente lo endeble que se encuentra la seguridad energética del país. Un dato muy claro de esto es que, contemplando todos los tipos de energéticos, 47.8% de la energía consumida en México para el 2017 fue cubierta por importaciones, que aportaron 4,417.61 PJ. (SENER, 2017).

Por otra parte, la irrefrenable explotación de los combustibles fósiles debido al incremento exponencial de consumo intensivo en sectores como el transporte, la industria, el sector residencial, comercial, público y agropecuario, ha contribuido directamente a las afectaciones originadas en el ambiente, principalmente las relacionadas a contaminación atmosférica pues en la quema de estos combustibles se generan emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI), los cuales, a su vez, provocan el fenómeno conocido como Calentamiento Global.

En vista de esto, se ha actuado de forma mundial y local con normas, órganos reguladores, leyes, tratados internacionales, entre otros mecanismos, que propicien un escenario adecuado para la transición hacia las energías limpias, partiendo de la base de un uso eficiente de recursos naturales que no comprometa la vida de generaciones futuras. En México se ha desarrollado un marco institucional que contempla la incorporación de energías limpias y renovables en la matriz energética nacional, así como el reemplazo paulatino de combustibles fósiles por combustibles renovables. La Ley de Transición Energética establece que para el año 2018, el 25% de la generación eléctrica deberá provenir de energías limpias, para el 2021 el 30% y para 2024 el 35% (Ley de Transición

Energética, 2015). Algunas otras leyes importantes que se han generado en México son la Ley General del Cambio Climático y la Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos.

Tal como se puede observar en la figura 1, hasta el 2017, la producción de energía primaria proveniente de fuentes renovables es del 9.50%, lo que representa un reto importante a futuro en la diversificación energética para las energías renovables y hace de vital importancia el desarrollo tecnológico en el país para llevar a cabo su implementación inmediata.

Estructura de la producción de energía primaria en México 2017

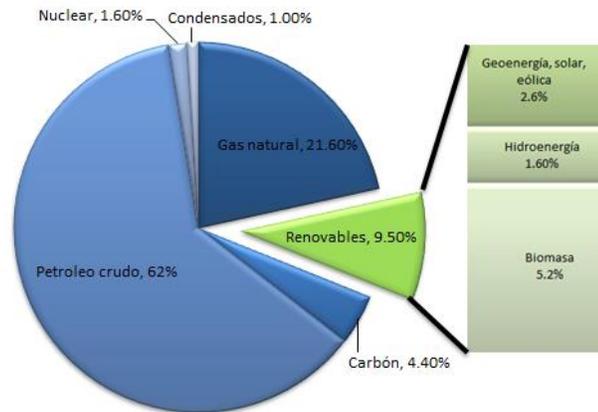


Figura 1. Estructura de la producción de energía primaria en México 2017 (Adaptada de SENER, 2017).

1.2. Biomasa

Parte muy importante del aporte total de las fuentes renovables es la biomasa. La biomasa engloba a cualquier tipo de materia orgánica que tiene origen en un proceso biológico (Kim, Lee, Lee, & Lee, 2012). El proceso de acumulación de energía en las plantas ocurre durante la fotosíntesis, se absorbe la energía solar en la clorofila y se transforma el dióxido de carbono (CO_2) del aire y el agua del suelo en carbohidratos que almacenan energía química, mediante el proceso de conversión fotoelectroquímica (García et al., 2016). De esta definición de la biomasa, se pueden tener diferentes clasificaciones de acuerdo con su origen, estado de agregación, composición, entre otras. A continuación, se muestra una clasificación de la biomasa para uso energético (figura 2):

Clasificación de la biomasa para uso energético

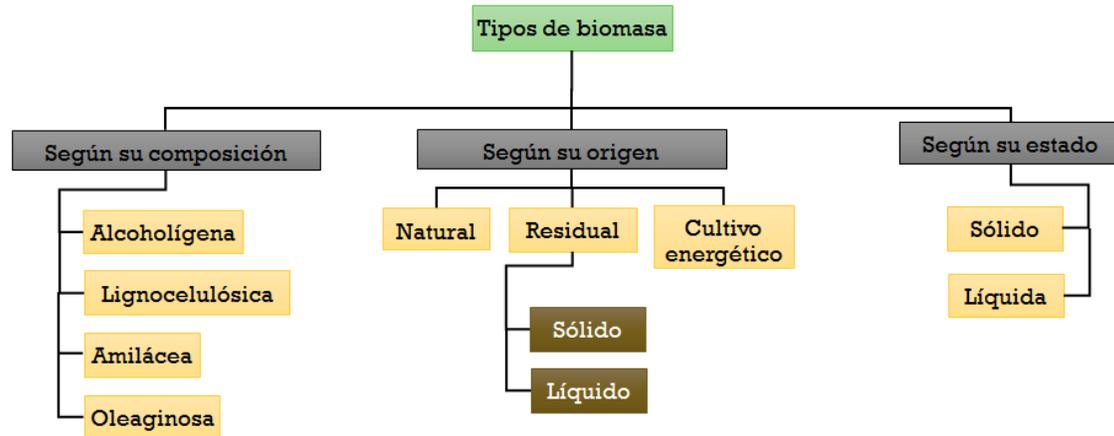


Figura 2. Clasificación de la biomasa para uso energético (elaboración propia, adaptada de Sánchez, 2019)

El 5.2 % de aporte que tiene la biomasa para la producción de energía primaria en México, se compone únicamente de dos materias primas, el bagazo de caña (31.8%) y la leña (68.2%) (SENER, 2017), ambas pertenecientes a la clasificación de biomasa lignocelulósica. Lo cual nos habla de una atractiva oportunidad de diversificación y desarrollo para la biomasa en el país.

1.3. Biodiésel

Debido al incipiente uso de biocombustibles líquidos en el mundo, la incidencia directa que estos tienen en el sector transporte para la reducción de contaminantes atmosféricos y sus ventajas en cuanto al manejo humano, el biodiésel surge como una alternativa renovable para la sustitución del diésel fósil, ya sea a nivel industrial, en transporte o uso en servicios públicos.

De acuerdo con la Sociedad Americana para Pruebas y Materiales (*American Society for Testing and Materials* o ASTM International por sus siglas en inglés), el biodiésel se define como un “combustible compuesto de ésteres monoalquílicos de ácidos grasos de cadena larga derivado de aceites vegetales o grasas animales” (ASTM International, 2015). Por otra parte, la Ley de promoción y desarrollo de los bioenergéticos lo define como el “combustible que se obtiene por la transesterificación de aceites de origen animal o vegetal” (Ley de promoción y desarrollo de los bioenergéticos, 2008).



Las principales materias primas para la producción de biodiésel convencional mediante la transesterificación son los aceites comestibles, mientras que los insumos para el biodiésel avanzado incluyen a los aceites de cultivos no alimenticio, aceites y grasas residuales y materiales lignocelulósica denominados fuentes de segunda generación, así como los aceites derivados de microorganismos que se consideran insumos de tercera generación. La producción de biodiésel va directamente relacionada con la cantidad de aceite vegetal o animal disponible como materia prima, es por esto que las biomásas oleaginosas toma un papel fundamental en las proyecciones de biodiésel como recurso energético (SENER, 2017.).

Tabla 1. Panorama de la biomasa como materia prima en la producción de biodiesel en México (elaboración propia, adaptada de SENER, 2017).

Materia prima	Estado actual	Emisiones
Aceite de cultivos alimenticios	La producción en México apenas satisface la demanda interna, pues se importa alrededor del 90% de semillas y aceites.	5.3 Mha (palma, coco, soya, canola). Principales áreas: Veracruz, Tamaulipas, Yucatán, Tabasco y Chiapas
Aceite de cultivos oleaginosos	El SIAP reportó 1014 Ha en 2013, 50 ha en 2014 cuando se abandonó la plantación de jatropha en Yucatán. El SIAP solo reporta 5-7 Ha de higuera desde el 2007 al 2011.	2.6 Mha de Jatropha (2008). 59.2 Mt/año de cultivos especializados. Principales áreas: Sinaloa, Tamaulipas, Guerrero, Chiapas y Michoacán.
Aceite de grasas residuales	Existe un número reducido de empresas dedicadas a la recolección de aceite de cocina usado para su conversión a biodiésel.	120,546-361,369 m ³ /año de aceite de cocina usado (2016)
Material lignocelulósico	En vez de biodiésel, se busca destinar los recursos a producir principalmente biogás y electricidad.	114.5 Mt/año (2013)
Aceites microbianos	Se reportan proyectos a nivel de laboratorio para producir biodiésel a partir de microalgas.	Aún no se determina

1.4. *Jatropha curcas* L.

La *Jatropha Curcas* L. o “piñón mexicano” es una planta oleaginosa, originaria de México y Centroamérica, abundante en zonas tropicales. La *Jatropha* es una planta perenne que se puede cosechar casi continuamente durante un periodo de entre 30 a 50 años, muy resistente a sequías, de rápido crecimiento y se adapta a diferentes condiciones climáticas (Ávila et al., 2018). De acuerdo con datos del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP), para el 2017 se obtuvieron rendimientos en la cosecha de esta planta de 0.32 Ton/Ha a nivel nacional.



Las semillas de *Jatropha curcas* L., son semillas oleaginosas de uso no comestible en su mayoría. Dependiendo de las procedencias de la semilla, se han encontrado variaciones en la constitución bioquímica, las hay tóxicas por contener ésteres de forbol, y otras que son libres de estas sustancias. Así que el destinar estas semillas para cultivos energéticos no atentaría contra la seguridad alimenticia del país (Mercado et al., 2011).

Uno de los puntos más importantes que presenta esta semilla, es su elevado contenido de aceite total, y que por lo tanto la proyecta como materia prima para la producción de biodiesel. Se han reportado contenido de aceite alrededor del 40% al 44% en el núcleo de la semilla de ciertas especies mexicanas. Este aceite contiene un 75% de ácidos grasos en su composición. Incluso se tienen estudios de semillas provenientes de la región de Totonacapan, Veracruz que contienen hasta un 69.1%. de contenido de aceite (Osuna, 2016). Otra de las ventajas que se tiene para la producción de *Jatropha curcas* L. como cultivo energético es que México alberga 45 taxones de *Jatropha curcas* L. (20% del total mundial), de los cuales 35 son endémicos (77%) (Mercado et al., 2011).

Dentro de las bondades que ofrece esta semilla se encuentra su alto contenido de proteínas, por arriba del 50%, en la harina residual que se obtiene una vez terminado el proceso de extracción de aceite. Esto es importante pues se tiene una generación de residuos con un importante valor agregado.

1.5. Extracción de aceite

Las propiedades del biodiésel dependen en gran medida del tipo de materia prima utilizada para su producción (Zhang, 2016). Por lo tanto, las especificaciones para su uso como combustible son necesarias para confinar las propiedades en un intervalo aceptable, controlar su calidad y asegurar un desempeño confiable del motor o disposición que se le dé al combustible.

Es por esto que el proceso de extracción de aceite de la semilla de *Jatropha curcas* L., para la producción de biodiésel, es de suma importancia para la calidad final del biocombustible, así como para los subproductos que se generen en el proceso.



Existen dos tipos de extracción de aceite vegetal; extracción mecánica y extracción química. Los rendimientos típicos para cada tipo de proceso se presentan a continuación en la Tabla 2 y Tabla 3:

Tabla 2. Rendimientos típicos de la extracción química de aceite (tomado de Achten et al., 2008)

Método de extracción de aceite	Tiempo transcurrido (hr)	Rendimiento en extracción de aceite (%)
n-hexano	24	95-99
Acuoso	2	38
Acuoso enzimático	2	73
Acuoso enzimático (proteasas alcalinas)	2	86
Particionamiento en tres fases	2	97

Tabla 3. Rendimientos típicos de la extracción mecánica de aceite (tomados de Achten et al., 2008).

Tipo de prensa	Rendimiento de extracción de aceite (%)
Prensa de tornillo sin fin	68
	80
	79
Prensa hidráulica	62.5
	62.5

Como se puede observar, la principal diferencia entre los métodos se da en los rendimientos finales de aceite extraído. El método de extracción por solventes es el que tiene una mayor eficiencia en la extracción, con una duración de alrededor de 24 horas. La gran desventaja que se tiene en este tipo método es el impacto ambiental, generación de aguas residuales, mayor cantidad de energía consumida en el proceso y altas emisiones de compuestos orgánicos volátiles, así como afectaciones a la salud humana por riesgos en su manejo debido a la inflamabilidad que posee (Achten et al., 2008).



En la mayoría de estos procesos químicos se deja de lado la calidad del subproducto generado, en este caso, la pasta proteica residual de la semilla. Se obtiene un aceite de calidad para la producción de biodiésel, pero se genera un residuo sin valor agregado.

En la extracción mecánica se tienen eficiencias más bajas comparadas con el método químico, pero al tratarse de un proceso en el cual no se dan reacciones químicas, los subproductos generados a lo largo del sistema son de alto valor, de esta manera se contribuye a la disminución del uso de solventes y a la no generación de residuos peligrosos.

1.6. Descascarado y extracción mecánica de aceite

1.6.1. Descascarado mecánico

Para lograr una alta eficiencia en la extracción mecánica de aceite, es necesario hacer un proceso de descascarado a la materia prima, pues las cascara poseen un alto contenido de fibra, la cual comprende lignina, celulosa y hemicelulosa no digeribles. Esto afecta a la eficiencia en la extracción de aceite y a las características finales de la pasta proteica (Yuan et al., 2016), además las cascara de semilla de *Jatropha* se pueden utilizar en diversas aplicaciones como la adsorción de metales en aguas residuales (Carrillo & González, 2015), o en la generación de nuevos biocombustibles (Yuan et al., 2015).

Los tipos de descascarado comprenden el pelado por medio de mallas rotatorias (Figura 3), sistemas de varillas giratorias que rompen la cascara (Figura 4), triturado por tolvas (Figura 5) y rodetes giratorios que comprimen la semilla para generar así la fractura (Figura 6).

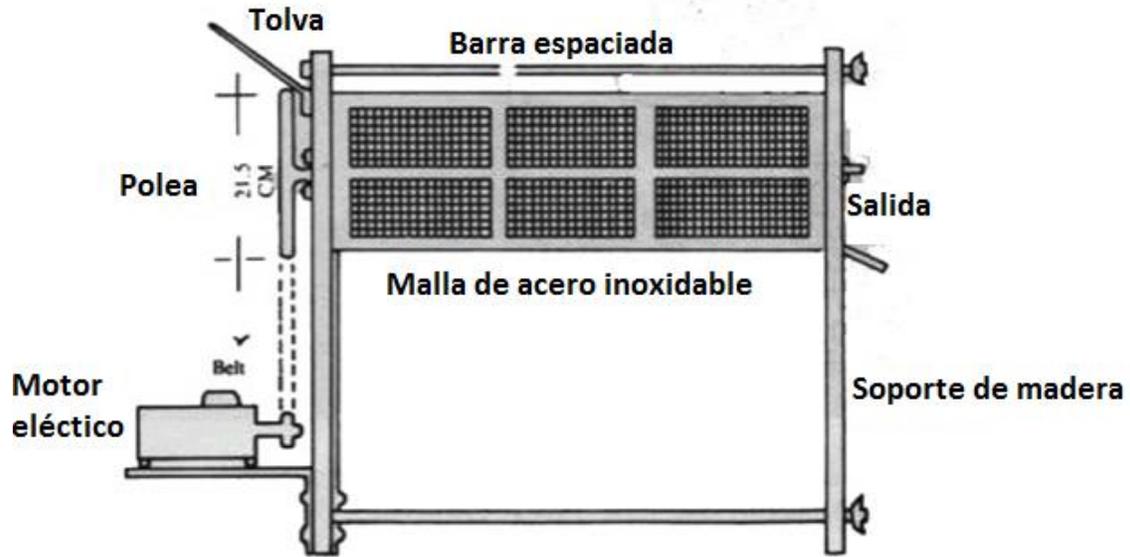


Figura 3. Mecanismo de mallas rotatorias

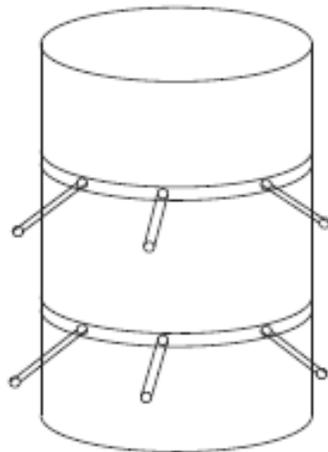


Figura 5. Tolva rotatoria de varillas para descascarado de semillas

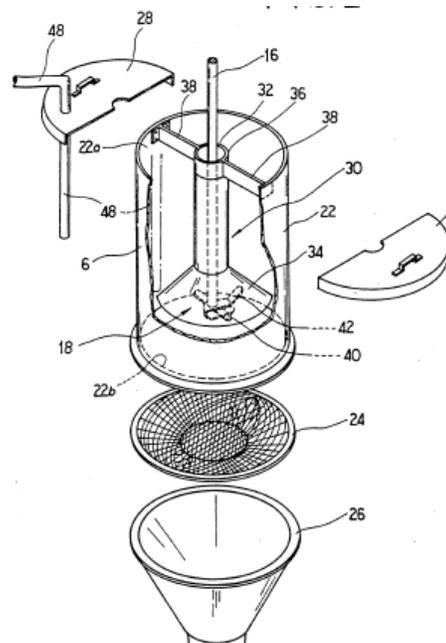


Figura 4. Triturador de semillas por tolvas

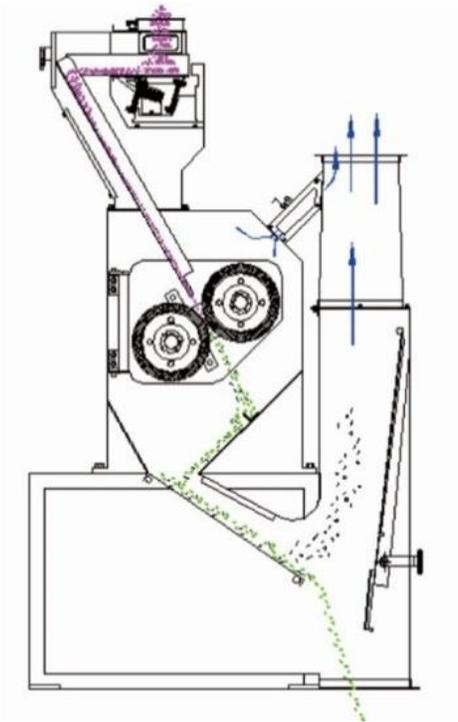


Figura 6. Mecanismo de rodetes giratorios para compresión de semillas

La principal diferencia entre los tipos de descascarado recae en la eficiencia para fracturar el mayor número de las cascara y una vez hecho esto, separar el núcleo de las semillas de la cascara fracturada.

En la tabla 4 se muestran características y resultados de maquinaria e investigación existente para el descascarado de semillas de *Jatropha curcas* L.

Parte fundamental de un descascarado eficiente, se manifiesta en el final del proceso, en donde se efectúa la separación cascara-núcleo. En muchos casos sucede que la semilla se fractura en partes resultantes muy pequeñas debido a que las dimensiones de la semilla son mayores a las contempladas en el diseño y el porcentaje de disminución de sección en la compresión es muy elevado.



Tabla 4. Maquinaria e investigación existente para descascarado mecánico de *Jatropha curcas* L.

Máquina	Título	Fuente	Resultados
Descascaradora	Performance evaluation and cfd multiphase modeling for Multistage <i>Jatropha</i> Fruit Shelling Machine	Industrial Crops and Products, Bo Yuan Lima, Rosnah Shamsudina, B.T. Hang Tuah Baharudinb, Robiah Yunus, Malasia, 2015	Separación de cáscara y núcleo por medio de aire comprimido (Velocidad óptima de 9.8 m/s). Se separa el 99% de la cáscara. Simulaciones por el método Computational Fluid Dynamics (CFD), utilizando el programa de diseño ANSYS.
Descascaradora	Development and Evaluation of <i>Jatropha</i> Seeds Shelling Machine for Biofuel Production	IDOSI Publications, Abdelmutalab F. Kheiralla, El-Kamil H. Tola, Adil N. Korsha, Abas Y. Eltigani, Sudan, 2015	Sección de limpieza previa al descascarado por medio de aire comprimido (97.81% de eficiencia). Descascarado con 100% de eficiencia máxima. Descascarado con una capacidad máxima de 150 Kg/hr
Descascaradora	Influence of physical properties of <i>Jatropha curcas</i> L. seeds on shelling performance using a modified disc	Industrial Crops and Products, Sebastian Romuli, Shkelqim Karaj, Joachim Müller, Alemania, 2015	Máquina construida con mecanismo de compresión por medio de rodetes. Rodetes de óxido de alúmina (Al ₂ O ₃), diámetro de 300 mm, abertura entre discos de hasta 60 mm. Motor de 3 kW con regulador de velocidad. Eficiencia de descascarado del 79.6% a 1000 RPM y 9 mm de separación entre rodetes.

Uno de los sistemas más utilizados en la separación cascara-núcleo de la semilla es el de aire comprimido. En este se induce una corriente de aire generada por un ventilador hacia un ducto que a su vez es dirigido de forma horizontal, o con un cierto grado de inclinación, a las semillas fracturadas (Figura 7). Debido a la diferencia de densidades que existe entre la cascara y el núcleo ocurre la separación.

Tal como se muestra en la figura 8, a pesar del pequeño tamaño que llegasen a tener la cascara y el núcleo, es posible lograr su separación. Se puede llegar a obtener una separación de cáscara y núcleo por medio de aire comprimido, a una velocidad óptima de 9.8 m/s, del 99% (Yuan et al., 2016).

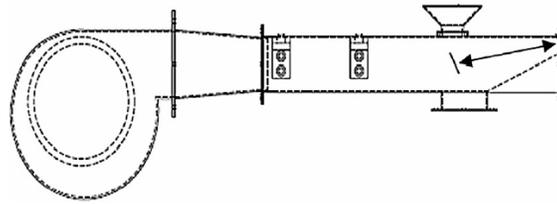


Figura 7. Sistema de aire comprimido para separación de cascara de semillas, tomado de (Yuan et al., 2016)



Figura 8. Separación de cascara y núcleo por medio de aire comprimido (tomado de Yuan et al., 2016)

En cualquiera de los casos, el diseño de la maquinaria depende de las dimensiones y propiedades mecánicas de la materia prima a trabajar, por lo que es necesario conocer estas magnitudes para el diseño adecuado de los mecanismos y los flujos máscos de alimentación en las tolvas. Es por esto que se deben realizar mediciones de dimensionamiento a la semilla y ensayos de resistencia mecánica en los tres ejes de la semilla (figura 9).

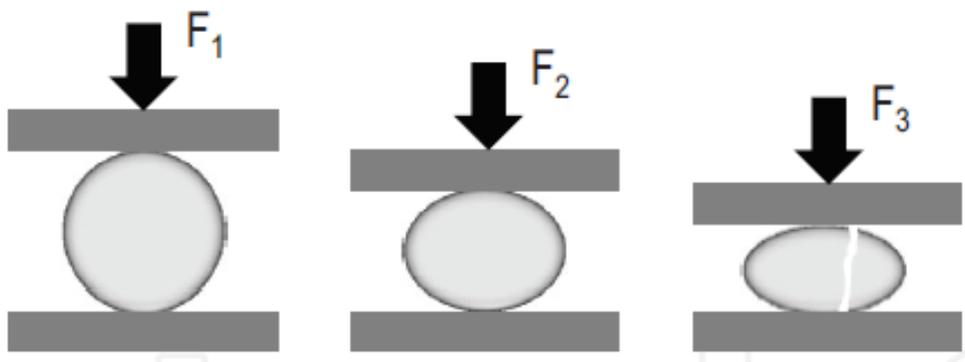


Figura 9. Aplicación de cargas de deformación y fractura a semillas en sus tres ejes (Drahansky et al., 2016)

1.6.2. Caracterización de la semilla de *Jatropha curcas* L.

Para el dimensionamiento de la semilla se toman diferentes muestras y a partir de estas se obtiene la masa (g) y por medio de mediciones en los tres ejes de la semilla se pueden determinar valores promedio de longitud (x), ancho (y) y espesor (z), tal como se muestra en la figura 10.

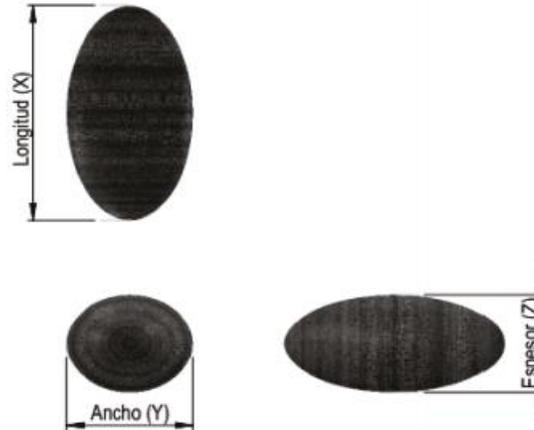


Figura 10. Dimensiones promedio de la *Jatropha curcas* L., tomado de (Betancur-prisco et. al., 2014).

El peso de la semilla se determina a partir de una balanza experimental y para las dimensiones geométricas se hace uso de un vernier. Estas dimensiones geométricas se utilizan de igual forma para la obtención de otros parámetros por medio de fórmulas matemáticas como las que se presentan a continuación:

$$\text{Diámetro aritmético (Da)} = \frac{(x + y + z)}{3}$$

$$\text{Diámetro geométrico (Dg)} = (x \cdot y \cdot z)^{1/3}$$

$$\text{Esfericidad}(\phi) = \frac{(x \cdot y \cdot z)^{1/3}}{x} = \frac{Dg}{x}$$

$$\text{Volumén unitario (Vu)} = \frac{4}{3} \pi \cdot \frac{(x \cdot y \cdot z)}{1000}$$

En la tabla 5 se reportan dimensiones de la semilla con base a diferentes trabajos de investigación

Tabla 5. Dimensiones de la semilla de *Jatropha curcas* L.

Muestra	Contenido de humedad (%)	Masa (g)	Longitud (mm)	Ancho (mm)	Espesor (mm)	Diámetro aritmético (mm)	Fuente
Semilla completa	6.8 ± 0.5	0.57 ± .002	18.33 ± 0.12	10.78 ± 0.11	8.32 ± 0.07	12.48 ± 0.09	(Romuli, Karaj, & Müller, 2019)
Semilla completa	58.3 ± 5.5	0.41 ± 0.003	16.98 ± 0.14	10.56 ± 0.21	8.17 ± 0.07	11.90 ± 0.09	(Romuli, Karaj, & Müller, 2019)
Semilla completa	5.85	-	17.01	10.74	8.19	11.43	(Bangboye & Adebayo, 2012)
Semilla completa	20.85	-	17.67	11.19	8.69	11.97	(Bangboye & Adebayo, 2012)
Semilla completa	25.85	-	17.71	11.23	8.96	12.12	(Bangboye & Adebayo, 2012)
Semilla completa	4.75	-	18.65	11.34	8.91	12.97	(Garnayak, Pradhan, Naik, & Bhatnagar, 2007)
Semilla completa	19.57	-	19.21	11.85	9.48	13.51	(Garnayak, Pradhan, Naik, & Bhatnagar, 2007)
Semilla completa	-	0.44 ± 0.042	16.96 ± 1.02	10.72 ± 0.59	9.79 ± 0.59	11.99 ± 0.58	(Karaj & Müller, 2010)
Semilla completa	-	0.61 ± 0.06	17.73 ± 0.85	11.04 ± 0.44	8.67 ± 0.44	12.48 ± 0.42	(Karaj & Müller, 2010)

Generalmente, las pruebas y caracterización mecánica de la semilla se llevan a cabo en una maquina universal para pruebas de compresión (figura 11), la cual utiliza dos platos paralelos. La muestra se deposita sobre uno de los platos y estos ejercen una carga sobre la probeta, con una velocidad y temperatura establecidas.



Figura 11. Maquina universal de compresión "INSTRON3382" (tomado de Cruz-Meza, et al., 2012)



Los resultados obtenidos de diversas fuentes, para estas pruebas mecánicas, se reportan en las Tablas 6,7 y 8.

Tabla 6. Pruebas en el eje "x" para caracterización mecánica de semilla de *Jatropha curcas* L.

Muestra	Fuerza de ruptura (N)	Dureza (N/mm)	Energía al punto de ruptura (N-mm)	Defromación al punto de ruptura (mm)	Radio de deformación al punto de ruptura (mm)	Fuente
Semilla completa	99.6 ± 33.85	63.3 ± 16.39	71.5 ± 36.85	1.6 ± 0.41	0.09 ± 0.02	(Romuli, Karaj, & Müller, 2019)
Semilla completa	113.2 ± 35.32	91.5 ± 22.94	64.6 ± 27.97	1.3 ± 0.43	0.07 ± 0.02	(Romuli, Karaj, & Müller, 2019)
Semilla completa	92.14	64.62	-	1.36	-	(Bangboye & Adebayo, 2012)
Semilla completa	113.99	67.75	-	2.5	-	(Bangboye & Adebayo, 2012)
Semilla completa	131.75	85.44	74.89	1.03	-	(Herak, Divisova, & Kabutey, 2014)
Semilla completa	-	-	-	0.93 ± 0.16	0.12 ± 0.002	(Garnayak, Pradhan, Naik, & Bhatnagar, 2007)
Semilla completa	-	-	-	1.13 ± 0.12	0.12 ± 0.001	(Garnayak, Pradhan, Naik, & Bhatnagar, 2007)

Tabla 7. Pruebas en el eje "y" para caracterización mecánica de semilla de *Jatropha curcas* L.

Muestra	Fuerza de ruptura (N)	Dureza (N/mm)	Energía al punto de ruptura (N-mm)	Defromación al punto de ruptura (mm)	Radio de deformación al punto de ruptura (mm)	Fuente
Semilla completa	44.9 ± 14.26	71.3 ± 18.18	19.2 ± 11.19	0.7 ± 0.23	0.06 ± 0.02	(Romuli, Karaj, & Müller, 2019)
Semilla completa	46.0 ± 9.06	96.0 ± 14.04	12.6 ± 4.78	0.5 ± 0.09	0.05 ± 0.01	(Romuli, Karaj, & Müller, 2019)
Semilla completa	37.22	67.08	-	0.58	-	(Bangboye & Adebayo, 2012)
Semilla completa	31.64	64.17	-	0.46	-	(Bangboye & Adebayo, 2012)
Semilla completa	29.47	67.75	35.19	1.44	-	(Herak, Divisova, & Kabutey, 2014)
Semilla completa	-	-	-	0.78 ± 0.19	0.10 ± 0.05	(Garnayak, Pradhan, Naik, & Bhatnagar, 2007)



Tabla 8. Pruebas en el eje "z" para caracterización mecánica de semilla de *Jatropha curcas* L.

Muestra	Fuerza de ruptura (N)	Dureza (N/mm)	Energía al punto de ruptura (N-mm)	Defromación al punto de ruptura (mm)	Radio de deformación al punto de ruptura (mm)	Fuente
Semilla completa	89.5 ± 36.78	74.2 ± 34.90	62.4 ± 30.75	1.3 ± 0.28	0.15 ± 0.04	(Romuli, Karaj, & Müller, 2019)
Semilla completa	101.1 ± 31.81	90.4 ± 20.40	65.6 ± 31.43	1.1 ± 0.26	0.13 ± 0.03	(Romuli, Karaj, & Müller, 2019)
Semilla completa	86.71	43.62	-	1.99	-	(Bangboye & Adebayo, 2012)
Semilla completa	95.48	55.51	-	1.72	-	(Bangboye & Adebayo, 2012)
Semilla completa	95.48	67.75	96.26	1.72	-	(Herak, Divisova, & Kabutey, 2014)
Semilla completa	-	-	-	0.92 ± 0.26	0.11 ± 0.04	(Garnayak, Pradhan, Naik, & Bhatnagar, 2007)
Semilla completa	-	-	-	0.77 ± 0.18	0.9 ± 0.02	(Garnayak, Pradhan, Naik, & Bhatnagar, 2007)

En la Tabla 9 se muestran los datos que se han obtenido para el caso específico de la semilla de *Jatropha curcas* L. proveniente del estado de Morelos que se estudiará en este trabajo de tesis.

Tabla 9. Caracterización de la semilla de *Jatropha curcas* L. del estado de Morelos

Muestra	Longitud (mm)	Ancho (mm)	Espesor (mm)	Diámetro aritmético (mm)	Diámetro geométrico (mm)	Esfericidad (%)	Dureza (N/mm)	Deformación al punto de ruptura (mm)
1	19.08	10.63	8.45	12.98	12.33	64.64	143	1.22
2	19.01	10.79	8.58	13.08	12.42	65.48	152	1.15
3	19.04	10.55	8.22	12.94	12.28	64.49	166	1.38

Para este dimensionamiento, se tomaron tres muestras de semillas de *Jatropha curcas* L. para llevar a cabo las mediciones y cálculos correspondientes a la caracterización. En cada muestra se midieron 100 semillas y se tomó el promedio aritmético para reportar las magnitudes de longitud, ancho y espesor en la tabla, además se calcularon por medio de fórmulas el diámetro aritmético, diámetro geométrico y el porcentaje de esfericidad.



De igual forma, los datos reportados para la dureza y deformación al punto de ruptura se obtuvieron a partir de las pruebas mecánicas de compresión realizadas a la semilla.

Algunos factores para considerar, que repercuten en la eficiencia de descascarado son:

- Sección de limpieza previa al descascarado por medio de aire comprimido, con lo que se logra alcanzar una eficiencia del 97.81% para una capacidad de 150 kg/hr (Kheiralla & Tola, 2015).
- Falta de homogeneidad en la materia prima a trabajar, disminuyendo así la eficiencia total de descascarado (Romuli et. al., 2015).
- Tolva de alimentación mal adecuada a la maquinaria, lo cual propicia una compresión de la semilla en alguna sección no contemplada por el diseño mecánico, provocando una pulverización de la semilla o evitando su compresión.

Las dimensiones y fisiología natural de la semilla de *Jatropha*, permite realizar un diseño de alimentación de la máquina y compresión basado en su forma. Las semillas, al caer libremente en un espacio, tienden a desplazarse por su sección más larga, es por esto que el diseño de alimentación tendrá una pendiente en la cual se deslizarán las semillas hasta llegar a los rodetes de compresión. La semilla de *Jatropha curcas* L. cuenta por naturaleza con una hendidura en su parte central que, desde el punto de vista mecánico, funge como concentrador de esfuerzos, por lo que, al ejercerse una carga de compresión, tiende a fracturarse en este punto.

1.6.3. Extracción mecánica de aceite

En lo que respecta a la extracción mecánica de aceite, este es el método más utilizado para sistemas continuos de tratamiento de biomasa. Se tienen mecanismos de engranes de tornillo sin fin con diferentes variaciones en el paso diametral (Figura 12), tornillos sin fin gemelos (Figura 13) y de prensa hidráulica (Figura 14).

Los mecanismos de extracción por prensa hidráulica fueron los primeros sistemas implementados en la industria, pero debido a que se trata de un proceso por lotes, al bajo rendimiento de extracción que presentan y al alto contenido de aceite residual en la pasta proteica, han sido reemplazados en su mayoría por procesos continuos (Ahmend, 2016).

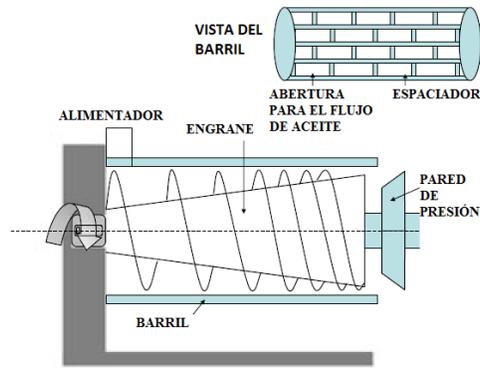


Figura 12. Máquinas de extracción de aceite a partir de un solo eje (tomado de Savoire et al., 2012)

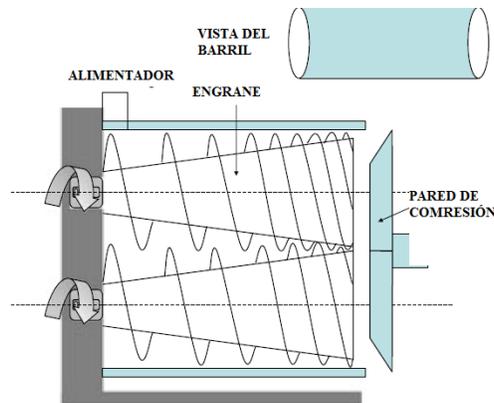


Figura 13. Máquina de extracción de aceite a partir de un tornillo sin fin gemelo (tomado de Savoire et al., 2012)



Figura 14. Máquina de extracción de aceite a partir de prensa hidráulica.



Los procesos continuos de extracción de aceite permiten un mayor flujo de masa por unidad de tiempo, una adición de temperatura homogénea al sistema y por consiguiente una mayor extracción de aceite, además, el aceite residual en la pasta proteica se encuentra en un menor porcentaje que en los procesos de prensa hidráulica.

Un mecanismo expeler es alimentado por una tolva y permite el flujo de las semillas a través de su eje sin fin y la compresión de la semilla se lleva a cabo con las paredes del barril que cubren al eje. Este barril cuenta con aberturas que permiten el flujo del aceite hacia los depósitos recolectores. La pasta generada por las semillas durante el proceso de compresión sigue su camino hasta el final del eje, donde finalmente es comprimido por una pared ajustable en la que se extrae lo máximo posible del aceite residual para obtener una pasta proteica seca.

Por otra parte, la eficiencia en la extracción de aceite para un mecanismo expeler depende de la velocidad de giro del eje, presión ejercida sobre la materia prima, temperatura, presión aplicada del rodete trasero hacia el sistema y el contenido de humedad presente en la semilla. (Savoire et al., 2012). En la extracción por un solo eje de tornillo sin fin se han reportado rendimientos extracción de aceite del 61% con unas velocidades aproximadas de rotación de 40 RPM y con un decrecimiento en el rendimientos a medida que el eje aumenta su velocidad, produciendo así pérdidas de potencia por calor en el eje (Isiaka, 2017). Este mecanismo es uno de los más comunes por su amplia fabricación y estudio, incluso por las grandes cantidades de biomasa que pueden trabajar, los cuales llegan hasta 150 Ton/día y consumos energéticos por el uso de motores que oscila por los 500 KW.

Las máquinas de tornillo sin fin gemelo tienen una mayor eficiencia y menores pérdidas energéticas (Evon et al., 2013). En este tipo de mecanismos, el aumento en la velocidad de rotación de los ejes no decrementa la eficiencia, incluso se ve beneficiada la extracción, aumentándose la temperatura dentro del proceso, además de que en estos sistemas se adiciona calor por medio de resistencias eléctricas para facilitar la extracción de aceite. Se llegan a tener rendimientos del 81% de extracción de aceite a 125 RPM, con una temperatura de 80°C y a una carga de 14 Kg/hr (Dufaure et al., 1999). En investigaciones



más reciente los rendimientos llegan máximos de extracción del 89%, ocurriendo el proceso a 100 ° C.

El mecanismo de doble tornillo sin fin tiene una mayor superficie de contacto con la biomasa durante el proceso de extracción, logrando comprimir al máximo los núcleos de tamaño regular y en partículas demasiado pequeñas se llega a tener un cierto grado de extracción y la filtración de sólidos en el aceite, tanto en tamaños como en cantidad, es reducida, lo que hace al proceso mucho más eficiente. El resultante de la pasta proteica es igualmente de calidad, ya que contiene entre 28 y 5.9% de aceite, con un contenido de proteínas máximo del 23%. (Evon et al., 2013).

La tabla 10 recopila especificaciones, funcionamientos y eficiencias de maquinaria e investigación existente para la extracción mecánica de aceite de los núcleos de semilla de *Jatropha curcas* L., a partir de sistemas de extracción continuos.

Tabla 10. Maquinaria e investigación existente para la extracción mecánica de aceite utilizando sistemas continuos

Máquina	Título	Fuente	Resultados
Extractora de aceite	Performance of jatropha oil blends in a diesel engine	Renewable Energy, Forson, F. K., Oduro, E. K., Hammond-Donkoh, E., 29, 1135–1145, Ghana, 2004	Extractora de prensa hidráulica. Se molieron 32 kg de semilla descascarada para la posterior extracción de aceite. Se obtuvieron 6.88 kg de aceite (7.5 Litros). Rendimiento de extracción de aceite del 39%.
Extractora de aceite	Development of an Oil Extraction Machine for Jatropha curcas Seeds	Journal of Scientific Research & Reports, A. T. Salawu, M. Isiaka, M. L. Suleiman, Nigeria, 2015	Extractora de tornillo con capacidad de 55 Kg/hr. Rendimiento máximo para extracción de aceite del 61% con rendimiento de 7.76 lts/hr. Al aumentar la velocidad del tornillo extractor de aceite la eficiencia disminuye debido al aumento de pérdidas por calor, siendo 40 RPM la velocidad optima.
Extractora de aceite	Extraction of oil from jatropha seeds using a twin-screw extruder: Feasibility study	Industrial Crops and Products, Ph. Evona, I. Amalia Kartikac, M. Cernya, L. Rigala, 2013, Indonesia	Extractora de tornillo gemelo (mayor eficiencia y menores pérdidas energéticas). Utiliza calentadores eléctricos para facilitar la extracción de aceite y su rendimiento máximo de extracción es del 89% (100°C). La extracción de aceite es más eficiente debido a que se tritura la semilla y el mecanismo reduce la cantidad y tamaño de partículas sólidas filtradas al aceite. La pasta proteica contiene de entre 28.0



Capítulo II: Desarrollo del prototipo

2.1. Metodología general del proceso

La metodología seguida para llevar a cabo el proceso de diseño, tanto de los mecanismos, la generación de planos, simulación estática y validación de elementos se presenta en la Figura 15.

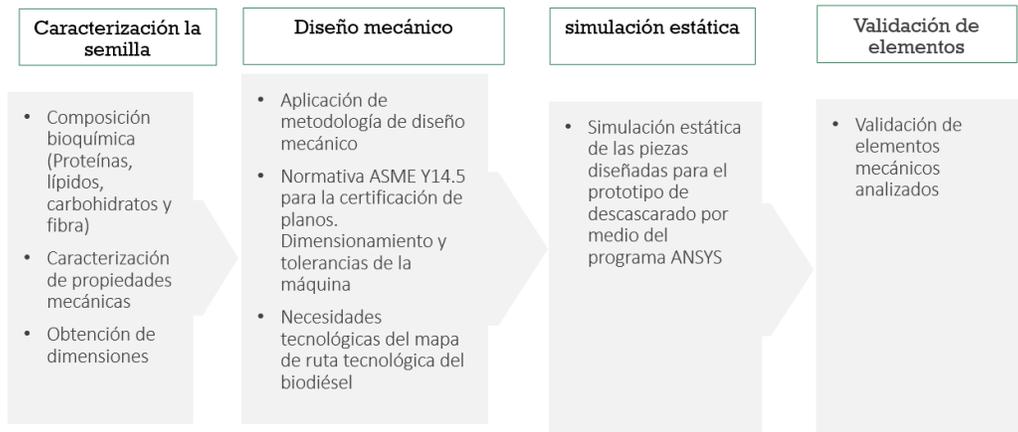


Figura 15. Metodología del proceso de diseño del prototipo

2.2. Diseño mecánico de los elementos

Para el desarrollo, diseño y adaptación de mecanismos de este prototipo se adoptó el proceso del diseño mecánico (Norton, 1999), focalizado al diseño detallado, el cual permite una reingeniería de los mecanismos, así como su adaptación para las características de la semilla de JCL. La tabla 1 muestra los puntos seleccionados en el rediseño y adaptación de elementos mecánicos para el prototipo.

Tabla 11. Proceso de diseño detallado para los mecanismos adaptados (Norton, 1999).

a. Diseño de tolva de alimentación
b. Diseño de mejora (re-ingeniería) del sistema convencional de rodets para el descascarado
c. Diseño de un sistema para la separación y recolección de cascara-semilla
d. Rediseño de un sistema tornillo sin fin para la extracción de aceite



2.3. Dibujo asistido por computadora

Para la elaboración de los dibujos mecánicos, se emplea el software de diseño asistido por computadora CATIA v5. Este software permite dibujar, analizar, simular y calcular piezas mecánicas de forma gráfica (GPS, Generative Part Structural Analysis), así como montar diferentes elementos mecánicos para formar un sistema de ensamble (GAS, Generative Assembly Structural Analysis). Ambos procesos serán utilizados en este trabajo para el diseño de piezas y mecanismos (Vázquez, 2011).

Los planos de las piezas mecánicas se realizarán de igual forma con el software CATIA v5 y el dimensionamiento de las piezas, mecanismos y del prototipo en general, se realiza bajo el estándar ASME Y14.5-2009 para dimensiones y tolerancias geométricas.

2.4. Simulación por medio del método de elementos finitos

El método de elemento finito parte de la discretización de un sistema continuo, creando subdominios y divisiones de un modelo. Las divisiones generadas se conforman por nodos, a través de los cuales se genera el trabajo de análisis de elemento finito. Los modelos continuos son representados por ecuaciones diferenciales que suelen ser de alta complejidad para su resolución, de esta forma, la discretización de estos modelos permite trabajar con ecuaciones lineales que facilitan los métodos de resolución del sistema.

Los cálculos necesarios para la solución numérica se realizan sobre una malla (de alto o bajo orden) creada a partir del dominio, en una etapa previa a los cálculos que se denomina pre-proceso. De acuerdo con estas relaciones de adyacencia o conectividad se relaciona el valor de un conjunto de variables incógnitas definidas en cada nodo y denominadas grados de libertad (Pradhan et al, 2019)

Para este trabajo, los valores a obtener con la simulación estática pueden ser de deformaciones mecánicas, flexión, compresión, torsión, esfuerzos principales y esfuerzos residuales. Para llevar a cabo esta simulación estática de los elementos mecánicos diseñados, se utilizará el software de simulación ANSYS Workbench 2020 R2.

2.5. Desarrollo de la descascaradora

2.5.1. Diseño de tolva de alimentación

Para el proceso de descascarado mecánico, las semillas de *Jatropha curcas* L. se sometieron a procesos que incluyen la compresión, cizallamiento e impacto. La máquina a diseñar utiliza el principio de la fuerza de compresión para fracturar la carcasa, después de eso, las cáscaras y los granos se separan por medio de un mecanismo de aire comprimido.

2.5.2. Procedimiento general para el diseño de la tolva de alimentación

El método de Jenike fue seleccionado para este caso de estudio (Figura 16), usando las siguientes ecuaciones para el ángulo mínimo de la tolva:

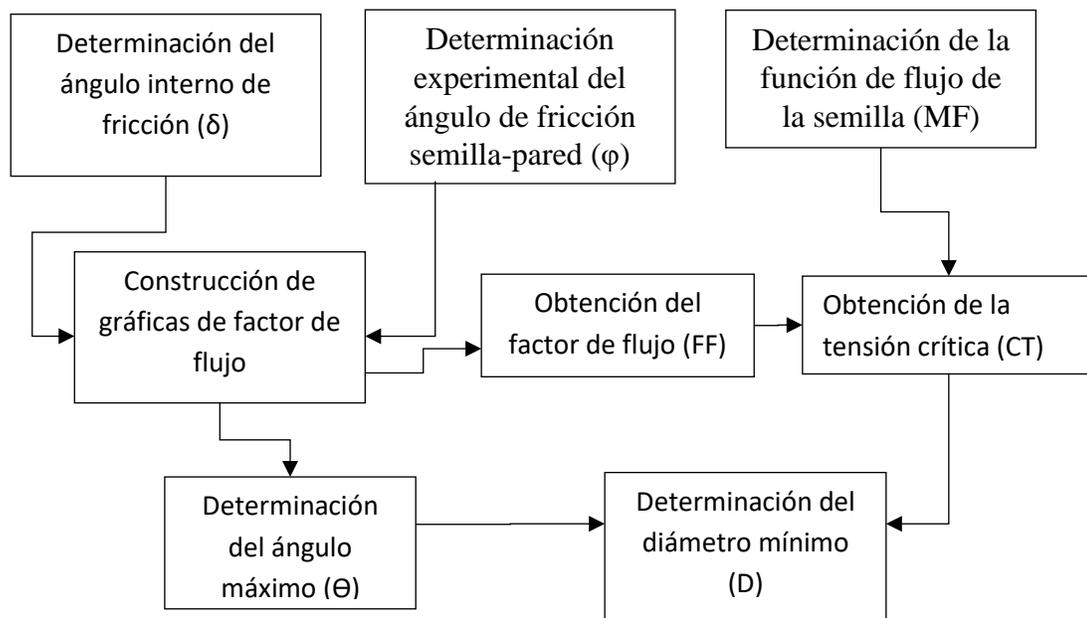


Figura 16. Proceso de diseño de tolvas de acuerdo con el método Jenike

2.5.3. Cálculo de ángulo de la tolva

$$\Theta \leq \frac{1}{2} \left(180 - \sin^{-1} \left(\frac{1 - \sin \delta e}{2 \sin \delta e} \right) - \delta w - \sin^{-1} \left(\frac{\sin \delta w}{\sin \delta e} \right) \right)$$

2.5.4. Cálculo de ángulo de fricción interna (δw)

$$\delta w = \tan^{-1}(\mu k)$$

μk es el coeficiente de fricción estático de la semilla de *Jatropha curcas L.* en acero inoxidable, el cual se obtiene a partir del ensayo de ángulo de reposo, el cual se tomó de 0.22 (Karaj & Müller, 2010).

$$\delta w = \tan^{-1}(0.22)$$

$$\delta w = 12.40^\circ$$

2.5.5. Cálculo de ángulo efectivo de fricción interna (δe)

El valor de δe se obtiene a partir de los gráfico construidos por el método Jenike para asegurar el libre flujo de la semilla dentro de la tolva cónica (J. C. M. Lobato & mesquita, 2016)

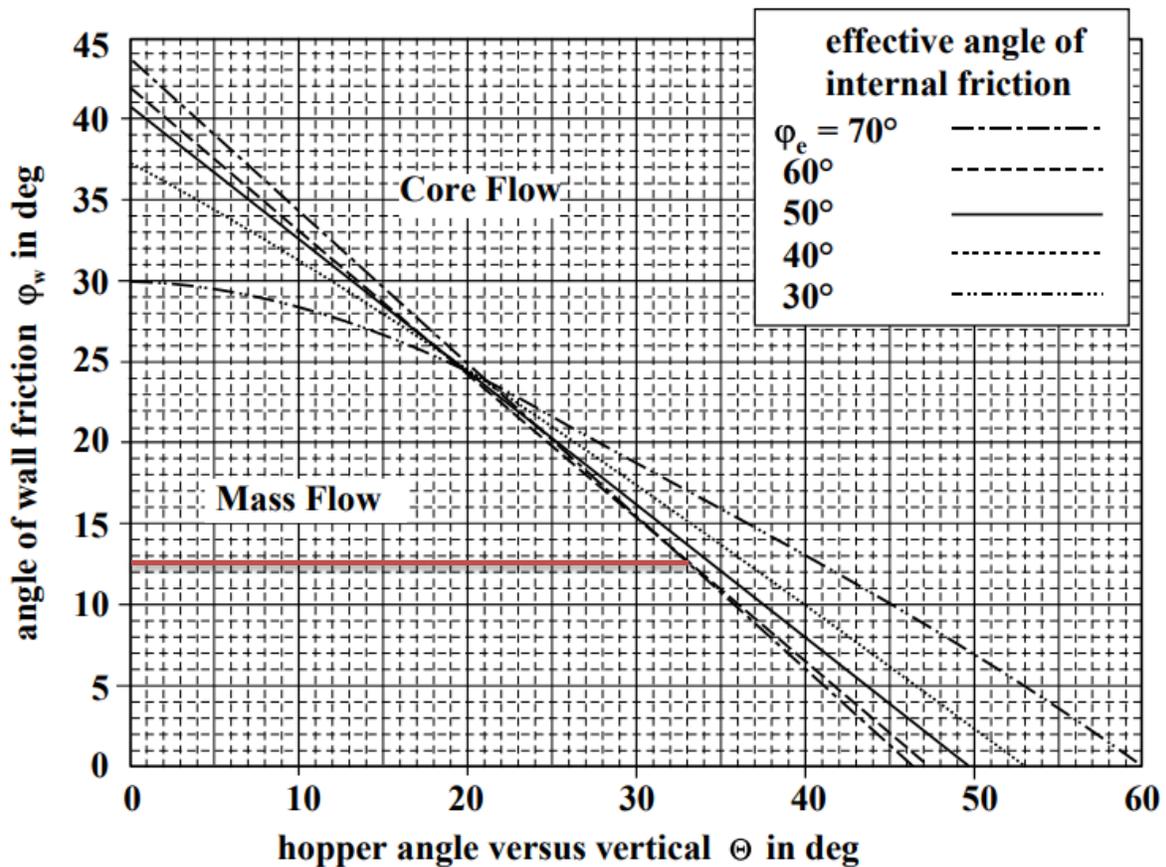


Figura 17. Determinación del ángulo interno de fricción

Para este caso, con ayuda de la Figura 17, se toma un ángulo efectivo de fricción interna de:

$$\delta e = 70^\circ$$

2.5.6. Cálculo de ángulo de inclinación para las paredes de la tolva (Θ)

Una vez obtenido el ángulo efectivo de fricción interna, se encuentra el ángulo de inclinación para la tolva con el mismo gráfico (Θ).

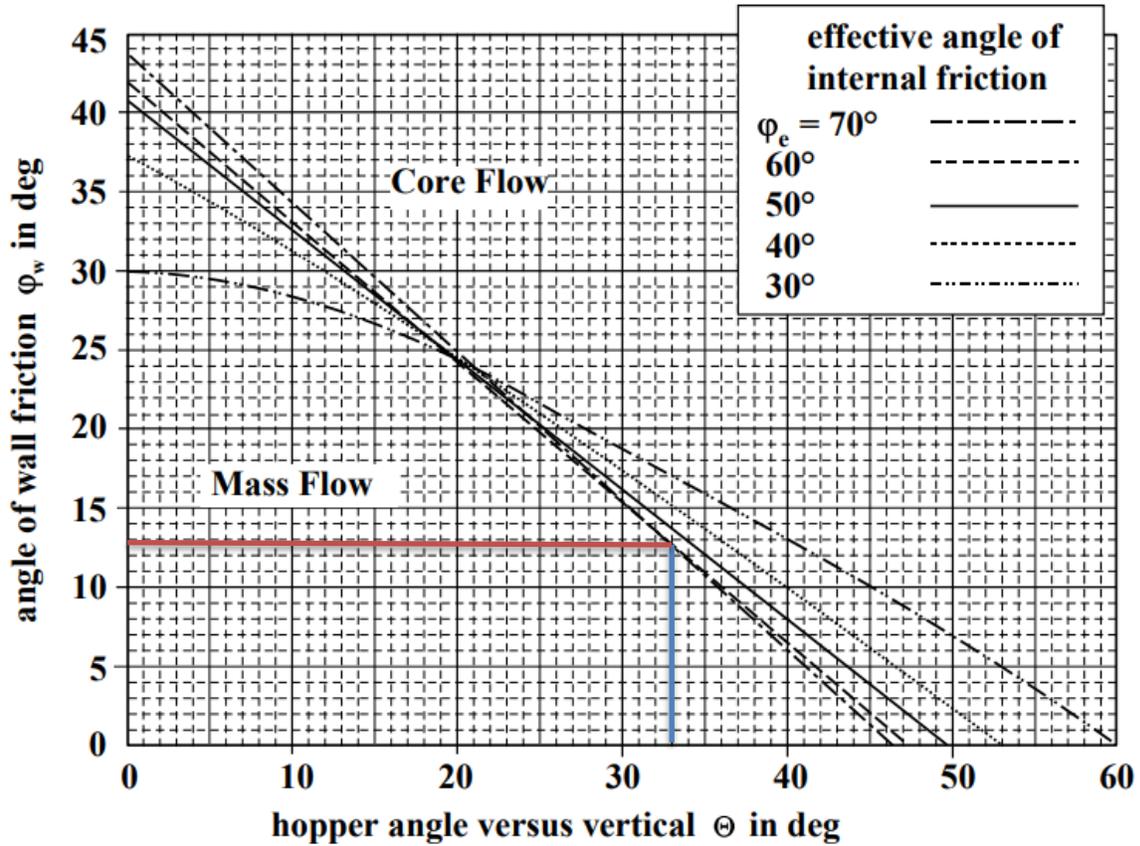


Figura 18. Determinación gráfica del ángulo máximo de la tolva

El ángulo es de aproximadamente 33° y se recomienda que el ángulo a seleccionar sea 3° menor al obtenido por la Figura 18.

$$\Theta' = 33^\circ$$

$$\Theta = (\Theta' - 3^\circ) = (33^\circ - 3^\circ) = 30^\circ$$

De la misma forma, el ángulo Θ se puede obtener a partir de la siguiente fórmula:

$$\Theta \leq \frac{1}{2} \left(180 - \sin^{-1} \left(\frac{1 - \sin \delta e}{2 \sin \delta e} \right) - \delta w - \sin^{-1} \left(\frac{\sin \delta w}{\sin \delta e} \right) \right)$$

$$\theta \leq \frac{1}{2} \left(180 - \sin^{-1} \left(\frac{1 - \sin(70)}{2 \sin(70)} \right) - \delta_w - \sin^{-1} \left(\frac{\sin(12.40)}{\sin(70)} \right) \right)$$

$$\theta \leq 33.11^\circ$$

Por lo tanto, se selecciona un ángulo de 30°.

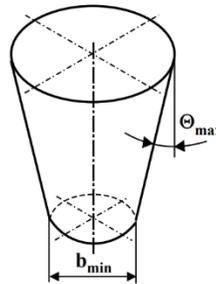


Figura 19. Nomenclatura de tolva cónica de acuerdo con el método Jenike

2.5.7. Cálculo del factor de flujo (ff)

El factor de flujo se obtiene de tablas construidas por el método Jenike para ángulos de fricción de la pared de entre 10° y 30°, a partir del ángulo efectivo de fricción interna.

(angle of wall friction $\phi_w = 10^\circ - 30^\circ$)

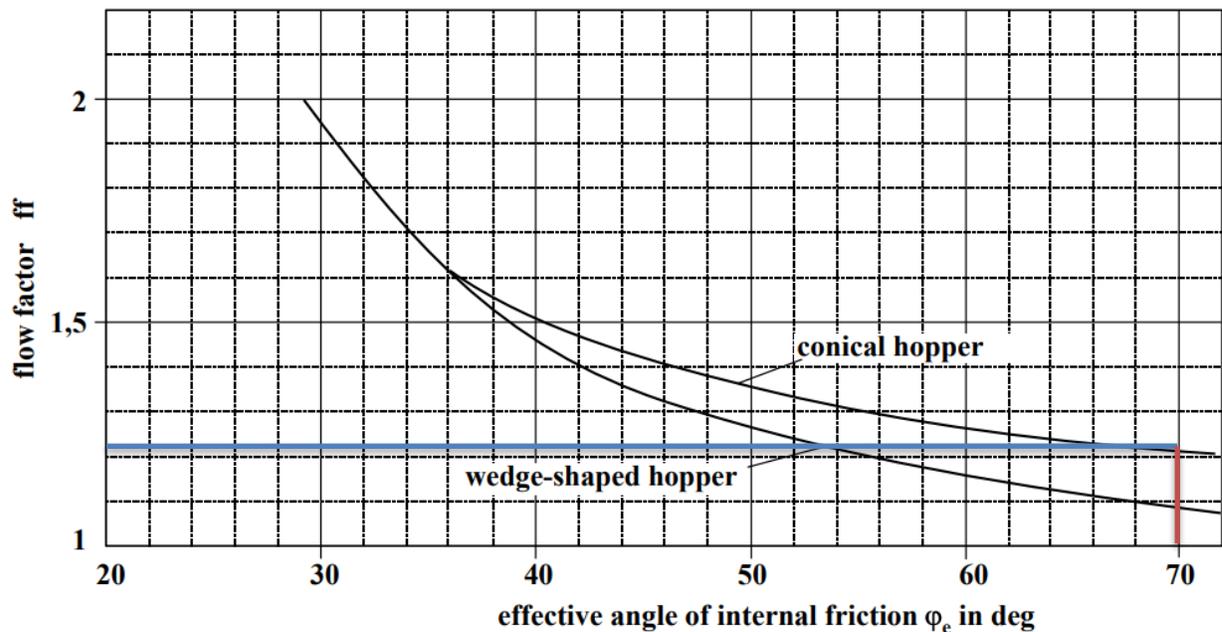


Figura 20. Determinación gráfica del factor de flujo



$$ff = 1.21$$

Este factor de flujo también se puede calcular por medio de la siguiente fórmula y los parámetros auxiliares mostrados a continuación:

$$ff = \left(\frac{Y(1 + \sin \delta e)}{2(x - 1)(F) \cos(90 - \theta)} \right)$$

$$\beta = \frac{\delta w + \sin^{-1}\left(\frac{\sin \delta w}{\sin \delta e}\right)}{2} = 12.80^\circ$$

$$\alpha = \beta + \theta = 42.80$$

$$X = \left[\frac{2^m \sin \delta e}{1 - \sin \delta e} \right] \left[\frac{\sin(\beta + \alpha)}{\cos(90 - \theta)} + 1 \right] = 82.59$$

$m = 1$ para una tolva cónica

$$Y = \left[\frac{2(1 - \cos \theta)^2 \alpha^{m-1} \cos(90 - \theta) + \sin \beta (\sin \alpha)^{1+m}}{(1 - \sin \delta e)(\sin \alpha^{2+m})} \right] = 12.48$$

$$ff = 0.72$$

El factor de flujo se tomó de 1.21

$$\gamma = \tan^{-1}(ff) = 50.42^\circ$$

2.5.8. Cálculo del esfuerzo crítico (f_c)

Para el ángulo crítico es necesario conocer las propiedades de flujo de la semilla de *Jatropha curcas* L.. Estas propiedades se obtienen por medio del ensayo realizado a partir del método Jenike para materiales granulares en los que se encuentran valores de esfuerzo cortante, esfuerzo normal y esfuerzo inicial (Audu & Irtwange, 2019).

La siguiente tabla muestra los valores de esfuerzo normal vs esfuerzo cortante, a partir de la función:

$$\tau = 0.195(\sigma) + 0.284$$

Tabla 12. Valores de esfuerzo normal vs esfuerzo cortante

σ_l (gf/cm ²)	τ (gf/cm ²)
6.3	1.5125
12.16	2.6552
18.02	3.7979
23.88	4.9406
29.74	6.0833

A partir de estos datos y el ángulo γ , que se obtuvo a partir del factor de flujo, se genera la siguiente gráfica

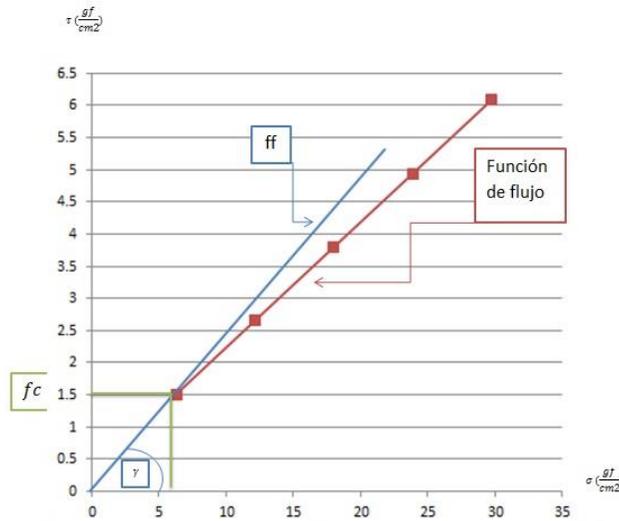


Tabla 13. Esfuerzo crítico de las semillas de JCL en la tolva cónica

Los valores se encuentran reportados en gf/cm² por lo que se convierten a N/m² (Pa) para homogenizar las unidades, multiplicando los valores por la siguiente función.

$$1 \times \frac{gf}{cm^2} \times \frac{0.00981 N}{1 gf} \times \frac{(100cm)^2}{1 m^2} = 98.1 \frac{N}{m^2} = 98.1 Pa$$

σ_l (Pa)	τ (Pa)

617.8221	148.32634
1192.4947	260.3875
1767.1673	372.44866
2341.84	484.50982
2916.5126	596.57098

El punto donde se cruza la recta del factor de flujo y la función de flujo, representa el esfuerzo crítico (f_c), para este caso tiene un valor de:

$$f_c = 148.32634 \text{ Pa}$$

2.5.9. Cálculo del diámetro mínimo de apertura (B)

Suponiendo que se trata de partículas granulares de gran tamaño, el diámetro mínimo de apertura de la tolva sería:

$$B = 5d\sqrt{k}$$

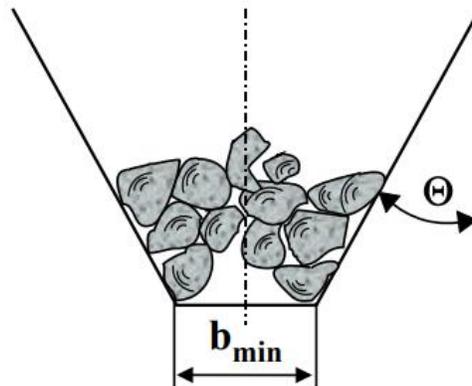


Figura 21. Nomenclatura para el cálculo del diámetro menor de la tolva de alimentación

Dónde el valor de k es de 0.5 para una abertura circular y d es el diámetro superior de tamaño del grano (18.1 mm para este caso).

$$B = 5d\sqrt{k} = 202.47 \text{ mm} = 20.24 \text{ cm} = 0.202 \text{ m}$$

Otra forma de calcular el diámetro mínimo de apertura sería con la siguiente formula:



$$B = \frac{(H)(fc)}{(\rho b)(g)}$$

Dónde:

$$H = 2 + \frac{\theta}{60^\circ} = 2.5$$

$$fc = 148.32 \text{ Pa}$$

$$\rho b = 426 \text{ Kg/m}^3$$

$$g = 9.81 \text{ m/s}^2$$

Por lo que:

$$B = \frac{(2.5)(148.32 \text{ Pa})}{(426 \text{ Kg/m}^3)(9.81 \text{ m/s}^2)} = 0.088 \text{ m} = 8.80 \text{ cm}$$

El valor de B se toma de 10 cm para este caso.

2.5.10. Cálculo de altura de la tolva (*h*)

La altura de la tolva se obtiene con las siguientes formulas:

$$ho = \frac{D}{(2)(\tan \theta)}$$

$$hB = \frac{B}{(2)(\tan \theta)}$$

$$h = ho - hB$$

Además, se hace la consideración:

$$1 \leq \frac{h}{D} \leq 2$$

Para este caso: $\frac{h}{D} = 1$, así que $D = 1$.

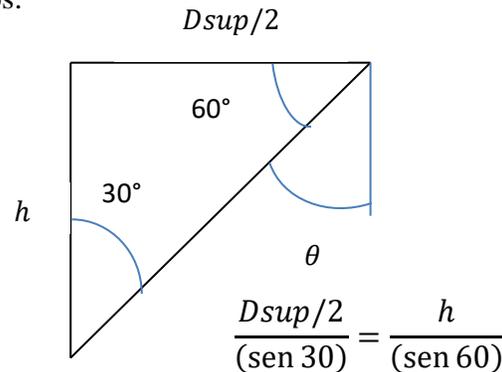
$$ho = \frac{1}{(2)(\tan 30)} = 0.86 \text{ m}$$

$$hB = \frac{0.088m}{(2)(\tan 30)} = 0.076m$$

$$h = (0.86 - 0.076)m = 0.784m = 78.4cm$$

2.5.11. Diámetro superior de la tolva (D_{sup})

Por ley de senos:



$$\frac{D_{sup}}{2} = \frac{h(\text{sen } 30)}{(\text{sen } 60)} = 0.4526 \text{ cm} = 45.26cm$$

$$D_{sup} = \left(\frac{D_{sup}}{2} \times 2 \right) + (b) = 100.52cm = 1.005m$$

2.5.12. Volumen de la tolva (V)

El diámetro de la tolva se calcula con la siguiente formula

$$V = \left(\frac{\pi}{24 \tan \theta} \times (D^3 - B^3) \right) + \left(\frac{\pi}{4} \times (D_{sup}^2) \times (h) \right) = 0.8423m^3$$

2.5.13. Velocidad de flujo (Uo)

Para la velocidad de flujo se utiliza la siguiente formula:

$$U_o = \sqrt{\frac{Bg}{2(1+m)\tan\theta}} = 0.61 \frac{m}{s}$$

2.5.14. Caudal de salida de la tolva (Q)

$$Q = (U_o)(A) = \left(0.61 \frac{m}{s}\right) \left(\pi \times \left(\frac{0.088}{2}\right)^2\right) = 90.4683 \times 10^{-6} \frac{m^3}{s}$$

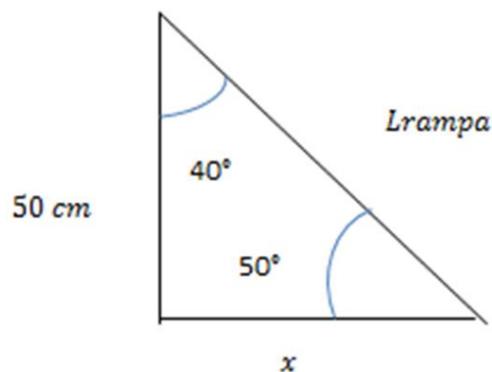
2.5.15. Caudal másico (\dot{m})

$$\dot{m} = (Q)(\rho) = \left(90.4683 \times 10^{-6} \frac{m^3}{s}\right) \left(973.5 \frac{kg}{m^3}\right) = 0.088 \frac{kg}{s} = 88.07 \frac{g}{s} = 317.05 \frac{kg}{h}$$

2.6. Diseño de rampa de deslizamiento

Partiendo de los datos experimentales obtenidos en las pruebas de flujo realizadas a la semilla de *Jatropha curcas* L., se realiza el análisis para la rampa de alimentación de la máquina.

El ángulo de inclinación mínimo para el deslizamiento de las semillas a lo largo de la rampa se toma como base para determinar la longitud de esta misma.



$$\frac{x}{\text{sen}(40)} = \frac{50\text{cm}}{(\text{sen } 50)}$$

$$x = \frac{50\text{cm}(\text{sen}40)}{(\text{sen } 50)} = 41.95 \text{ cm} = 0.419 \text{ m}$$



$$L_{rampa} = \sqrt{(50cm)^2 + (41.95^2)} = 65.27cm = 0.652m$$

2.7. Diseño de rodets compresores de alimentación

2.7.1. Energía necesaria para fracturar la cáscara

Los barriles para el mecanismo de compresión fueron diseñados por la ley de kick.

De acuerdo con la ley de Kick, la energía requerida para reducir el tamaño de un material es directamente proporcional a la relación de su reducción de tamaño dL / L .

$$\frac{dE}{dL} = kL^n$$

Donde:

dL= Cambio en la dimensión

dE= energía diferencial requerida

L= dimensión típica de la semilla

K= constante

n= constante

$$E = Kk f_c \text{Loge} \left(\frac{L1}{L2} \right)$$

Donde:

E = energía requerida para descascarar una semilla

Kk = constante de Kick

f_c = resistencia a la compresión de la semilla de *Jatropha* (kg / m²)

L1 = longitud promedio de semilla de *Jatropha* con cáscara

L2 = longitud promedio de semillas de *Jatropha* con cáscara

De acuerdo a los reportes que se tienen de las pruebas mecánicas realizadas a la semilla de *Jatropha curcas* L. se ha determinado que el valor de energía al punto de ruptura para la cáscara de semilla de JCL es de 99.33 N-mm.



2.7.2. Potencia necesaria para fracturar la semilla

La potencia necesaria para fracturar la semilla de *Jatropha curcas* L. se obtiene de igual forma de la ley de kick, adicionando el flujo másico de semillas a la formula.

$$H = \dot{m} K k f_c \text{Loge} \left(\frac{L1}{L2} \right)$$

Donde:

\dot{m} = Flujo másico de semillas de *Jatropha curcas* L.

E = energía requerida para descascarar una semilla

Kk = constante de Kick

fc = resistencia a la compresión de la semilla de *Jatropha* (kg / m²)

L1 = longitud promedio de semilla de *Jatropha* con cáscara

L2 = longitud promedio de semillas de *Jatropha* con cáscara

$$\text{flujo másico de semillas} = \dot{m} = 150 \frac{kg}{h}$$

$$\dot{m} = 150 \frac{kg}{h} \times \frac{1 h}{3600 s} = 0.0416 \frac{kg}{s}$$

$$E = 99.33 N mm \times \frac{1 m}{1000 mm} = 0.09933 N m = 0.09933 J$$

$$H = \dot{m} E = \left(0.0416 \frac{kg}{s} \right) (0.09933 J) = 0.0041 W = 4.1322 \times 10^{-3} W$$

Para el cálculo de la potencia real necesaria, es necesario dividir la potencia teórica entre la eficiencia de la máquina.

$$H_m = \frac{H}{\text{Eficiencia}} = \frac{4.1322 \times 10^{-3} W}{0.90} = 4.59 \times 10^{-3} W = 0.00459 W$$

Partiendo de esta potencia mínima necesaria para la fractura de las semillas, se calcula la potencia necesaria para el soplador.



2.7.3. Potencia del soplador

El proceso de separación se desarrolla por la diferencia de densidad de los depósitos y los bultos. Un flujo de aire es impulsado por un túnel e intercepta las partículas que caen del núcleo de la cáscara.

La potencia del ventilador está determinada por el consumo de energía más bajo y el flujo de aire mínimo necesario para separar las partículas. En este caso, se sabe que el flujo de aire crítico es de 9.8 m / s

La potencia requerida del ventilador se calcula mediante la siguiente formula:

$$Hf = (Pft)(Q)$$

Donde:

Hf =Potencia ideal requerida (W)

Pft =Presión estática del ventilador (Pa)

Q = flujo de aire $\left(\frac{m^3}{h}\right)$

Para este caso, se seleccionó el ventilador por medio de tablas del fabricante y tomando como parámetro el flujo de aire necesario para realizar la separación de cascara y núcleo

El caudal de aire se obtuvo a partir de los siguientes cálculos:

$$Q = (v)(A)$$

$$v = 10 \frac{m}{s} \times \frac{3600 s}{1 h} = 36000 \frac{m}{h}$$

$$A = \pi r^2 = (3.1416) \left(5 cm \frac{1 m}{100 cm}\right)^2 = 7.8539 \times 10^{-3} m^2$$

$$Q = \left(36000 \frac{m}{h}\right) (7.8539 \times 10^{-3} m^2) = 282.74 \frac{m^3}{h}$$

$$Q = 282.74 \frac{m^3}{h} \times \frac{(3.28)^3 ft^3}{1 m^3} \times \frac{1 h}{60 min} = 166.28 CFM$$

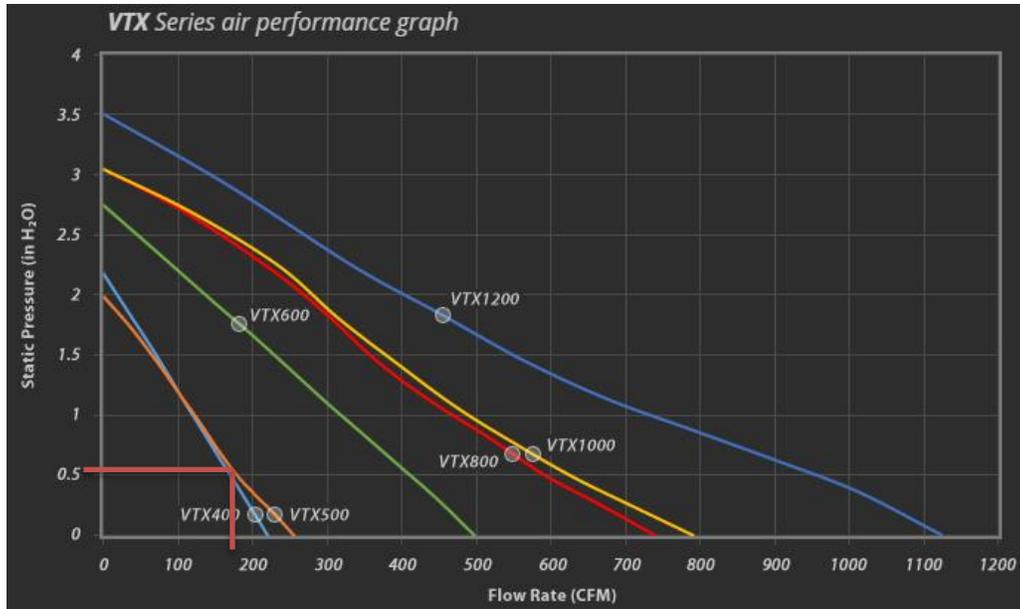


Figura 22.. Determinación del ángulo interno de fricción

Se selecciona el ventilador VTX 400 el cual cuenta con las siguientes características

Peso = 7.4 lb

RPM=2970 RPM

Voltaje= 120 Volts

Potencia requerida= 80 Watts

Flujo máximo de 220 CFM aproximadamente

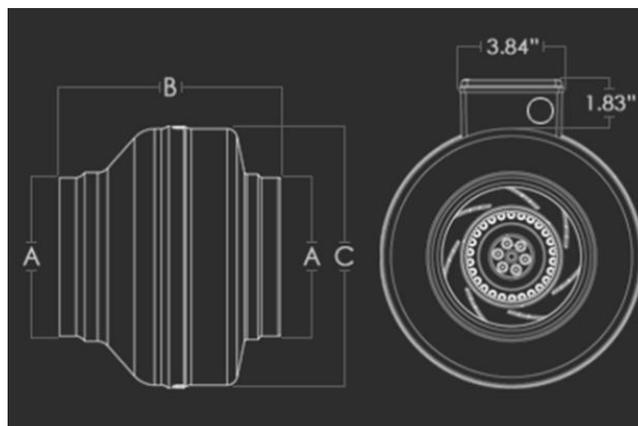


Figura 23. Soplador Vortex power fan

El diseño del ducto de flujo de aire para el mecanismo de separación de cáscara-núcleo se adapta del sistema implementado en un estudio de CFD. Para este mecanismo se propone una salida de aire rectangular en el que las cáscaras y los núcleos llegan a través de la tolva de alimentación del separador (a) y son separadas por medio del aire expulsado por el ventilador (b), el cual se transmite a lo largo del ducto. Este flujo de aire se inyecta con un ángulo de inclinación el cual permite expulsar las cáscaras en el ducto de salida (c) y desechar los núcleos para su recolección (d).

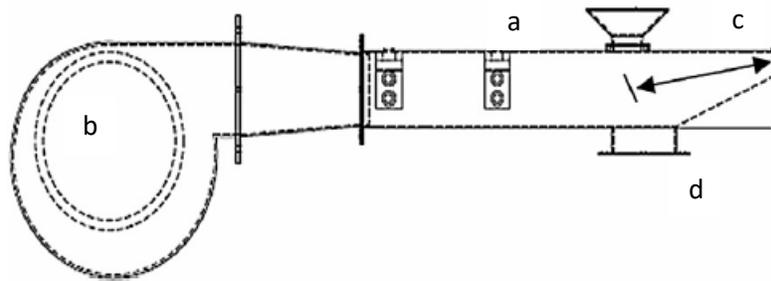


Figura 24. Configuración del mecanismo de separación cascara-núcleo; (a) entrada; (b) soplador; (c) salida de cáscaras; (d) salida de núcleos

Las fórmulas utilizadas para analizar y determinar el flujo de aire necesario para separar las cáscaras y núcleos se presentan a continuación

$$\text{Continuidad} \frac{\partial}{\partial t} (\alpha_p \rho_p) + \nabla \cdot (\alpha_p \rho_p \vec{v}_p)$$

$$\text{Momentum} \frac{\partial}{\partial t} (\alpha_p \rho_p \vec{v}_p) + \nabla \cdot (\alpha_p \rho_p \vec{v}_p \vec{v}_p)$$

$$\text{Fuerza de balance partícula} = F_D(u_{fluid} - u_p) + \frac{g_x(\rho_p - \rho_{fluid})}{\rho_p} + F_x + F_{interaction}$$

El análisis del CFD se centra en determinar cuál es la corriente de aire y adecuada para llevar a cabo la separación, por lo que es indispensable analizar el ducto de salida de aire del mecanismo y cuál es la eficiencia de separación. Para esto, se realiza el CFD con respecto a

la densidad de los núcleos y cáscaras (fig. 2) y a su tiempo de residencia dentro del proceso (fig 3) con una carga másica de 0.011 kg/h y una velocidad de caudal de entrada de 10 m/s, alcanzando eficiencias de separación del $99.55 \pm 0.23 \%$.

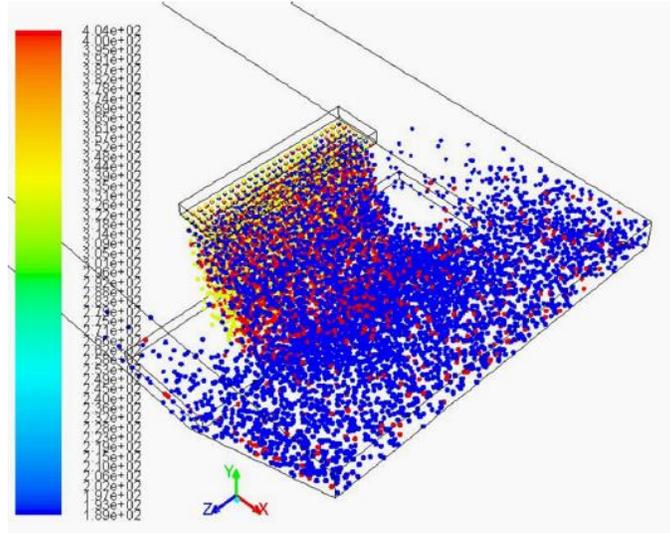


Figura 25. Análisis CFD con respecto a la densidad de los núcleos y cáscaras

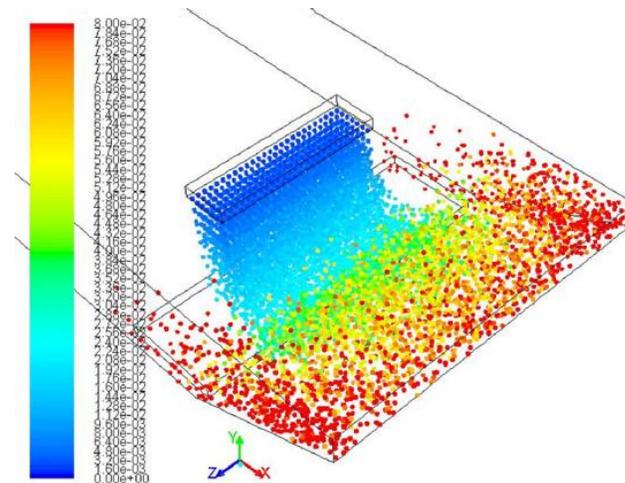


Figura 26. Análisis CFD con respecto al tiempo de residencia en el proceso

2.8. Desarrollo del mecanismo de extracción de aceite

2.8.1. Diseño de tolva de alimentación

Para el diseño de la tolva de alimentación del proceso de extracción mecánica de aceite se toman los mismos parámetros mostrados en el diseño de la tolva para el sistema de

descascarado ya que los núcleos de semilla se asemejan en sus propiedades mecánicas a las semillas con cáscara, así que la tolva se dimensiona bajo las mismas condiciones.

2.8.2. Diseño de doble tornillo sin fin

La extrusora de doble tornillo sin fin está diseñada por las ecuaciones de engranaje helicoidal. El engranaje helicoidal es un engranaje cilíndrico con una o más roscas que se asemeja a una rosca de tornillo. El ángulo de avance variará desde la raíz hasta el diámetro exterior del gusano y todo esto se calcula por medio de la nomenclatura general del tornillo sin fin, tal como se indica en la figura 13.

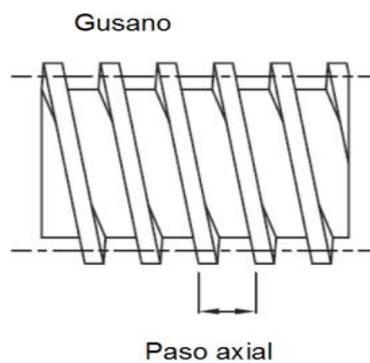


Figura 27. Nomenclatura general del tornillo sin fin (tomado de ANSI/ AGMA 6022)

El paso axial del gusano y el paso circular transversal de la rueda serán iguales para una configuración establecida de 90 ° El tornillo sin fin de gusano puede tener cualquier diámetro de paso, ya que esto no está relacionado con la cantidad de dientes.

La guía general para una capacidad de potencia óptima indica que el diámetro de paso (d) del gusano debe estar entre los siguientes rangos:

$$d = mN$$

$$\frac{C^{0.875}}{1.6} \leq d_{max} \leq \frac{C^{0.875}}{1.07}$$

Donde:

c = distancia central (mm),

d = diámetro de paso de gusano (mm),

d_{max} = diámetro máximo de paso de gusano (mm),

d_{min} = diámetro mínimo de paso de gusano (mm).



El diámetro de paso del tornillo sin fin (d_G), está relacionado por la distancia central C y el diámetro de paso del tornillo sin fin:

$$d_G = 2C - d_m$$

El addendum (a) y dedendum (b) están dados por:

$$a = (0.3183) (\text{longitud de paso})$$

$$b = (0.3683) (\text{longitud de paso})$$

El ancho mínimo de la cara, para un paso superior a 4,06 mm, está dado por:

$$FG = 0.67d$$

En la siguiente tabla incluye el número mínimo sugerido de dientes para el gusano según AGMA (ANSI/AGMA 6022):

Tabla 14. Número mínimo de dientes para el engrane para diferentes ángulos de presión

Ángulo de presión (°)	Nmin
14.5	40
17.5	27
20	21
22.5	17
25	14
27.5	12
30	10

La potencia de entrada del engrane (P_{input}), está dada por:

$$P_{input} = P_{output} + P_{loss}$$

Dónde:

P_{loss} = potencia perdida debido a la fricción (kW).



La potencia de salida está dada por:

$$P_{salida} = \frac{nW_{tg}d_g}{1.91 \times 10^7 m_G}$$

Donde:

n = velocidad de rotación del gusano (rpm)

W_{tg} = fuerza tangencial de engranaje helicoidal (N)

Poutput = potencia de salida (kW)

m_G = relación de transmisión

d_g = diámetro medio del engranaje (mm)

2.9. Simulación estática

Para la simulación estática de los elementos mecánicos diseñados, se esperan obtener valores de esfuerzo, elongación y deformación mecánica, así como el cálculo del factor de seguridad con el que se determinará el correcto funcionamiento del mecanismo sometido a cargas estáticas.

Para llevar a cabo la simulación en el software ANSYS Workbench, es necesario importar los elementos mecánicos dibujados con ayuda del software CATIA v5. Para esto, los dibujos son guardados en formato IGES y posteriormente se abren ANSYS Workbench como una geometría nueva a analizar.

En este trabajo se realizará la simulación de los rodetes compresores y del mecanismo de doble tornillo sin fin, ya que ambos mecanismos estarán sometidos a cargas de impacto, compresión, tensión, cortantes y momento torsional, además de que deben ser diseñados para su correcto funcionamiento a las cargas máximas sin tener riesgo a fallar por fatiga o fractura del material.

El análisis estático por medio de la teoría de fallas mecánicas permite analizar el funcionamiento de materiales dúctiles a medida que se somete a distintos tipos y magnitudes de cargas, con el fin de determinar valores de esfuerzos principales que indiquen un funcionamiento del elemento dentro de su límite elástico, evitando así la falla mecánica.



Particularmente, la simulación de los rodets y del doble tornillo sin fin se analizará por medio de la teoría de la energía de distorsión (criterio de Von Mises). Por medio de la ecuación de esfuerzo de Von Mises para un elemento tridimensional y de la resistencia a la fatiga del material seleccionado, se puede calcular el factor de seguridad del elemento mecánico (Budynas & Nisbett, 2008).

$$\sigma'_a = \sqrt{\sigma_{1a}^2 + \sigma_{2a}^2 + \sigma_{3a}^2 - \sigma_{1a}\sigma_{2a} - \sigma_{2a}\sigma_{3a} - \sigma_{1a}\sigma_{3a}}$$

$$N = \frac{S_n}{\sigma'_a}$$

Es así como se seleccionó el acero inoxidable AISI 316 como material de análisis debido a su grado alimenticio y a la necesidad de no contaminar los productos y subproductos resultantes de la extracción de aceite y fractura de cáscaras de semilla. El módulo elástico de este material es equivalente a 205 MPa.

El factor de seguridad a calcular es un indicador de la cantidad de veces que se podría aumentar la tensión máxima a la que se somete el elemento mecánico sin que se llegue al módulo elástico del material, asegurando que no se tengan deformaciones plásticas. Además de hallar el factor de seguridad para cada caso, se obtendrán magnitudes de elongación y deformación.

Para la solución, se define el mallado de la pieza, así como las diversas cargas y fuerzas que interactúan con los elementos a analizar, además de los apoyos para cada tipo de mecanismo, lo cual depende de los grados de libertad con los que cuenta cada pieza.

2.10. Métricas verdes

Con el fin de mostrar la cantidad de subproductos valorizables obtenidos en el proceso de descascarado y la posterior extracción de aceite, así como el beneficio energético obtenido a partir de estos y la reducción de residuos producidos, se realizó el cálculo de las métricas verdes y la tasa de retorno energético. Estos valores servirán como parámetro de medición e indicadores de la calidad y cantidad de los subproductos valorizables.

El diseño de este prototipo engloba algunos de los principios de la química verde como eje central, debido al impacto que tiene su utilización en la reducción del daño ambiental por el



uso de solventes químicos, empleo de fuentes renovables de energía y reducción de residuos.

Cinco de los doce principios de la química verde se aplican en este trabajo (Anastas & Eghbali, 2010):

- Prevención de residuos contaminantes.
- Eficiencia energética
- Reducción de solventes
- Uso de materias primas renovables.
- Síntesis química menos peligrosa.

Las fórmulas para el cálculo de las métricas verdes y de la tasa de retorno energético se presentan a continuación.

2.10.1. Eficiencia Másica de la Reacción (EMR)

$$\text{EMR} = (\text{Masa de productos}) (100\%) / (\text{Masa de reactivos})$$

2.10.2. Factor Ambiental (factor E)

$$\text{E-factor} = (\text{Masa de desechos}) (100\%) / (\text{masa de productos})$$

2.10.3. Intensidad Másica del Proceso (IMP)

$$\text{IMP} = (\text{Masa de entradas}) (100\%) / (\text{Masa de productos})$$

2.10.4. Tasa de Retorno Energético (TRE)

$$\text{TRE} = (\text{Energía obtenida}) (100\%) / (\text{Energía invertida})$$



Capítulo III: Análisis de resultados

3.1. Parámetros utilizados para el diseño de maquinaria

Para el diseño del prototipo, dibujo, simulación y selección de dispositivos auxiliares, es necesario parametrizar los mecanismos y conocer la composición bioquímica-mecánica de la semilla de JCL. Los parámetros seleccionados cumplen con la función de facilitar la adaptación de los elementos mecánicos, y dispositivos, a las necesidades específicas de la semilla de JCL, priorizando el menor consumo energético.

Por otra parte, la caracterización química de la semilla permite calcular teóricamente los flujos másicos de materia en los diferentes procesos, además de ser representativos para la potencial valorización energéticas de los subproductos obtenidos.

Tabla 15. Dimensiones obtenidas para las semillas de JCL con 6% de humedad

Longitud (mm)	Ancho (mm)	Espesor (mm)	Diámetro aritmético (mm)	Diámetro geométrico (mm)	Esfericidad (%)
19.08	10.63	8.45	12.98	12.33	64.64
19.01	10.79	8.58	13.08	12.42	65.48
19.04	10.55	8.22	12.94	12.28	64.49

Tabla 16. Propiedades mecánicas de la semilla de JCL con 6% de humedad

Parámetro	Unidad	Eje x	Eje y	Eje z
Fuerza de ruptura	N	99.6 ± 33.85	44.9 ± 14.26	89.5 ± 36.78
Dureza	N/mm	63.3 ± 16.39	71.3 ± 18.18	74.2 ± 34.90
Energía al punto de ruptura	N-mm	71.5 ± 36.85	19.2 ± 11.19	62.4 ± 30.75
Deformación al punto de ruptura	mm	1.6 ± 0.41	0.7 ± 0.23	1.3 ± 0.28
Radio de deformación al punto de ruptura	mm	0.09 ± 0.02	0.06 ± 0.02	0.15 ± 0.04



Tabla 17. Propiedades bioquímicas de la semilla de JCL con 6% de humedad

Parámetro	Magnitud	Unidades	Fuente
Grasas (lípidos)	54	%	(Vallarta, 2017)
Proteínas	26	%	(Vallarta, 2017)
Carbohidratos	3	%	(Vallarta, 2017)
Fibra	9	%	(Vallarta, 2017)
Aporte energético	1491	KJ	(Vallarta, 2017)
Composición de la semilla de JCL en porcentaje peso			
Cáscara	36.86	%	(Karaj et. al., 2010)
Núcleo	63.03	%	
Pasta proteica	50	%	
Aceite	50	%	
Composición de acidos grasos del aceite de semilla de JCL			
Palmítico	14.2	%	(Herak et. al., 2014)
Linoleico	32.8	%	
Linolenico	0.2	%	
Oleico	44.7	%	
Esteárico	7	%	
Poder calorífico de la semilla de JCL			
Semilla completa de JCL	20.85	MJ/Kg	(Garnayak et. al., 2008)
Cáscara	18.2	MJ/Kg	
Pasta proteica	19.11	MJ/Kg	
Aceite	39.6	MJ/Kg	

De los cálculos realizados para el dimensionamiento de ambas tolvas de alimentación, los parámetros tomados de literatura son provenientes de los ensayos mecánicos relacionados al ángulo de fricción. La Tabla 18 presenta dichas magnitudes.

Tabla 18. Parámetros seleccionados para el cálculo y diseño de la tolva de alimentación

Parámetro	Magnitud	Unidades
Ángulo de fricción interna	12.4°	-
Ángulo de fricción con la pared de la tolva	70°	-
Ángulo máximo de inclinación	30°	-
Factor de flujo	1.21	-
Altura de la tolva	86	cm
Diámetro superior	100	cm
Diámetro inferior	7.6	cm
Volumen	0.8423	m ³
Presión en las paredes	8.46	Kpa



Los rodetes mecánicos se parametrizaron con base a los mecanismos de mayor eficiencia en el descascarado, así como la separación óptima entre rodetes de 7mm. La Tabla 19 presenta las dimensiones seleccionadas para el diseño de los rodetes compresores de este prototipo.

Tabla 19. Parámetros seleccionados para el diseño del mecanismo de rodetes compresores

Parámetro	Magnitud	Unidades
Diámetro del rodete dinámico	300	mm
Espesor del rodete dinámico	40	mm
Potencia del rodete dinámico	459	Watts
Diámetro del rodete dinámico	300	mm
Espesor del rodete dinámico	40	mm

Para el caso de la máquina extractora de aceite, el mecanismo de doble tornillo sin fin es el elemento con el cual se trabaja principalmente bajo parámetros. El cálculo del engrane parte de las magnitudes presentadas en la Tabla 20.

Tabla 20. Parámetros seleccionados para el cálculo y diseño del mecanismo de extracción de aceite

Parámetro	Magnitud	Unidades
Flujo másico de núcleos	94.5	Kg/h
Velocidad angular del tornillo sin fin	60	RPM
Longitud del paso inverso entre dientes del tornillo	25	Mm
Paso del tornillo	16	Mm
Tamaño de partícula del filtro	500	µm
Temperatura del proceso	80	°C
Energía mecánica específica del doble tornillo sin fin	33.5	W-h/Kg

Los flujos másicos de insumos se calculan teóricamente a partir de los resultados de la composición química de la semilla de JCL. La Tabla 21 presenta los flujos másicos de productos, reactivos y desechos generados a través del proceso, además de los valores energéticos de entrada y salida.



Se tiene una eficiencia en el proceso de descascarado del 95% y de extracción de aceite del 90%. Con estos porcentajes de eficiencia es que se obtiene un valor teórico de productos y subproductos finales obtenidos.

En el caso de los consumos energéticos, estos se convirtieron de valores de consumo eléctrico a energía en Joules. Esto se hace para homogenizar las unidades del consumo eléctrico y las del poder calorífico superior de los productos y subproductos obtenidos, permitiendo la realización del balance de energía para el cálculo de la TRE.

Tabla 21. Flujos mássicos y energéticos del proceso global de descascarado y extracción mecánica de aceite

Parámetro	Magnitud	Unidades
Flujo mássico de semilla a tratar por la maquinaria		
Semilla completa de JCL	150	Kg/h
Cáscara	55.29	Kg/h
Núcleo	94.55	Kg/h
Pasta proteica	42.27	Kg/h
Aceite	42.27	Kg/h
Masa de producto y desechos		
Producto	138	Kg
Desecho	12.22	Kg
Poder calorífico de la semilla de JCL		
Semilla completa de JCL	3127.5	MJ
Cáscara	955.96	MJ
Pasta proteica	813.03	MJ
Aceite	1684.79	MJ
Consumo energético de maquinaria		
Descascaradora	0.288	MJ
Expeller	10.83	MJ

3.2. Dibujos y planos mecánicos de los elementos diseñados

Con los parámetros y cálculos realizados para cada elemento mecánico se obtuvieron los dibujos mecánicos de cada pieza para su posterior ensamble. El proceso de dibujo se llevó a cabo con el software CATIA V5.

De la misma forma, la realización de planos por medio de normativa ASME se hizo con ayuda del software CATIA V5.

3.2.1. Dibujos mecánicos y planos de la tolva de alimentación

La tolva de alimentación dimensionada para el proceso de descascarado se utilizará igualmente para la alimentación del proceso de extracción de aceite. Esto se debe a que las propiedades de flujo de los núcleos de semilla de JCL son muy similares a las de la semilla completa.

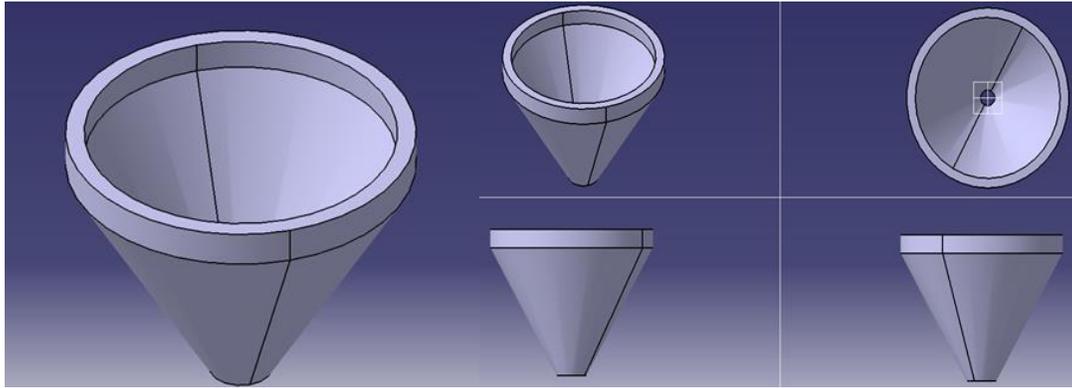


Figura 28. Vistas del dibujo mecánico de la tolva de alimentación (realizado en Catia V5)

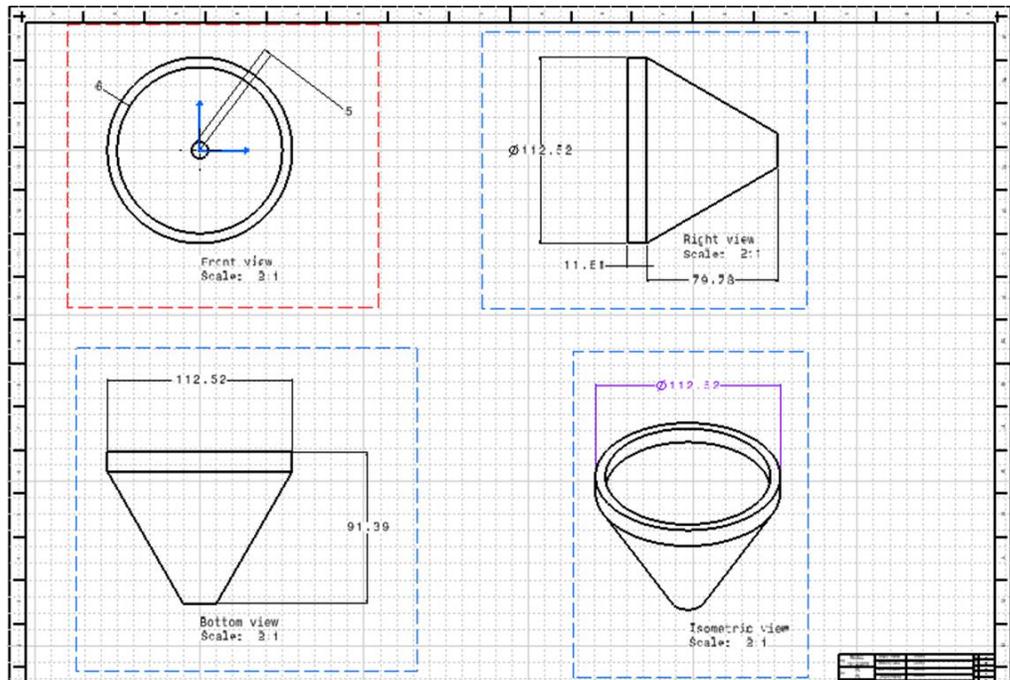


Figura 29. Plano mecánico de tolva de alimentación (ASME US Standard)

3.2.2. Rampa de deslizamiento

La rampa de deslizamiento de las semillas, en el proceso de descascarado, se ajustó a la salida de la tolva de alimentación y al largo e inclinación con el cual se realizó el cálculo previo.

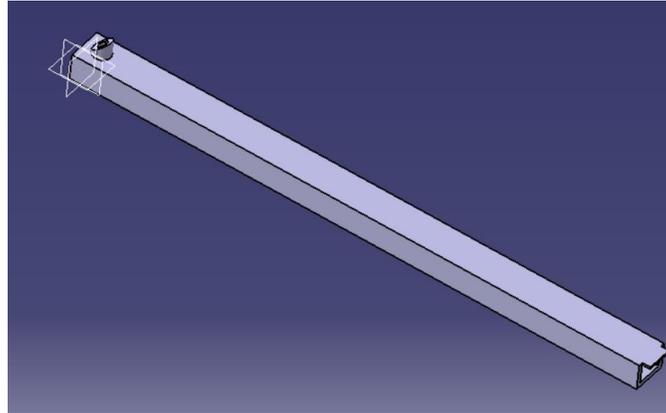


Figura 30. Dibujo mecánico de rampa de deslizamiento (realizado en Catia V5)

3.2.3. Tambores compresores para el descascarado

Los dibujos realizados para ambos rodetes son similares en cuanto a dimensiones. La diferencia principal se encuentra en el ajuste que se realizó para el rodete estático, al cual se le agregaron 4 ranuras para su fijación por medio de tornillos.

En contra parte, el rodete dinámico se dibujó y diseño con un ajuste de cuña al sistema de transmisión de potencia del motor que alimenta al soplador.

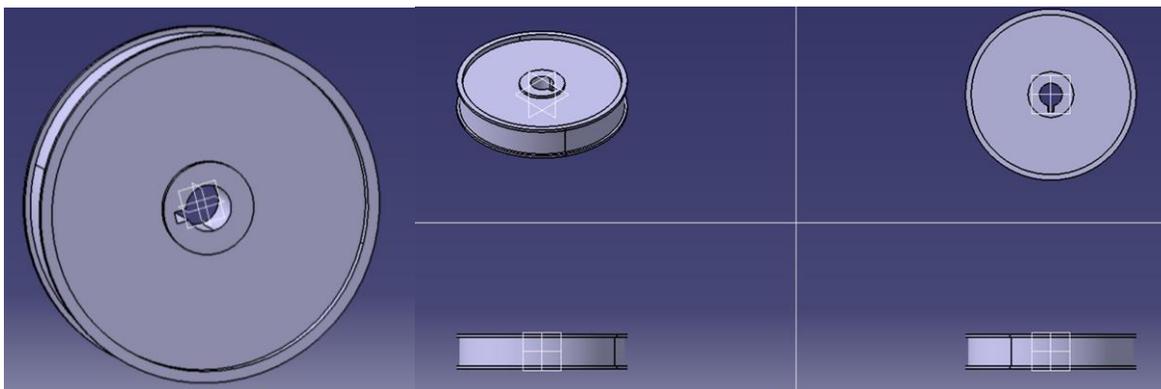


Figura 31. Vistas del dibujo mecánico de rodete compresor dinámico (realizado en Catia V5)

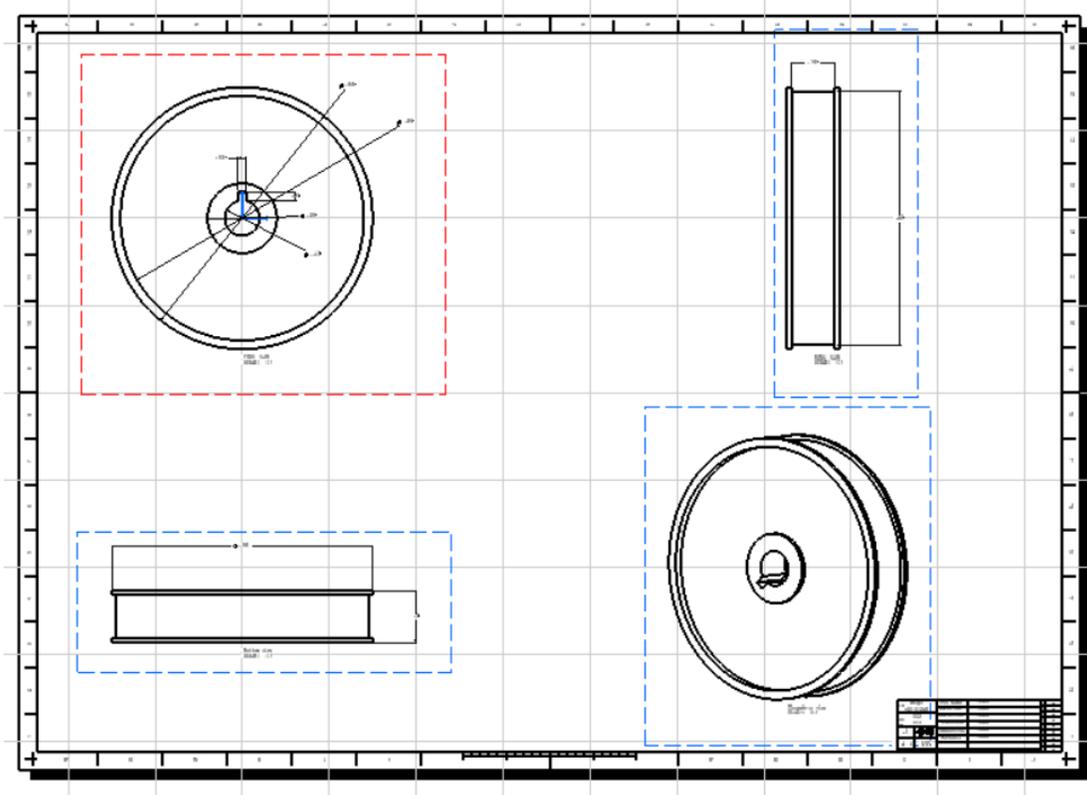


Figura 32. Plano mecánico de rodete compresor dinámico (ASME US Standard)

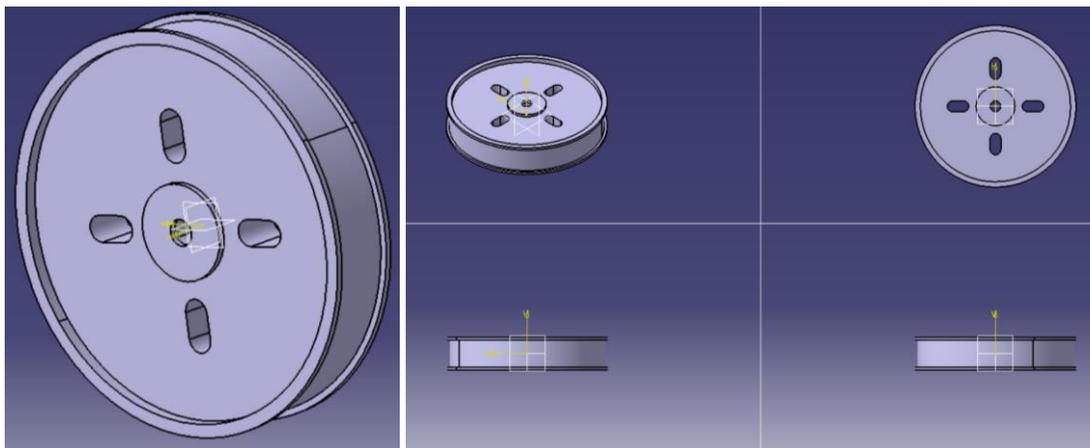


Figura 33. Vistas de dibujo mecánico del rodete compresor estático (realizado en Catia V5)

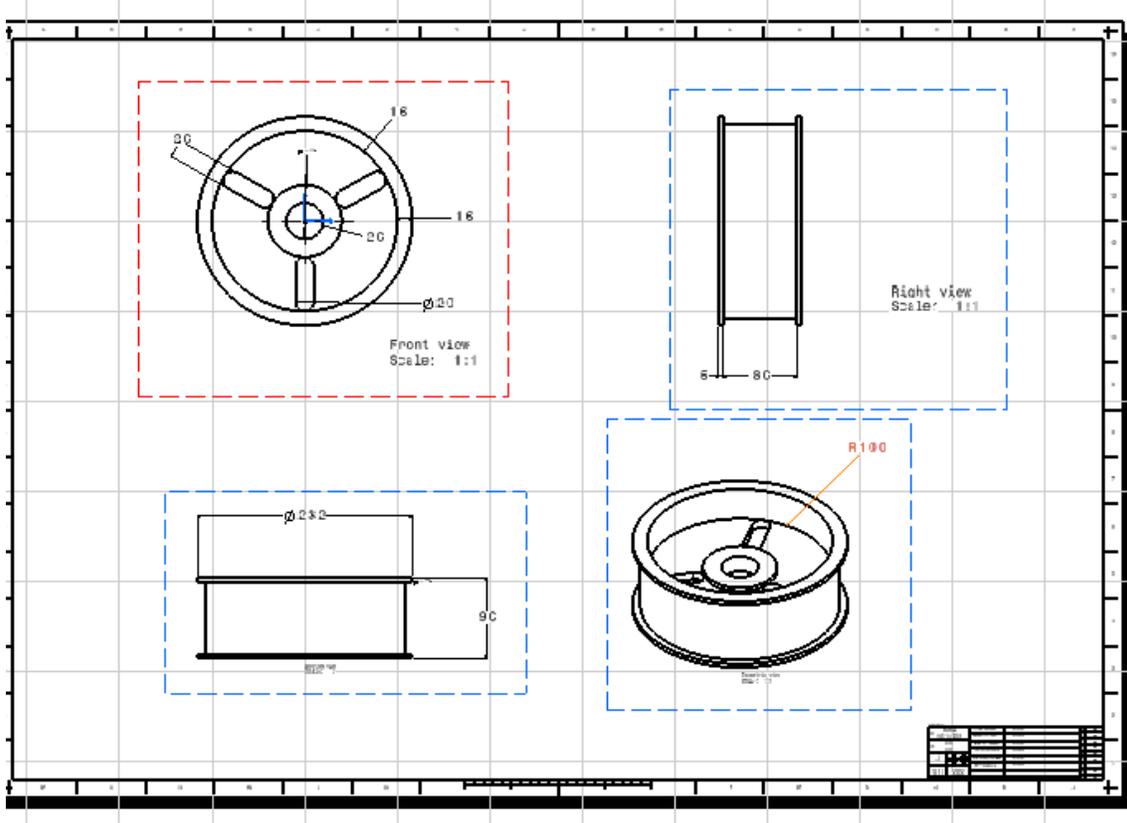


Figura 34. Plano mecánico de rodete compresor estático (ASME US Standard)

3.2.4. Soplador y ducto de aire

Los parámetros de diseño del ducto de aire tuvieron que ser ajustados a las características específicas de la salida de ventilador seleccionado.

De esta forma, fue necesario realizar el dibujo mecánico de los acoples para el ducto de aire.

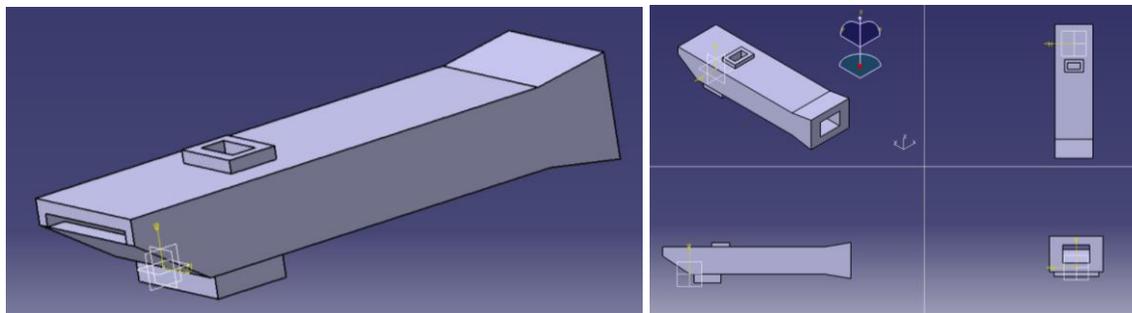


Figura 35. Vistas del dibujo mecánico del ducto de aire (realizado en Catia V5)

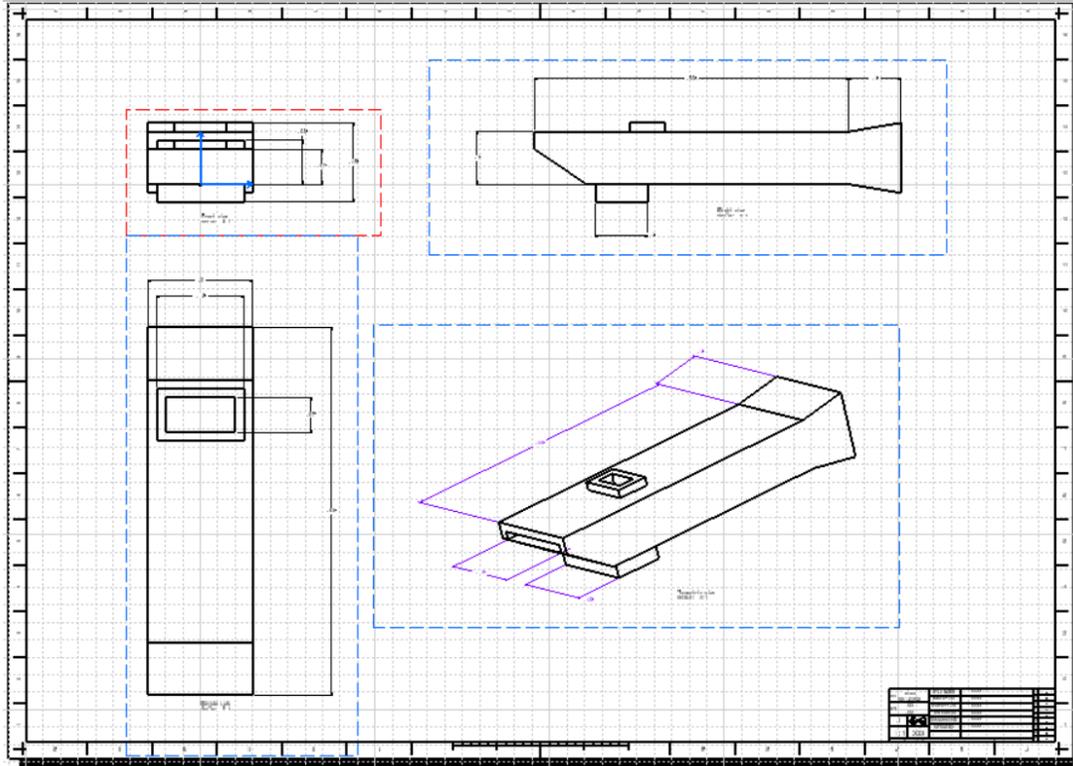


Figura 36. Dibujo mecánico del ducto de aire (ASME US standard)

En el caso del soplador, se tomaron como referencia las dimensiones del fabricante para el ventilador y su salida, por lo que se presentan los dibujos correspondientes al cuerpo del soplador. Con esto, se puede corroborar el correcto ensamble del ducto de aire con la salida del aire.

Además de la salida del soplador y del eje del ventilador, se dibujó también el soporte del ventilador y un motor para completar así el mecanismo.

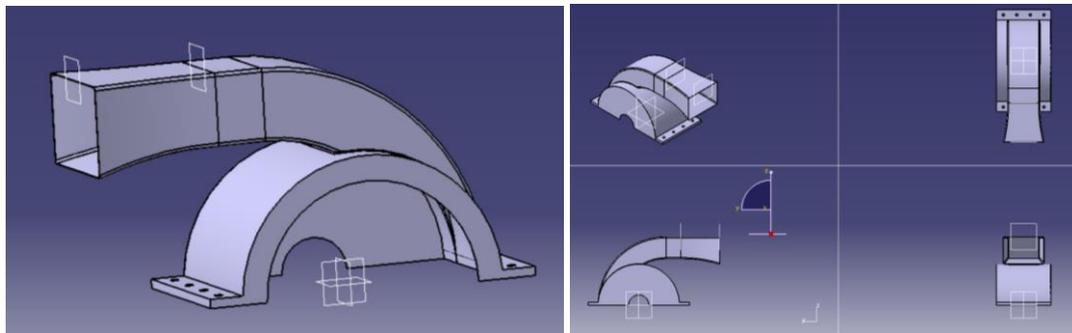


Figura 37. Vistas del dibujo mecánico del aditamento para el ducto de aire del soplador (realizado en Catia V5)

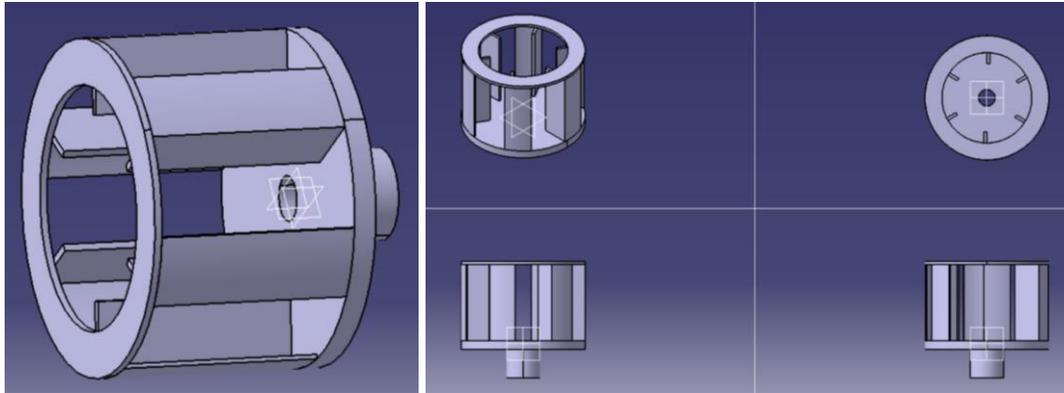


Figura 38. Vistas del dibujo mecánico del soplador (realizado en Catia V5)

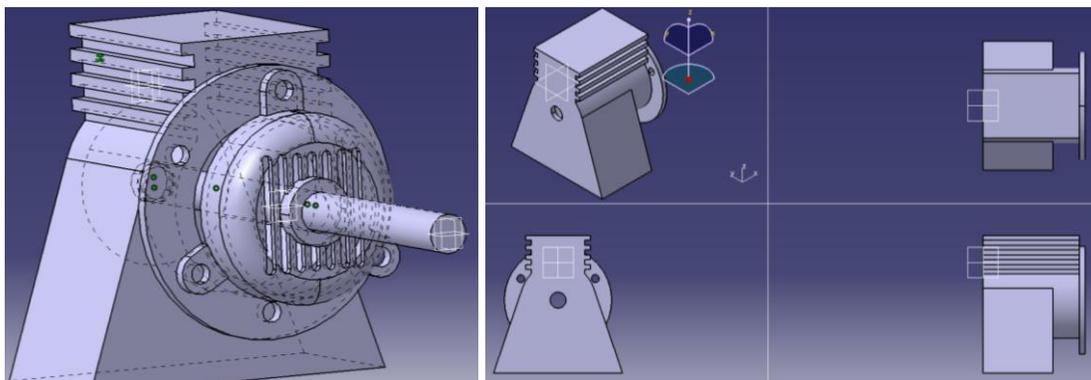


Figura 39. Vistas del dibujo mecánico del motor acoplado para el soplador (realizado en Catia V5)

3.2.5. Mecanismo de doble tornillo sin fin para extracción de aceite

El mecanismo de doble tornillo sin fin, seleccionado para la extracción de aceite, se dibujó y diseñó a partir de los resultados obtenidos del cálculo y parametrización del elemento.

Se realizaron dos tornillos sin fin con las mismas características y medidas, pero con la diferencia en el tipo de apoyo al cual se ajusta ya que un engrane será dinámico y el otro estático.

Dadas las características del tornillo sin fin, y al ser idénticos en cuanto a dimensiones los tornillos para el mecanismo extruder, la Figura 40 y la Figura 41 muestran las vistas del dibujo mecánico y de los planos realizados para uno de los tornillos sin fin, lo cual sirve para representar el diseño de ambos tornillos.

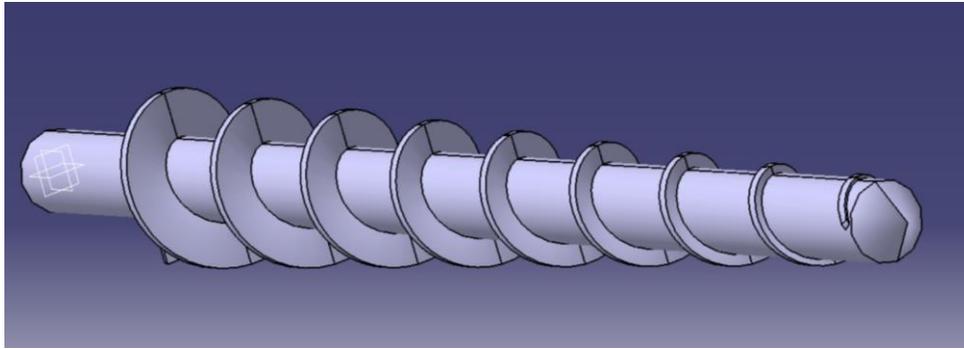


Figura 40. Vista isométrica del dibujo mecánico del tornillo sin fin para la extracción de aceite (realizado en Catia V5)

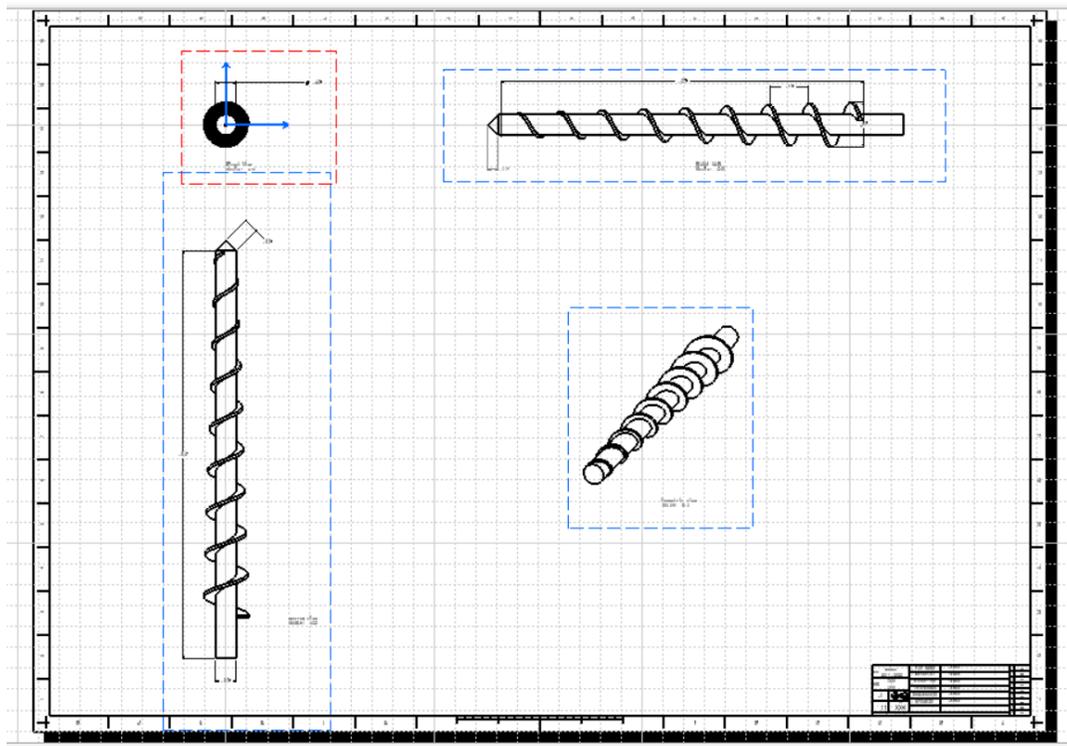


Figura 41. Planos tornillo sin fin extractor de aceite (ASME US Standard)

Además del tornillo sin fin, el mecanismo de extracción se compone también del barril de recolección de aceite que se ensamblará posteriormente al mecanismo de doble tornillo sin fin.

3.3. Ensamble de los elementos mecánicos

Por medio del software CATIA V5, se realizó el ensamble de los elementos mecánicos que dan forma a la maquinaria diseñada, tanto para el descascarado como para la extracción de aceite.

Mediante esta herramienta se puede observar que el encaje de las piezas diseñadas sea correcto y que las dimensiones seleccionadas coinciden con las calculadas teóricamente.

3.3.1. Ensamble del soplador

El soplador se ensambló con el motor diseñado para este mismo, al igual que la carcasa de acople con el ducto de aire. Fue necesario también el realizar el dibujo y montaje de un eje, con el cual se transmite potencia desde el motor hacía el soplador.

La Figura 41 muestra el ensamble final del arreglo seleccionado para el soplador. Este ensamble será utilizado posteriormente para ser acoplado al diseño del ducto de aire.

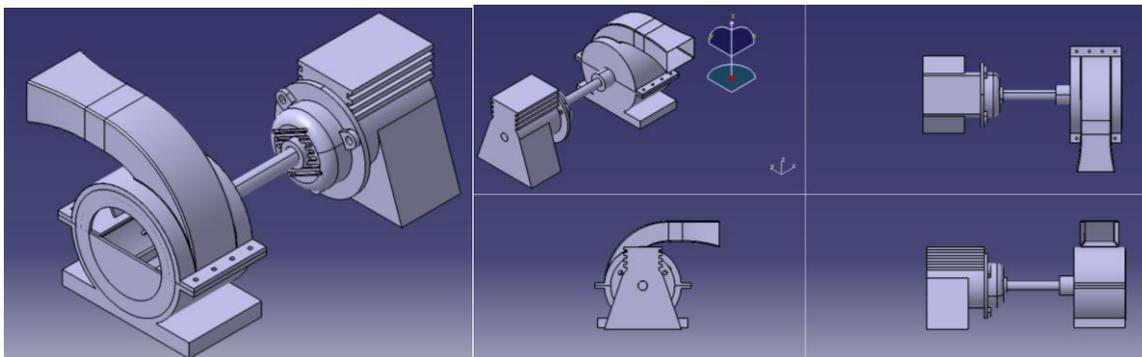


Figura 42. Vistas del ensamble mecánico del soplador y el motor (realizado en Catia V5)

3.3.2. Ensamble de la máquina descascaradora

La máquina descascaradora se ensambló una vez se tenían listos todos los mecanismos. Las vistas del ensamble se muestran en la Figura 43y Figura 44. La Figura 45 muestra el ensamble del mecanismo con las carcasas y base sobrepuestas para una mejor apreciación de los mecanismos.

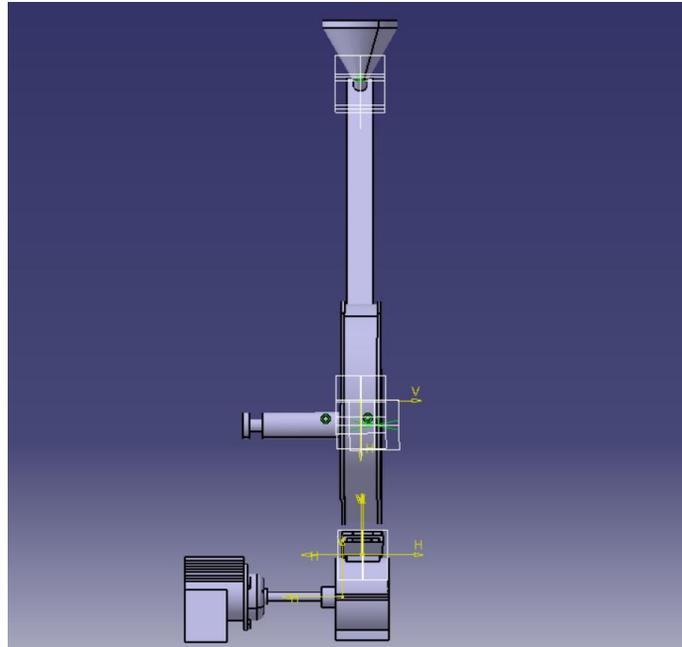


Figura 43. Vista frontal del ensamble de la máquina de descascarado (realizado en Catia V5)

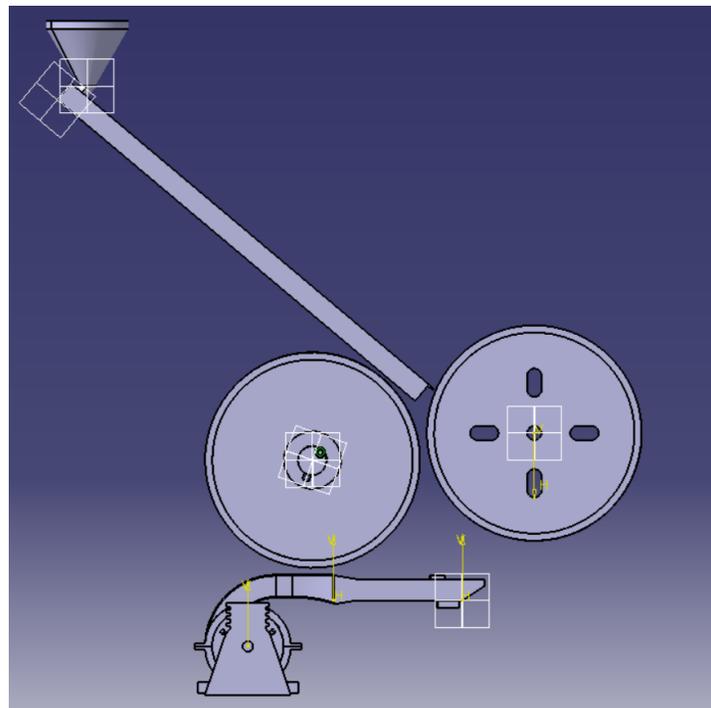


Figura 44. Vista lateral del ensamble de la máquina de descascarado (realizado en Catia V5)

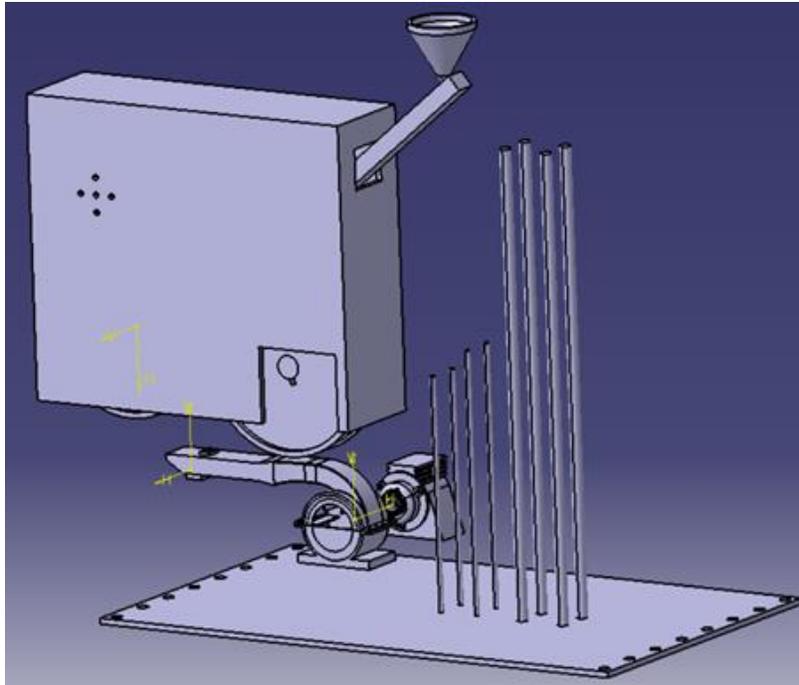


Figura 45. Vista isométrica del ensamble de la máquina de descascarado, con carcasas y base sobrepuestas (realizado en Catia V5)

El ensamble de las piezas permite observar que la maquina descascaradora se ajusta al diseño esperado en un inicio, con la inclusión además de los ensambles realizados para el sistema motriz, los ejes de transmisión de potencia y del ducto de aire para la separación.

3.3.3 Ensamble de la máquina extractora de aceite

Para el ensamble de la máquina extractora de aceite se utilizaron los elementos diseñados para el doble tornillo sin fin. Se ensamblaron con una separación entre engranes de 2mm y ajustando un eje al sistema de transmisión de potencia. La Figura 46 muestra el ensamble principal del doble tornillo sin fin.

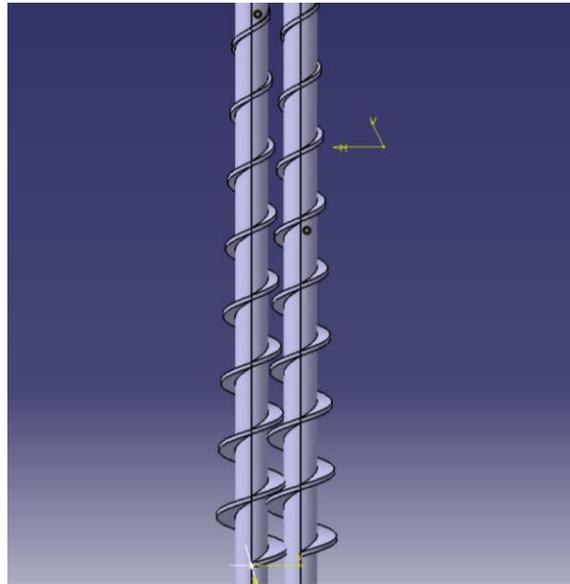


Figura 46. Vista superior del mecanismo de doble tornillo sin fin (realizado en Catia V5)

La figura 47 muestra en ensamble completo de la máquina con su acople al motor y la tolva de alimentación.

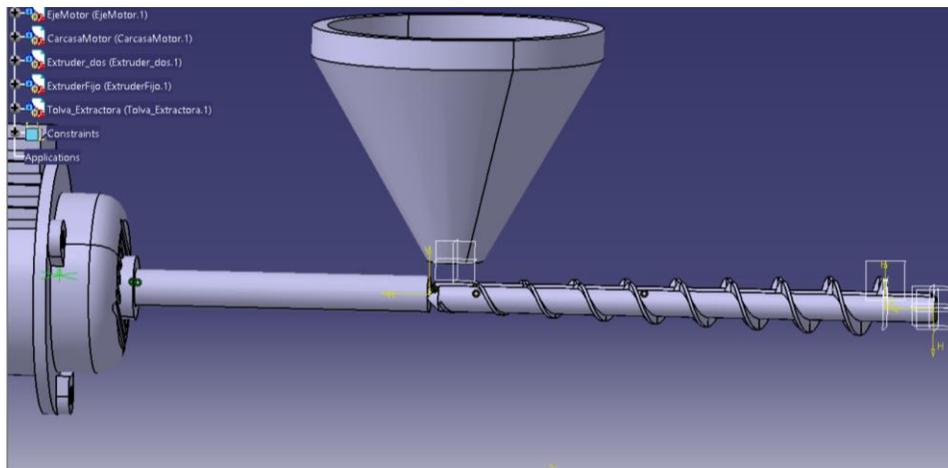


Figura 47. Ensamble mecánico del mecanismo de extracción de aceite (realizado en Catia V5)

Finalmente, la figura 48 muestra el acople final del mecanismo de extracción de aceite con carcavas y bases sobrepuestas para una mejor visualización de las piezas.

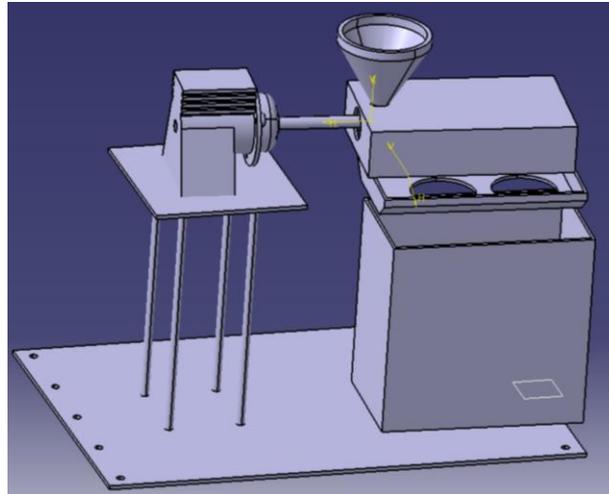


Figura 48. Ensamble mecánico del mecanismo de extracción de aceite con carcasas y base sobrepuestas (realizado en CATIA V5)

3.4. Resultados de la simulación estática

3.4.1. Simulación estática de los rodetes compresores

Para la simulación del rodete compresor dinámico, se ajustó la pieza a un apoyo de eje cilíndrico que permitiese el libre accionar de la pieza en su movimiento rotatorio a través del eje de acople con el motor.

Las cargas mecánicas se aplicaron a lo largo de todo el rodete y éstas son equivalentes a el esfuerzo requerido para la fractura de la cascara de semilla de JCL (110 N-mm). Se incluyó una fuerza de reacción debido al torque aplicado por eje. La velocidad de giro seleccionada fue de 300 rpm.

La Figura 49 presenta los resultados del mallado, deformación, elongación y esfuerzo de Von Mises. Se puede observar que la tensión máxima a la que es sometido el elemento se encuentra en la circunferencia exterior del rodete, siendo muy uniforme la carga y la deformación de la pieza.

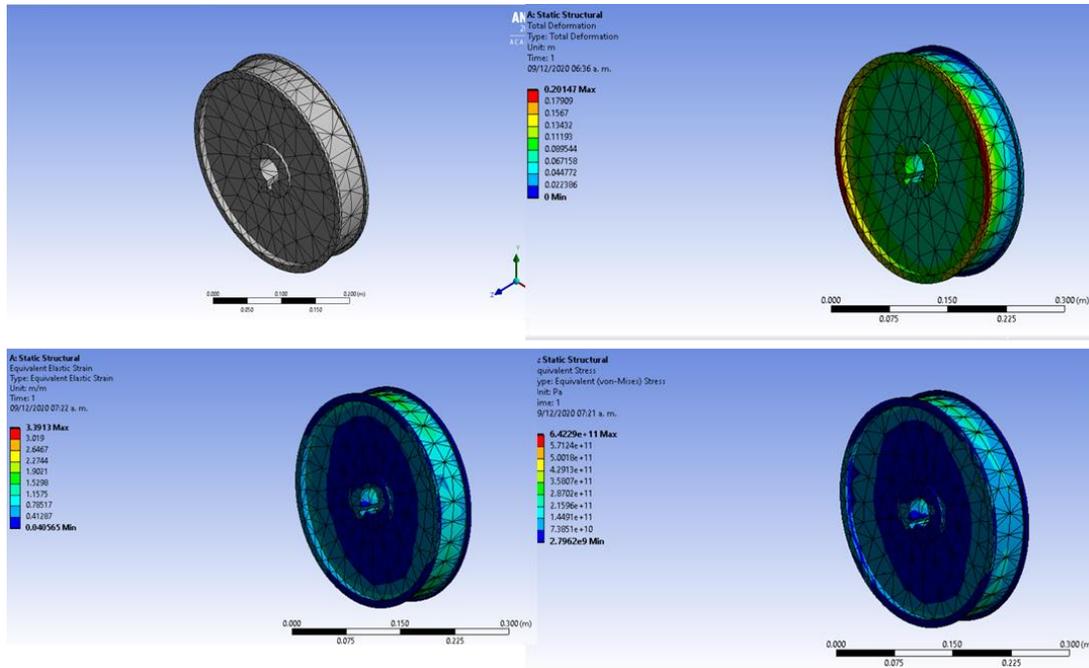


Figura 49. Mallado del rodete dinámico y resultados de la simulación (Realizado en ANSYS Workbench 2020 R2)

La tabla 22 muestra los resultados numéricos de esfuerzo y deformación mecánica obtenidos de la simulación estática.

Tabla 22. Resultados obtenidos de la simulación para el rodete dinámico

Rodete dinámico			
Resultado		Magnitud	Unidades
Deformación	Mínimo	0	m
	Máximo	0.2014	m
Esfuerzo (von Mises)	Mínimo	2.79	Mpa
	Máximo	6.42	Mpa
Elongación	Mínimo	0.04	m/m
	Máximo	3.39	m/m

Con estos resultados es posible calcular el factor de seguridad para este elemento

$$N = \frac{S_y}{\sigma'} = \frac{205 \text{ Mpa}}{6.42 \text{ Mpa}} = 32$$

Este factor de seguridad indica que las cargas máximas a las cuales es sometida la pieza tendrían que aumentarse 32 veces antes de que el material pudiese fallar por deformación plástica y posterior fractura o fatiga. Incluso en las zonas de la pieza en las que la simulación muestra la mayor concentración de esfuerzo no se tendría fallas mecánicas ya

que estos esfuerzos máximos son muy pequeños en comparación con el módulo elástico del material.

Para el rodete compresor estático, este se fijó para restringir su movimiento. A las 5 ranuras realizadas para su ajuste se les aplicó un soporte que simulara la reacción generada por tornillos de fijación, con lo que no se permitió el movimiento rotacional de la pieza.

Las cargas aplicadas fueron similares a las que se aplicaron al rodete dinámico, con la excepción de que en este caso no se agregó un giro tangencial para el rodete.

En la Figura 50 se muestran los resultados obtenidos para la simulación estática del rodete fijo, observándose que los esfuerzos resultantes se distribuyen de manera muy uniforme a lo largo de las piezas, así como la deformación y elongación.

El esfuerzo máximo se alcanza en el centro del rodete, lo cual se esperaba debido a que en esa zona es donde se lleva a cabo la fractura de las cáscaras de la semilla.

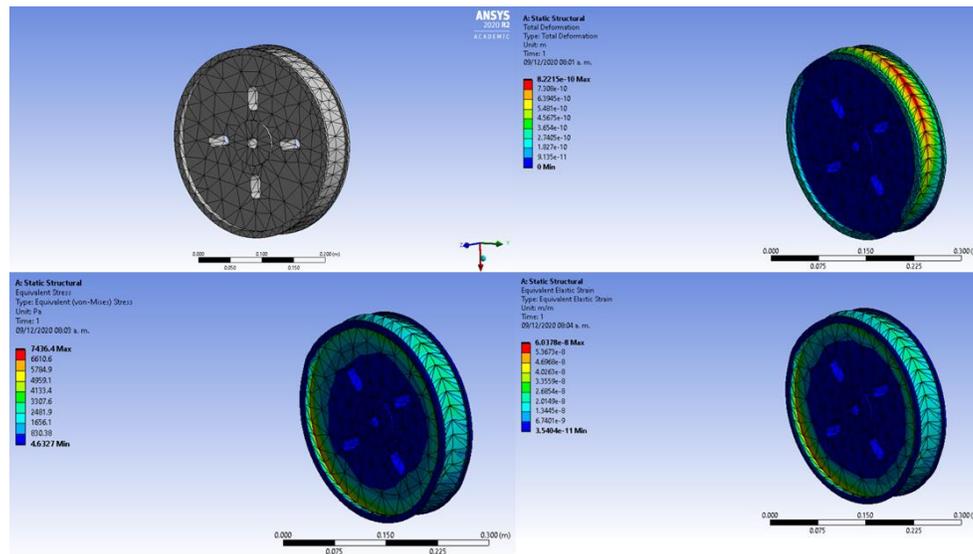


Figura 50. Mallado del rodete estático y resultados de la simulación (Realizado en ANSYS Workbench 2020 R2)

La Tabla 23 muestra los resultados numéricos de esfuerzo y deformación mecánica obtenidos de la simulación estática.



Tabla 23. Resultados obtenidos de la simulación para el rodete estático

Rodete estático			
Resultado		Magnitud	Unidades
Deformación	Mínimo	0	m
	Máximo	8.22×10^{-6}	m
Esfuerzo (von Misses)	Mínimo	0.463	MPa
	Máximo	0.743	Mpa
Elongación	Mínimo	3.54×10^{-7}	m/m
	Máximo	6.03×10^{-5}	m/m

El cálculo del factor de seguridad se muestra a continuación:

$$N = \frac{S_y}{\sigma'} = \frac{205 \text{ Mpa}}{0.743 \text{ Mpa}} = 272$$

De acuerdo con el factor de seguridad obtenido, se puede determinar que la carga a la cual es sometido el rodete es mínima y solo se reduce al impacto y fuerza aplicada por la cáscara de la semilla. No se observa que en las ranuras de fijación se pudiese tener algún tipo de falla, aun siendo estos un concentrador de esfuerzos.

Esta diferencia sustancial entre el factor de seguridad del rodete estático y del rodete dinámico se atribuye entonces al momento torsional generado por el eje motriz del motor y no a la carga generada por las semillas completas durante la fractura de su cáscara.

Es claro que la carga máxima a soportar por el elemento mecánico sin sufrir deformación es muy elevada si se compara con la carga a la que se somete por el descascarillado por lo que se podría pensar en la selección de un nuevo material de diferentes características y que minimice los costos para su manufactura pero se selecciona el acero inoxidable AISI 316 debido a que se prioriza el potencial uso alimenticio o agrícola de las cáscaras, así como la pureza de los núcleos al pasar a la siguiente etapa de extracción.

3.4.2. Simulación estática del doble tornillo sin fin

En el caso del tornillo sin fin del mecanismo de extracción de aceite, este se ajustó a un soporte cilíndrico que le permitiera el movimiento rotacional sobre el eje de acople del motor, restringiendo únicamente su desplazamiento lateral y se agregó una reacción adicional proveniente del apoyo que se tendría con la chumacera que soporta al engrande en el extremo contrario al ensamble con el eje de potencia del motor.

Las cargas aplicadas al engrane fueron de presión a lo largo de todos los dientes del engrane, lo cual representaría la compresión de los núcleos para la extracción de aceite, además de fuerzas equivalentes a la reacción de compresión en cada diente y finalmente de una carga total sobre el eje dentado que es representativa del peso total de las semillas en el momento de mayor flujo másico de núcleos. Los apoyos seleccionados fueron de una sola reacción normal ya que se apoya el tornillo en dos chumaceras. Finalmente, se agregó una velocidad tangencial de 60 rpm.

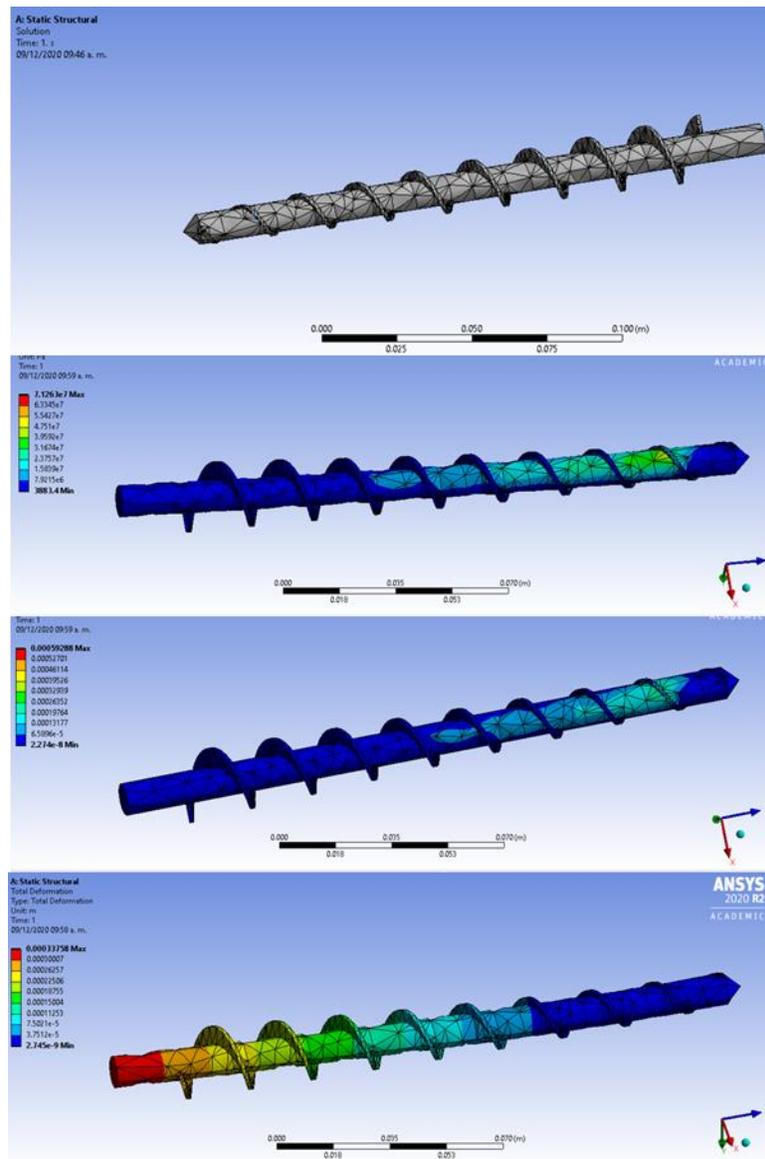


Figura 51. Mallado del tornillo sin fin y resultados de la simulación (Realizado en ANSYS Workbench 2020 R2)



De acuerdo con los resultados mostrados en la Figura 51 se puede determinar que el mayor esfuerzo generado en el elemento proviene del par torsional que se aplica desde el eje del motor, pero la deformación y elongación de la pieza se concentra principalmente en el final del tornillo ya que en este punto se encuentra la mayor cantidad de pasta por área de contacto del diente.

La Tabla 24 muestra los resultados numéricos de esfuerzo y deformación mecánica obtenidos de la simulación estática.

Tabla 24. Resultados obtenidos de la simulación para el doble tornillo sin fin

Extruder			
Resultado		Magnitud	Unidades
Deformación	Mínimo	0	m
	Máximo	3×10^{-4}	m
Esfuerzo (von Misses)	Mínimo	3.88	KPa
	Máximo	7.12	Mpa
Elongación	Mínimo	2.27×10^{-8}	m/m
	Máximo	5.9×10^{-4}	m/m

El factor de seguridad calculado con los resultados obtenidos de la simulación se muestra a continuación:

$$N = \frac{S_y}{\sigma'} = \frac{205 \text{ Mpa}}{7.12 \text{ Mpa}} = 28.79$$

Este factor de seguridad se asemeja a el valor obtenido para el rodete dinámico y se relaciona a la potencia transmitida por el eje del motor hacia el engrane. La elongación y deformación del engrane se da principalmente sobre el eje y no sobre los dientes del engrane, siendo esto un resultado que asegura el funcionamiento adecuado del elemento y que no interfiere con la separación seleccionada entre ambos ejes.

Analizando al engrane como una viga, la flexión del eje debida al peso ejercido por los núcleos es mínima y puede considerarse despreciable.

3.5. Resultados de las métricas verdes

Los resultados de las métricas verdes se obtuvieron a partir del cálculo de las fórmulas correspondientes. Los flujos máxicos y consumos energéticos se tomaron de los resultados



obtenidos a partir de la caracterización química de la semilla y del balance de materia realizado con las eficiencias de descascarado y extracción.

Los resultados se presentan a continuación:

3.5.1. Eficiencia Másica de la Reacción (EMR)

$$\frac{(Masa\ de\ productos)(100\%)}{Masa\ de\ reactivos} = \frac{(138\ Kg)(100\%)}{150\ Kg} = 91.74\%$$

La eficiencia másica de la reacción indica que el 91 por ciento del total de semillas ingresadas al proceso se convierten en productos valorizables.

3.5.2. Intensidad Másica del Proceso (IMP)

$$\frac{Masa\ de\ entradas}{Masa\ de\ productos} = \frac{150\ Kg}{138\ Kg} = 1.09$$

La intensidad másica del proceso indica que la relación de materias primas y productos obtenidos es muy cercana a una relación de 1 a 1. Por cada 1.09 Kg de semilla se obtiene 1Kg de productos valorizables.

3.5.3. Factor Ambiental (E-Factor)

$$\frac{Masa\ de\ desechos}{Masa\ de\ productos} = \frac{12.22}{138} = 0.08$$

Para el factor ambiental se trata de resaltar la cantidad de desechos generados por la cantidad total de productos obtenidos. Para el caso del prototipo, se generan 0.08 Kg de desechos por cada Kilogramo de producto obtenido.

3.5.4. Tasa de Retorno Energético

$$\frac{(Energía\ obtenida)(100\%)}{Energía\ invertida} = \frac{3453.79\ MJ}{3138.62\ MJ} = 1.1004$$



De acuerdo con el balance de materia realizado para obtener los valores de energía invertida y energía obtenida, se realizó el cálculo de la tasa de retorno energético del prototipo. Se obtiene que por cada MJ invertido en el sistema se obtendrá 1.1 MJ de energía de acuerdo con los productos y subproductos generados.



Conclusiones

A partir de los resultados obtenidos en el trabajo se concluye que:

- Mediante el diseño adaptativo se pueden parametrizar diversas variables mecánicas y propiedades de la semilla de JCL que influyen tanto en la eficiencia final del proceso de extracción y descascarado, como en las características finales de los productos y subproductos obtenidos. La caracterización mecánica y bioquímica de las semillas de JCL es de suma importancia para el correcto diseño e implementación de los elementos mecánicos pues de esto dependen las dimensiones y consumos energéticos de la maquinaria.
- Las dimensiones físicas y características químicas de la semilla de JCL del estado de Morelos coinciden, en general, con lo reportado en literatura, por lo que se toman los promedios de las magnitudes de las propiedades mecánicas como válidas para este trabajo. Los ensayos de materiales necesarios para caracterizar las propiedades mecánicas y de flujo de las semillas de JCL son un punto importante para corroborar los valores utilizados y para un dimensionamiento específico de la semilla proveniente del estado de Morelos.
- El dibujo mecánico de las piezas, por medio del software Catia V5, permitió un acoplamiento adecuado de los diferentes mecanismos o elementos externos que se agregan a la maquinaria como los motores o el soplador. Partiendo de las características dimensionales se ajustaron los elementos mecánicos de la máquina descascaradora y extractora de aceite. El ensamble del producto permitió corroborar que las medidas de cada elemento encajan correctamente y que el diseño general de la maquinaria es similar al propuesto en un inicio.
- La eficiencia global del proceso dependerá en la realidad del correcto funcionamiento del sistema electromotriz de la maquinaria y de la homogeneidad de las muestras a trabajar de semillas de JCL, sin embargo, la eficiencia de extracción de aceite y descascarado continuaran siendo superiores a lo reportado en literatura o a la maquinaria existente en el mercado, esto debido a la implementación del doble



tornillo sin fin en la extracción, al descascarado que permite un mejor flujo de aceite desde los núcleos de la semilla y a el sistema de inyección de aire seleccionado.

- La simulación estática de los rodetes compresores y del doble tornillo sin fin entregó resultados de acuerdo con lo esperado con el análisis teórico de cargas y esfuerzos a los que será sometido cada elemento mecánico. En ninguno de los casos se superó el límite elástico del material, por lo que no se correría el riesgo de sufrir fractura o cedencia de las piezas por esfuerzos de cizallamiento, tensión o compresión. Una siguiente etapa de manufactura y construcción del prototipo corroboraría el correcto accionar de las piezas, así como su comportamiento acorde a los resultados obtenidos por el método de elementos finitos.
- El cálculo de las métricas verdes permite observar que el proceso diseñado genera una menor cantidad de residuos en comparación con otros procesos de extracción con solventes químicos o con mecanismos de un solo eje. La potencial valorización de los subproductos generados del proceso de extracción de aceite de semillas de JCL (pasta proteica y cáscaras) es consecuencia de la implementación del proceso de descascarado, el cual no suele incluirse en los métodos convencionales de extracción mecánica de aceite de semillas. Es así como los resultados obtenidos de las métricas verdes dejan en evidencia que se puede reducir la cantidad de residuos generados en el proceso y hacer un uso eficiente de las materias primas, sin dejar de lado la obtención de un producto principal de buena calidad.
- El prototipo entrega una TRE positiva (1.1) debido a los pocos requerimientos energéticos para su funcionamiento. Los mecanismos utilizados permiten al proceso funcionar sin una alta demanda de energía eléctrica, además de que los elementos mecánicos se diseñaron específicamente para la semilla de JCL y no se trata de maquinaria que se pueda acoplar a diferentes tipos de semillas que cuenten con otras propiedades mecánicas. Por otra parte, el poder calorífico superior de los subproductos y productos obtenidos ayuda a entregar un balance positivo de retorno energético, si no se tomarán en cuenta las cáscaras y la pasta proteica, este balance energético sería negativo, tomando en cuenta a la semilla de JCL completa como un insumo de entrada.



Bibliografía

- Achten, W. M. J., Verchot, L., Franken, Y. J., Mathijs, E., Singh, V. P., Aerts, R., & Muys, B. (2008). *Jatropha bio-diesel production and use*. 32, 1063–1084. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2008.03.003>
- Ahmed, K. & Bashir, T. (2016). *Design and development of jatropha oil expelling machine*. University of Khartoum. Sudán.
- Anastas, P., & Eghbali, N. (2010). *Green Chemistry: Principles and Practice*. Chem. Soc. Rev., 39(1), 301–312.
- ANSI/AGMA 6022. *Design Manual for Cylindrical Wormgearing*.
- Ávila, E., García, J. & Valtierra, E. (2018). Competitividad de la producción de *Jatropha curcas* en la región de La Frailesca, Chiapas, México. INECOL: Madera y Bosques, 24 (2). doi.org/10.21829/myb.2018.2421608
- Bamgboye, A. I., & Adebayo, S. E. (2012). *Seed moisture dependent on physical and mechanical properties of Jatropha curcas*. *Journal of Agricultural Technology*, 8(1), 13–26.
- Betancur-prisco, J. C., Mira-hernández, C., & Santiago, L. (2014). Propiedades físicas y mecánicas de granos de *Jatropha curcas* cultivadas en Colombia. *Revista Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia*, 187–199.
- Budynas, C & Nisbett, J. K (2008). *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley*, McGraw-Hill.
- Carrillo-González, R & González-Chávez, M. (2015). Biosorción de zinc, cadmio y plomo con cápsulas de *Jatropha curcas*. *Revista Latinoamericana de Biotecnología Ambiental y Algal*, 6(2). [doi:10.7603/s40682-015-0006-1](https://doi.org/10.7603/s40682-015-0006-1)
- Campuzano-duque, L. F., Ríos, L. A., & Cardeño-lópez, F. (2016). Caracterización composicional del fruto de 15 variedades de *Jatropha curcas* L.. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 17(3), 379–390.
- Cesar, J., & Nava, V. (2015). *Maquina descascaradora de higuierillas*. Instituto Tecnológico de Celaya. (113), 474–526.
- Chapuis, A., Blin, J., Carré, P., & Lecomte, D. (2014). *Separation efficiency and energy consumption of oil expression using a screw-press: The case of Jatropha curcas L. seeds*. *Industrial Crops & Products*, 52, 752–761. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2013.11.046>



- CONACyT. (2015). Fondo de Innovación Tecnológica Secretaría de Economía – CONACYT Etapas de maduración tecnológica, según metodología " Technology Readiness Level " de la NASA Anexo 1 Fondo de Innovación Tecnológica Secretaría de Economía.
- Cruz Meza, P., García Silva, S., Márquez Rosano, C., & López Canteñs, G. (2012). Determinación de las propiedades físico-mecánicas para el descascarado de las cápsulas de la higuera (Ricinus communis L.). *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, (4), 644–649.
- Díaz-Hernández, B. G., Francisco, J., & Víctor, A. (2013). Rendimiento de *Jatropha curcas* L. inoculada con micorriza y aplicación de composta de caña. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 4, 599–610.
- Drahansky, M., Paridah, M., Moradbak, A., Mohamed, A. ., Owolabi, F. abdulwahab taiwo, Asniza, M., & Abdul Khalid, S. H. . (2016). *Application of Mechanics to Plant Seeds as a Granular or Particulate Material*. *Intech*, 13. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.5772/57353>
- Dufaure, C., Leyris, J., Rigal, L., & Mouloungui, Z. (1999). *A Twin-Screw Extruder for Oil Extraction : I . Direct Expression of Oleic Sunflower Seeds*. *Journal of the American Oil Chemists Society*, 76(9), 1073–1079
- Evon, P., Kartika, I. A., Cerny, M., & Rigal, L. (2013). Extraction of oil from jatropha seeds using a twin-screw extruder : Feasibility study. *Industrial Crops & Products*, 47, 33–42. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2013.02.034>
- Field, C. B., Campbell, J. E., & Lobell, D. B. (2007). *Biomass energy : the scale of the potential resource*. National Center for Biotechnology Information, 65–72. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2007.12.001>
- Forson, F. K. Ñ., & Oduro, E. K. (2004). *Performance of jatropha oil blends in a diesel engine*. *Renewable Energy*, 29, 1135–1145. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2003.11.002>
- García, V. B., Parra, A. C., Ángel, J., & Ruíz, P. (2016). Química de la biomasa vegetal y su efecto en el rendimiento durante la torrefacción : revisión. *Revista Mexicana de Las Ciencias Forestales*, 7(38).
- Garnayak, D. K., Pradhan, R. C., Naik, S. N., & Bhatnagar, N. (2008). *Moisture-dependent physical properties of jatropha seed (Jatropha curcas L.)*. *Industrial Crops and Products*, 27(1), 123–129. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2007.09.001>
- Gbabo, A., Lukman, A., Kuku, A., & Baba, N. (2016). *Design and Performance Assessment of A Spike toothed Drum Mechanism for Shelling of Castor*. *International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology*, 3(2), 229–238.



- Herak, D., Divisova, M., & Kabutey, A. (2014). *a Review of the Physycal, Mechanical, Thermal , and Chemical Properties of Jatropha Curcas Seeds As Basic Information for Oil Pressing*. *Agronomy Research*, 44–53.
- Isiaka, M. (2017). *Development of an Oil Extraction Machine for Jatropha curcas Seeds*. *Journal of Scientific Research and Reports*. <https://doi.org/10.9734/JSRR/2015/15148>
- Karaj, S., & Müller, J. (2010). *Determination of physical, mechanical and chemical properties of seeds and kernels of Jatropha curcas L*. *Industrial Crops and Products*, 32(2), 129–138. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2010.04.001>
- Kheiralla, A. F., & Tola, E. (2015). *Development and Evaluation of Jatropha Seeds Shelling Machine for Biofuel Production*. *American-Eurasian Journal of Agricultural and Environmental Science*. <https://doi.org/10.5829/idosi.aejaes.2015.15.4.12603>
- Kim, Y., Lee, S., Lee, H., & Lee, J. (2012). *Bioresource Technology Physical and chemical characteristics of products from the torrefaction of yellow poplar (Liriodendron tulipifera)*. *Bioresource Technology*, 116, 120–125. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.04.033>
- Lizarde, A., Escalante, A., & Ángel, M. (2015). *Propiedades fisicoquímicas del aceite de semillas de Jatropha curcas de poblaciones silvestres en México*. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Cuyo Argentina*, 47(1), 127–137.
- Ley de Transición Energética. (Diciembre 24 de 2015). *Diario Oficial de la Federación*, DOF 24-12-2015. Recuperado del sitio de internet de la Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión. <http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LTE.pdf>
- Ley General de Cambio Climático. (Julio 13 de 2018). *Diario Oficial de la Federación*, DOF 13-07-2018. Recuperado del sitio de internet de la Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión. <http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LGCC.pdf>
- Mercado, R., Martínez, M., Moráles, P., Cruz, E. & Zarázua, M. (2013). *Tecnología para la producción de Jatropha en el estado de hidalgo*. *Biology*.
- Nanaware, S., Gondhale, P., Kemkar, S. D., & Nanaware, S. (2017). *A Low Cost Oil Extraction Machine for Extraction of Oil from Gears*.
- Nnanna, I., Solomon, I., & Ogonnia, O. (2018). *Design And Fabrication Of A Groundnut Oil Expelling Machine*. *American Journal of Engineering Research*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.30378.06081>
- Norton R. L. (1999), *Diseño de Maquinas*, Prentice Hall.



- Osuna, F. (2015). *State of art on science an technology for production and processing of non-toxic Jatropha*. INIFAP. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1153.1123>
- Pradhan, R. C., Mishra, S., Naik, S. N., Bhatnagar, N., & Vijay, V. K. (2011). *Oil expression from Jatropha seeds using a screw press expeller*. *Biosystems Engineering*, 109(2), 158–166. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2011.02.012>
- Romuli, S., Karaj, S., & Müller, J. (2019). Physical properties of *Jatropha curcas* L. fruits and seeds with respect to their maturity stage. *Applied Sciences (Switzerland)*, 9(9). <https://doi.org/10.3390/app9091802>
- Romuli, S., Karaj, S., & Müller, J. (2015). *Influence of physical properties of Jatropha curcas L . seeds on shelling performance using a modified disc mil*. *Industrial Crops & Products*, 77, 1053–1062. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.10.014>
- Sánchez, J., Curt, M. D., Robert, N., & Fernández, J. (2019). Biomass Resources. *The Role of Bioenergy in the Bioeconomy*, 25–111. doi:10.1016/b978-0-12-813056-8.00002-9
- Savoire, R., Lanoisellé, J.-L., & Vorobiev, E. (2012). *Mechanical Continuous Oil Expression from Oilseeds: A Review*. *Food and Bioprocess Technology*, 6(1), 1–16.
- Pradhan, R. C., Naik, S. N., Bhatnagar, N., & Vijay, V. K. (2010). *Design, development and testing of hand-operated decorticator for Jatropha fruit*. *Applied Energy*, 87(3), 762–768. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.09.019>
- SENER. (2017). Balance nacional de energía 2017. México
- SENER. (2017). Mapa de ruta tecnológica del biodiesel. México
- Uitterhaegen, E. & Evon, P. (2017). *Twin-screw extrusion technology for vegetable oil extraction: A review*. *Journal of Food Engineering*, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.06.006>
- Vallarta, D. (2017). Extracción de aceite de *Jatropha curcas* L., en un proceso batch, utilizando isopropanol como disolvente. Instituto Politécnico Nacional. México.
- Vázquez, J. A. (2011). Análisis y diseño de piezas con CATIA V5: Método de elementos finitos (2a Ed.). Marcombo. ISBN 8426717489, 9788426717481
- Yuan, B., Shamsudin, R., Tuah, B. T. H., & Yunus, R. (2016). *Performance evaluation and cfd multiphase modeling for Multistage Jatropha Fruit Shelling Machine*. *University Putra Malasya*. 85, 125–138.



Yuan, B., Shamsudin, R., Tuah, B. T. H., & Yunus, R. (2015). *A review of processing and machinery for Jatropha curcas L. fruits and seeds in biodiesel production: Harvesting, shelling, pretreatment and storage. Renewable & Sustainable Energy Reviews* 52, 991–1002. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.077>