

**DISEÑO DE UN SISTEMA MECÁNICO PARA LA EXTRACCIÓN DE ACEITE
DE CHONTADURO (*BACTRIS GASIPAES*)**

**MARÍA CAMILA CÉSPEDES PATIÑO
INGENIERA EN AUTOMATIZACIÓN**



**UNIVERSIDAD ECCI
DIRECCIÓN DE POSGRADOS
BOGOTÁ, COLOMBIA
2021**

**DISEÑO DE UN SISTEMA MECÁNICO PARA LA EXTRACCIÓN DE ACEITE
DE CHONTADURO (*BACTRIS GASIPAES*)**

**MARÍA CAMILA CÉSPEDES PATIÑO
INGENIERA EN AUTOMATIZACIÓN**

**Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:
Magister en ingeniería con énfasis en mecánica**

**Director (a):
Ing. Claudia Natalia Lara Herrera PhD
Co- director (a):
Ing. M.Sc. Daniel Eduardo Villalobos Correa**

**Grupo de Investigación:
Investigación en Diseño Mecánico y Materiales (GIDMyM)**

**Universidad ECCI
Dirección de Posgrados
Bogotá, Colombia
2021**

Nota de aceptación

Firma Asesor
Ingeniera Claudia Natalia Lara Herrera

Firma Codirector
Ingeniero Daniel Eduardo Villalobos

Firma del jurado

Firma del jurado

Bogotá, noviembre de 2021.

RESUMEN

En el sector agroindustrial colombiano, la extracción de aceites provenientes de frutos oleaginosos generalmente se realiza de forma artesanal o por medio de procesos químicos en donde se emplean solventes como el hexano grado analítico, éter de petróleo grado comercial y dióxido de carbono presurizado en combinación con sistemas mecánicos de extracción, que permiten obtener diferentes grados de rendimiento del aceite. La extracción de aceite por prensado mecánico es el método más común para el tratamiento continuo de semillas oleaginosas sin solvente, mediante el uso de tornillos o prensas que someten al fruto contra las paredes, dependiendo del propósito se pueden utilizar diferentes tipos de prensas (expulsor, expansor y extrusora de mono y doble husillo), del rango de capacidad y del rendimiento deseado. Por lo tanto, la extracción mecánica surge como una alternativa viable en este sector agroindustrial.

En el diseño de las máquinas de extracción de aceite es necesario determinar la fuerza que requiere el tornillo, en este sentido fue indispensable realizar la caracterización mecánica y morfológica de la fruta; en este trabajo de investigación se empleó el fruto del chontaduro (*Bactris Gasipaes*) y de esta manera se propuso el diseño de un tornillo con paso variable y diámetro del tornillo constante, y la verificación de los elementos mecánicos especialmente de la tolva, el tornillo y la estructura por medio de elementos finitos, y así determinar el comportamiento y el factor de seguridad de estos elementos. Además, se realizó un estudio exploratorio del desgaste que se presenta en el sistema de extracción de aceite.

Palabras claves: desgaste, dimensiones geométricas del tornillo, elementos finitos, frutos oleaginosos, métodos de extracción, potencia.

ABSTRACT

In the Colombian agro-industrial sector, the extraction of oils from oleaginous fruits is generally carried out by hand or by chemical processes using solvents such as analytical grade hexane, commercial grade petroleum ether and pressurized carbon dioxide in combination with mechanical extraction systems, which allow different degrees of oil yield to be obtained. Oil extraction by mechanical pressing is the most common method for the continuous treatment of oilseeds without solvent, using screws or presses that subject the fruit against the walls, depending on the purpose, different types of presses can be used (expeller, expander, and single and twin-screw extruder), the range of capacity and the desired yield. Therefore, mechanical extraction emerges as a viable alternative in this agro-industrial sector.

In the design of oil extraction machines, it is necessary to determine the force required by the screw, in this sense it was essential to carry out the mechanical and morphological characterization of the fruit; in this research work the fruit of the *chontaduro* (*Bactris Gasipaes*) was used and in this way the design of a screw with variable pitch and constant screw diameter was proposed, and the verification by means of finite elements especially of the hopper, the screw and the structure by means of finite elements, and thus determine the behavior and the safety factor of these elements. In addition, an exploratory study of the wear that occurs in the oil extraction system was carried out.

Keywords: wear, screw geometric dimensions, finite elements, oleaginous fruits, extraction methods.

CONTENIDO

	Pág
1. MARCO DE REFERENCIA	15
1.1 MÉTODOS DE EXTRACCIÓN	15
1.1.1 Método de extracción químico.....	15
1.1.2 Método de extracción mecánico.....	18
1.2 CARACTERIZACIÓN MECÁNICA Y MORFOLÓGICA DE FRUTOS	26
1.2.1 Análisis del perfil de textura (TPA).....	26
1.2.2 Características reológicas.....	30
2. METODOLOGÍA DE TRABAJO	34
2.1 CARACTERIZACIÓN DEL FRUTO	34
2.1.1 Caracterización morfológica.....	34
2.1.2 Caracterización mecánica	35
2.1.3 Caracterización reológica.....	36
2.2 DISEÑO MECÁNICO.....	37
2.2.1 Sistema de dosificación.....	37
2.2.2 Sistema de compresión.....	38
2.2.3 Consideraciones mecánicas.....	40
2.2.4. Sistema de obtención de aceite.....	44
2.3 DISEÑO PRELIMINAR	44
2.4 VALIDACIÓN DEL SISTEMA	47
3. DISEÑO	50
3.1 CASO DE ESTUDIO.....	50
3.2 VALIDACIÓN POR ELEMENTOS FINITOS	59
3.3 ESTUDIO EXPLORATORIO.....	79
4. CONCLUSIONES	84
5. TRABAJOS FUTUROS	86
6. BIBLIOGRAFÍA	87
7. ANEXOS	92

ÍNDICE DE TABLAS

Pág

Tabla 1. Porcentaje de rendimiento de aceite obtenido bajo condiciones específicas.	16
Tabla 2. Coadyuvantes empleados en la elaboración de aceites y grasas comestibles.....	17
Tabla 3. Resumen método químico.....	18
Tabla 4. Resumen método mecánico.....	25
Tabla 5. Variables obtenidas del TPA [27], [28].....	27
Tabla 6. Fuerza máxima de compresión (adaptación de [33]).....	28
Tabla 7. Resumen de parámetros evaluados en el TPA.....	30
Tabla 8. Resumen sobre reología.....	32
Tabla 9. Composición de aceite (%) de diferentes semillas oleaginosas [44] [45].	35
Tabla 10. Composición de aceite (%) de diferentes frutos secos oleaginosos [46].	35
Tabla 11. Variables para calcular las propiedades mecánicas.....	36
Tabla 12. Parámetros de los índices empleados en el modelo de la ley de potencia [11], [49] y [50].	37
Tabla 13. Variables para calcular dimensiones geométricas del tornillo [14], [15].	38
Tabla 14. Coeficiente de relleno según carga [52].	41
Tabla 15. Coeficiente de disminución de flujo del material en función del ángulo de inclinación.....	41
Tabla 16. Factor de diámetro del tornillo [52].	42
Tabla 17. Factores de buje para el colgante [52].....	42
Tabla 18. Factor de helicoidal [52].....	42
Tabla 19. Factor de paletas [52].....	43
Tabla 20. Diseños preliminares para el sistema de dosificación.....	45
Tabla 21. Diseños preliminares para el sistema de compresión.....	45
Tabla 22. Caracterización morfológica del chontaduro (Bactris Gasipaes).	51
Tabla 23. Caracterización química.....	51
Tabla 24. Ensayo de compresión.....	54
Tabla 25. Resultados de las variables de la caracterización mecánica.....	54
Tabla 26. Resultados de la viscosidad en función de las variables para la zona de alimentación.....	55
Tabla 27. Resultados de la viscosidad en función de las variables para la zona de compresión y medición.....	55
Tabla 28. Resultados de las variables geométricas del tornillo en las zonas de trabajo.....	57

Tabla 29. Resultados de las variables de las dimensiones del dado de extrusión.	57
Tabla 30. Resultados de las variables del análisis de extrusión.....	57
Tabla 31. Potencia requerida en cada una de las zonas.....	58
Tabla 32. Dimensiones de las consideraciones mecánica.	58
Tabla 33. Propiedades mecánicas del acero inoxidable 316.....	59
Tabla 34. Propiedades mecánicas del acero AISI 1020 estirado en frío.	59
Tabla 35. Carga de los elementos mecánicos.....	72
Tabla 36. Resumen datos simulación.....	78

TABLA DE FIGURAS

Pág

Figura 1. Componentes de una máquina extrusora de alimentos mono husillo [14].	19
Figura 2. Holgura del canal en la sección de alimentación en el tornillo [15].	19
Figura 3. Configuración esquemática modular del barril y tornillo de la extrusora de doble tornillo [19]......	21
Figura 4. Evolución de la presión vs la distancia axial del tornillo a diferentes rotaciones [23].	24
Figura 5. Secciones del tornillo.	24
Figura 6. Curva típica de TPA.	27
Figura 7. Fuerza vs tiempo para una compresión unidireccional: radial (izquierda) y axial (derecha).	28
Figura 8. Curva esfuerzo deformación [35].	30
Figura 9. Metodología genérica del sistema de extracción de aceite de frutos oleaginosos.	34
Figura 10. Procedimiento del diseño mecánico.	37
Figura 11. Detalles del tornillo extrusor del barril [14].	38
Figura 12. Fluido que fluye entre dos placas paralelas.	39
Figura 13. Boquilla de forma anular [51].	40
Figura 14. Metodología resumen para el diseño de extracción de aceite.	46
Figura 15. Metodología para desarrollar un análisis estructural.	47
Figura 16. Ventana Model del programa Ansys.	48
Figura 17. Parámetros incorporados.	48
Figura 18. Configuración del análisis estructural.	49
Figura 19. Configuración de los análisis que se desean obtener.	49
Figura 20. Medición geométrica del chontaduro.	50
Figura 21. (a) Dispositivo (b) Probetas.	52
Figura 22. Probeta en el centro de la placa.	52
Figura 23. Fuerzas aplicadas a través del tiempo en la probeta longitudinal.	53
Figura 24. Fuerzas aplicadas a través del tiempo en la probeta transversal.	53
Figura 25. Soportes y cargas aplicadas a la tolva.	60
Figura 26. Malla generada para la tolva.	60
Figura 27. Análisis de convergencia de la tolva.	61
Figura 28. Número de nodos vs esfuerzo equivalente obtenido.	62
Figura 29. Deformación total de la tolva.	62
Figura 30. Esfuerzo equivalente de la tolva.	63
Figura 31. Soportes fijos del tornillo.	63

Figura 32. Cambio de presión a lo largo del tronillo.	64
Figura 33. Presión aplicada en las zonas del tornillo.	64
Figura 34. Presión hidrostática aplicada.	65
Figura 35. Sección de enmallado del tornillo.	66
Figura 36. Mesh Metric obtenida para el tornillo.	66
Figura 37. Análisis de convergencia del tornillo.	67
Figura 38. Número de nodos vs esfuerzo obtenido.....	67
Figura 39. Deformación total en el tornillo.....	68
Figura 40. Esfuerzo equivalente del tornillo.	68
Figura 41. Esfuerzo equivalente en el cuñero.	69
Figura 42. Par de torsión.....	69
Figura 43. Fuerzas de reacción en el rodamiento.	70
Figura 44. Factor de seguridad del tornillo.	70
Figura 45 . Factor de seguridad en la sección del cuñero.....	71
Figura 46. Vida de fatiga del tornillo en la sección del cuñero.	71
Figura 47. Elementos mecánicos de la máquina.....	72
Figura 48. Gravedad aplicada a la mesa de soporte.....	73
Figura 49. Soportes fijos de la estructura.....	73
Figura 50. Fuerzas remotas en la estructura.....	74
Figura 51. Malla generada en la estructura.....	74
Figura 52. Refinamiento en los agujeros de la mesa.	75
Figura 53. Mesh Metric obtenida para la mesa.	75
Figura 54. Deformación total en la mesa.	76
Figura 55. Deformación máxima generada en la parte superior de la mesa.	76
Figura 56. Esfuerzo equivalente de la mesa.	77
Figura 57. Factor de seguridad en la mesa.....	78
Figura 58. Desgaste anormal causado por la contaminación de partículas finas de hierro.....	79
Figura 59. Efecto de las horas de funcionamiento del tornillo endurecido en el desgaste.	81
Figura 60. Efecto de las horas de funcionamiento del tornillo no endurecidos en el desgaste.	82

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1. Diseño de una máquina de extracción de aceite de chontaduro (Bactris Gasipaes)	92
Anexo 2. Explosionado	92
Anexo 3. Diseño de la Tolva	92
Anexo 4. Desarrollo de la lámina de la tolva.	92
Anexo 5. Diseño del barril.	92
Anexo 6. Diseño del tornillo de extracción.	92
Anexo 7. Diseño de la cuña.	92
Anexo 8. Diseño de los bujes.....	92
Anexo 9. Diseño de la tapa del barril.	92
Anexo 10. Desarrollo de la lámina de la tapa del barril.	92
Anexo 11. Diseño del soporte.	92
Anexo 12. Desarrollo de la lámina del soporte.....	92
Anexo 13. Diseño de la mesa del motor.	92
Anexo 14. Desarrollo de la lámina de la mesa del motor.	92
Anexo 15. Tapa deslizante de la mesa-motor.....	92
Anexo 16. Diseño de la mesa.	92
Anexo 17. Diseño de las láminas de la mesa.	92
Anexo 18. Diseño de los soportes de la mesa.	92
Anexo 19. Diseño de la guía inferior.	92
Anexo 20. Tanque de almacenamiento de aceite.	92
Anexo 21. Ficha técnica del motor.	92
Anexo 22. Artículo sustentado en la ponencia del Congreso Internacional De Ingeniería Mecánica, Mecatrónica Y Automatización	92

JUSTIFICACIÓN

Según un estudio realizado por el Departamento Nacional de Planeación (DNP), con respecto a las pérdidas de alimentos en Colombia, “*la oferta nacional disponible de alimentos es de 28 millones de toneladas, de los cuales se pierden o desperdician 9.76 millones de toneladas de comida al año*”, esta cifra representa el 34 % de los alimentos que el país podría consumir en un año. Las pérdidas de los alimentos en toneladas de la producción agropecuaria es de 3.95 ton (40.5 %), en postcosecha y el almacenamiento de 1.93 ton (19.8 %), en el procesamiento industrial 0.34 ton (3.5 %), en la distribución y comercio minorista 0.34 ton (3.5 %) y en la etapa de consumo en los hogares de 1.53 ton (15.6 %) [1]. Como se observa el porcentaje más alto en pérdidas se encuentra en la etapa de producción agropecuaria, puesto que en muchos lugares existe una sobretasa de producción del alimento, y éste no es aprovechado en su totalidad, como es el caso del chontaduro (*Bactris Gasipaes*), el cual, se cultiva en las regiones tropicales y subtropicales de América, en donde se encuentran las condiciones agroecológicas apropiadas para el desarrollo del cultivo; el área cultivada en Colombia es de aproximadamente de 11.124 hectáreas, de las cuales en la costa del pacifico se siembra el 73 %, en la región amazonia el 22 % y el 5 % restante se encuentra en el resto del país [2].

Los métodos de extracción de aceites provenientes de frutos oleaginosos se realizan de forma artesanal, mecánica o por medio de procesos químicos. En la literatura investigada existen pocos estudios sobre la obtención de aceite de chontaduro de forma mecánica y existen pocos trabajos orientados a documentar el diseño de estos sistemas mecánicos para la extracción de aceite de los frutos oleaginosos. Cabe resaltar que, a diferencia de los métodos de extracción de aceite químico, el residuo tras el prensado puede utilizarse directamente para la alimentación humana y animal, debido a que, no hay trazas de contaminación química para la calidad del aceite y se garantiza la extracción de una torta o harían, económica y que contiene proteínas y grasas naturales.

Por lo anterior, en el presente estudio se propone el diseño de un sistema mecánico de extracción de aceite de frutos oleaginosos, como método promisorio para mitigar los porcentajes de pérdidas de alimentos en el sector agroindustrial y se aplica la metodología propuesta para las características mecánicas y reológicas del fruto del chontaduro (*Bactris Gasipaes*), como caso de estudio y para diferentes frutos oleaginosos con características morfológicas y mecánicas similares.

Para el fruto del chontaduro, particularmente, no se encontró información referente a sus propiedades mecánicas en la literatura consultada. En este trabajo se realiza un análisis de perfil de textura (TPA), para la caracterización mecánica del fruto de chontaduro, se emplea la ecuación de la ley de potencia para determinar la

viscosidad de este, por último, se realiza el diseño mecánico del tornillo de extracción de aceite, teniendo en cuenta las características morfológicas y mecánicas del fruto.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Diseñar un sistema mecánico para la extracción de aceite de chontaduro como alternativa a la extracción convencional.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar los parámetros técnicos requeridos para el diseño de los sistemas de extracción, de acuerdo con lo reportado en la literatura.
- Formular la síntesis de los componentes del sistema mecánico para la extracción de aceite.
- Proponer una metodología genérica de diseño para un sistema de extracción mecánica.
- Explicar la influencia del desgaste en el sistema mecánico de extracción con base en un estudio exploratorio de la literatura científica.

1. MARCO DE REFERENCIA

1.1 MÉTODOS DE EXTRACCIÓN

La extracción de aceite de diferentes frutos oleaginosos se realiza por medio de métodos de extracción química y mecánica, en algunos casos se combinan los métodos con el fin de obtener mayor porcentaje de aceite. A continuación, se explican brevemente los métodos de extracción que, de acuerdo con la literatura, son usados con mayor frecuencia.

1.1.1 Método de extracción químico. Se emplean solventes como etanol, éter etílico, hexano e isopropanol [3], ya que son capaces de extraer un porcentaje más alto de aceite; se separa el contenido graso de la semilla o fruto y así se obtiene una mezcla de solvente con el aceite [4], se refina el aceite para eliminar los posibles residuos del solvente aplicado; en algunos casos se recupera el aceite un 98 %, teniendo en cuenta materias primas con bajo contenido de humedad.

Una de las principales desventajas del uso de solventes es el costo de los equipos o dispositivos, la disponibilidad del solvente a emplear y el peligro del mal uso de este, ya que es altamente inflamable.

Los autores Pasquel, Del Castillo, Sotero y García para el año 2002 estudiaron la extracción del aceite de la cáscara de *Bactris Gasipaes H.B.K.* usando dióxido de carbono presurizado de $3.18 \pm 0.06 \text{ g/min}$; la cáscara fue picada y tamizada por un agitador magnético, la extracción de aceite se realizó en un tiempo de 15 h a una temperatura de $150 \text{ }^\circ\text{C}$, se esperó que la materia prima alcanzara la temperatura óptima de trabajo; en este proceso, la materia prima alcanzó una temperatura de $20.1 \pm 0.7 \text{ }^\circ\text{C}$ pero al aumentarla $7 \text{ }^\circ\text{C}$ se obtuvo un rendimiento de aceite extraído del 9.55 %. Como conclusión los autores evidenciaron que la extracción realizada con dióxido de carbono es mayor que con solventes orgánicos como el hexano [5].

En el estudio realizado por Martínez en el año 2010 acerca de la extracción y la caracterización de aceite de nuez, se analizaron y se evaluaron diferentes métodos de extracción químico con solventes como hexano, dióxido de carbono en estado supercrítico y extracción mecánico, en donde se utilizó una prensa de tornillo helicoidal a escala piloto y a escala industrial. Para el análisis de la extracción de aceite de nuez con el solvente hexano, se trabajó con la semilla, la cual se trituró con un molino con rodillos, y se obtuvieron tres rangos de tamaños de partículas: 0.5 a 1 mm, 1 a 3 mm y 3 a 5 mm. El método empleado fue soxhlet que duró dos horas a una temperatura constante de $25 \text{ }^\circ\text{C}$. Para cada uno de los rangos mencionados se adicionó la cantidad de hexano correspondiente a la muestra, de esta manera se obtuvo un 95.5 % de aceite en el primer rango, 54.9 % en el segundo y 92 % en el tercer rango. Posteriormente, se realizaron las extracciones con dióxido

de carbono grado alimenticio en estado supercrítico con una muestra de partícula de 1.2 mm a 2.4 mm en una planta a escala piloto con un sistema de separación y recirculación del solvente, las extracciones se llevaron a una temperatura de 50 °C y 70 °C con un flujo másico de 10.5 kg/h, luego de esto, se evaluó la temperatura y la presión en las siguientes combinaciones 50 °C y 200 bar (20 MPa), 50 °C y 400 bar (40 MPa), 70 °C y 200 bar, y 70 °C y 400 bar; de esto se obtuvo para la primera combinación 79.1 % de aceite extraído, 44.3 %, 92.6 %, 91.2 %, en las demás combinaciones, respectivamente [6].

Para el caso de los frutos de chontaduro, Chaparro Vega en el año 2011 estudio la obtención del aceite a partir de los residuos de chontaduro de las variedades rojo cauca (Tambo) y rojo costeño (Sabaletas), debido a que en la literatura estas variedades son reportadas como las que contienen mayor porcentaje de aceite [7], para esto, primero se retiró la semilla del fruto, luego el fruto fue molido con el fin de generar un área mayor de contacto con los solventes hexano grado analítico y éter de petróleo grado comercial; con ambos solventes se empleó el método de extracción *soxhlet* que consiste en obtener el aceite y una torta que contienen una fracción del solvente, a la torta se le realizó un proceso de desolventización para separar las partículas del solvente y obtener una harina [8]; al aceite adquirido se le realizó un proceso de destilación para terminar de separar las partículas del solvente y así proceder con la recuperación del mismo, por último, se procesó el aceite crudo derivado para obtener un aceite refinado del 14.38 % empleando el solvente éter de petróleo con el fruto cocinado y con cáscara. Cabe resaltar que los datos obtenidos de cada combinación se presenta en la **Tabla 1** [9].

Tabla 1. Porcentaje de rendimiento de aceite obtenido bajo condiciones específicas.

Variedad	Condición			Rendimientos (%)		
	Solvente	Cocinado	Cáscara	Repetición 1	Repetición 2	
Rojo costeño (Sabaletas)	Hexano	No	Si	11.29	11.33	
			No	7.97	7.95	
		Si	Si	13.81	13.79	
			No	9.16	8.72	
		Éter	No	Si	11.53	11.47
				No	7.98	8.01
	Si		Si	13.78	13.55	
			No	9.27	9.37	
	Rojo cauca (Tambo)	Hexano	No	Si	11.64	12.34
				No	8.06	8.09
Si			Si	13.95	14.22	
			No	9.40	9.39	
Éter		No	Si	13.19	12.98	
			No	8.13	9.13	
		Si	Si	14.38	14.37	
			No	10.82	9.96	

Fuente: M. C. Chaparro Vega [9].

Por otro lado, Emilio y Mena para el año 2016 produjo biodiesel a partir de aceite vegetal extraído del fruto de la palma de chontaduro (*Bactris Gasipaes*) variedad roja que se cultiva en el pacífico colombiano, los métodos de extracción empleados fueron: extracción con agua caliente y extracción *soxhlet*. En el primer método se evaluaron las variables tiempo y la relación de agua en el fruto con respecto a la temperatura; para esto se extrajo la semilla, se molió la fruta, se cocinó mediante agitación constante, después se enfrió y se separaron las fases por la diferencia de densidad entre el agua y el aceite, por último, en un proceso de rotoevaporación se obtuvo el aceite crudo y la harina, se obtuvo 12 g aceite/100 g de fruto. Para el segundo método de extracción se empleó hexano, metanol, hidróxido de potasio, óxido de titanio y nitrato de potasio; la obtención de aceite tardó un tiempo de 4 h con relación 1: 1 de hexano y 100 g fruta, 5 h con relación 2: 1, y 6 h con relación 3: 1, al final del proceso se recuperó un 10.96 % de aceite en 100 g de fruta y en la torta 1.04 % de aceite residual [8].

La **Tabla 2** menciona algunos coadyuvantes empleados en la elaboración de aceite y grasas, ambos de tipo comestible, y la función de cada uno de estos [10]. Y la **Tabla 3** presenta el resumen del método de extracción químico teniendo en cuenta los solventes empleados, los parámetros evaluados, con el fin de determinar las variables a considerar en este trabajo de investigación y el rendimiento de aceite obtenido.

Tabla 2. Coadyuvantes empleados en la elaboración de aceites y grasas comestibles

Coadyuvante	Efecto	Modo de eliminación
Hidróxido sódico	Auxiliar de refinado	Neutralización con ácido
Carbón/arcilla (tierra de diatomeas)	Auxiliar de blanqueado	Filtración
Níquel	Catalizador de hidrogenación	Blanqueado posterior y filtración
Metóxido sódico	Catalizador de reorganización	Neutralización con agua o ácido, filtración y desodorización
Ácido fosfórico Ácido cítrico	Refinado de ácidos, quelación de metales Mejorar la velocidad y la eficacia del proceso	Neutralización con base, filtración o lavado con agua
Acetona Hexano Isopropanol 2-Nitropropano	Medios de cristalización para el fraccionamiento de grasas y aceites	Eliminación del disolvente y desodorización
Nitrógeno	Sustitución de oxígeno	Difusión
Esteres del poliglicerol	Modificación de la cristalización	Refinado, caustico y filtración
Lauril sulfato sódico	Auxiliar de fraccionamiento, humectante	Lavado y centrifugación

Fuente: H. Lawson [10].

Tabla 3. Resumen método químico

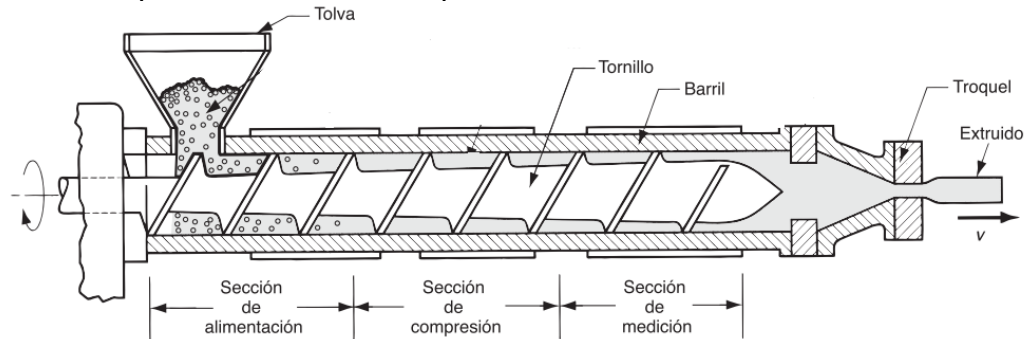
Autores	Materia prima que se empleó	Solvente empleado	Parámetros evaluados	Rendimiento
Pasquel, Del Castillo, Sotero y García, (2002)	Cáscara de <i>Bactris Gasipaes</i> HBK	Dióxido de carbono presurizado	Tiempo Temperatura Concentración del solvente	9.55 %.
		Hexano	Tiempo Temperatura	95.5 % 54.9 % 92 %
Martínez, (2010)	Nuez	Dióxido de carbono en estado supercrítico (Extracción soxhlet)	Temperatura Presión Concentración del solvente	79.1 % 44.3 % 92.6 % 91.2 %
		Hexano grado analítico (Extracción soxhlet)	Temperatura Presión	13.81 %
Chaparro Vega, (2011)	Chontaduro sin semilla	Éter de petróleo grado comercial (Extracción soxhlet)	Temperatura Presión	14.38 %
		Extracción con agua caliente	Tiempo Relación de agua Temperatura	10.76 %
Emilio y Mena, (2016)	Chontaduro sin semilla	Hexano, metanol, hidróxido de potasio, óxido de titanio y nitrato de potasio (Extracción soxhlet)	Tiempo Temperatura Presión	10.96 %

Elaborada por el autor.

1.1.2 Método de extracción mecánico. En este método se aplica presión a las semillas y/o frutos oleaginosos, mediante el uso de tornillos que giran dentro de un tambor y permiten moler la materia sometiéndola contra las paredes de la máquina, generando un aumento en la energía cinética presente [11], y así se extrae el aceite contenido; el material sólido es arrastrado hasta el final del tambor donde se encuentra un orificio que permite la expulsión. Se emplean molinos de tornillo, molinos de rodillos, molinos de martillos rotatorios, molino de bolas, etc. Una de las ventajas presentes en este método es que se obtiene un aceite que conserva todas las propiedades organolépticas [12]. Para el diseño de los sistemas de extrusión de tornillo se emplean mono y doble husillo, estos sistemas comprenden de tres (3) secciones o zonas: (i) alimentación o transporte, (ii) compresión o transición y (iii) medición o dosificación (**Figura 1**). La sección de alimentación se ubica cerca de la tolva, la profundidad del canal del tornillo es mayor con respecto a las otras zonas;

el objetivo principal es compactar el fruto y generar una materia uniforme sólida y densa para transportarla a la siguiente zona. La sección de compresión está ubicada en la mitad del tornillo, en esta zona se comprime la fruta y se transforma. La sección de medición o dosificación se sitúa al final del tornillo cerca a la boquilla ubicada en el troquel en donde la profundidad del canal es menor, se homogeniza la materia y se genera la presión suficiente para forzarla a pasar por la abertura del troquel [13], [14].

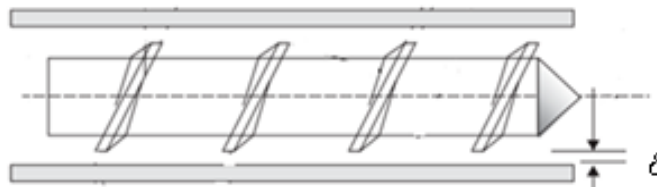
Figura 1. Componentes de una máquina extrusora de alimentos mono husillo [14].



Fuente: modificada de M. P. Groover [14].

En cada una de las zonas la holgura del canal (δ) es variable y la profundidad del canal (d_c) disminuye gradualmente; para la zona de compresión la holgura debe tener una dimensión de 0.05 mm , debido a que esta limita la fuga del alimento comprimido [14] (**Figura 2**). Cabe resaltar que los tornillos dobles casi siempre presentan giro contrario, debido a que están ubicados paralelamente, lo que permite que exista mayor fuerza de cizalla, alta capacidad de mezclado y control del tiempo de residencia, de igual forma, son empleados para materiales que requieren realizar una mezcla mayor [13].

Figura 2. Holgura del canal en la sección de alimentación en el tornillo [15].



Fuente: modificada de D. W. Sun [15].

Cabe resaltar, que en ingeniería se emplean técnicas o métodos numéricos que permiten realizar un análisis estático y dinámico, lineal y no lineal, de esfuerzo y de

deflexión, vibraciones libres y forzadas, transferencia de calor; inestabilidad elástica; acústica, electrostática y magnetismo, dinámica de fluidos, análisis de tuberías y físicas de diferentes elementos mecánicos que componen las máquinas para extracción de aceite. Estas técnicas o métodos numéricos se pueden estudiar por medio de software comerciales para el análisis de elementos finitos (*Finite Elements Analysis* siglas en inglés F.E.A.) o también llamado método de elementos finitos (*Finite Element Method* siglas en inglés F.E.M.) [16].

F.E.M. es una herramienta de análisis de diseño que emplean los investigadores para estudiar el comportamiento de los elementos mecánicos, ensamblajes, piezas o estructuras que son sometidas a diversos estados de carga, ya que, permite simular la respuesta del sistema bajo diversos estímulos mecánicos [17]. Esta herramienta proporciona una forma de probar virtualmente el diseño de un producto, sin que se haya construido, además, ayuda a los usuarios a entender sus diseños, optimizar e implementar los cambios de diseño apropiados en la primera etapa de diseño [18]. El análisis se puede realizar con modelos físicos o modelos matemáticos, estos últimos modelos se desglosan en función de los métodos utilizados para obtener la solución, existen modelos matemáticos simples que pueden ser resueltos analíticamente y modelos matemáticos complejos que requieren el uso de métodos numéricos.

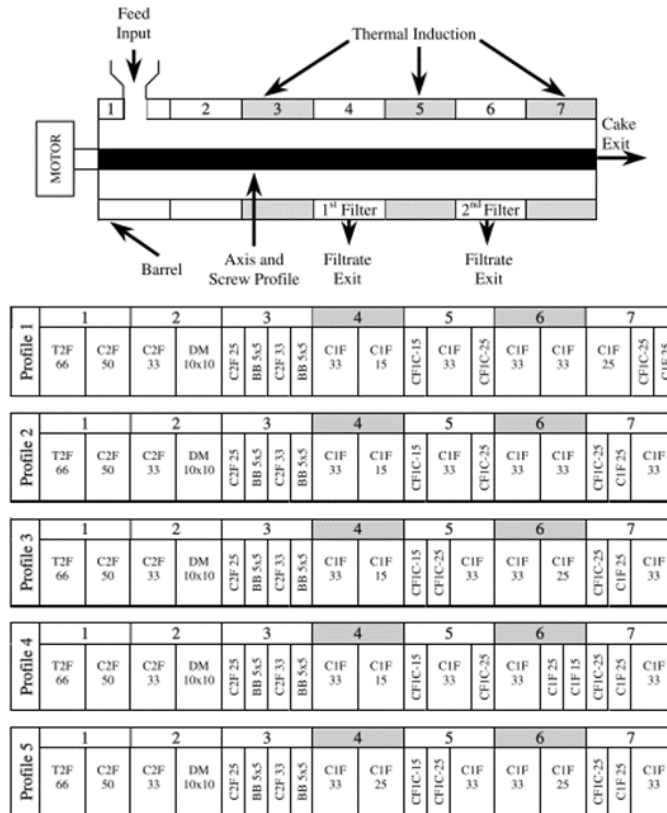
Kartika, Pontalier y Rigal en el año 2006 estudiaron un sistema de doble tornillo, generando cinco (5) perfiles para verificar el rendimiento de la obtención del aceite, para los autores, el perfil es el conjunto de varios módulos ensamblados a lo largo del eje del tornillo, los cuales tienen diferentes nomenclaturas [19], las cuales fueron:

- T2F: tornillo trapezoidal de doble rosca
- C2F: tornillo de doble rosca de transporte
- C1F: tornillo de transporte simple
- BB: tornillo de paleta bilóbulo
- DM: tornillo de paleta monolóbulo
- CF: tornillo invertido

Se desarrolló un ensayo para los cinco (5) perfiles con las siguientes constantes, una temperatura de $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ a una velocidad de tornillo de 165 rpm y una alimentación de 24 kg/h , en el perfil 1 se obtuvo un rendimiento de aceite extraído de 71.1% , en el perfil 2 de 70.9% y para el perfil 5 de 67% ; en los perfiles 3 y 4 no se obtuvo aceite debido a que, en el perfil 3 se colocaron elementos del tornillo invertido en el módulo 5, sin espacio entre ellos y para el perfil 4 en el módulo 6 se reemplazó el tornillo delantero por una paleta de inclinación hacia adelante. En estos dos perfiles, el tornillo extrusor se obstruyó y no se recolectaron muestras. Posteriormente, se determinaron cuáles eran las condiciones óptimas del tornillo con el perfil 2. Mediante el estudio de las condiciones de operación, la temperatura en el barril, la velocidad del tornillo y la alimentación se obtuvo que con $120\text{ }^{\circ}\text{C}$, 75 rpm y 19 kg/h

respectivamente, existe un mayor rendimiento de la extracción del aceite del 85 % y la harina de torta con un aceite residual de 13 %. En la **Figura 3** se evidencia la configuración que el autor empleó para realizar cada ensayo, cabe resaltar que el orden de los perfiles va de arriba hacia abajo.

Figura 3. Configuración esquemática modular del barril y tornillo de la extrusora de doble tornillo [19].



Fuente: I. Amalia Kartika, P. Y. Pontalier, and L. Rigal [19].

Como se mencionó anteriormente en el trabajo de grado de Martínez sobre la extracción de aceite de nuez se empleó una máquina con tornillo helicoidal cuya longitud era de 150 mm, el diámetro 30 mm y una velocidad del tornillo de 20 rpm. Se realizaron tres ensayos en donde se combinó el contenido de humedad con la temperatura interna de prensado, para el primer ensayo se dejó a 2.5 % el contenido de humedad, la temperatura se variaba de 25 °C, a 50 °C y a 70 °C, para una extracción de aceite del 61 %, 64.7 % y 73 %, respectivamente. En el segundo ensayo se dejó un contenido de humedad del 4.5 % el aceite extraído para cada una de las temperaturas fue de 73 %, 68.7 % y 87.8 %. Por último, se dejó un contenido de humedad de 7.5 % el aceite extraído para cada una de las temperaturas fue de 83.5 %, 89.3 % y 78.3 % [6].

Los autores Quitiaquez Sarzosa & Reina Yanque, (2011) propusieron el diseño y la construcción de un molino para extracción de aceite de chontaduro con una capacidad de alimentación de 3.79 kg/h . Se realizó la caracterización morfológica y mecánica de los frutos, lo que permitió definir los parámetros del tornillo extrusor, éste tuvo una longitud total de 800 mm y una longitud de trabajo de 500 mm , un ángulo de la hélice de 12.76° y un paso de 74 mm con respecto a la longitud total del fruto, posteriormente, se calentaron los frutos durante 30 min , fueron partidos por la mitad e ingresados a la máquina para ser triturados; la capacidad de la máquina fue de 105 gramos de chontaduro por minuto [11].

Por otro lado, Santos Jaimes (2013) desarrolló un equipo para la extracción de aceite de semillas de algodón con una capacidad de procesamiento de 50 kg/h . Para la operación de este equipo tuvieron en cuenta variables como la temperatura y la humedad de la materia prima y posteriormente se analiza si el aceite obtenido se puede implementar para la elaboración de biodiesel. El diseño geométrico se realizó mediante el *software SolidWorks*, en este se planteó un tornillo sin fin y elementos mecánicos de unión y sujeción. No obstante, se diseñaron dos tipos de tornillos sin fin, uno tiene la característica de tener el paso constante y altura variable, mientras que el otro tiene un paso variable y altura constante. El primer diseño de tornillo tuvo un paso de 48 mm y una longitud roscada de 45 mm para el cono a contrapresión; el segundo diseño constó de tres (3) secciones de la misma longitud, la primera sección fue de alimentación la cual tuvo un paso de 63.5 mm , la segunda fue de compresión de la semilla con un paso de 50.8 mm y en la tercera sección ocurre la mayor compresión de la semilla con un paso de 38.1 mm . Los resultados obtenidos permitieron identificar que el tornillo de paso constante y altura variable fue adecuado para el proceso de extracción de aceite de semillas de algodón, debido a que generó una homogenización de la torta por la discontinuidad del paso a lo largo del tornillo, y permitió una extracción de aceite del 20.9% a una temperatura de 81°C [20].

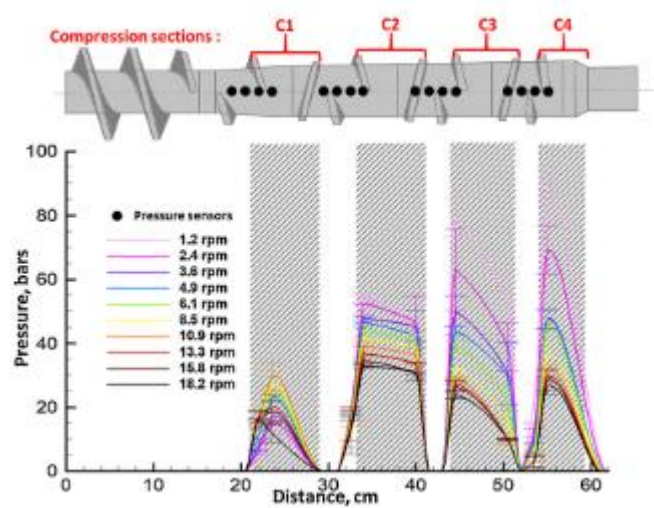
Evon, Kartika, Cerny, y Rigal evaluaron la factibilidad del prensado mecánico, la influencia de las condiciones de operación en el rendimiento del aceite de semillas de *jatropha*. Se empleó una máquina extrusora *Clextral BC 21* de doble tornillo entrelazado. Para realizar la prueba se hicieron cuatro (4) perfiles de tornillo, las diferencias se presentaron en la zona de trituración ubicada en los módulos 2 a 5 (**Figura 3**) y en la zona de prensado ubicada en el módulo 7. De igual forma, se tuvo en cuenta la velocidad de rotación y la temperatura a la que se realizó el prensado, estas condiciones influenciaron el rendimiento y la calidad del aceite. El rendimiento de aceite fue de 57.5% para un tornillo diseñado en la zona de trituración con 10 paletas monolóbulo y 10 bilóbulo, zona de prensado con tornillos de paso inverso de -33 mm , 50 mm de longitud, por otro lado, a unas condiciones de operación de 153 rpm de velocidad del tornillo y una capacidad de 5.16 kg/h y 80°C se obtuvo un rendimiento de aceite extraído del 70.6% y aceite residual encontrado en la torta menor al 8% [21].

Rodrigues, Miranda, Gominho, Vasconcelos y demás, en el año 2015, publicaron un artículo sobre el modelo y optimización de triturar las semillas de *Jatropha curcas* L. sin tratamiento por calentamiento en un molino de martillo, en donde emplearon el método de superficie de respuesta en 11 experimentos de acondicionamiento en seco, en función de la temperatura en un tiempo de 52 *min* a 108 *min*, en donde se produjo un aumento en el aceite extraído de 5.6 % (p/p) y un rendimiento de extracción del 84 %. Teniendo en cuenta las pruebas, se concluyó que se debió realizar un tratamiento de calentamiento en seco después de la trituración, debido a que se obtuvo un rendimiento de extracción del 88 % en condiciones de temperaturas elevadas por tiempos cortos, por ejemplo 90 °C en 10-20 *min* o 80°C en 30 *min* [22].

Por otro lado, el objetivo general de Galarraga Rivera, (2015) fue el diseño y selección de una prensa tipo tornillo para extraer aceite comestible de semilla de maíz. Se requirió procesar 53125 *kg/h*, la semilla de maíz fue caracterizada morfológicamente, se desarrolló el diseño mecánico de la máquina y se validó a partir de un análisis estático por medio de elementos finitos del programa *SolidWorks*. Para la simulación del tornillo sin fin, se aplicaron las cargas en el extremo de este y se obtuvo un desplazamiento máximo de 0.4 *mm*. De igual manera, se realizó un análisis estático y de fatiga en la camisa y el dado, los elementos mecánicos dimensionados soportan las cargas de presión a las cuales fueron sometidos por la fricción de las semillas con el tornillo, sin superar el límite de fluencia del material y se obtuvo un factor de seguridad de 1.5 [12].

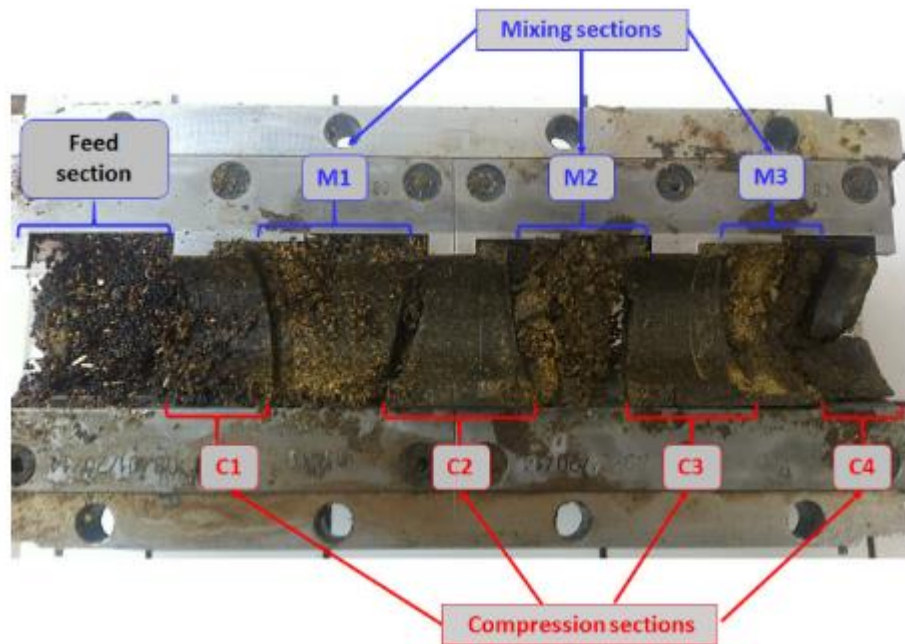
Bogaert, Mathieu, Mhemdi y Vorobiev emplearon materias primas de semillas de canola y lino, para realizar pruebas de extracción en una planta piloto a escala que procesaba hasta 40 *kg/h*, la cual fue instrumentada con tres sensores de temperatura y 16 sensores de presión. Se estudió la velocidad de giro del tornillo y el flujo de materia que existió dentro de la prensa de extracción, además, para determinar la presión radial del tornillo se realizaron diferentes pruebas, el contenido de aceite residual interno y cómo transcurrió la materia dependiendo de la velocidad. Para determinar la capacidad de la prensa con respecto a la velocidad de rotación se propuso una metodología experimental y los resultados permitieron establecer que la relación entre estas dos (2) variables es lineal, por ejemplo, demostraron que al aumentar la velocidad 1.2 *rpm* a 18 *rpm* aumentó de 6.9 % al 15.9 % el contenido de aceite residual y la capacidad de carga de 2.2 *kg/h* a 29.4 *kg/h*. De acuerdo con los resultados, las semillas se encontraron intactas en los primeros 200 *mm*, en esta área no se realizó compresión y solo se produjo el transporte de las semillas (**Figura 4**). Al igual, las curvas presentadas mostraron que la presión no evoluciona regularmente en todo el trayecto del tornillo, sino que, por el contrario, la presión va aumentando, mientras que en las secciones M1, M2 y M3 (**Figura 5**) la presión desciende hasta 0 *bar* [23].

Figura 4. Evolución de la presión vs la distancia axial del tornillo a diferentes rotaciones [23].



Fuente: L. Bogaert, H. Mathieu, H. Mhemdi, and E. Vorobiev [23].

Figura 5. Secciones del tornillo.



Fuente: L. Bogaert, H. Mathieu, H. Mhemdi, and E. Vorobiev [23].

En la **Tabla 4** se expone cada uno de los sistemas de extracción mecánicos, la materia prima utilizada, los parámetros evaluados y el rendimiento obtenido.

Tabla 4. Resumen método mecánico.

Autores	Materia prima que se empleó	Sistema mecánico	Parámetros evaluados	Rendimiento
Amalia Kartika, Pontalier, & Rigal, (2006)	Girasol	Tornillo doble	Geometría del tornillo Temperatura en el barril Velocidad del tornillo Capacidad de alimentación	85 %
Martínez, (2010)	Nuez	Tornillo helicoidal	Temperatura Contenido de humedad de la fruta Caracterización mecánica y morfológica de la fruta	89.3 %
Quitiaquez Sarzosa & Reina Yanque, (2011)	Chontaduro	Tornillo extrusor	Cocción de la fruta Geometría del tornillo Temperatura y humedad de la materia prima	
Santos Jaimes, (2013)	Semillas de algodón	Tornillo sin fin	Geometría del tornillo (paso constante, altura y paso variable y altura constante)	20.9%
Evon, Kartika, Cerny, & Rigal, 2013	Semillas de <i>jatropha</i>	Tornillo doble	Geometría del tornillo (zona de alimentación y zona de prensado)	70.6%
Rodrigues, Miranda, Gominho, Vasconcelos, Barradas, Pereira, Bianchi-de-Aguilar & Ferreira-Dias, (2015)	Semillas de <i>jatropha</i>	Molino de martillo	Estado de la semilla Temperatura Tiempo	88 %
Galarraga Rivera, (2015)	Semilla de maíz	Tornillo sencillo	Caracterización morfológica Cargas de presión Fricción de la semilla con el tornillo Velocidad de giro del tornillo	
Bogaert, Mathieu, Mhemdi, & Vorobiev, (2018)	Semillas de canola y lino	Tornillo sencillo	Geometría del tornillo Temperatura Flujo másico Presión radial	15.9 %

Elaborada por el autor.

1.2 CARACTERIZACIÓN MECÁNICA Y MORFOLÓGICA DE FRUTOS

En esta sección, se presentan algunos estudios basados en esfuerzos normales de compresión y se establecen las características mecánicas o pruebas de deformación realizadas en frutos [24]. El propósito general de una caracterización mecánica por medio de ensayos de compresión es determinar las curvas esfuerzo - deformación para estimar los parámetros del proceso y diseño en función de la presión y la fuerza. Al igual, el análisis de estos esfuerzos permite determinar el punto que soporta el máximo nivel en un elemento sometido a cargas [25].

Según la Organización Internacional de Normalización (ISO), la textura se puede definir como: *"Todos los atributos reológicos y estructurales (geométricos y superficiales) de un producto alimenticio perceptible por medio de receptores mecánicos, táctiles y, en su caso, visuales y auditivos"* [26].

Por lo anterior, se analiza el concepto de análisis del perfil de textura (TPA) y las características reológicas de diferentes frutos oleaginosos.

1.2.1 Análisis del perfil de textura (TPA). Es un procedimiento que imita las condiciones a las que se somete el alimento durante el proceso de masticación de la mandíbula; en la prueba se miden y cuantifican parámetros: dureza, fragilidad, masticabilidad, elasticidad y cohesividad (**Tabla 5**), estos se relacionan con la forma de caracterizar las propiedades mecánicas de un alimento sólido, de igual forma, se relaciona con la variable de deformación [27], [28]. En el procedimiento se sitúa la probeta en la base, es comprimida y relajada dos (2) veces mediante una placa, por último, se cuantifican los parámetros mecánicos de las curvas fuerza-tiempo, el cual se puede relacionar con el parámetro de deformación. La **Figura 6** muestra una curva característica de este análisis [28], en donde el primer pico evidenciado se relaciona con la fracturabilidad o fragilidad, es decir, la primera fuerza de rotura significativa de la probeta; el segundo pico relaciona la dureza, es decir, la máxima fuerza necesaria durante el primer ciclo de compresión para generar una determinada deformación y en el tercer pico se obtienen los datos de fuerza, cohesión y elasticidad, estas dos últimas variables hacen referencia a la deformación del fruto antes de romperse en la segunda compresión aplicada.

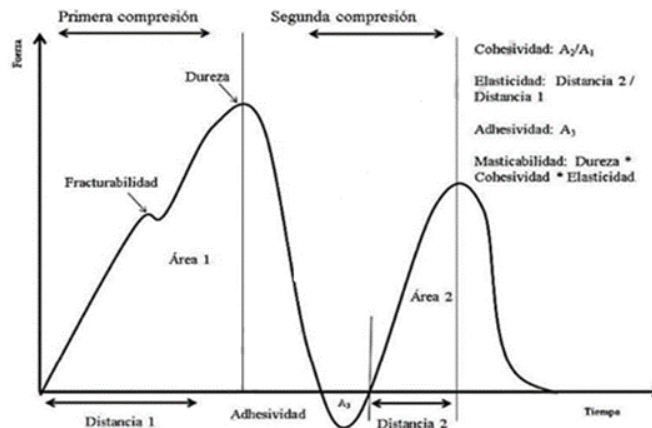
Cabe resaltar, que para realizar este tipo de análisis se debe contemplar el grado de maduración de la fruta, es decir, el índice que ha alcanzado la fruta luego de que se ha completado su desarrollo o formación [29].

Tabla 5. Variables obtenidas del TPA [27], [28].

Variable	Definición	Determinación
Fragilidad (Fracturability) [N]	Relacionada con la cohesión. Fuerza necesaria para romper la muestra	Fuerza en la primera ruptura significativa de la muestra
Dureza (Hardness) [N]	Fuerza necesaria para generar una determinada deformación	Máxima fuerza durante el primer ciclo de compresión
Cohesión (Cohesiveness) [Relación A_2/A_1]	Relativa al grado de deformación de un producto antes de romperse Resistencia de un material a una segunda deformación con relación a como fue el comportamiento en el primer ciclo de deformación. Trabajo realizado en la segunda compresión dividido entre el trabajo durante la segunda compresión.	Relación entre el área positiva del segundo ciclo de compresión (A_2) y el área positiva del primer ciclo (A_1)
Adhesividad (Adhesiveness) [J]	Relativa al esfuerzo requerido para separar la superficie del alimento de otra superficie	Área negativa después del primer ciclo de compresión. Representa el trabajo necesario para separar la superficie del equipo y la muestra
Elasticidad (Springiness)	Relativa a la rapidez de recuperación de la deformación después de la aplicación de una fuerza y al grado de dicha recuperación	Cociente entre las longitudes final e inicial de la muestra L_2/L_1
Gomosidad (Gumminess) [N]	Relativa a la cohesión de un producto blando	
Masticabilidad (Chewiness) [N]	Relacionada con la cohesión y el tiempo necesario o el número de masticaciones requeridas para dejar un producto sólido en las condiciones necesarias para su deglución.	

Fuente: P. Talens Oliag, J. Torres González, K. González Morelos, and D. Acevedo Correa [27], [28].

Figura 6. Curva típica de TPA.

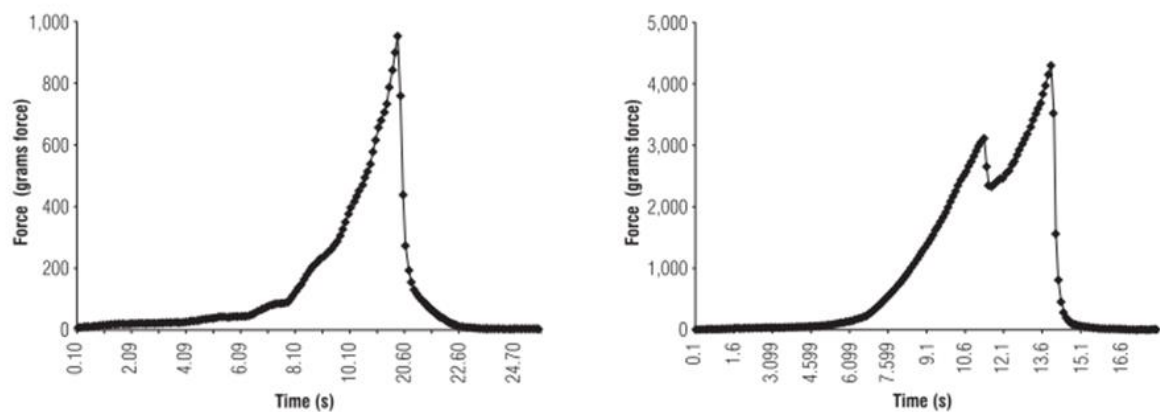


Fuente: N. V. Esquivel Reyes, A. González, A. Alvis, and G. Arrázola [30], [31].

En Letaief, Rolle, & Gerbi, (2008) el análisis de textura se realizó a las semillas de la uva, comprimiendo dos (2) veces con una diferencia de 2 s, bajo una deformación del 25 %. Se concluyó que la fuerza de ruptura de la semilla predomina en un análisis de varianza en un 29.9 %, ya que la fuerza máxima requerida fue de 0.913 N [32].

Los autores W. J. Llanos, B. Castillo, and M. T. Londoño realizaron la caracterización de las propiedades mecánicas de la uchuva (*Physalis peruviana L.*) mediante 50 pruebas reológicas de compresión unidireccional para obtener la respuesta mecánica de la fruta por el tipo de fuerzas ejercidas, por lo cual, se empleó un analizador de textura con una sonda cilíndrica acrílica con diámetro de 50.8 mm, longitud de 20 mm a una velocidad de 2 mm/s. Las probetas con cáscara se ubicaron en dos (2) direcciones: axial y radial, para aplicar la compresión de la fruta. Mediante el software *TexturePro CT V1.2 Build 9* se obtuvo una curva de Fuerza vs Tiempo (con medición de deformación) como se observa en la **Figura 7**. A partir de la curva obtenida se determinó el esfuerzo máximo obtenido de 6.0 kPa a partir de la fuerza máxima de 38.6 ± 6.2 N del ensayo de compresión axial que se les realizó a las probetas que tenían un grado de maduración cuatro (4). La **Tabla 6** evidencia los datos obtenidos por los autores al realizar cada una de las pruebas [33]. Los autores concluyeron que el fruto de la uchuva, cuando fue sometido a cargas cuasi - estáticas, se comportó como un material viscoelástico con alta variabilidad de propiedades anisotrópicas.

Figura 7. Fuerza vs tiempo para una compresión unidireccional: radial (izquierda) y axial (derecha).



Fuente: W. J. Llanos, B. Castillo, and M. T. Londoño [33]

Tabla 6. Fuerza máxima de compresión (adaptación de [33])

Tipo de prueba	Grado de madurez	Fuerza máxima (N)	σ (kPa)
Compresión axial	4	38.6 ± 6.2	6.0
Compresión radial	4	9.4 ± 0.2	2.8

Tipo de prueba	Grado de madurez	Fuerza máxima (N)	σ (kPa)
Compresión axial	5	34.9 ± 4.5	5.5
Compresión radial	5	32.5 ± 8.1	3.4
Punción axial	4	4.9 ± 1.4	440
Punción radial	4	4.7 ± 1.5	32.5
Punción axial	5	4.9 ± 1.2	140
Punción radial	5	3.5 ± 2.2	62.0
Cizalla en el pedúnculo	N/A	15.1 ± 8.1	

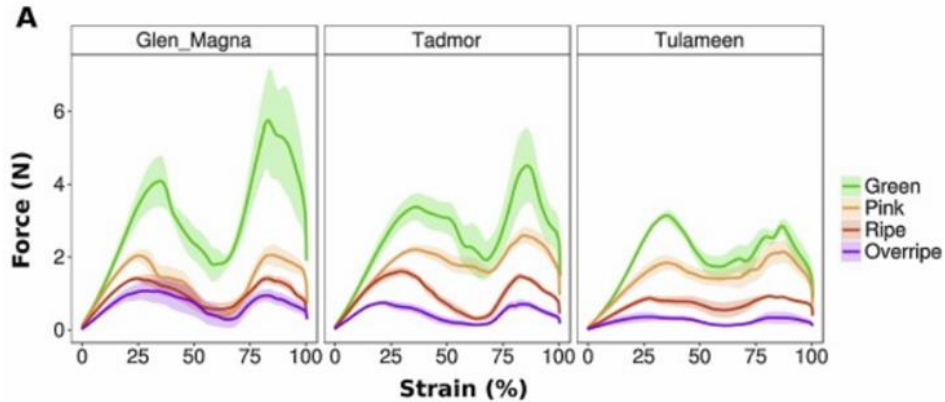
Fuente: modificado de W. J. Llanos, B. Castillo, and M. T. Londoño [33]

De igual manera en Linares, Castillo, & Londoño, (2013) por medio de pruebas reológicas se analizó la textura de la granadilla para caracterizar mecánicamente el fruto; en la prueba de compresión unidireccional se establecieron dos (2) ubicaciones: transversal y longitudinalmente para la aplicación de la carga. Se obtuvo una fuerza máxima de $107.4 \pm 19.5 N$ para la prueba de compresión transversal y $117.4 \pm 23.7 N$ para longitudinal en el cuarto (4) grado de maduración de la fruta y para el quinto (5) grado de maduración se obtuvo $84.3 \pm 18.8 N$ y $98.4 \pm 25.1 N$ respectivamente [34].

En el artículo de Giongo, Ajelli, Poncetta, Ramos-García y demás, [35] desarrollaron y validaron un conjunto de parámetros de textura que emplearon en el análisis de textura, para la evaluación de esta, utilizaron un analizador de referencia *Zick Roell*, emplearon dos (2) pruebas, (i) Prueba de penetrometría destructiva y (ii) Prueba de compresión no destructiva. La prueba de compresión se basó en una prueba de doble ciclo con un tiempo de espera de 5 s entre cada ciclo, en la prueba fue importante realizar una compresión alta sin llegar a romper el alimento evaluado. La velocidad de la prueba fue 100 mm/min ; la carga fue 20 % aumentándola hasta el 99 % de deformación. Como resultado se obtuvo una curva de fuerza deformación donde se derivó el parámetro de dureza, el cual fue asociado a la primera compresión y corresponde a la fuerza máxima empleada.

En la **Figura 8** se observan cuatro (4) colores asociados a las epatas de maduración (Verde-Green (G), Rosa-Pink (P), Rojo-Ripe (R) y Madura Madura-Overripe (OR)) para tres (3) cultivos (*Glend Magna*, *Tadmor* y *Tulameen*), así mismo el perfil de textura cambió considerablemente teniendo en cuenta la evolución de maduración de la fruta *Green* a *Overripe*. De la evaluación mencionada, se pudo concluir que la fuerza de la piel o cáscara de la fruta no afectó el análisis de textura, que la forma de la fruta en las diferentes etapas de maduración fue susceptible a la deformación bajo cargas de compresión y para el caso de la frambuesa, esta se caracterizó por tener un módulo de Young bajo.

Figura 8. Curva esfuerzo deformación [35].



Fuente: L. Giongo, M. Ajelli, P. Poncetta, M. Ramos-García, P. Sambo, and B. Farneti [35].

En la **Tabla 7** se presenta el resumen del método del perfil de textura y reología teniendo en cuenta los parámetros evaluados.

Tabla 7. Resumen de parámetros evaluados en el TPA.

Autores	Materia prima empleada	Parámetros evaluados
Letaief, Rolle, & Gerbi, (2008)	Semillas de uva	Doble compresión a 2 s Deformación al 25% Fuerza de ruptura
Llanos, Castillo, and Londoño, (2013)	Uchuva-grosella	Compresión unidireccional con sonda cilíndrica Fuerzas máximas de compresión axial y radial Fuerzas máximas de punción axial y radial
Linares, Castillo, & Londoño, (2013)	Granadilla	Grados de maduración Compresión unidireccional transversal y longitudinal Fuerzas máximas de compresión transversal y longitudinal
Giongo, Ajelli, Poncetta, Ramos-García, Sambo, and Farneti, (2019)	Frambuesa	Grados de maduración Doble compresión a 5 s Deformación del 20% al 90% Velocidad de compresión Grados de maduración

Fuente: autor.

1.2.2 Características reológicas. La reología es la ciencia que estudia el flujo y la deformación de la materia [36], es aplicada a los sólidos, líquidos, gases, geles, espumas y semisólidos. De igual forma, en el estudio de los antecedentes de esta

sección se encuentra el termino de viscosidad, que según Newton lo presenta como un sinónimo de la fricción interna, siendo la viscosidad una constante de proporcionalidad entre el esfuerzo aplicado y la velocidad de deformación causada [13].

Mazile Bezerra, Pelegrina y Gasparetto (2004), realizaron un análisis del comportamiento reológico de la pulpa de mango al variar la temperatura de 10°C a 60°C . Mediante un analizador de texturas o texturómetro test modelo TA-TX2 se estandarizó el grado de madurez a 16.6° Brix para ejecutar los ensayos, se empleó un reómetro de cilindro concéntrico ZA30 con un tiempo de ejecución de 4 min por prueba. Se aplicó el modelo *Mizrahi-Berk* y el modelo matemático de la ley de potencia para determinar la curva de velocidad de esfuerzo-deformación, permitiendo así calcular el índice de comportamiento en función de la temperatura y el índice de consistencia mediante la ecuación de *Arrhenius*. De lo anterior, se concluye que a medida que la temperatura aumenta, el índice de comportamiento aumenta y el índice de consistencia disminuye, lo que permite determinar que la pulpa se vuelve menos viscosa y pierde su pseudoplasticidad [37].

Para realizar el análisis del comportamiento reológico y el efecto que tiene la temperatura sobre los parámetros de flujo de la fruta níspero Andrade, Torres, Montes y Pérez [38] emplearon el modelo matemático de la ley de potencia, ya que relacionó la fuerza de cizallamiento y la variación del gradiente de cizalla. Para realizar las pruebas se empleó un viscosímetro *Brookfield* modelo DV-II + Pro, se tomó una muestra de fruta de 400 mL en un *beaker*, variando la velocidad de 0 a 100 rpm por un tiempo de 5 min , y otra prueba con velocidad descendente de 100 a 0 rpm ; se determinó la viscosidad aparente para cada cambio de velocidad. Concluyeron que el comportamiento del flujo es independiente al tiempo, ya que no presentó ruptura del fluido durante las pruebas.

Haminiuk, Sierakowski, Izidoro, Maciel, Scheer y Masson [39] investigaron el comportamiento reológico oscilatorio de pectina extraídas de la pulpa de frutos rojos (fresa, mora y frambuesa) mediante el uso de un reómetro *Haake Rheostress* 600 acoplado a un sensor de placa cónica a una temperatura de 20°C . Evaluaron la estabilidad en función de la variación de la temperatura de 20°C a 60°C . Se realizó un barrido de tensión en cada una de las pulpas para determinar en qué zona se presentó visco elasticidad y según los datos obtenidos en esta zona, la deformación del sistema péptico de fresa bajo una tensión de 10 Pa fue inferior al 3% , mientras que para el sistema péptico de la mora y frambuesa bajo una tensión de 1 Pa , las deformaciones fueron 0.46% y 0.38% , respectivamente.

En el trabajo realizado por Augusto, Cristianini y Ibarz [40] evaluaron las propiedades reológicas de corte dinámico y en estado estacionario de la pulpa de ciruela en función de la variación de la temperatura (0°C a 80°C) con un reómetro de esfuerzo controlado, durante 5 min antes de ser cortadas; mediante el modelo

Herschel-Bulkley se describe el comportamiento del flujo después de realizar el corte en estado estacionario en un rango de velocidad de cizallamiento de 0.01 a 100 s^{-1} . De igual manera, se realizaron barridos de tensión para determinar la zona viscoelástica lineal de la fruta, se empleó la regla de *Cox-Merz* para determinar mediante ensayos de cizallamiento oscilatorio. En el trabajo se concluyó que al aumentar la temperatura se reduce el límite elástico y que la viscosidad compleja es mayor a la viscosidad aparente.

En el artículo de Sánchez, Castillo, Quezada, Palacios y López Rivera [41] se presentó como problemática la caracterización del comportamiento del flujo de la pulpa de manzana simple y concentrada, evaluando así el comportamiento reológico mediante un reómetro de cilindros concéntricos *Brookfield R/S-CC+* haciendo uso del spin CC-40 para pulpa simple y CC-25 para pulpa concentrada; para realizar las pruebas se varió la temperatura y la velocidad angular de deformación, se destacó que la fruta está constituida por partículas sólidas en una solución acuosa, por tal motivo, el comportamiento reológico está presidido por las características tanto de la fase sólida como de la fase líquida. Al realizar el análisis reológico se pudo concluir que a medida que la temperatura aumentó hay una disminución del índice de consistencia y con los valores obtenidos en el índice de comportamiento del flujo se mostró un carácter pseudoplástico de la pulpa.

Por último, en el artículo de Santos Lopes, Mattietto, Castle de Menezes, Meller da Silva, y Silva Pena [42] se estudió el comportamiento reológico de la pulpa de cereza brasileña, variando la temperatura empleadas para la pasteurización de $83 \text{ }^\circ\text{C}$ a $97 \text{ }^\circ\text{C}$, se empleó un reómetro digital marca *Brookfield Rv-Dv Iii*. Según los experimentos realizados se determinó que la cereza presentó un comportamiento pseudoplástico, ya que al implementar el modelo *Herschel-Bulkley* el comportamiento del fluido varió en un rango de 0.448 a 0.627 . Además, el comportamiento de la viscosidad con respecto a la temperatura se describió mediante una ecuación análoga a la ecuación de *Arrhenius*, en donde se observó que al aumentar la temperatura existió una disminución de la viscosidad aparente.

La **Tabla 8** de resumen sobre reología, presenta parámetros necesarios o requeridos empleados por los diferentes autores, para hallar la viscosidad.

Tabla 8. Resumen sobre reología.

Autores	Materia prima empleada	Parámetros evaluados
Mazile Bezerra, Pelegrina y Gasparetto (2004)	Pulpa de mango	Variación de temperatura Índice de consistencia Índice de comportamiento Ecuación de Arrhenius Modelo Mizrahi-Berk ley de potencia Seudoplasticidad

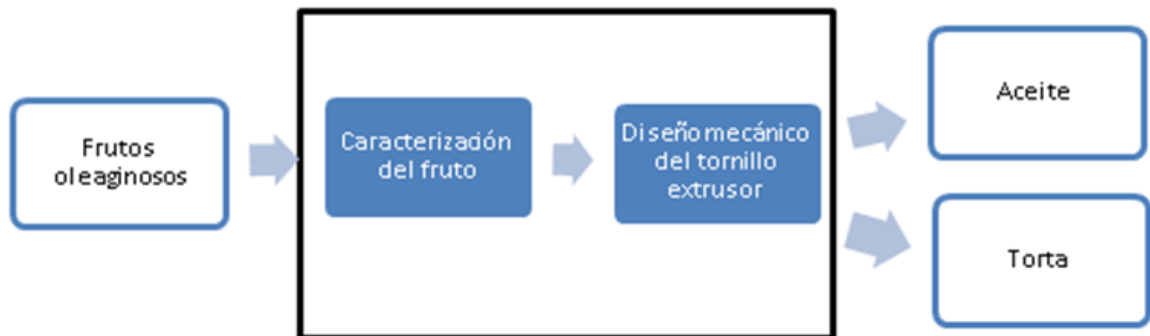
Autores	Materia prima empleada	Parámetros evaluados
R. D. Andrade, R. Torres, E. J. Montes, O. A. Pérez, L. E. Restan, and R. E. Peña, (2009).	Pulpa de níspero	Variación de la temperatura ley de potencia Viscosidad aparente Reología Seudoplasticidad
C. W. Isidoro Haminiuk, M. R. Sierakowski, D. R. Izidoro, G. M. Maciel, A. de P. Scheer, and M. L. Masson, (2009).	Pulpa de frutos rojos (mora, frambuesa y fresa)	Barrido de tensión Viscoelasticidad Deformación Reología Seudoplasticidad
P. E. D. Augusto, M. Cristianini, and A. Ibarz, (2012).	Pulpa de ciruela	Variación de la temperatura Modelo Herchel-Bulkley Barrido de tensión Regla de Cox-Merz Seudoplasticidad
D. Manayay Sánchez, W. Castillo Martinez, S. Quezada Berru, L. Palacios Ambrocio, and S. López Rivera, (2013).	Pulpa de manzana	Variación de la temperatura Reología Índice de consistencia Índice de comportamiento Seudoplasticidad
A. Santos Lopes, R. de A. Mattietto, H. Castle de Menezes, L. H. Meller da Silva, and R. da Silva Pena, (2013).	Pulpa de cereza basileña	Reología Variación de la temperatura Ecuación de Arrhenius Viscosidad aparente Seudoplasticidad

Fuente: autor.

2. METODOLOGÍA DE TRABAJO

En este capítulo se establece el modelo matemático empleado para determinar cada uno de los componentes que integran el sistema de extracción de aceite de frutos oleaginosos mostrados en la **Figura 9**. El fruto procesado se transforma en un flujo que usualmente se comporta como un fluido no newtoniano y no isotérmico, ya que forma un proceso de extrusión-cocción dentro del tambor, que influye en la viscosidad [43]. Por tanto, la viscosidad del material cambia y genera pérdidas de presión a lo largo del tornillo, siendo pertinente abordar el modelado a partir de un enfoque reológico que considere el cambio de presión en cada una de las zonas del tornillo. Cabe resaltar que este comportamiento justifica el uso de la ecuación de la ley de potencia teniendo en cuenta la viscosidad al cizallamiento [43]. Además, en este capítulo se formula la síntesis de los componentes del sistema mecánico para la extracción de aceite y se propone una metodología genérica de diseño para un sistema de extracción mecánica de aceite de frutos oleaginosos.

Figura 9. Metodología genérica del sistema de extracción de aceite de frutos oleaginosos.



Fuente: autor.

2.1 CARACTERIZACIÓN DEL FRUTO

Teniendo en cuenta los parámetros técnicos requeridos para el diseño de los sistemas de extracción hallados en el Capítulo 1, se encuentra que, para la caracterización, es necesario describir los aspectos morfológicos y mecánicos del fruto, como se presenta a continuación.

2.1.1 Caracterización morfológica. En esta parte del proceso se emplea una muestra estadísticamente representativa de frutos o semillas oleaginosos que permitan establecer los parámetros geométricos y morfológicos necesarios para el caso de estudio. Es importante caracterizar la masa inicial (m_i), la longitud (l), el

diámetro, el volumen (v), la densidad (ρ), la masa de la semilla o fruto, por último, la masa de la semilla o fruto (m_f); algunos de estos datos serán empleados en análisis posteriores.

Cabe resaltar que dentro de la caracterización morfológica se tiene en cuenta la composición química del fruto, por lo tanto, en la **Tabla 9** y **Tabla 10** se evidencia el porcentaje de ácidos grasos de diferentes frutos y semillas oleaginosos, valor considerado para determinar el rendimiento de la máquina en el proceso de extracción.

Tabla 9. Composición de aceite (%) de diferentes semillas oleaginosas [44] [45].

Ácidos grasos	Semilla de chía	Semilla de linaza	Semilla de Rosa mosqueta	Semillas de cacao amazónico
Ácido Palmítico	7.29 ± 0.17	5.21 ± 0.10	3.71 ± 0.04	7.23 ± 0.20
Ácido Palmitoleico	0.06 ± 0.00		0.10 ± 0.00	0.312 ± 0.04
Ácido Esteárico	3.84 ± 0.09	3.40 ± 0.07	2.46 ± 0.09	29.27 ± 0.80
Ácido Oleico	8.91 ± 0.30	15.76 ± 0.47	16.12 ± 0.24	36.30 ± 1.00
Ácido Linoleico	19.36 ± 0.16	16.23 ± 0.18	41.55 ± 0.44	3.60 ± 0.08
Ácido Linolénico	0.08 ± 0.01	0.62 ± 0.11		0.20 ± 0.01
Ácidos grasos insaturados	87.06	90.3	92.06	

Fuente: modificado de P. Jiménez P, L. Masson S, and V. Quitral R, E. Alvárez G, W. Murillo A, E. Murillo P, B. A. Rojano, and J. J. Méndez A [44] [45].

Tabla 10. Composición de aceite (%) de diferentes frutos secos oleaginosos [46].

Ácidos grasos	Almendras	Avellanas	Nueces	Cacahuates	Pistachos	Piñones
Ácido Palmítico	6.6	5.0	3.7	10.5	12.3	6.3
Ácido Esteárico	1.9	2.0	2.5	2.2	2.4	4.5
Ácido Oleico	63.7	77.7	21.0	48.1	53.7	36.6
Ácido Linoleico	20.1	9.3	59.2	31.6	29.3	45.2
Ácido Linolénico	0.7	0.2	5.8		0.5	1.0

Fuente: E. Gimeno, "Frutos Secos y Frutas [46]

2.1.2 Caracterización mecánica. El método implementado en esta etapa es el de TPA, puesto que, la materia prima que se emplea es de origen biológico, además, para obtener la relación fuerza/deformación que depende del tiempo y de la velocidad de carga se emplea el método de textura destructivo de la probeta [24], por lo cual, se debe establecer la velocidad y el porcentaje de compresión.

El procedimiento empleado para frutos es:

1. Cortar el fruto de acuerdo con la orientación de las fibras, transversal y longitudinal, definiendo el diámetro y la longitud de todas las probetas.
2. Colocar la probeta en el centro de la placa fija de la máquina.
3. Comprimir la probeta dos (2) veces con la máquina.

El procedimiento empleado para las semillas oleaginosas fue:

1. Generar las muestras de semillas dentro de un dispositivo al que se le conoce el diámetro y la longitud inicial.
2. Colocar sobre la placa de fija de metal la probeta con las semillas, en este caso se pueden emplear sondas que se adecuen a la forma de la probeta o muestra realizada.
3. Comprimir la probeta dos (2) veces con la máquina.

A partir de la curva típica del TPA (**Figura 6**), se determinó el esfuerzo generado en la probeta (σ) con la ecuación 2.1, teniendo en cuenta la fuerza máxima (F) y el área de la sección transversal (A_t) de la probeta se calcula la deformación del fruto en el pico 2 (ecuación 2.2) a partir de la longitud inicial (L_0) y final (L). el parámetro Módulo de Young (ecuación 2.3). También, se empleó la ecuación 2.4 para calcular la energía de deformación total (Tenacidad-energía por unidad de volumen) que acumula la probeta antes de alcanzar la rotura en la prueba de TPA. Por último, para determinar el esfuerzo cortante del fruto se emplea la ecuación 2.5 (

Tabla 11).

Tabla 11. Variables para calcular las propiedades mecánicas.

Variable	Ecuación	Numeración
Esfuerzo	$\sigma = \frac{F}{A_t}$ [25]	2.1
Deformación	$\varepsilon = \frac{L_0 - L}{L_0}$ [24]	2.2
Módulo de Young	$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$ [24]	2.3
Energía por unidad de volumen	$E_V = \int_0^{\varepsilon_R} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon$ [13]	2.4
Esfuerzo cortante	$\tau = \eta * \dot{\gamma}$ [47]	2.5

Fuente: autor.

2.1.3 Caracterización reológica. La ley de potencia que describe el comportamiento reológico de materiales viscosos, es usada para realizar las curvas de flujo que representan el comportamiento newtoniano y reológico de materiales oleaginosos [13]. Por lo tanto, se emplea la ecuación 2.6 donde el índice de consistencia es k [Ns^n/m^2], la tasa de deformación por cortante es $\dot{\gamma}$ [s^{-1}], la

viscosidad aparente η [Pa] y n es el índice de la ley de potencia [48]. En la **Tabla 12** se presentan los valores de los parámetros de diferentes materiales alimenticios.

$$\eta = k \dot{\gamma}^{n-1} \quad 2.6$$

Tabla 12. Parámetros de los índices empleados en el modelo de la ley de potencia [11], [49] y [50].

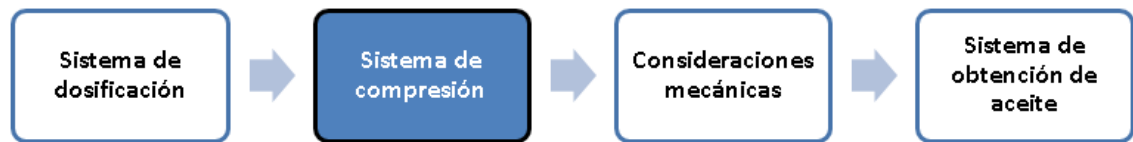
Material	Concentración (%)	Procedimiento de dispersión	k	n
Almidón de trigo	8.5	Pre calentamiento a 96°C, calentamiento y agitación variable	490-5370	0.53-0.82
Almidones de cereal				
Sémola de trigo	5.5-10	Viscoamilógrafo (Brabender) a 96°C	25-650	0.06-0.85
Harina de trigo				
Hojuelas de papa	9.1	Sin pre calentamiento	71-2028	0.67-0.86
		Pre calentamiento a 80°C	387-9920	0.52-0.77
Sémola de maíz	9.1	Sin pre calentamiento	10-390	0.74-1.00
		Pre calentamiento a 80°C	40-900	0.60-0.96

Fuente: modificado y traducido de W. Quitiaquez Sarzosa and C. Reina Yanque, B. Launay and J. M. Lisch y J. L. Doublier, P. Colonna, and C. Mercier [11], [49] y [50].

2.2 DISEÑO MECÁNICO

En esta sección se plantean las ecuaciones empleadas para cada una de las etapas del procedimiento de diseño mecánico del tornillo extrusor presentado en la **Figura 10**.

Figura 10. Procedimiento del diseño mecánico.

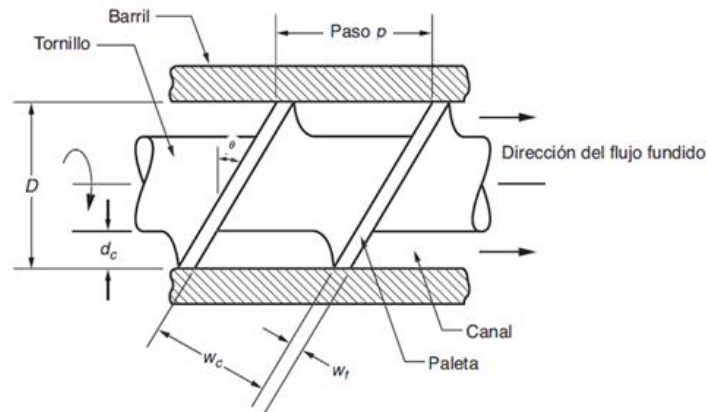


Fuente: autor.

2.2.1 Sistema de dosificación. Con base en las referencias bibliográficas estudiadas, se genera el modelo de una tolva circular y una cuadrada, ya que, según [13] este tipo de tolvas proporcionan un flujo constante de material y casi siempre se diseñan con un volumen que permite albergar hasta 2 horas de trabajo

2.2.2 Sistema de compresión. Los parámetros geométricos para diseñar la geometría de un tornillo extrusor (**Figura 11**) son: el diámetro del tornillo (D), el paso (p), la profundidad del canal del tornillo (d_c), el ancho del filete (W_t) que corresponde aproximadamente al 10 % del diámetro del tornillo, la holgura del canal (δ) es variable, la profundidad del canal (d_c) y la longitud del husillo (L), las ecuaciones se evidencian en la **Tabla 13** [13]. Cabe resaltar, que para diseñar un tornillo extrusor adecuado en el proceso de fusión y en el transporte de esa fusión, según las referencias bibliográficas estudiadas se prefiere plantear una geometría de tornillo con paso variable [15].

Figura 11. Detalles del tornillo extrusor del barril [14].



Fuente: M. P. Groover [14].

Tabla 13. Variables para calcular dimensiones geométricas del tornillo [14], [15].

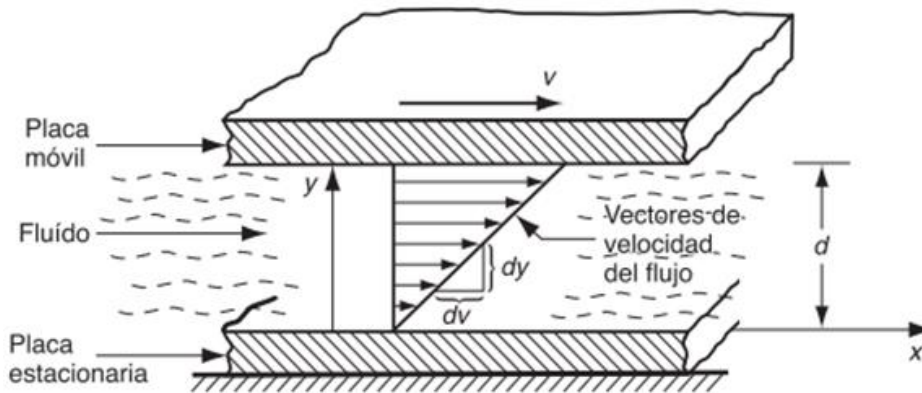
Variable	Ecuación	Numeración
Diámetro de abertura del barril	$D_b = (\delta * 2) + D$	2.7
Diámetro del eje del tornillo	$D_r = D_b - 2d_c$	2.8
Ángulo del filete	$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{p}{\pi D}\right)$	2.9
Ancho del canal	$W_c = (\pi D \tan \theta - W_t) \cos \theta$	2.10
Número de hélices	$\#Hélices = \frac{L}{p}$	2.11

Fuente: M. P. Groover, D.-W. Sun [14], [15]

Posterior al diseño geométrico del tornillo, se expresa el modelo matemático del flujo por arrastre resultante de la fricción entre el líquido viscoso de la transformación

de la materia prima y la superficie del barril (**Figura 12**), determinando la presión a lo largo del tornillo debido al cambio de la viscosidad del fruto oleaginoso. Teniendo en cuenta lo anterior, la superficie del barril se puede esquematizar como dos placas paralelas que están separadas a una distancia d , donde la placa móvil tiene una velocidad v y la velocidad promedio del fluido es $v/2$, teniendo en cuenta, que se considera como un flujo laminar en estado estacionario, estas variables fueron comparadas con los parámetros definidos para el tornillo de extrusión y la superficie del barril [14]. Con la ecuación 2.12 se calcula el gasto volumétrico por arrastre (Q_d) [m^3/s], donde N [rps] es la velocidad rotacional del tornillo.

Figura 12. Fluido que fluye entre dos placas paralelas.



Fuente: M. P. Groover [14].

$$Q_d = 0.5 \pi^2 D^2 N d_c \sin \theta \cos \theta \quad 2.12$$

Cuando pasa a la zona de compresión (**Figura 1**) se genera una contrapresión en el barril, donde se supone existe una fuga de flujo mínima a través de la holgura de la hélice y del barril de extrusión. En los tornillos de extrusión, el flujo a contrapresión (Q_b) [m^3/s] es igual al flujo por arrastre en esta sección del tornillo ($Q_d = Q_b$), teniendo en cuenta, la curva característica del tornillo con el barril, además, de que la contrapresión producida no es despreciable lo que ocasiona que el flujo sea igual cero, lo que permite determinar la presión piezométrica máxima ($p_{m\acute{a}x}$) [MPa] dada por la ecuación 2.13.

$$p_{m\acute{a}x} = \frac{6\pi D N L \eta \cot \theta}{d_c^2} \quad 2.13$$

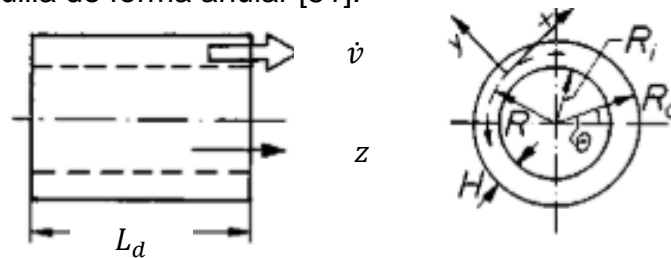
De igual forma, para la zona de medición se tiene en cuenta la característica del troquel, ya que define la relación que existe entre la presión piezométrica y el gasto en la máquina, además, en el diseño del troquel se relacionan las dimensiones geométricas de la sección por donde pasa el fundido [15]. Teniendo en cuenta que

el flujo volumétrico (\dot{v}) que atraviesa el troquel es un fluido no newtoniano pseudopolítico y aplicando la ley de potencia, se propone el diseño de una abertura anular en el canal de salida del troquel, que permite realizar una contrapresión ideal del material, por lo tanto, con las variables R , H y la longitud de abertura del canal (L_d) se determina el factor de forma del troquel (k_s) según la ecuación 2.14 y la

Figura 13 [14] [15] [51].

$$k_s = \frac{2\pi R + H}{12L_d} * H^3 \quad 2.14$$

Figura 13. Boquilla de forma anular [51].



Fuente: W. Michaeli [51].

El gasto real (Q_x) en esta zona del tornillo, dada la ecuación 2.15, depende del troquel y de la presión (p) que se aplicó para forzar al flujo a pasar por medio de esta abertura. Para calcular la presión se igualaron las ecuaciones del flujo a contrapresión y del gasto volumétrico según lo establece el autor en [14].

$$Q_x = k_s p \quad 2.15$$

2.2.3 Consideraciones mecánicas. El tornillo posee la capacidad de transmitir la torsión necesaria para girar y soportar los esfuerzos impuestos por el proceso de transporte a lo largo de la extrusión, la determinación de dicha capacidad se lleva a cabo desde la zona de alimentación hasta la zona de medición. Para este trabajo de investigación la configuración y/o ubicación del tornillo es horizontal con una entrada y 2 salidas [52].

Se calculó el área de llenado (S) [m^2] que ocupa el material que moverá el tornillo con la ecuación 2.16, donde se tuvo en cuenta el diámetro del tornillo y el coeficiente de relleno de la sección (λ) según la **Tabla 14**. Además, se calcula la velocidad de desplazamiento (V) y la capacidad (Q) [kg/h] de la máquina, a partir de las ecuaciones 2.17 y 2.18. en esta última el coeficiente de disminución de flujo del

material (i) está en función del ángulo de inclinación del tornillo con respecto a la horizontal (**Tabla 15**) y de la densidad del material (ρ).

$$S = \lambda \frac{\pi D^2}{4} \quad 2.16$$

$$V = \frac{p N}{60} \quad 2.17$$

$$Q = S V \rho i \quad 2.18$$

Tabla 14. Coeficiente de relleno según carga [52].

Tipo de carga	Coeficiente de relleno
Pesada y abrasiva	0.125
Pesada y poco abrasiva	0.25
Ligera y poco abrasiva	0.32
Ligera y no abrasiva	0.4

Fuente: D. E. Osorio Orellana [52].

Tabla 15. Coeficiente de disminución de flujo del material en función del ángulo de inclinación.

Inclinación del tornillo en grados °	0°	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°
Coeficiente de disminución de flujo de material	1	0.9	0.8	0.7	0.65	0.42	0.3	0.2

Fuente: D. E. Osorio Orellana [52].

La sección crítica del tornillo de extrusión es la zona de alimentación, ya que el área de la sección transversal de la raíz del tornillo es generalmente la más pequeña y, por lo tanto, la resistencia a la torsión es más baja [47]. En esta zona, el motor transmite todo el par torsional, mientras que, en la zona de compresión y medición, solo se transmite una fracción del par total. A continuación, se presentan las ecuaciones para calcular la potencia en cada una de las zonas del tornillo. La potencia consumida en las zonas de alimentación y compresión se pueden deducir al relacionar el esfuerzo de la cizalla en las paredes y la velocidad del flujo basado en Z. Tadmor and C. G. Gogos [53], para llegar al diseño metodológico de M. P. Groover [14] se desarrolló la ecuación 2.19.

$$P_{Z(x)} = Q_d p_{m\acute{a}x} \quad 2.19$$

En la zona de medición la potencia requerida por el tornillo (P_{Zm}) (ecuación 2.20) se consideró como el gasto a través del troquel que depende del tamaño y la forma de la abertura, y de la presión que se aplica para forzar la harina al pasar por ella.

$$P_{zm} = Q_x p \quad 2.20$$

Además, para determinar la potencia total de accionamiento del tornillo transportador se calculó la potencia de accionamiento en vacío (P_{fr}) (ecuación 2.23) y la potencia del desplazamiento del material (P_{dm}) (ecuación 2.22). Donde F_b es el factor del buje para colgante (**Tabla 16**), F_d es el factor del diámetro del tornillo (**Tabla 17**), ρ es el peso específico del material [lb/ft^3], F_f es el factor de la helicoidal del tornillo (**Tabla 17**), F_m es el factor del material (**Tabla 18**) y F_p es el factor por hélices (**Tabla 19**).

$$P_{fr} = \frac{L N F_b F_d}{1000000} \quad 2.21$$

$$P_{fr} = \frac{Q L \rho F_f F_m F_p}{1000000} \quad 2.22$$

Tabla 16. Factor de diámetro del tornillo [52].

Diámetro del helicoidal (in)	Factor
4	12
6	18
9	31
10	37
12	55
30	300

Fuente: D. E. Osorio Orellana [52].

Tabla 17. Factores de buje para el colgante [52].

Tipo de buje	Factor del buje
Rodamiento de bolas	1
Bronce Grafitado - Bronce, Impregnado en Aceite - Madera, Impregnado en Aceite - Nylatrón -Nylon - Teflón - UHMH – Uretano	2
Superficie Endurecida-Stellite	4.4

Fuente: D. E. Osorio Orellana [52].

Tabla 18. Factor de helicoidal [52].

Tipo de helicoidal	Factor de porcentaje de carga del tornillo			
	15%	30%	45%	95%
Estándar	1	1	1	1
Helicoidal con corte	1.10	1.15	1.2	1.3
Helicoidal con corte y dobles	N.R*	1.5	1.7	2.2
Helicoidal con listón	1.05	1.14	1.20	-

Fuente: D. E. Osorio Orellana [52] (Nota: N.R* = no recomendado).

Tabla 19. Factor de paletas [52].

Factor de paletas					
Número de paletas por paso	0	1	2	3	4
Factor de paleta	1	1.29	1.58	1.87	2.16

Fuente: D. E. Osorio Orellana [52].

La potencia total del motor (P_m) [W] (ecuación 2.23) es la sumatoria de las potencias en cada una de las zonas con la potencia de accionamiento en vacío, sobre la eficiencia total (ε) que, generalmente, es alrededor de 0.75 y un factor de seguridad (F) [53].

$$P_m = \left(\frac{P_{Za} + P_{Zc} + P_{Zm} + P_{fr}}{\varepsilon} \right) * F \quad 2.23$$

El torque transmitido (T) [Nm] está determinado por la potencia requerida por el tornillo en estas zonas (P_m) y la velocidad a la que gira el tornillo (ω) [rad/s] (ecuación 2.24) [47] [53].

$$T = \frac{P_m}{\omega} \quad 2.24$$

2.2.3.1. Selección de Rodamientos. Según lo analizado anteriormente, en el tornillo se producen cargas radiales y axiales que actúan hacia el centro del cojinete a lo largo del radio, por lo general los tornillos de extrusión presentan dos cojinetes (delantero y trasero). El cojinete delantero o de empuje absorbe la presión axial que surge durante el trabajo del tornillo, generalmente se emplean cojinetes de rodamientos con brida. Los cojinetes traseros tienen como función principal evitar un posible desplazamiento axial [54].

Por medio de la ecuación 2.25 se estableció la vida nominal esperada del rodamiento (L_{10}), ya que es un rodamiento de bolas con velocidad constante, la carga máxima dada de diseño fue P_d y la constante k fue 3, se empleó la ecuación 2.26 para calcular la vida expresada en horas de funcionamiento del rodamiento (L_{10H}) [55].

$$L_{10} = \left(\frac{C}{P_d} \right)^k \quad 2.25$$

$$L_{10H} = \frac{10^6}{60n} L_{10} \quad 2.26$$

2.2.3.2. Diseño de cuñas. Para transmitir el par torsional generado por el motorreductor al eje del tornillo de extrusión se empleó una cuña desmontable para facilitar el ensamble y desmontaje de esta sección [25]. Con la ecuación 2.27 se calculó la longitud (L_c) mínima que requiere la cuña, donde en la literatura el factor de diseño (N) es de 3, el torque (T) que recibió el eje es calculado con la ecuación 2.24 y el ancho (W) se obtuvo según R. L. Mott [25] en función del diámetro del eje.

$$L_c = \frac{4TN}{DWs_y} \quad 2.27$$

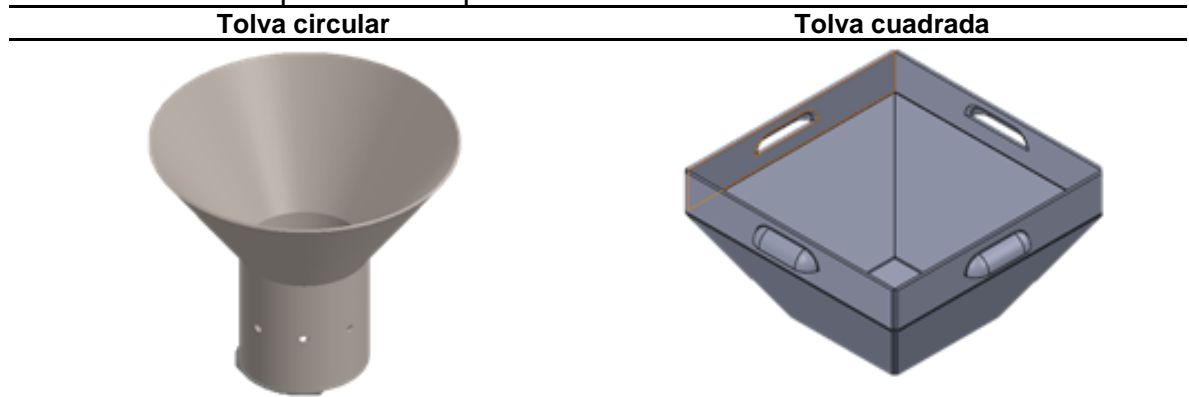
2.2.4. Sistema de obtención de aceite. Para el diseño del sistema de obtención de aceite se tuvo en cuenta las referencias evaluadas de M. L. Martínez [6] y Y. O. Galarraga Rivera [12], en donde se mencionó que la ubicación del orificio de la salida del aceite debe situarse en la zona de compresión, ya que es donde la máquina presenta una presión elevada y en donde el aceite es liberado. Además, para el diseño se tuvo en cuenta el diámetro de los orificios de salida que pueden tener un valor entre 0.7 mm a 1 mm según M. L. Martínez [6], para corroborar el área máxima que tendrá esta sección se empleó la ecuación 2.28, en donde v_{zc} fue la velocidad generada perpendicular al tornillo [m/s], Q_{zc} fue el flujo de aceite obtenido en la zona de compresión [m^3/s] y A el área de los orificios.

$$Q_{zc} = v_{zc} * A \quad 2.28$$

2.3 DISEÑO PRELIMINAR

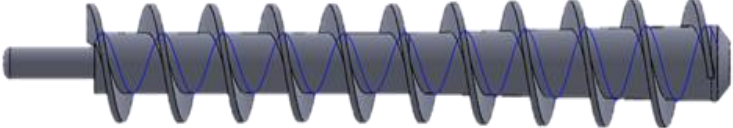
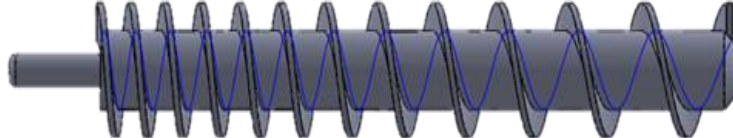

Teniendo en cuenta lo descrito y estudiado en las anteriores secciones, a continuación, se realizan los diseños preliminares de los componentes empleados para la elaboración de una máquina para extracción mecánica de aceite (**Tabla 20** y **Tabla 21**), y posteriormente una metodología genérica de este sistema (**Figura 14**).

Tabla 20. Diseños preliminares para el sistema de dosificación.



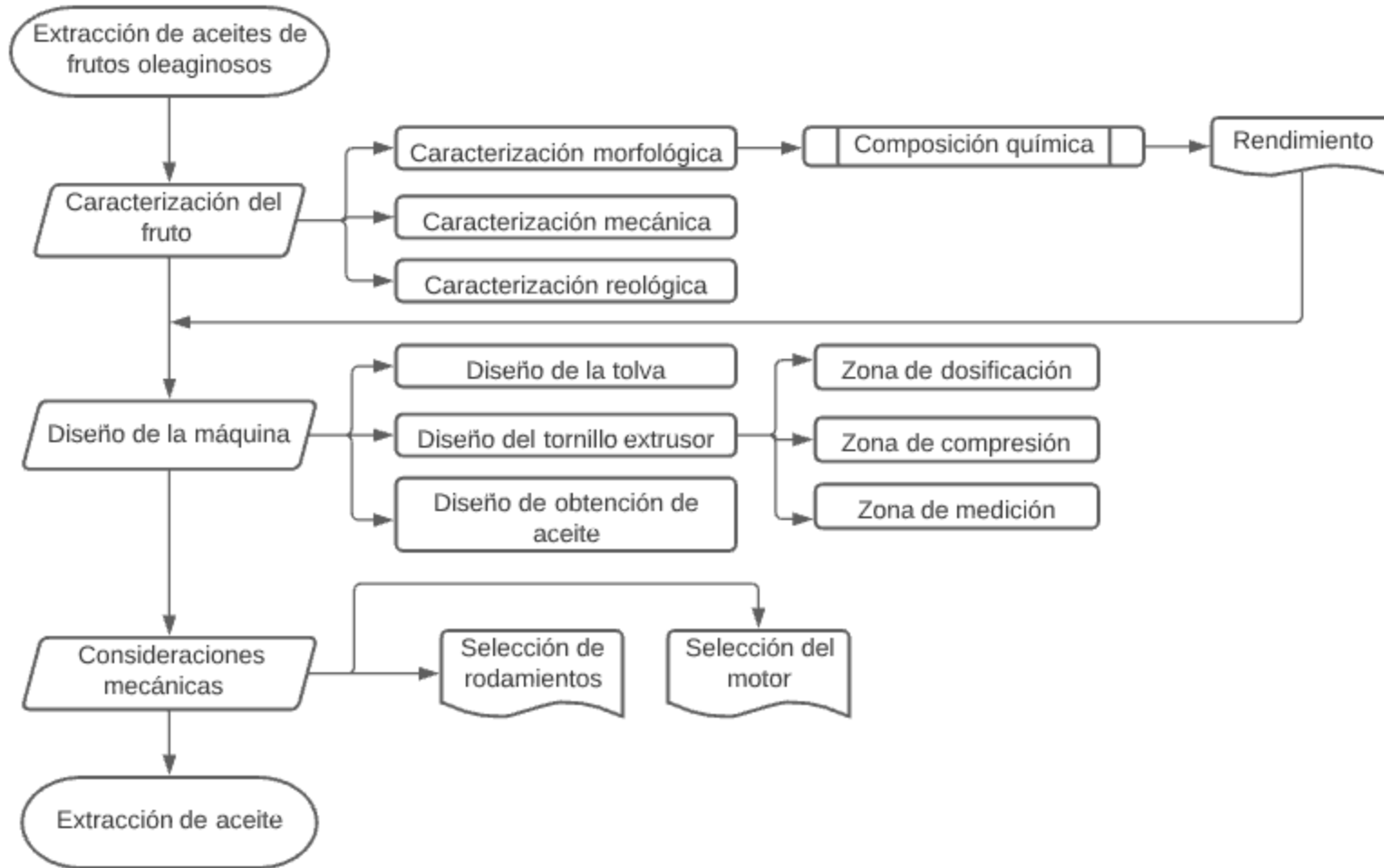
Fuente: autor

Tabla 21. Diseños preliminares para el sistema de compresión.

<i>Denominación</i>	<i>Diseño preliminar</i>
<i>Tornillo simple diámetro variable paso constante</i>	
<i>Tornillo simple diámetro constante paso variable</i>	
<i>Tornillo doble diámetro y paso constante</i>	

Fuente: autor

Figura 14. Metodología resumen para el diseño de extracción de aceite.



Fuente: autor.

2.4 VALIDACIÓN DEL SISTEMA

Es importante conocer el comportamiento real aproximado de cada una de las piezas, como las cargas presentes, los desplazamientos, las deformaciones y tensiones, es por esto que se pretende realizar un análisis estático estructural mediante el programa *Ansys* de la tolva, el tornillo y estructura, ya que, permite simular el comportamiento del sistema y se obtiene un resultado aproximado a lo real [56]. De forma general, el programa permite definir unas entradas que son las condiciones de contorno que son los apoyos o sujeciones y cargas que tendrá el sistema, el tipo de análisis o los resultados que se quieren obtener.

El análisis estructural estático *Static Structural* contiene varias etapas que se desarrollan de forma secuencial como se evidencia en la **Figura 15**. En la primera sección *Engineering Data* se añadió el material definido para cada una de las piezas y se procedió a incorporar las propiedades de este como lo son la resistencia a la tensión, resistencia a la fluencia, el módulo de Young, entre otros.

En la segunda etapa *Geometry* se importaron uno a uno los modelos mecánicos CAD del programa *SolidWorks*.

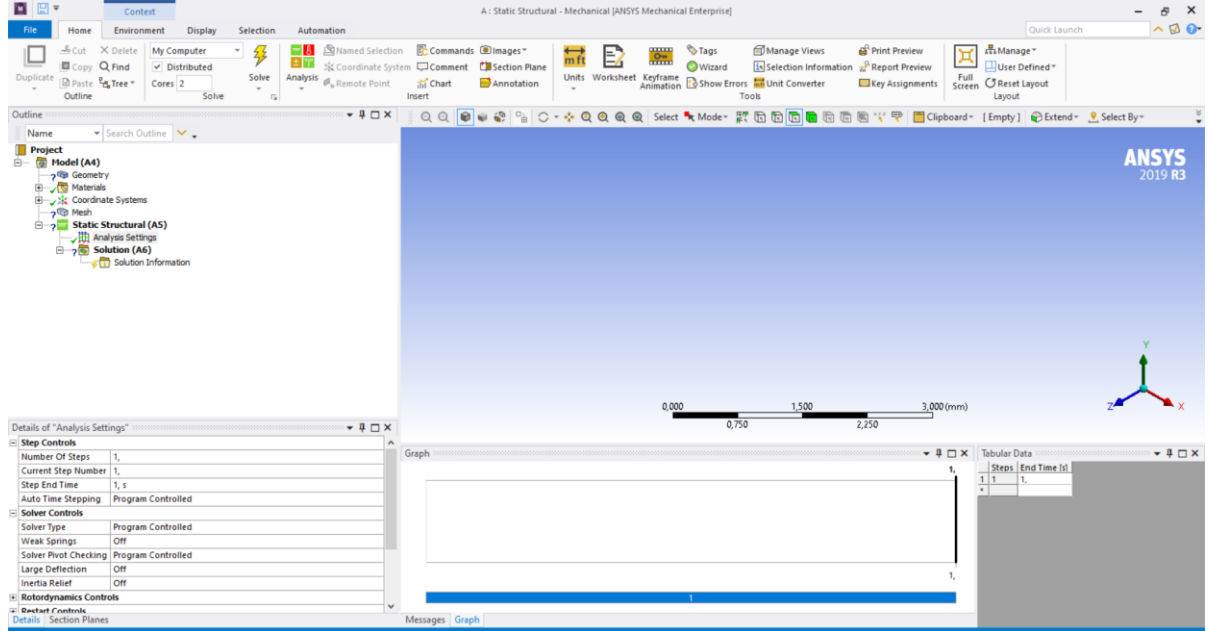
Figura 15. Metodología para desarrollar un análisis estructural.



Fuente: autor.

A continuación, se procedió con la etapa *Model* para definir la malla, establecer los parámetros y generar la solución del análisis de la pieza, como se evidencia en la **Figura 16**.

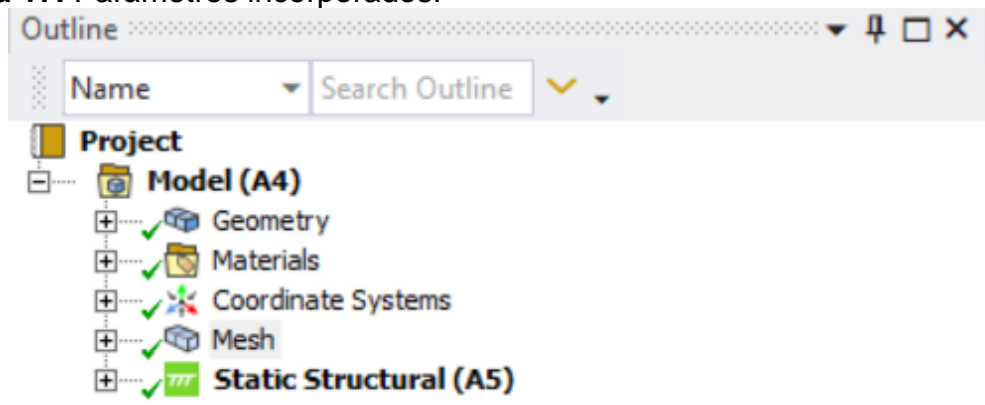
Figura 16. Ventana *Model* del programa *Ansys*.



Fuente: autor.

En la ventana *Outline* (Figura 17) se genera la malla “*Mesh*”, se introducen los parámetros: el tipo de enmallado a realizar, el tamaño, los diferentes controles, entre otros.

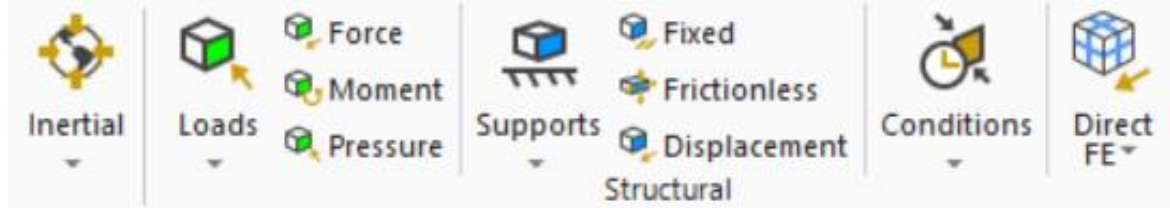
Figura 17. Parámetros incorporados.



Fuente: autor.

En la sección “*Static Structural*” se agregan los ajustes del análisis “*Analysis Setting*”, es decir, las posibles cargas, desplazamientos, soportes, y demás parámetros que permiten establecer las condiciones de la pieza (Figura 18).

Figura 18. Configuración del análisis estructural.



Fuente: autor.

A continuación, en la sección “*Solution*” se incorporan los resultados que se desean obtener como la deformación, el esfuerzo, la energía, la fatiga y demás parámetros que se requieran (**Figura 19**).

Figura 19. Configuración de los análisis que se desean obtener.



Fuente: autor.

Para la tolva se estableció el soporte en la parte inferior, las cargas dentro de la tolva, para la tensión consolidada generada (σ_c) se empleó la ecuación 2.29 [57], el modelo representó las condiciones experimentales en sus condiciones de frontera, debido a que estas partes estarán sujetas al barril contenedor del tornillo. Además, se tuvo en cuenta la fricción ($H(\theta)$) existente entre el fruto y el material de la tolva y la densidad del material (ρ).

$$\sigma_c = \frac{\phi_g \rho g}{H(\theta)} \quad 2.29$$

Para el tornillo se establecieron los soportes, uno fijo en el extremo y el segundo en el cuñero, y las cargas que presentó el tornillo. Se tuvieron en cuenta, la acción o movimiento de éste mientras procesa el fruto oleaginoso, lo que genera un gradiente de presión, por lo tanto, los resultados del análisis de presión en cada una de las zonas fueron aplicadas sobre la superficie.

Por último, en la sección “*Solve*” se resuelve el análisis estructural anteriormente parametrizado y configurado.

3. DISEÑO

Según lo expuesto en el Capítulo 2, en este capítulo se expuso la metodología de diseño propuesta para calcular las variables empleadas para el desarrollo de una máquina de extracción de aceite. Para esto se tuvo en cuenta las ecuaciones mencionadas en dicho capítulo, de igual forma, se realizó un estudio exploratorio acerca de la influencia del desgaste en el sistema mecánico de extracción que se presentó en algunos elementos mecánicos con base en un estudio exploratorio de la literatura científica.

3.1 CASO DE ESTUDIO

Según la **Figura 14**, el primer paso consistió en realizar la caracterización del fruto (morfológica, química, mecánica y reológica), con el fin de emplear estos datos posteriormente en el diseño del tornillo, para este trabajo de investigación se empleó como caso de estudio el fruto chontaduro (*Bactris Gasipaes*).

Teniendo en cuenta la sección 2.1.1 se definieron las variables para llevar a cabo la caracterización morfológica del fruto como la masa inicial, la longitud (l) (**Figura 20**), el diámetro medio (d_{me}) y el diámetro máximo (d_{max}) tomados de forma transversal, el volumen (V_f), la densidad (ρ), la masa de la semilla o fruto (m_s), por último, la masa de la semilla o fruto (m_f); algunos de estos datos fueron empleados en análisis posteriores.

Figura 20. Medición geométrica del chontaduro.



Fuente: autor

La **Tabla 22** muestra los valores promedios obtenidos en la caracterización morfológica de una muestra de 80 frutos de chontaduro, teniendo en cuenta las pruebas, el fruto presentó una forma cónica de base estrecha inferior como [58].

Tabla 22. Caracterización morfológica del chontaduro (*Bactris Gasipaes*).

	Prueba 1	Prueba 2
Masa del fruto con semilla (g)	57.55 ± 5.85	55.36 ± 5.62
Longitud (mm)	41.44 ± 5.92	40.04 ± 5.25
Diámetro medio (mm)	43.82 ± 1.54	42.69 ± 2.24
Diámetro máximo (mm)	47.13 ± 2.37	46.35 ± 3.87
Volumen (mL)	49.34 ± 3.36	50.45 ± 1.20
Densidad (g/mL)	0.84 ± 0.12	0.82 ± 0.53
Peso nuez (g)	3.35 ± 0.76	3.53 ± 0.25

Elaborada por el autor.

En la **Tabla 23** se consignan los datos mínimos y máximos para el caso de la caracterización química del fruto, según lo hallado y estudiado, y así obtener el rendimiento en porcentaje de aceite del fruto. Sin embargo, se pudo estimar que la extracción de aceite por método de prensado arroja rendimientos menores al 4 % [9].

Tabla 23. Caracterización química.

Ácido graso	Composición de aceite (%)	
	Mínimo	Máximo
Ácido Palmítico	29.3**	40.3*
Ácido Palmítoleico	5.3**	9.3**
Ácido Estearico	0.4**	2.4*
Ácido Oleico	32.6*	53.6**
Ácido Linoleico	1.3**	21.1*
Ácido Linolénico	1.5*(***)	5.5*
Ácidos grasos insaturados	53.7**	64.6**

Elaborada por el autor según (Nota: [59]* [60]** [8]*** [61]).

Siguiendo con el método de diseño planteado, se realizó la caracterización mecánica en donde se obtuvo la curva típica de la metodología del TPA, para las probetas longitudinal y transversal. La prueba se realizó con un analizador de textura *Lloyd Instrument LF Plus*, marca comercial *Ametek Test & Calibration Instrument*, con una velocidad de 2 mm/s y 30 % de compresión de la fruta, siguiendo con la metodología planteada, se procedió a:

1. Se cortó el fruto de acuerdo con la orientación de las fibras, transversal y longitudinal a través de un dispositivo fabricado para este fin (**Figura 21(a)**). El diámetro de todas las probetas fue de 10 mm con una longitud de 12 mm

y 15 mm, para las probetas transversal y longitudinal, respectivamente (**Figura 21(b)**).

Figura 21. (a) Dispositivo (b) Probetas



Fuente: autor.

2. Se colocó la probeta en el centro de la placa fija de la máquina (**Figura 22;Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). Y se comprime la probeta dos (2) veces con la máquina .

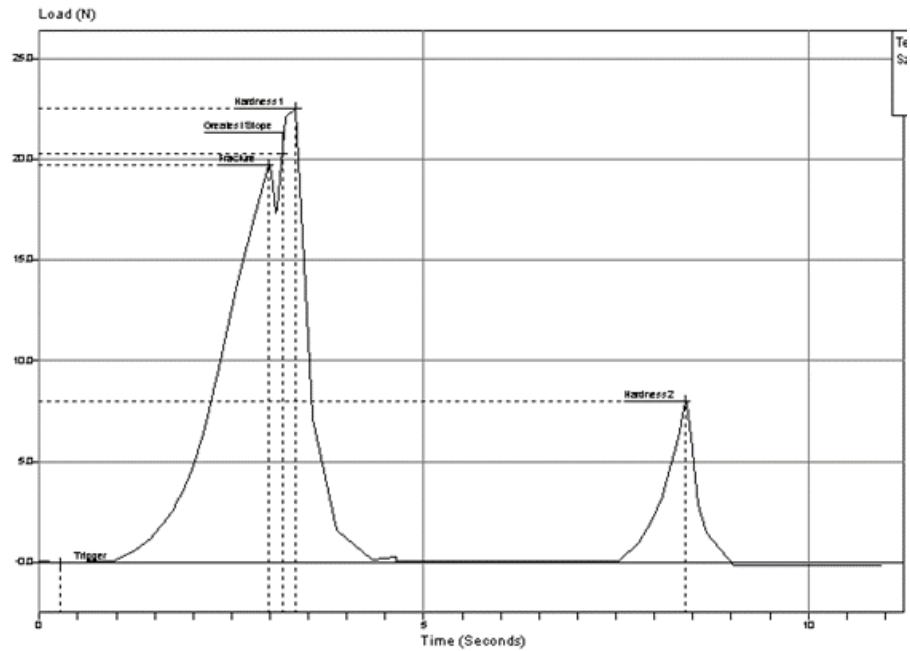
Figura 22. Probeta en el centro de la placa.



Fuente: autor.

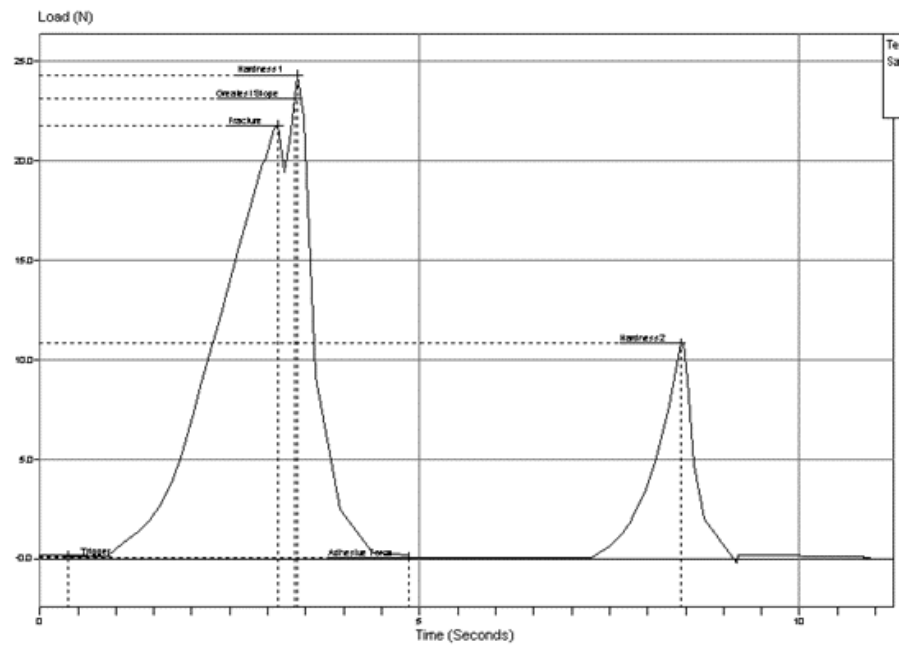
En la **Figura 23** y **Figura 24**, se presentan la fuerza de rotura máxima para la probeta longitudinal con un valor de 26.38 N y para la probeta transversal de 48.03 N , y se cuantifica en la **Tabla 24**.

Figura 23. Fuerzas aplicadas a través del tiempo en la probeta longitudinal.



Elaborada por el autor.

Figura 24. Fuerzas aplicadas a través del tiempo en la probeta transversal.



Elaborada por el autor.

Tabla 24. Ensayo de compresión.

	Fuerza máxima de rotura (N)	Fuerza máxima de deformación (N)
Ensayo Longitudinal	26.38	28.51
Ensayo Transversal	48.03	48.03

Elaborada por el autor

Realizando un análisis de los datos, se obtuvo una longitud mínima de compresión de 8.24 mm en el ensayo con la probeta transversal. Estos datos fueron empleados en las ecuaciones 2.1 hasta 2.5, para hallar los resultados de las variables para caracterizar mecánicamente el fruto (**Tabla 25**).

Tabla 25. Resultados de las variables de la caracterización mecánica.

Variables	Valor de las variables evaluadas	Resultado
Esfuerzo	$F = 48.03 \text{ N}$ $A_t = 78.54 \text{ mm}^2$	$\sigma = 0.61 \text{ MPa}$
Deformación	$L_0 = 12 \text{ mm}$ $L = 8.24 \text{ mm}$	$\varepsilon = 0.31$
Módulo de Young		$E = 1.91 \text{ MPa}$
Energía por unidad de volumen		$E_V = 0.093 \frac{\text{J}}{\text{mm}^3}$
Esfuerzo cortante	$\eta = 306.81 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ $\dot{\gamma} = 149.14 \text{ s}^{-1}$	$\tau = 0.0458 \text{ MPa}$

Fuente: autor.

Para caracterizar reológicamente el fruto en el proceso de molienda para la extracción de aceite, se desarrolló la ecuación 2.6 de la ley de potencia, por lo tanto, el índice de la ley de potencia del flujo (n) fue menor a 1 y el índice de consistencia fue un valor entre 25 a 650 Pa s, teniendo en cuenta que el fruto del chontaduro posee características similares a la harina de trigo (**Tabla 12**. Parámetros de los índices empleados en el modelo de la ley de potencia [11], [49] y [50].). Para obtener el valor de la deformación por cortante se tuvo un rango de velocidad de 5 a 165 rpm, según la literatura estudiada. Para calcular la viscosidad, el índice de consistencia se escogió con un valor mínimo, medio y máximo de 25 Ns/m^2 , 312 Ns/m^2 y 650 Ns/m^2 respectivamente, para el índice de la ley de potencia 0.06, 0.395 y 0.85, y para el valor de la velocidad se seleccionó un valor mínimo de 85 rpm y un valor máximo de 165 rpm, valores propuestos por el autor según las velocidades encontradas en el estudio de la literatura para diferentes semillas y frutos.

En la **Tabla 26** y **Tabla 27** se presentan los valores escogidos para el respectivo cálculo de la viscosidad en las diferentes zonas del tornillo, para este trabajo de investigación se usó una velocidad del tornillo de 85 rpm, ya que en las tres zonas se obtuvo un mayor valor de viscosidad. Cabe resaltar, que las dimensiones del tornillo que se emplearon para realizar el cálculo de la viscosidad se encuentran visibles en la

Tabla 28. De esta forma, el valor mayor de viscosidad se obtuvo en la zona de alimentación con un valor de 306.81 Pa s.

Tabla 26. Resultados de la viscosidad en función de las variables para la zona de alimentación.

Velocidad del tornillo [rpm]	Índice de consistencia [Ns/m^2]	Índice de la ley de potencia	Tasa de Deformación por cortante [s^{-1}]	Viscosidad [Pa. s]	
85	25	0.06	149.14	149.14	
		0.395		1.21	
		0.85		11.80	
		0.06		2.82	
		0.395		15.10	
		0.85		147.27	
	312	0.06		5.88	
		0.395		31.46	
		0.85		306.81	
		650		0.06	0.12
				0.395	0.81
				0.85	10.68
165	0.06		1.51		
	0.395		10.11		
	0.85		133.32		
	312	0.06	3.15		
		0.395	21.06		
		0.85	277.75		

Fuente: autor.

Tabla 27. Resultados de la viscosidad en función de las variables para la zona de compresión y medición.

Velocidad del tornillo [rpm]	Índice de consistencia [Ns/m^2]	Índice de la ley de potencia	Tasa de Deformación por cortante [s^{-1}]	Viscosidad [Pa. s]
85	25	0.06	447.42	0.08
		0.395		0.62
		0.85		10.00
		0.06		1.00
		0.395		7.77
		0.85		124.89
	312	0.06		209
		0.395		16.182

Velocidad del tornillo [rpm]	Índice de consistencia [Ns/m ²]	Índice de la ley de potencia	Tasa de Deformación por cortante [s ⁻¹]	Viscosidad [Pa.s]
		0.85		260.19
		0.06		0.04
	25	0.395		0.41
		0.85		9.05
		0.06		0.53
165	312	0.395	868.52	5.20
		0.85		113.06
		0.06		1.12
	650	0.395		10.83
		0.85		235.55

Fuente: autor.

Después de culminar la caracterización del fruto, se realizaron los cálculos de los diferentes elementos mecánicos que componen el prototipo de máquina para la extracción de aceite de chontaduro.

Con base en las referencias bibliográficas estudiadas, se realizó el modelo de una tolva circular en acero inoxidable 316 con un espesor 1.5 mm, para este trabajo de investigación se concluyó que el diámetro inferior de la tolva (ϕ_g) fue aproximadamente dos (2) veces el diámetro del fruto y la altura de la tolva (h) [13], debe permitir el almacenamiento 24 chontaduros partidos por la mitad y sin semilla, equivalentes a 1548 g de fruta. Se propuso el diseño la tolva circular teniendo en cuenta la longitud y el diámetro máximo del fruto (**Tabla 22**) con diámetro de la garganta (ϕ_g) de 0.05 m, la altura de la garganta de 0.08 m, el diámetro de la parte superior de 0.18 m y la altura de 0.15 m ().

Según las dimensiones geométricas del fruto a procesar (**Tabla 22**. Caracterización morfológica del chontaduro (*Bactris Gasipaes*).), la caracterización morfológica permite calcular las dimensiones geométricas del tornillo para las tres zonas (**Tabla 28**), con una longitud del tornillo fue de 0.617 m y la longitud de trabajo de 0.42 m, para el diseño del tornillo de extracción se tiene en cuenta la longitud del chontaduro de 41.44 ± 5.92 mm para determinar el paso del tornillo. Cabe resaltar que, según el análisis de los datos de la caracterización morfológica del fruto, tanto la longitud y el diámetro del tornillo son valores propuestos por el autor (), el diseño del tornillo sirve de parámetro geométrico para elaborar el diseño del barril (), la tapa del barril (* MERGEFORMAT) y los soportes ().

La **Tabla 29** evidencia las dimensiones para el diseño de la boquilla de forma anular o dado de extrusión que se empleó, de igual forma, en la **Tabla 30** se exponen los resultados del análisis de extrusión del flujo.

Tabla 28. Resultados de las variables geométricas del tornillo en las zonas de trabajo.

VARIABLES DE LAS DIMENSIONES GEOMÉTRICAS DEL TORNILLO	Resultado zona de alimentación	Resultado zona de compresión	Resultado zona de medición
Diámetro del tornillo (D) [m]	0.08	0.08	0.08
Longitud del tornillo en cada zona (L) [m]	0.14	0.14	0.14
Profundidad del canal (d_c) [m]	0.015	0.005	0.005
Paso (p) [m]	0.045	0.045	0.04
Holgura entre el cilindro y el filete (δ) [m]	0.00005	0.00005	0.00005
Diámetro del eje del tornillo (D_r) [m]	0.05	0.07	0.07
Ángulo del filete (θ)	10.15 °	10.15 °	9.04 °
Ancho del canal (W_c) [m]	0.0364	0.0364	0.0316
Número de hélices	3	3	3.5

Fuente: autor.

Tabla 29. Resultados de las variables de las dimensiones del dado de extrusión.

VARIABLES DE LAS DIMENSIONES GEOMÉTRICAS DEL DADO DE EXTRUSIÓN	Resultado [m]
Diámetro interno (D)	0.016
Diámetro externo (D)	0.02
Longitud (L_d)	0.005

Fuente: autor.

Tabla 30. Resultados de las variables del análisis de extrusión.

VARIABLES DEL ANÁLISIS DE EXTRUSIÓN	Gasto volumétrico por arrastre (Q_d) [m^3/s]	Presión piezométrica máxima ($p_{máx}$) [MPa]	Presión real de operación (p) [MPa]	Gasto de operación (Q_x) [m^3/s]	Factor de forma (k_s) [m^5/Ns]
Resultado zona de alimentación	0.0001163	0.073	-	-	-
Resultado zona de compresión	0.0000388	0.55	-	-	-
Resultado zona de medición	0.00000347	0.49	0.48	9.29×10^{-7}	2.06×10^{-12}

Fuente: autor.

Los cálculos de las consideraciones mecánicas correspondientes al diseño de un prototipo de máquina para extracción de aceite de chontaduro, se presentan en la **Tabla 31** y **Tabla 32**. En donde se consiguió una capacidad de 140.36 kg/h, con

un valor de potencia del motor de 120.79 W (0.16 Hp) y el torque transmitido es 13.57 Nm . Teniendo en cuenta, la capacidad de la tolva de alimentación de la máquina se puede estimar que se requieren 90 repeticiones por hora para llegar a esa capacidad. En los y se presenta el diseño de la mesa del motor y en el se presenta la mesa en donde se ubicó la máquina, cabe resaltar, que se seleccionó una lámina de acero AISI 1020 con un espesor de 1.71 mm (y) y los soportes de la mesa () fueron en tubo cuadrado de $40\text{ mm} \times 40\text{ mm}$ con un espesor de 1.5 mm .

Tabla 31. Potencia requerida en cada una de las zonas.

Variables de las consideraciones mecánicas	Resultado zona de alimentación	Resultado zona de compresión	Resultado zona de medición
Potencia requerida del tornillo [W]	8.50	21.63	0.47

Fuente: autor.

Tabla 32. Dimensiones de las consideraciones mecánica.

Variables de las consideraciones mecánicas	Resultado
Potencia requerida del tornillo [W]	30.61
Potencia de accionamiento al vacío [W]	37.43
Potencia de desplazamiento del material [W]	0.0054
Factor de seguridad del motor	1.5
Potencia del motor [W]	120.79
Torque transmitido [Nm]	13.57

Fuente: autor.

Teniendo en cuenta, los valores evaluados y consignados se realizó la selección de un motorreductor *Nord* (**Anexo 21**) con una velocidad rotacional de 1385 rpm , una relación 16.24: 1 y 0.18 kW de potencia para llegar a la velocidad deseada de 85 rpm para la obtención y extracción de aceite.

Se escogió un rodamiento de bolas de una hilera comercial 61805, teniendo en cuenta que el eje que se acopló al motorreductor tiene un diámetro de 0.02444 m por lo tanto, el diámetro interno del rodamiento es 0.025 m , además el ancho del rodamiento es de 7 mm debido al espacio entre la lámina y el motor que es de 8 mm . Además, se obtuvo una duración esperada del rodamiento de 18500 rpm y la vida nominal con un 90 % de confiabilidad de 882 horas de funcionamiento, es decir, 3.6 meses.

El material que se seleccionó para la cuña fue acero AISI 1020 estirado en frío, la longitud mínima que requirió la cuña fue 2.4638 mm y la longitud máxima de 104 mm , debido al ancho del eje hueco del motorreductor, teniendo en cuenta que el ancho (W) fue de $\frac{5}{16}\text{ in}$ (7.93 mm). Por último, se empleó la ecuación 2.28 y se

determinó que el área máxima para los orificios es de 0.00002761 m^2 , por lo tanto, se realizaron 35 orificios con un diámetro de 1 mm para la obtención del aceite.

3.2 VALIDACIÓN POR ELEMENTOS FINITOS

En la siguiente sección se realiza la validación del diseño de la máquina de extracción de aceite un análisis estático estructural en la tolva, el tornillo y la estructura o mesa de soporte por medio de un *software* CAD/CAE.

En la primera sección *Engineering Data* se seleccionó el material para cada una de las piezas y se procedió a incorporar las propiedades en el sistema. Cabe resaltar que, la tolva y el tornillo se diseñaron en acero inoxidable 316, los demás elementos mecánicos de la máquina fueron diseñados en acero AISI 1020, en la **Tabla 33** y **Tabla 34** se muestran las propiedades mecánicas, respectivamente.

Tabla 33. Propiedades mecánicas del acero inoxidable 316.

Propiedad mecánica	Valor
Resistencia a la tensión [MPa]	520
Resistencia de fluencia [MPa]	205
Porcentaje de elongación [%]	40
Dureza Brinell (HB)	187

Fuente: [62]

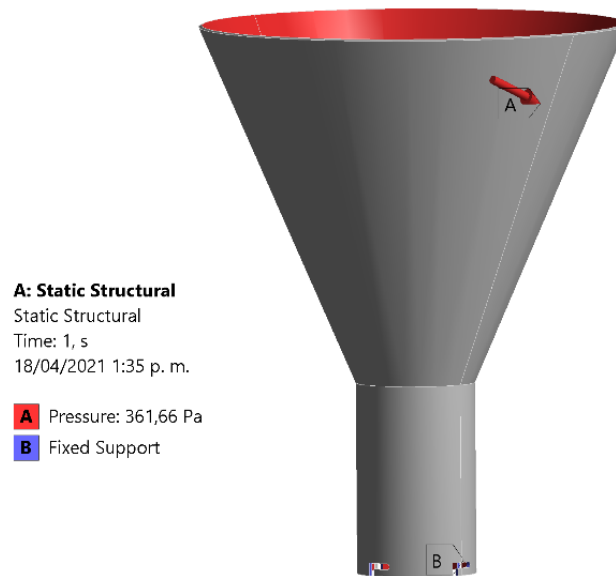
Tabla 34. Propiedades mecánicas del acero AISI 1020 estirado en frío.

Propiedad mecánica	Valor
Resistencia a la tensión [MPa]	420
Resistencia de fluencia [MPa]	352
Módulo de elasticidad [GPa]	186
Porcentaje de elongación en 2 pulgadas	15
Porcentaje de reducción de área	40
Dureza Brinell (HB)	122
Razón de Poisson	0.29
Módulo de cortante [GPa]	72

Fuente: R. L. Mott, Matweb, [25], [63].

Se empleó la ecuación 2.29 para establecer las cargas dentro de la tolva o la tensión consolidada generada (σ_c) se estableció un soporte fijo en la parte inferior del diámetro inferior de la tolva (ϕ_g) y en las pestañas (**Figura 25**). La fricción ($H(\theta)$) existente entre el fruto y el material de la tolva fue de 1.32 y la densidad del material (ρ) según la Tabla 22 fue de 0.84 g/mL . Por lo tanto, el valor del esfuerzo consolidado calculado y establecido en el programa fue de 361.66 Pa , como se observa en la Figura 25.

Figura 25. Soportes y cargas aplicadas a la tolva.



Fuente: autor.

Se configuro una malla tipo *Body Sizing* con un de tamaño de 1.5 mm, de preferencia mecánica controlada por el programa, de tamaño adaptativo con una resolución de 4, una transición lenta, y ángulo medio, con un total de 522956 nodos y 274279 elementos (**Figura 26**).

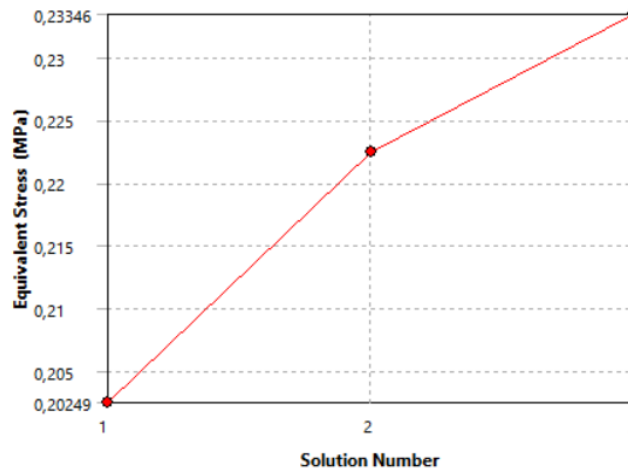
Figura 26. Malla generada para la tolva.



Fuente: autor.

Se realizó un análisis de convergencia paramétrico teniendo en cuenta el enmallado tipo *Body Sizing*, en donde se obtuvo un cambio del 9.4% y 4.8% del esfuerzo equivalente en la segunda y tercera iteración. De igual manera, se evidencia que el esfuerzo equivalente máximo es de 0.23346 MPa, observar **Figura 27**.

Figura 27. Análisis de convergencia de la tolva.

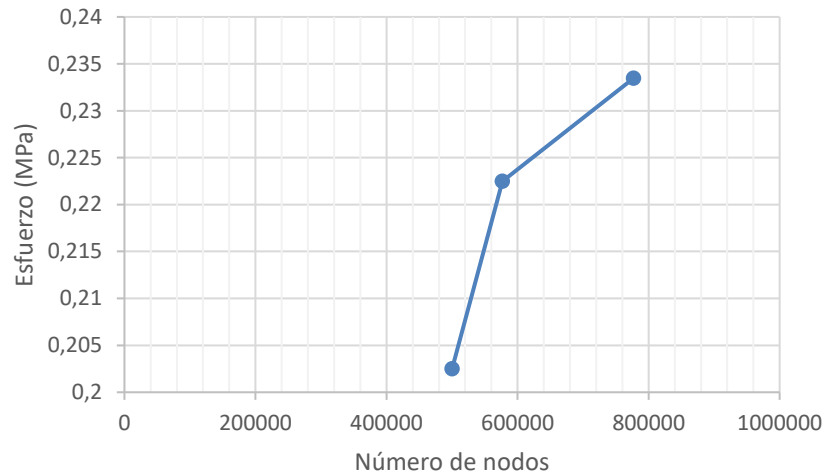


	Equivalent Stress (MPa)	Change (%)	Nodes	Elements
1	0,20249		500053	259304
2	0,22249	9,4096	576787	307004
3	0,23346	4,8152	776949	442123

Fuente: autor.

Se gráfica la cantidad de nodos generados en las iteraciones con el esfuerzo obtenido (**Figura 28**), cabe resaltar que es preferible hacer un mallado adaptativo porque no hay concentradores de esfuerzos, de igual forma no se recomienda hacer un enmallado con un tamaño igual en toda la pieza.

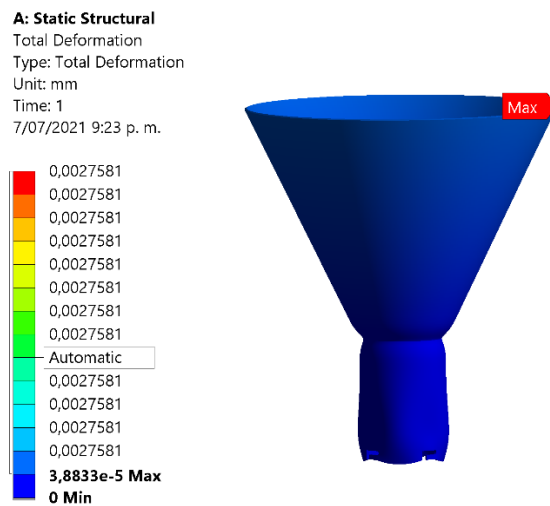
Figura 28. Número de nodos vs esfuerzo equivalente obtenido.



Fuente: autor.

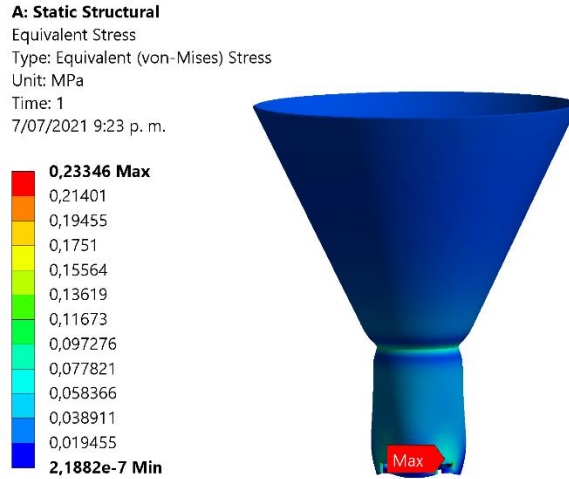
Se observó una deformación máxima de 0.0027581 mm en la parte superior de la tolva o en el diámetro superior y un esfuerzo equivalente máximo de 0.23346 MPa presente en la parte inferior de la tolva o en el diámetro inferior de la garganta, en donde se establecieron los soportes fijos de la tolva (**Figura 29** y **Figura 30** respectivamente). Teniendo en cuenta, que el factor de seguridad fue de 878.09, se propone realizar la escogencia de otro tipo de material como un PET o un polímero [64].

Figura 29. Deformación total de la tolva.



Fuente: autor.

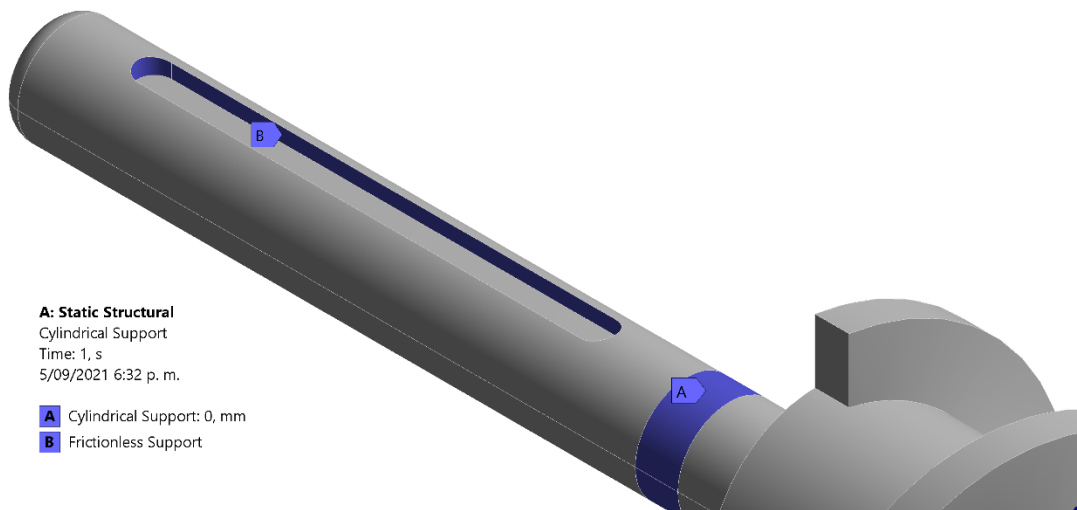
Figura 30. Esfuerzo equivalente de la tolva.



Fuente: autor.

Las condiciones de frontera que se estipularon en el análisis del tornillo representan la sección en donde se ubica el rodamiento y la cuña, se seleccionan las caras del cuñero para generar el soporte fijo del tornillo (**Figura 31 (B)**) y se establece un soporte cilíndrico ubicado en el rodamiento de bolas a 153 mm (**Figura 31 (A)**). De igual forma, las mediciones triaxiales se configuraron de la siguiente manera: la dirección axial y tangencial, fija, y la dirección radial, libre.

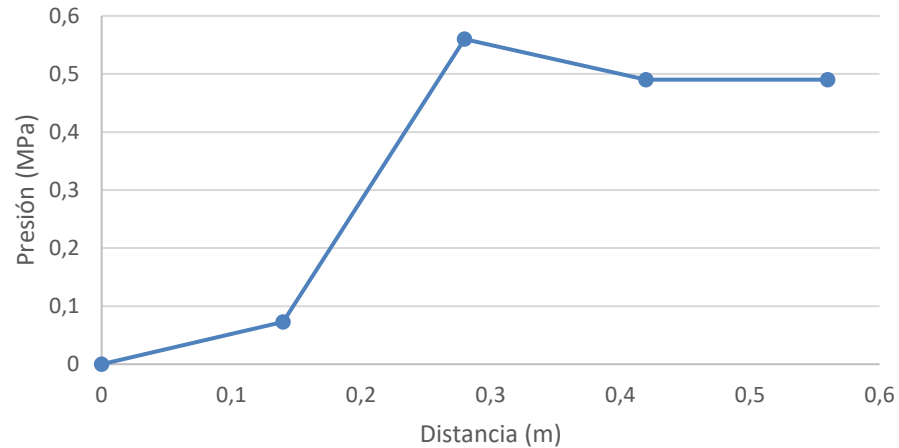
Figura 31. Soportes fijos del tornillo.



Fuente: autor.

Según la sección 2 (**Tabla 30. Resultados de las variables del análisis de extrusión.**), la presión piezométrica máxima para la zona de alimentación fue de 0.073 MPa , en la zona de compresión fue 0.56 MPa y en la zona de medición de 0.49 MPa . En la **Figura 32** se presenta el cambio de presión que surge a lo largo de las zonas del tornillo.

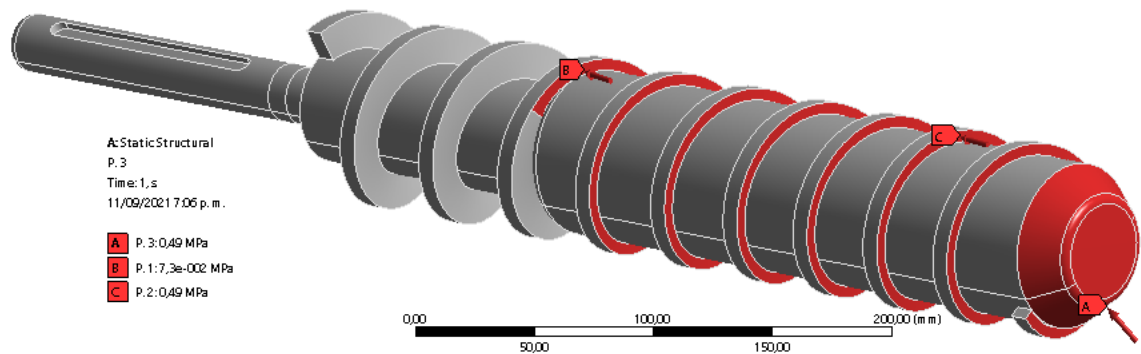
Figura 32. Cambio de presión a lo largo del tronillo.



Fuente: autor.

Por lo tanto, la presión asciende desde 0 Pa en la zona de alimentación hasta 0.073 MPa (**Figura 33 (B)**), en la zona de compresión se produce un delta de presión de 0.487 MPa (**Figura 33 (C)**), por último, en la zona de medición el valor de la presión es un valor constante de 0.49 MPa (**Figura 33 (A)**), cabe resaltar que la presión en la zona de medición se aplicó en la punta del tornillo

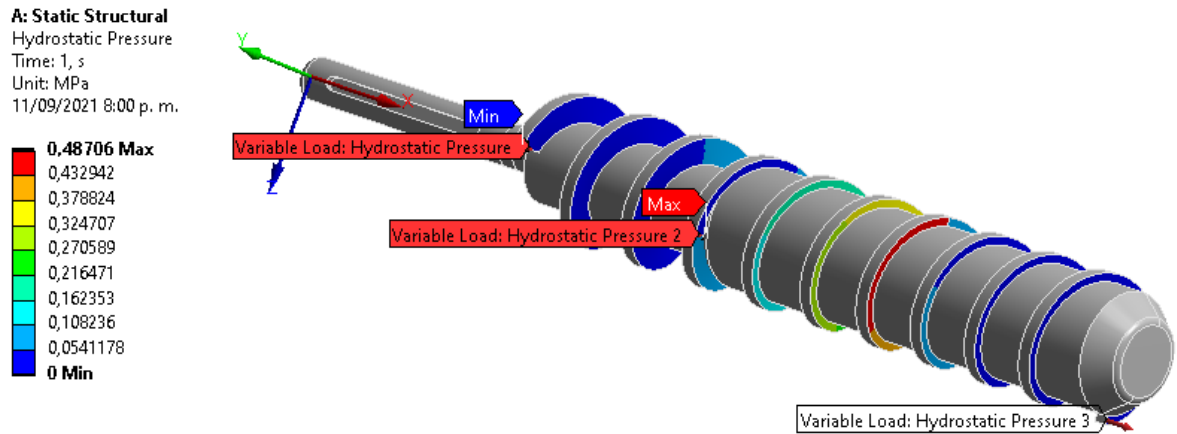
Figura 33. Presión aplicada en las zonas del tornillo.



Fuente: autor.

Se carga la presión de forma gradual y lineal (**Figura 34**) teniendo en cuenta las zonas del tornillo en cada una de las hélices, los resultados obtenidos en la **Tabla 30** y los deltas de presión que se generaron.

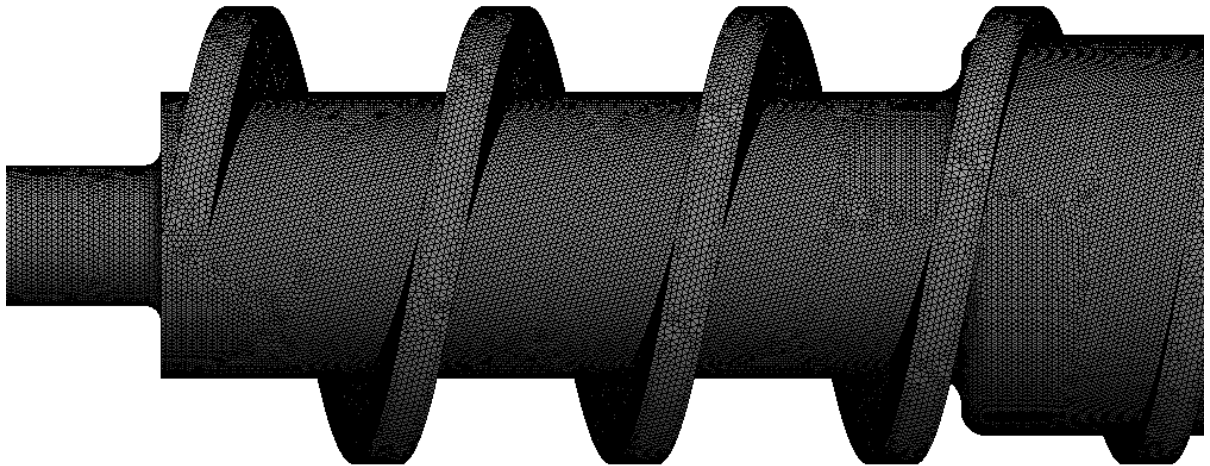
Figura 34. Presión hidrostática aplicada.



Fuente: autor.

Se generó una malla de preferencia explícita de orden lineal y un tamaño de malla de 2 mm, con un total de 150346 nodos y 780992 elementos (**Figura 35**). El tamaño de malla empleada fue adaptativo, con una resolución de 4, con una transición lenta y con un ángulo central de la envergadura grueso. Según lo obtenido se puede mencionar que el tipo de malla es uniforme y presenta la misma configuración en todo el tornillo diseñado.

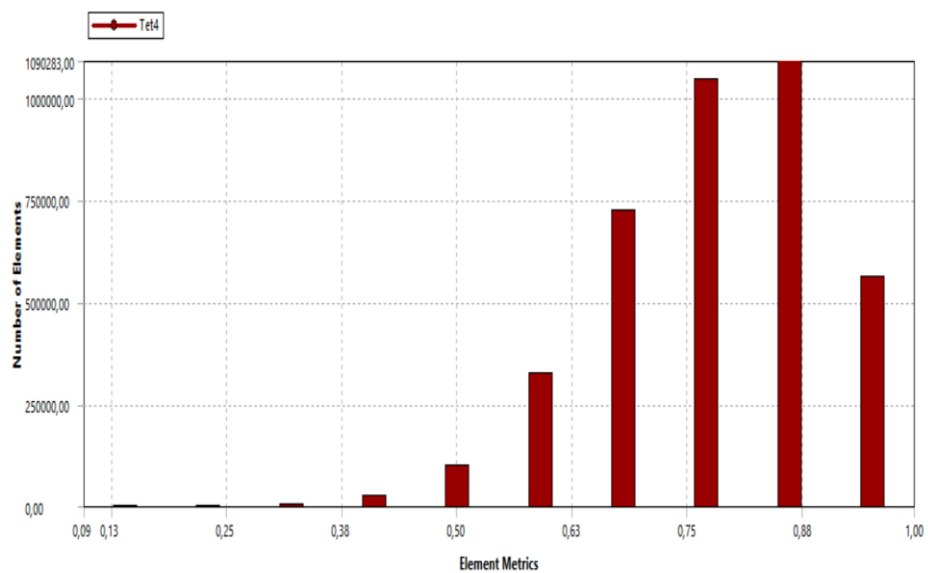
Figura 35. Sección de enmallado del tornillo.



Fuente: autor.

En la **Figura 36** se observan los elementos de la malla obtenida para el tornillo que es de 0.88 elementos métricos en forma ortogonal, con una desviación estándar de 0.11648, también se presenta un valor mínimo de 0.0098051 y un valor máximo de 0.99337.

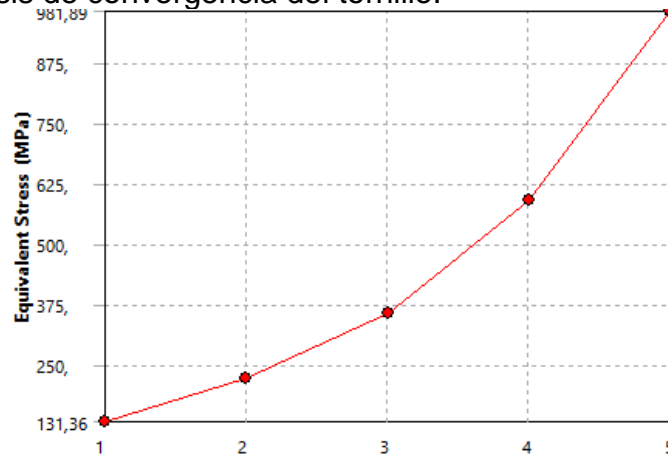
Figura 36. Mesh Metric obtenida para el tornillo.



Fuente: autor.

Se considera el enmallado generado para el análisis de convergencia en donde se obtuvo un primer cambio de 51.611%, en la tercera iteración el cambio porcentual varia hasta llegar a 45.793%, en la cuarta iteración con un cambio 49.742% y en la quinta iteración un cambio de 49.85% con un esfuerzo equivalente máximo de 981.89 MPa, el cual se encuentra dentro del módulo elástico del acero inoxidable 316 de 193000 MPa (**Figura 37**). Cabe resaltar, que no se generaron más iteraciones debido a que se pudo analizar que la simulación no converge debido a la singularidad del tornillo y su diseño geométrico.

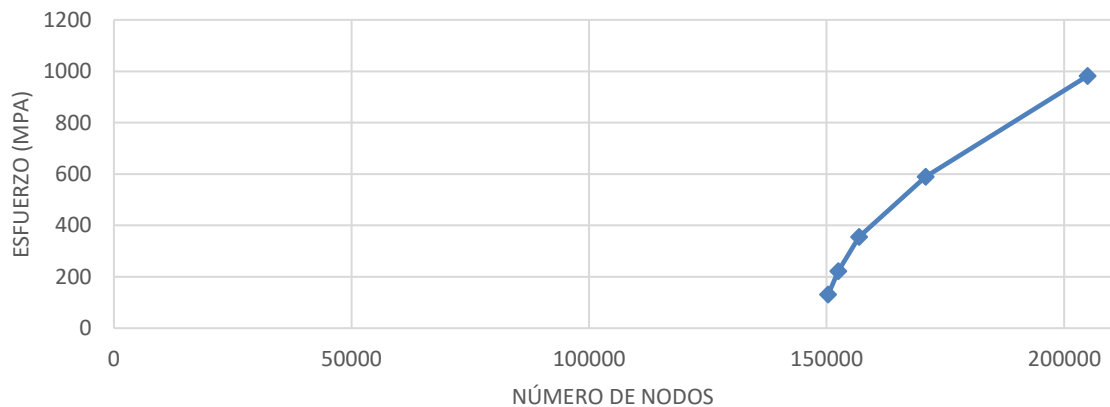
Figura 37. Análisis de convergencia del tornillo.



Fuente: autor.

En la **Figura 38** se gráfica la cantidad de nodos generados en las iteraciones con el esfuerzo obtenido teniendo en cuenta la malla generada.

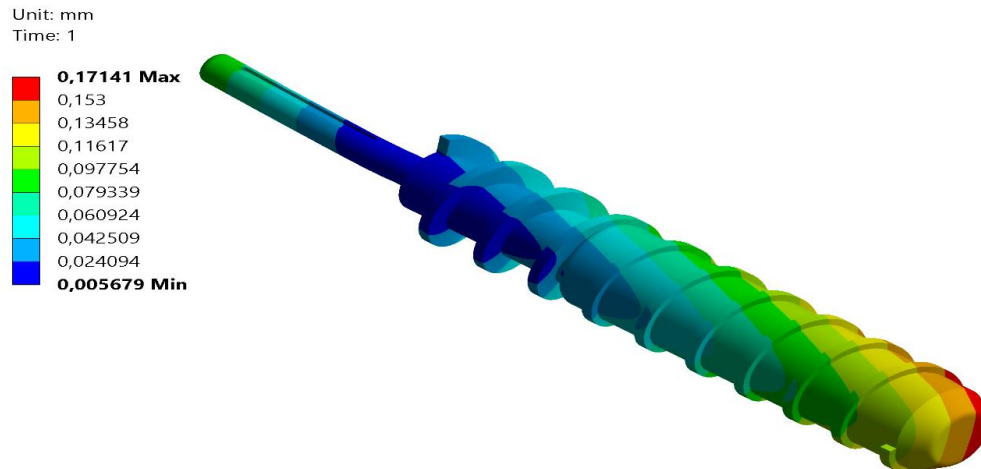
Figura 38. Número de nodos vs esfuerzo obtenido.



Fuente: autor.

El tornillo presentó una deformación máxima de 0.17141 mm en la última zona de medición sobre el costado izquierdo (**Figura 39**), de igual forma, y según la figura el tornillo llega a chocar con la pared del tambor y produce un desgaste desde la zona de compresión. Sin embargo, se propone diseñar un soporte en la última sección el cual evite la deflexión del tornillo y evite que este choque con las paredes del tubo contenedor.

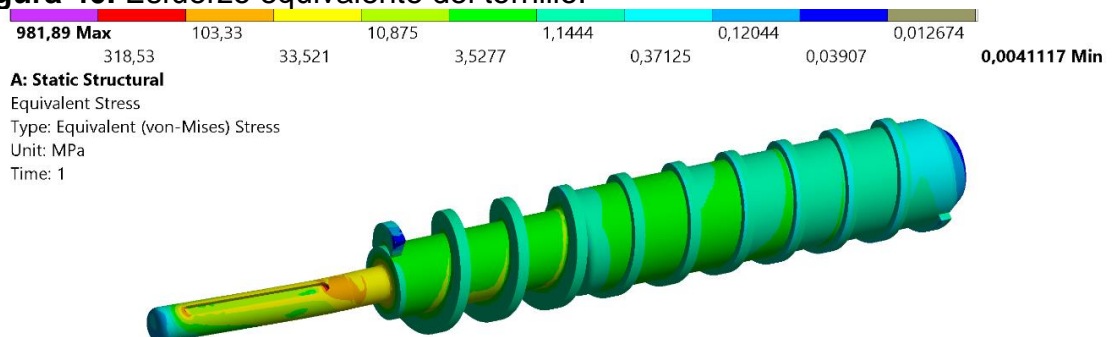
Figura 39. Deformación total en el tornillo.



Fuente: autor.

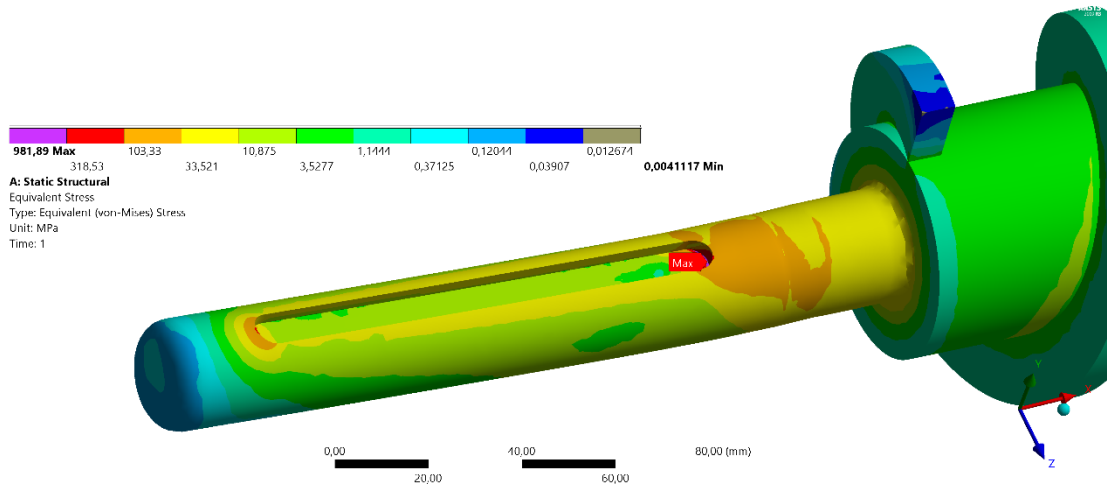
El tornillo presentó un esfuerzo equivalente máximo en la sección donde se ubica el cuñero y el rodamiento con un valor de 981.89 MPa (**Figura 40** y **Figura 41**), debido a que este recibe el torque del motor y se obtiene un factor de seguridad crítico de 0.21. Cabe resaltar que el área presenta un esfuerzo de 33.521 MPa , valor tenido en cuenta para obtener el factor de seguridad del tornillo 6.12.

Figura 40. Esfuerzo equivalente del tornillo.



Fuente: autor.

Figura 41. Esfuerzo equivalente en el cuñero.

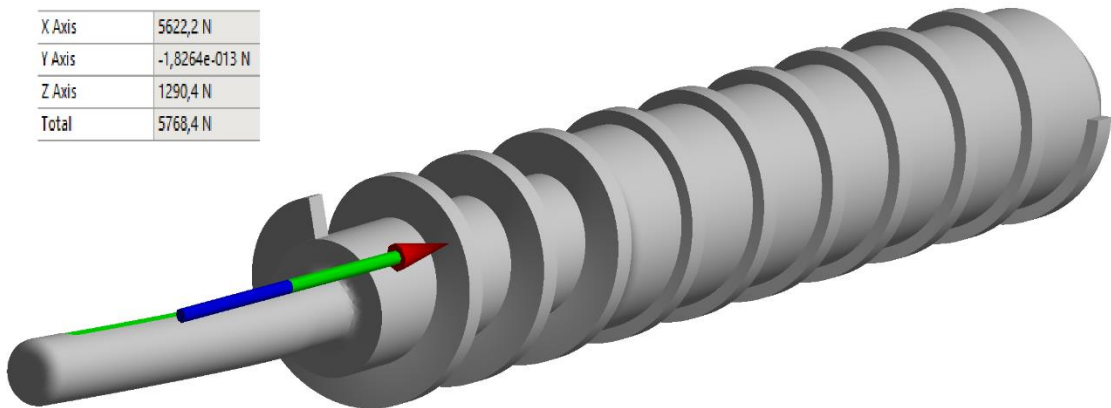


Fuente: autor

Se realizó un análisis para determinar el par de torsión ejercido por el motor en el cuñero, en la **Figura 42** se observa que la dirección de la fuerza de reacción se generó en el eje Z con un valor máximo de 1290.4 N , teniendo en cuenta que la altura existente del centroide del cuñero es 9.88 mm se obtiene un torque de 12.28 N , lo que genera un error del 9% con respecto al valor teórico obtenido. Sin embargo, la fuerza de reacción en el eje Y fue de $-1.8264 \times 10^{-13}\text{ N}$ y en el eje X fue de 5622.2 N .

Figura 42. Par de torsión

X Axis	5622,2 N
Y Axis	-1,8264e-013 N
Z Axis	1290,4 N
Total	5768,4 N

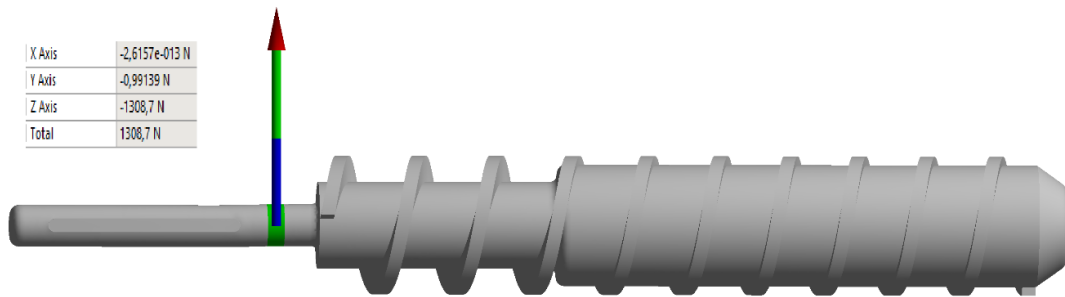


Fuente: autor

A continuación, en la **Figura 43** se presentan las fuerzas de reacción generadas en el rodamiento, en donde en el eje Z es de 1308.7 N , en el eje X y Y los valores son

despreciables. Teniendo en cuenta, los datos obtenidos en la simulación se puede seleccionar un buen sistema de apoyo que absorba la carga axial, como un rodamiento con un ancho de mayor dimensión para que ayude a distribuir la carga y disminuir la deflexión que se presenta en el tornillo. El rodamiento 6205 presenta un ancho de 15 mm, una vida nominal de 38400 h, es decir, 13.15 años con una jornada de trabajo de 8 h diarias, este rodamiento se ubicaría después de la mesa del motor, debido al espacio existente.

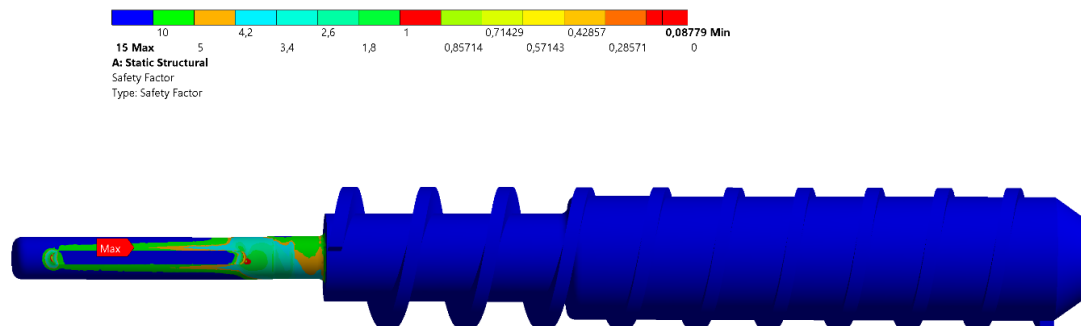
Figura 43. Fuerzas de reacción en el rodamiento.



Fuente: autor.

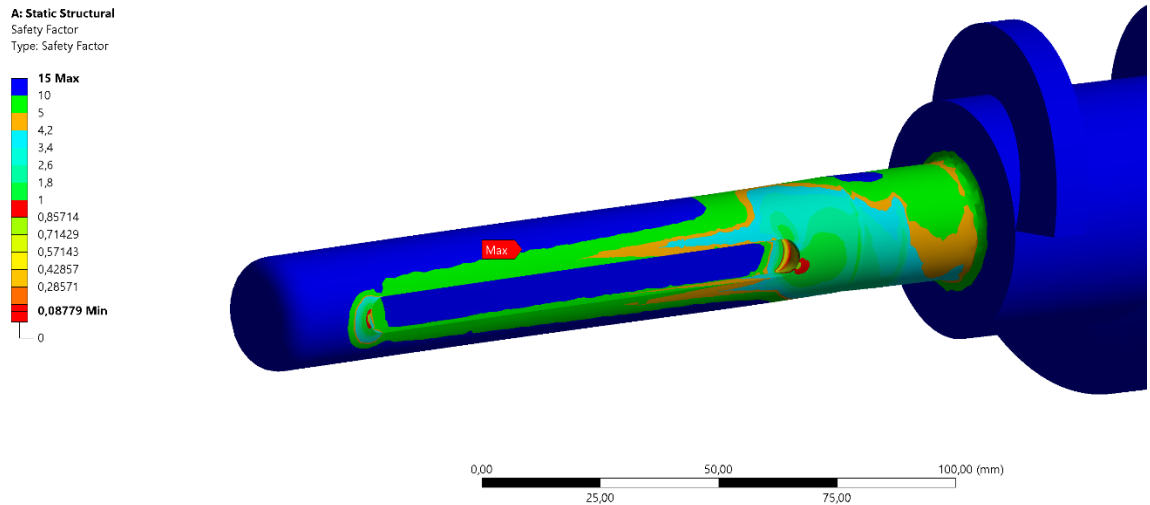
Debido a que el tornillo se somete a cargas variables y existe un proceso de deformación progresivo y localizado en el extremo del elemento mecánico que está sujeto a condiciones que producen tensiones y deformaciones fluctuantes y que puede generar grietas o fracturas, se procedió a realizar un análisis de fatiga empleando la teoría de Soderberg donde se obtuvo un factor de seguridad mínimo en el cuñero 0.08779 y un valor máximo de 15 en el resto del tornillo (**Figura 44** y **Figura 45**).

Figura 44. Factor de seguridad del tornillo.



Fuente: autor

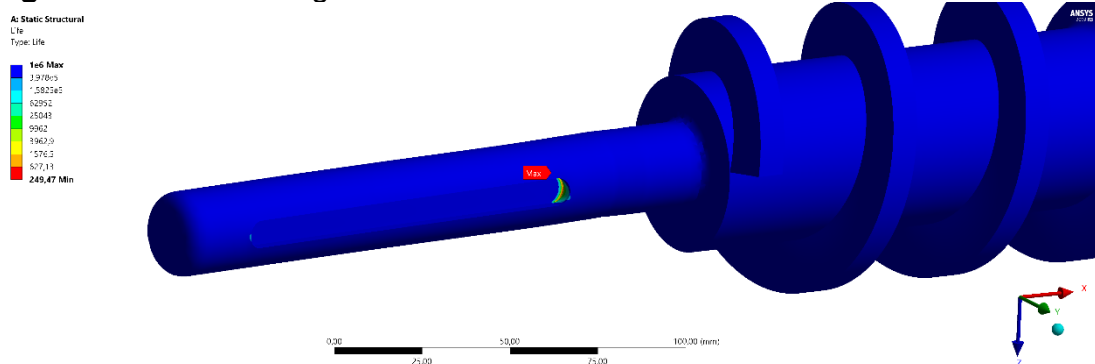
Figura 45 . Factor de seguridad en la sección del cuñero.



Fuente: autor.

Adicional, se realizó un análisis de vida de fatiga del tornillo, en donde se obtuvo 249.47 ciclos de vida hasta que la pieza falle por fatiga en la sección del cuñero (**Figura 46**). Lo que se puede mejorar con un recubrimiento de nanopartículas de Ti.

Figura 46. Vida de fatiga del tornillo en la sección del cuñero.



Fuente: autor.

Por último, se realiza el análisis estructural de la mesa de soporte, por lo que, se considera el peso de cada uno de los elementos mecánicos que se situaran encima de la mesa como se observa en la **Figura 47 (Tabla 35)**. Como parámetro inicial se agrega el valor de la gravedad (**Figura 48**), las condiciones de frontera que se establecen son soportes fijos en la parte inferior de la estructura (**Figura 49**), las cargas se establecen teniendo en cuenta cada uno de los elementos mecánicos que

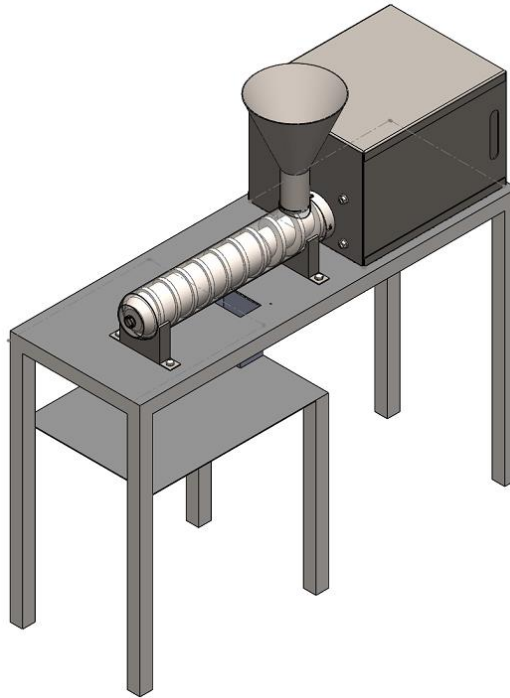
se encuentran encima de la mesa, en la **Figura 50** se establece una carga de 173 N (A), y una carga de 155 N (B).

Tabla 35. Carga de los elementos mecánicos.

Elemento mecánico	Peso (Kg)	Total (Kg)	Carga (N)
Bujes	0.0038		
Motor	10.99	17.63	173
Mesa motor	4.524		
Tapa deslizante	2.1081		
Tolva	0.8482		
Barril	1.4343		
Tornillo de extrusión	12.927	15.80	155
Cuña	0.00695		
Tapa	0.13413		
Soportes	0.440		

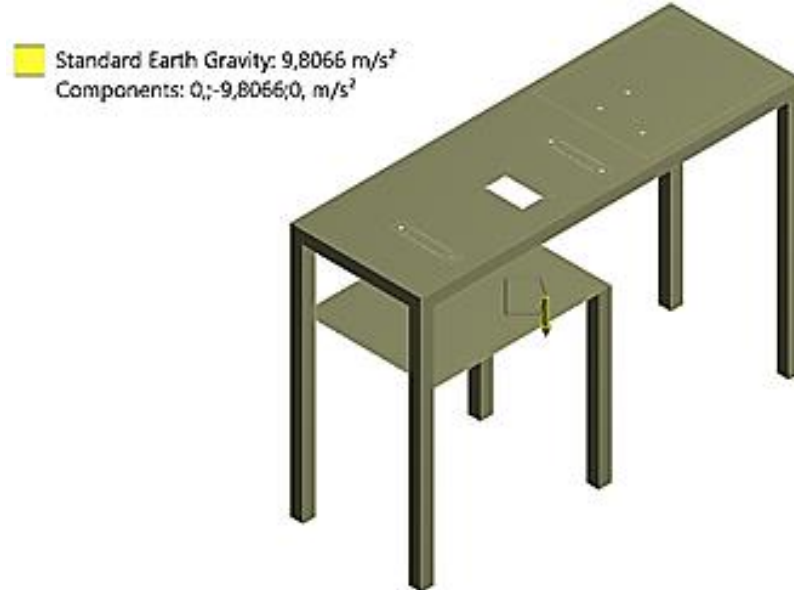
Fuente: autor.

Figura 47. Elementos mecánicos de la máquina.



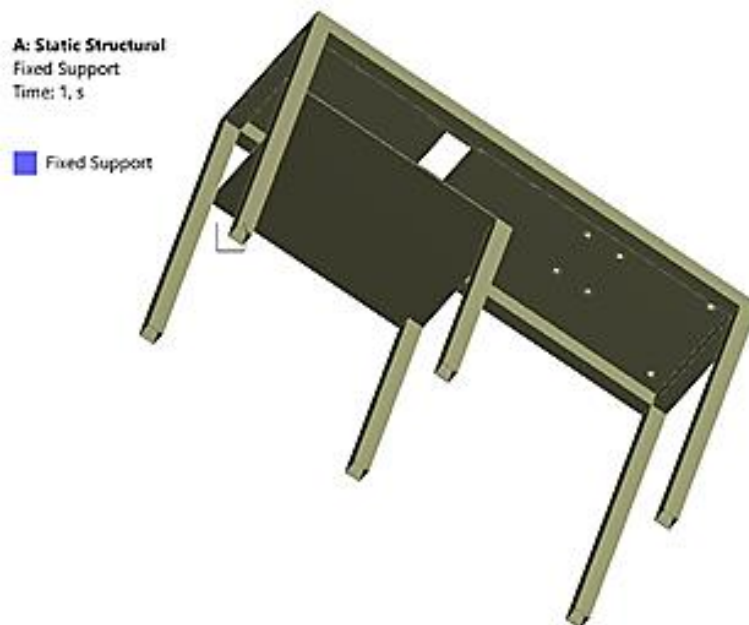
Fuente: autor.

Figura 48. Gravedad aplicada a la mesa de soporte.



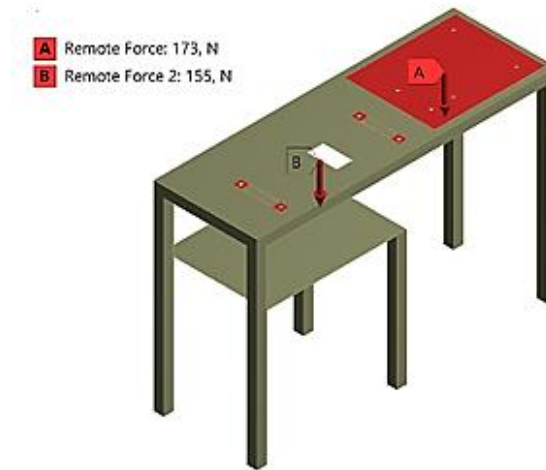
Fuente: autor

Figura 49. Soportes fijos de la estructura.



Fuente: autor.

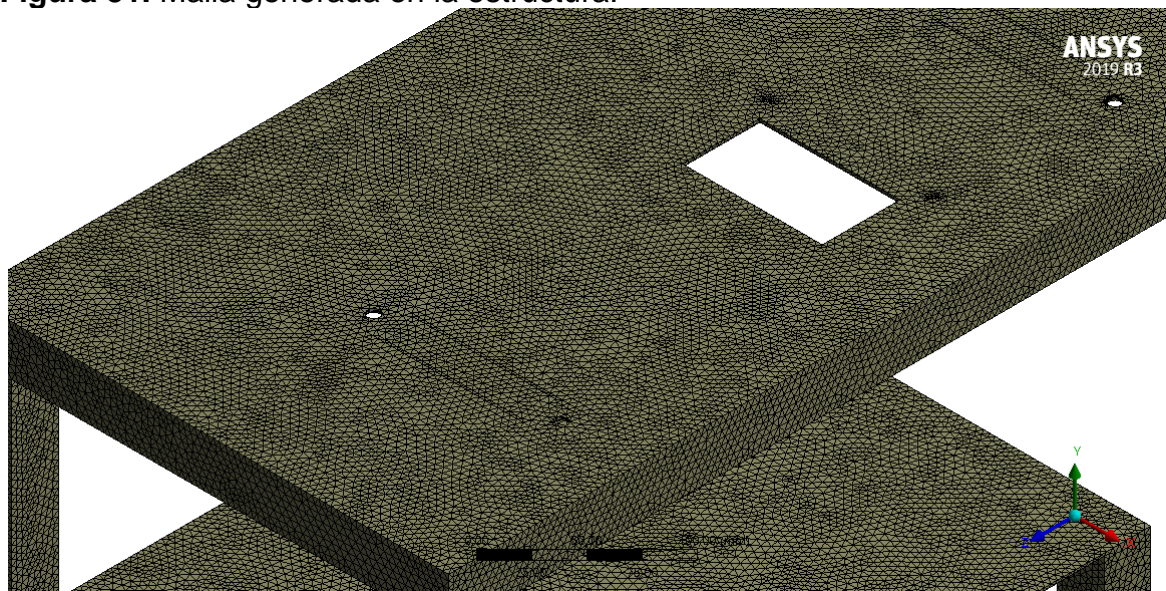
Figura 50. Fuerzas remotas en la estructura.



Fuente: autor.

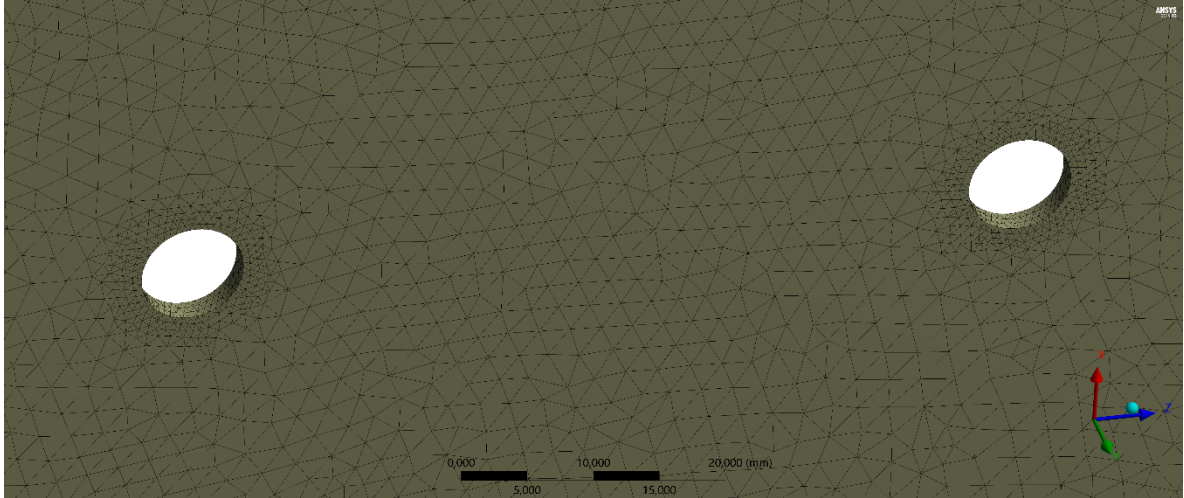
Se realiza un enmallado de preferencia *Mechanical*, con un tamaño de cada elemento de malla de 2 mm (**Figura 51**). Adicional, se realiza un refinamiento de segundo nivel en la sección de los agujeros como se observa en la **Figura 52**, con una cantidad de nodos y elementos obtenidos de 1562981 y 779473, respectivamente.

Figura 51. Malla generada en la estructura.



Fuente: autor

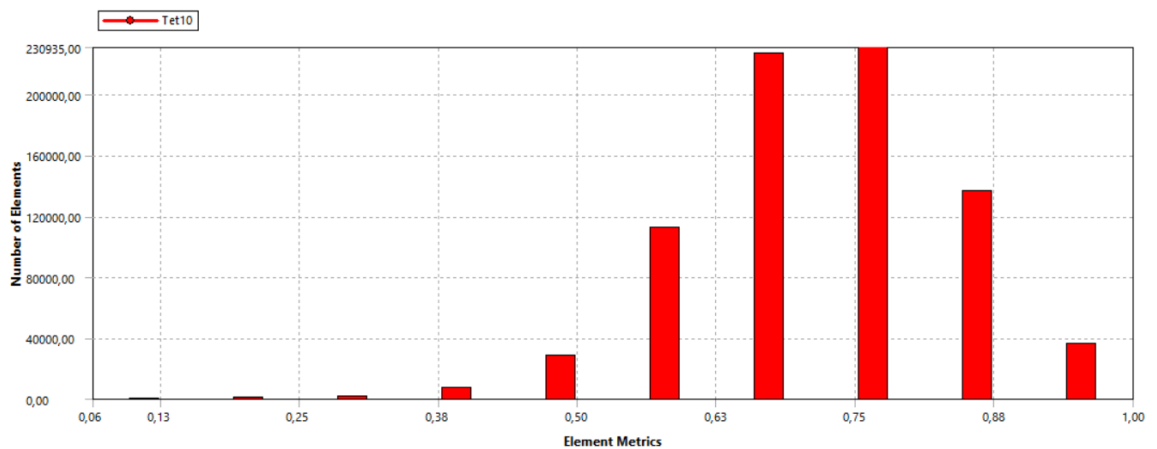
Figura 52. Refinamiento en los agujeros de la mesa.



Fuente: autor

En la **Figura 53** se observan los elementos de la malla obtenida para el tornillo que es de 0.68 y 0.75 elementos métricos en forma de tetraedros. Debido a la forma geométrica de la estructura se puede deducir que la malla aplicada es adecuada, ya que, todos los elementos de la malla son homogéneos tiene nodos de cara media lo que hace que el número total de nodos sea de diez.

Figura 53. Mesh Metric obtenida para la mesa.

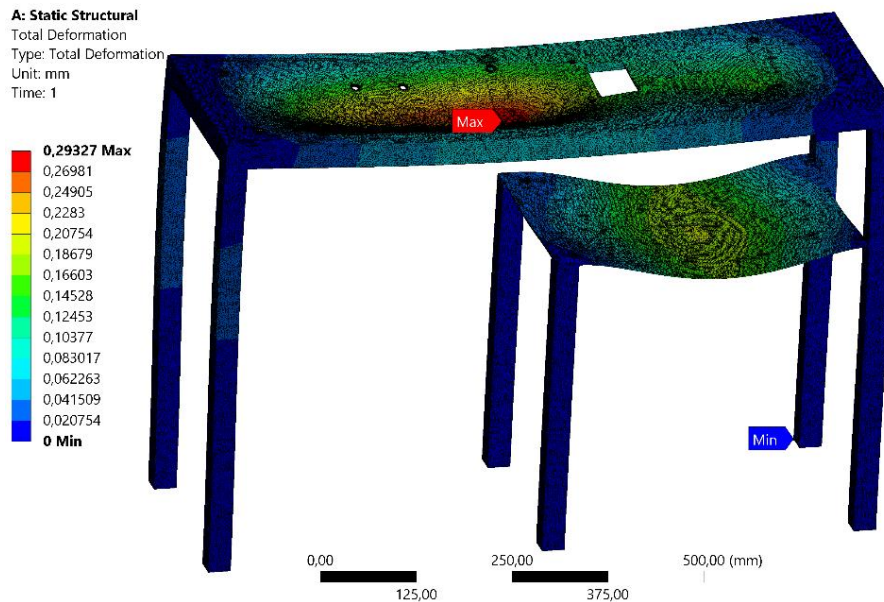


Fuente: autor

Se realizó un análisis de deformación en la mesa (**Figura 54**), se evidenció que la deformación máxima fue de 0.29327 mm en la parte superior de la mesa, en donde se encuentra el primer soporte del tornillo o de la sección de la zona de alimentación

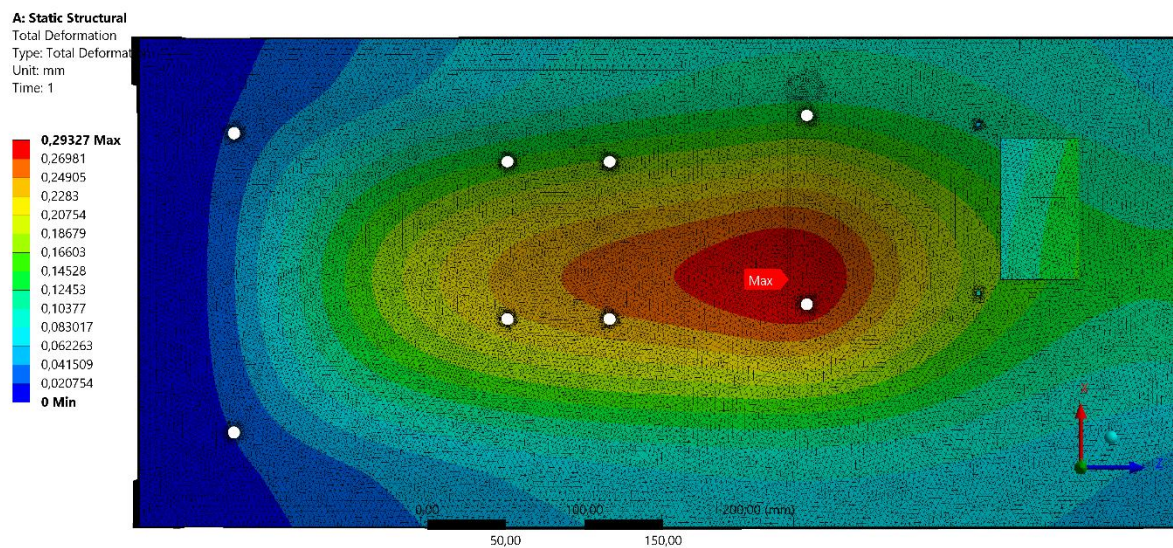
(Figura 55), cabe resaltar que la deformación está distribuida de forma homogénea, desde el centro de la mesa hacia los laterales, lo que produce un desplazamiento del tornillo de 0.0269° en ese punto con respecto a la horizontal de la mesa, es decir, un desplazamiento imperceptible teniendo en cuenta el peso de la máquina.

Figura 54. Deformación total en la mesa.



Fuente: autor.

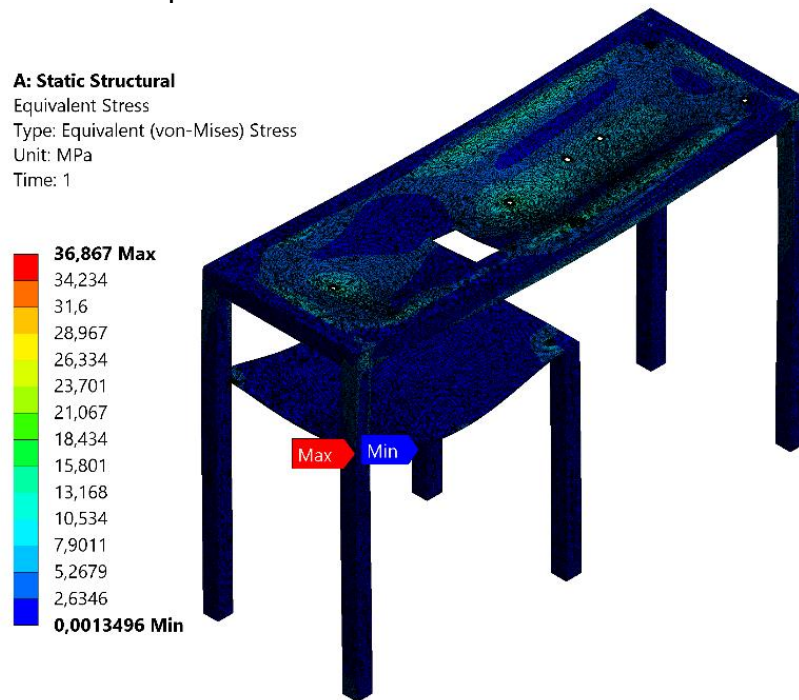
Figura 55. Deformación máxima generada en la parte superior de la mesa.



Fuente: autor.

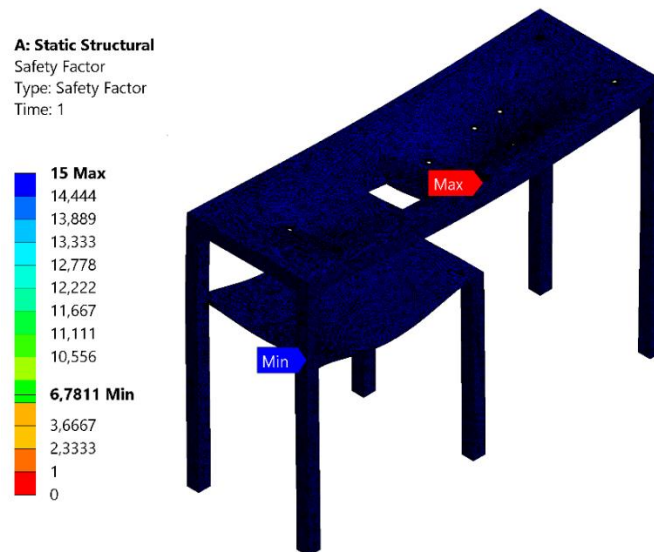
Se observo que el análisis del esfuerzo equivalente (**Figura 56**) se presenta particularmente en toda la mesa con un valor de 0.0013496 MPa , y se generó un esfuerzo mayor en uno de los costados de los soportes de la mesa con un valor de 36.867 MPa , esto debido a que los elementos mecánicos no se encuentran centrados en la mesa, sino que, existe una sobre carga en esa sección. Por último, se observa el factor de seguridad que se presenta en el diseño de la mesa con un valor máximo de 15 y el valor mínimo fue de 6,78 11 que se encuentra ubicado en la última sección de la mesa, sobre el perfil (**Figura 57**). Con base en estos resultados, se tomó una decisión que implicó la disminución del perfil inicial que se planteó a un perfil cuadrado de $30 \text{ mm} \times 30 \text{ mm} \times 1.5 \text{ mm}$, con un factor de seguridad de 15.

Figura 56. Esfuerzo equivalente de la mesa.



Fuente: autor.

Figura 57. Factor de seguridad en la mesa.



Fuente: autor.

En la **Tabla 36** se evidencian los datos obtenidos de la simulación el programa ANSYS, y los parámetros teniendo en cuenta el tipo de malla empleada en cada una de las piezas.

Tabla 36. Resumen datos simulación.

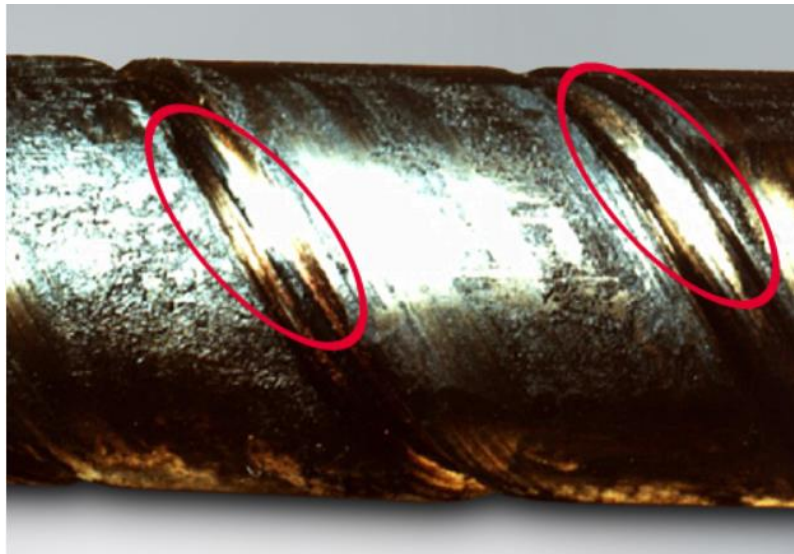
Pieza	Tipo de malla	Tamaño de malla (mm)	Factor de seguridad
Tolva	<i>Body sizing</i>	1.5	878.09
Tornillo	<i>Explicit</i>	2	0.35
Mesa	<i>Mechanical Refinement</i>	2	15

Fuente: autor

3.3 ESTUDIO EXPLORATORIO

En esta sección se realiza el estudio exploratorio sobre el desgaste presentado en los elementos mecánicos de una máquina de extracción de aceite de frutos oleaginosos, debido a que, el desplazamiento del tornillo puede producir contacto físico con las superficies del tambor o barril generando así una eliminación gradual del material. Existen diferentes tipos de desgaste: *(i)* picadura, aspereza, rayadura o escoriación; *(ii)* desgaste abrasivo, rascado mecánico, corte o rayadura; *(iii)* fisuramiento y por último *(iv)* desgaste por choque o impacto [25]. En la **Figura 58** se evidencia el desgaste por fricción severa generado en industriales generales entre el tornillo y la camisa o tubo contenedor.

Figura 58. Desgaste anormal causado por la contaminación de partículas finas de hierro.



Fuente: N. Motion&control [65]

Cabe resaltar, que es imposible describir el problema de desgaste que presentan los elementos de una máquina cuando se analizan en conjunto; sin embargo, en M. Heinze [66] consideran que para realizar el análisis se debe determinar únicamente sistemas tribológicos individuales muy pequeños, teniendo en cuenta, los parámetros del proceso y las propiedades del material. De esta forma, se puede examinar el tipo de desgaste, los mecanismos de desgaste y correlacionar los resultados con parámetros físicos como la temperatura, la tensión de cizalladura, la velocidad de corte y la viscosidad. La eficiencia del tornillo se ve afectada por el aumento de la holgura entre la hélice y el barril, debido a que, las diferencias de temperatura a lo largo del tornillo aumentan [67].

En el artículo de J.-M. Bouvier and O. H. Campanella [68] se estableció que el tornillo se ve afectado por el desgaste ya que aumentó la holgura existente en las hélices, reduciendo así el rendimiento del tornillo extrusor lo que modificó las características del producto, en este caso, alteró el rendimiento de la máquina o la obtención de aceite, porque en el proceso de extrusión se generó una fusión incompleta, falta de uniformidad en la temperatura, fluctuaciones de presión, una mezcla y transferencia de calor deficientes. La optimización y la consistencia del rendimiento del tornillo extrusor se lograron reduciendo al mínimo la tasa de desgaste en el procesamiento, lo que requiere la validación del diseño por elementos finitos de los mecanismos de desgaste de la máquina. Cabe resaltar que, la tasa de desgaste depende de tres factores principales según [68] que son: (i) la composición de la mezcla, (ii) las propiedades de los materiales a emplear para el tornillo y el barril y por último, (iii) la configuración o diseño del tornillo extrusor y transportador del material en cada una de las zonas del tornillo.

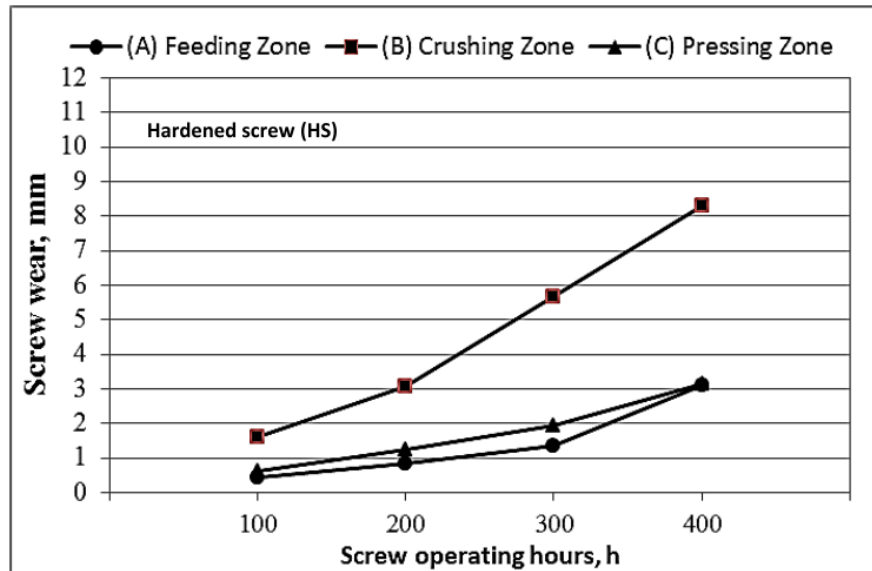
Para la producción de aceite vegetal en las industrias aceiteras se emplean las prensas de tornillo de semillas oleaginosas y para garantizar una vida útil más larga, los componentes de estas máquinas, en particular los tornillos sinfín y los revestimientos de las jaulas, deben ser sustituidos o mantenidos, ya que se desgastan con el uso, pero en Nigeria, debido a las limitaciones económicas, sociales y políticas es difícil la adquisición de piezas de repuesto de una calidad superior. Por lo que, surge una necesidad de mejorar el rendimiento de estas máquinas mediante métodos científicos que utilicen materiales de bajo costo y que sean disponibles localmente. En el estudio realizado por [69] la fase inicial fue el desarrollo de un banco de pruebas de desgaste de bajo costo y la evaluación de cuatro materiales (hierro fundido, acero inoxidable, revestimiento duro y acero dulce) de relleno de electrodos disponibles localmente, para su uso en el mantenimiento y revestimientos de jaula desgastados. Se obtuvo que, el desgaste o la pérdida de material en la pieza se representa en función del número de pasadas experimentales, siendo la duración de cada una de ellas de 3 minutos. Ahora bien, en cada ensayo realizado tuvieron en cuenta parámetros de presión y de velocidad, lo que permitió obtener que la mayor resistencia al desgaste se obtuvo de las muestras de relleno de electrodos de hierro fundido cuando la velocidad y la presión de funcionamiento fueron de 40 rpm y 13.7 MPa, respectivamente. Para la prueba con acero inoxidable ofrecieron la mayor resistencia al desgaste a una velocidad y presión de 40 rpm y 19.7 MPa, respectivamente. Cabe resaltar que cuando se aumentó la velocidad de 40 rpm a 85 rpm se evidenció un aumento de la tasa de desgaste de cada tipo de muestra.

Los resultados encontrados en el trabajo de investigación realizado en Nigeria por O. B. Aluko, G. O. Oluwadare, I. A. Ola, and G. A. Makanjuola [69] permiten concluir que la tasa de desgaste es proporcional al número de recorridos experimentales o al tiempo de funcionamiento de la máquina; el material que presentó menor resistencia al desgaste fue relleno de los electrodos de acero dulce, y la vida útil de las piezas con relleno de electrodos de acero inoxidable en las máquinas de

extracción de aceites oleaginosos que funcionan a una velocidad relativamente alta de 85 rpm y a una presión de 19.7 MPa darán los mejores resultados entre los materiales alternativos disponibles localmente que se consideraron.

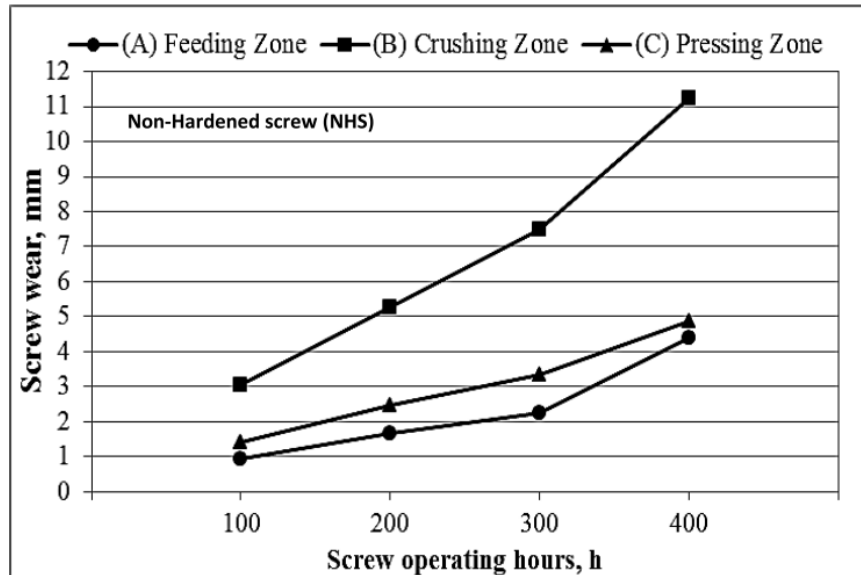
De igual forma en el artículo de M. Tawfk [70], donde el objetivo principal fue investigar la influencia del tratamiento de endurecimiento y de las horas de funcionamiento del tornillo empleado para la extracción de aceite de frutos oleaginosos, en el desgaste presentado a lo largo de las tres (3) zonas, así como el rendimiento de la expulsora durante el proceso de expresión del aceite para determinar el momento óptimo de sustitución del tornillo. En este trabajo de investigación compararon dos (2) tipos de tornillos cónicos, uno endurecido (HS) y el otro no endurecido (NHS) para prensar semillas de lino durante 400 horas de trabajo a 30 rpm y con un valor de 0.4 mm en la holgura de la última zona del tornillo (Figura 59 y Figura 60). Los resultados obtenidos por los autores revelaron que, el tornillo endurecido (HS) disminuiría el desgaste después de 400 h de extracción de aceite en 30.54 % en la zona de alimentación, 26.22 % en la zona de compresión y 35% en la zona de medición en comparación con el NHS. Por último, en el trabajo se sugiere sustituir el tornillo cónico por uno nuevo, después de 300 h y 400 h de funcionamiento para el tornillo NHS y el tornillo HS, respectivamente.

Figura 59. Efecto de las horas de funcionamiento del tornillo endurecido en el desgaste.



Fuente: M. Tawfk [70]

Figura 60. Efecto de las horas de funcionamiento del tornillo no endurecidos en el desgaste.



Fuente: M. Tawfk [70]

Además, según el estudio realizado por M. A. Cifuentes Riaño en [71] el coeficiente de desgaste que se presenta en elementos fabricados con acero inoxidable AISI 316 es de $6.3316 \times 10^{-5} \text{ mm}^3 / N \text{ mm}$, mientras que el acero inoxidable AISI 316 con adiciones de 3% Mo y 0.4% Ti presenta un coeficiente de desgaste del $29.722 \times 10^{-5} \text{ mm}^3 / N \text{ mm}$, ya que al adicionar estos recubrimientos tienden mejorar la resistencia mecánica.

De igual forma, en el artículo de Galán Avila, Avendaño Rodríguez y Villalobos Correa [72] el diseño de la prensa en un software CAD-CAE permitió el desarrollo, el análisis y la selección de los materiales adecuados para cada componente mecánico; permitiendo la evaluación iterativa del marco estructural y la propuesta de otros componentes. Además, se realizó una simulación FEA 2D axisimétrico para determinar el comportamiento del recubrimiento nanoestructurado cuando los componentes mecánicos de la prensa son sometidos a altas cargas.

Teniendo en cuenta, las secciones anteriores en donde se empleó la metodología hallada y formulada para el diseño de un sistema mecánico para la extracción de aceite de chontaduro (*Bactris Gasipaes*) el tipo de desgaste que se estudió principalmente fue desgaste abrasivo en tornillos empleados para el procesamiento de alimentos. Para el presente trabajo de investigación los factores que generan el desgaste se evidencian en que (i) al fruto no se le aplicará ningún componente químico para ser procesado, (ii) el fruto será cortado por la mitad y cocinado antes de ingresar, (iii) el material en el que se realizó el diseño de los elementos mecánicos de la máquina de extracción de aceite es acero inoxidable 316, por

último, según lo estudiado y analizado, se diseñó un tornillo variable en cada una de las zonas, de la zona de alimentación y compresión, el diámetro del eje es variable y el paso es constante, de la zona de compresión a la zona de medición el paso es variable, el diámetro del eje es constante y el diámetro del tornillo en cada una de las zonas es constante.

El desgaste se puede presentar en las zonas de compresión y medición del tornillo y del barril, ya que se produce un diferencial de presión mientras el fruto se tritura completamente a lo largo del tornillo, según S. Surley [73] el desgaste en estas zonas está causado por el contacto metal-metal entre el diámetro exterior del tornillo y el diámetro interior del barril, debido a la flexión del husillo y debido a que en cada una de las zonas la holgura del canal es constante; como ya se estudió anteriormente la holgura debe tener una dimensión de 0.05 mm , puesto que esta limita la fuga del alimento comprimido [14].

Según el análisis por elementos finitos, el desgaste se produce por la deformación generada a lo largo del tornillo, en donde, se genera micro corte y/o levantamiento de la superficie del material debido a la fricción generada entre el tornillo y el tambor. Según los datos obtenidos, en el desplazamiento del tornillo (0.17141 mm) se propone diseñar un soporte en la última sección del tubo contenedor, el cual evite la deflexión del tornillo (0.0159°) y evite que éste choque con las paredes del tambor y se mantenga la holgura en todas las zonas.

4. CONCLUSIONES

Se propone una metodología de diseño para un sistema de extracción de aceite de frutos oleaginosos donde se encuentra que los parámetros técnicos requeridos son la temperatura ($96\text{ }^{\circ}\text{C}$), la presión (0.55 MPa), la capacidad de procesamiento (140 kg/h) y el tiempo (37 frutos/min), lo que permite un rendimiento de extracción de aceite de 5.61 kg/h es decir, 6.23 l/h , adicional a esto, se estudia la geometría y la velocidad del tornillo, la caracterización mecánica y morfológica de la fruta. Por lo tanto, es necesario analizar los esfuerzos producidos en las piezas mecánicas para determinar la carga que soportan en el procesamiento del alimento y así establecer las características mecánicas en función de la deformación de los frutos o semillas que se utilizan.

A partir de la caracterización reológica estudiada, se obtuvo que la viscosidad del fruto de chontaduro es de 306.81 Pa s en la zona de alimentación del tornillo, la cual fue el mayor valor de viscosidad obtenido en cada una de las zonas de trabajo del tornillo, esto genera menos pérdida en el rendimiento que los frutos de menor viscosidad. Además, que es necesaria para diseñar la geometría del tornillo. Los resultados de los ensayos experimentales permiten corroborar el diseño del tornillo de extracción propuesto, planteado con base en el comportamiento reológico del fruto.

La geometría de tornillo propuesta consiste en un diámetro de tornillo constante con un valor de 0.08 m , con una longitud total de 0.617 m y una longitud en cada zona de 0.14 m . En cada una de las zonas de trabajo se diseña de la siguiente manera: en la zona de alimentación y de compresión el paso permanece constante con un valor de 0.045 m y el diámetro del eje varía de 0.05 m a 0.07 m , respectivamente, de la zona de compresión a la zona de medición el paso varía de 0.045 m a 0.040 m y el diámetro del eje es constante con un valor de 0.07 m . Cabe resaltar que la velocidad de 85 rpm fue un valor decidido por el autor. El diseño del tornillo propuesto permitió obtener una presión piezométrica máxima en la zona de alimentación del tornillo de 0.55 MPa y un torque de 13.57 Nm .

Realizando el análisis de los datos obtenidos se obtiene un error del 9.72% entre el valor analítico hallado para la presión piezométrica máxima que se genera en la zona de medición del tornillo (0.55 MPa) y el esfuerzo calculado (0.61 MPa) a partir de la fuerza máxima (48.03 N) encontrada mediante el TPA. Con la energía por unidad de volumen y el gasto de operación se estima la potencia del sistema (126.85 W) presentándose un error de 5.01% entre esta y la potencia analítica (120.79 W); ambas potencias se calcularon con un 75% de eficiencia. Es probable que las diferencias entre el valor analítico hallado para la presión piezométrica máxima que se genera en la zona de medición del tornillo y la potencia del sistema mediante el cálculo de la energía por unidad de volumen y el gasto de operación y

la potencia analítica se deba a que el TPA se realizó a temperatura ambiente, mientras que la presión se basó en el comportamiento reológico que presentan frutos similares a una temperatura de 96 °C.

El uso de las herramientas computacionales puede disminuir los tiempos de una manera considerable, además, de que evita el costo al realizar la construcción de la máquina y evidenciar que sus sistemas mecánicos no es el apropiado para la cantidad de aceite obtenido deseado, permitiendo rediseñar el sistema propuesto, desde un comportamiento cercano a las condiciones de operación reales. Además, la herramienta de análisis por medio de elementos finitos permite optimizar en cuestión de resistencia y deflexión, para garantizar que los componentes no se van a chocar internamente y garanticen un buen funcionamiento.

En el desgaste producido en los elementos mecánicos de una máquina de extracción de aceite de frutos oleaginosos, se tiene en cuenta que debe existir una diferencia significativa en las propiedades mecánicas (dureza) o tratamientos a los que debe ser sometido el material del barril y el tornillo de extracción, ya que es más fácil sustituir el tornillo que el barril. Para evitar el desgaste en el barril la solución que se contempla según los trabajos de investigación estudiados es utilizar material de acero al carbono, el cual debe recibir un tratamiento de endurecimiento mediante nitruración, después de la mecanización. Además, de colocar un soporte fijo en la última sección del tornillo para evitar la deformación del tornillo.

En la operación de este tipo de sistemas se pueden presentar fallas debido a diferentes fenómenos mecánicos como cargas pico, fatiga o uno de los más recurrentes, en el caso de contacto sólido-sólido, desgaste. Por lo tanto, es importante tener en cuenta estos fenómenos dentro de los parámetros de diseño y conocer la afectación en la vida útil de los elementos mecánicos, así como la factibilidad financiera para la implementación de mencionados sistemas de extracción.

5. TRABAJOS FUTUROS

Se recomienda realizar un trabajo experimental de investigación que relacione el grado de madurez y el contenido de humedad presente de la fruta oleaginosa que se va a procesar para determinar la cantidad de aceite oleaginoso extraído por la máquina, de igual forma, estos parámetros permiten relacionar el análisis TPA con la ley de potencia y así obtener las variables de diseño del tornillo de extracción.

Realizar la simulación del sistema mecánico adicionando el tratamiento químico de los elementos mecánicos. Adicional, tener en cuenta el desgaste metal a metal que se produce en estos elementos.

6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] S. Gaviria, L. F. Mejia, M. F. Castro, É. A. Gómez, and F. Castro, “Pérdida y Desperdicio de alimentos en Colombia,” *Dep. Nac. Planeación*, vol. 39, p. 116, 2016.
- [2] Ministerio de Agricultura, “Cultivo De Chontaduro,” *Minist. Agric. y Desarro. Rural*, pp. 5–8, 2016.
- [3] D. Tabio, Y. Díaz, M. Rondón, E. Fernández, and R. Piloto, “Extracción de aceites de origen vegetal,” *Univ. Tecnol. la Habana*, no. May, p. 29, 2017, doi: 10.13140/RG.2.2.11047.55201.
- [4] L. J. Manobanda Tutasig, “Diseño y construcción de una máquina para la extracción de aceite de cacao,” QUITO/UIDE/2016, 2016.
- [5] A. Pasquel, A. Del Castillo, V. Sotero, and D. García, “Extracción del aceite de la cáscara de *Bactris gasipaes* HBK usando dióxido de carbono presurizado,” *Rev. Amaz. Investig. Aliment.*, vol. 2, no. 1, pp. 1–14, 2002.
- [6] M. L. Martínez, “Extracción y caracterización de aceite de nuez (*Juglans regia* L.): influencia del cultivar y de factores tecnológicos sobre su composición y estabilidad oxidativa,” Universidad Nacional de Córdoba. Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales., 2010.
- [7] J. Restrepo, J. A. Estupiñán, and A. J. Colmenares, “Estudio comparativo de las fracciones lipídicas de *Bactris gasipaes* Kunth (chontaduro) obtenidas por extracción soxhlet y por extracción con CO 2 supercrítico Comparative study of lipid fractions from *Bactris gasipaes* Kunth (peach palm) obtained by so,” *SciELO*, pp. 5–9, 2016, doi: <http://dx.doi.org/10.5446/rev.colomb.quim.v45n1.57199>.
- [8] F. Emilio and C. Mena, “Producción de Biodiesel a Partir de Aceite Vegetal Extraído del Fruto de la Palma *Bactris Gasipaes* (Chontaduro),” 2016.
- [9] M. C. Chaparro Vega, “Obtencion De Aceite a Partir De Los Residuos Del Chontaduro,” Universidad del Valle, 2011.
- [10] H. Lawson, “The Basic Chemistry of Oils,” 1995.
- [11] W. Quitiaquez Sarzosa and C. Reina Yanque, “Diseño Y Construcción De Un Molino Para La Extracción De Aceite De Chonta (Fruto De Palmeras),” Universidad Politécnica Salesiana, 2011.
- [12] Y. O. Galarraga Rivera, “Diseño De Una Prensa De Tornillo Tipo Expeller Para La Extracción De Aceite Vegetal Virgen De La Semilla De Maíz, Para Uso Comestible,” Universidad Tecnológica de Pereira, 2015.
- [13] Maribel Beltrán and Antonio Marcilla, *Tecnología de Polímeros Procesado y propiedades*. 2012.
- [14] M. P. Groover, *Fundamentos de manufactura moderna*, 3rd ed. 2007.
- [15] W. A. Yacu, “Advances in Food Extrusion Technology,” in *Advances in Food Extrusion Technology*, M. Maskan and A. Altan, Eds. Dublin, Ireland, 2016, pp. 1–78.
- [16] R. G. Budynas and J. K. Nisbett, *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley*, Octava. Mc Graw Hill, 2008.
- [17] J. Isaza, I. Mariaka, and J. Ramírez, “Characterization of mechanical properties by finite element method inverse analysis combined with indentation test,” *Dyna*, vol. 80, no. 179, pp. 126–133, 2013.
- [18] X. Chen and Y. Liu, *Finite Element Modeling and Simulation with ANSYS Workbench*.
- [19] I. Amalia Kartika, P. Y. Pontalier, and L. Rigal, “Extraction of sunflower oil by twin

- screw extruder: Screw configuration and operating condition effects,” *Bioresour. Technol.*, vol. 97, no. 18, pp. 2302–2310, Dec. 2006, doi: 10.1016/j.biortech.2005.10.034.
- [20] A. Santos Jaimes, “Desarrollo de un equipo para la extracción de aceite a partir de la semilla de algodón,” *Red Rev. científicas América Lat. y el Caribe, España y Port.*, no. 42–43, pp. 50–59, 2013, Accessed: Sep. 27, 2018. [Online]. Available: <http://www.redalyc.org/html/478/47829722008/>.
- [21] P. Evon, I. A. Kartika, M. Cerny, and L. Rigal, “Extraction of oil from jatropha seeds using a twin-screw extruder: Feasibility study,” *Ind. Crops Prod.*, vol. 47, pp. 33–42, May 2013, doi: 10.1016/j.indcrop.2013.02.034.
- [22] J. Rodrigues *et al.*, “Modeling and optimization of laboratory-scale conditioning of *Jatropha curcas* L. seeds for oil expression,” *Ind. Crops Prod.*, vol. 83, pp. 614–619, May 2015, doi: 10.1016/j.indcrop.2015.12.062.
- [23] L. Bogaert, H. Mathieu, H. Mhemdi, and E. Vorobiev, “Characterization of oilseeds mechanical expression in an instrumented pilot screw,” *Ind. Crops Prod.*, vol. 121, pp. 106–113, Oct. 2018, doi: 10.1016/j.indcrop.2018.04.039.
- [24] D. Kilcast, *Texture in food Volumen 2: Solid foods*, Kilcast, D. Woodhead Publishing Limited, 2004.
- [25] R. L. Mott, *Diseño de elementos de máquinas*, 4th ed. University of Dayton: Pearson Education, 2006.
- [26] S. S. Bair, “Rheology,” *Handb. Lubr. Tribol. Vol. II Theory Des. Second Ed.*, pp. 26-1-26–14, 2012, doi: 10.1201/b12265.
- [27] P. Talens Oliag, “Caracterización de las propiedades mecánicas de alimentos mediante análisis de perfil de textura,” May 2017. [Online]. Available: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/83513/Talens - Caracterización de las propiedades mecánicas de alimentos mediante análisis de perfil de....pdf?sequence=1>.
- [28] J. Torres González, K. González Morelos, and D. Acevedo Correa, “Análisis del Perfil de Textura en Frutas, Productos Cárnicos y Quesos,” *ReCiTeIA*, vol. 14, no. 2, pp. 63–75, 2015.
- [29] A. F. López Camelo, “Manual Para la Preparación y Venta de Frutas y Hortalizas,” Balcarce, Argentina, 2003.
- [30] N. V. Esquivel Reyes, “Análisis de textura en frutas,” Universidad Nacional de Trujillo, 2017.
- [31] A. González, A. Alvis, and G. Arrázola, “Efecto del recubrimiento comestible en las propiedades de trozos de batata (*Ipomoea Batatas* Lam) fritos por inmersión. Parte 1: Textura,” *Inf. Tecnol.*, vol. 26, no. 1, pp. 95–102, 2015, doi: 10.4067/S0718-07642015000100011.
- [32] H. Letaief, L. Rolle, and V. Gerbi, “Mechanical behavior of winegrapes under compression tests,” *Am. J. Enol. Vitic.*, vol. 59, no. 3, pp. 323–329, 2008.
- [33] W. J. Llanos, B. Castillo, and M. T. Londoño, “Characterization of the mechanical properties of the cape gooseberry fruit (*Physalis peruviana* L.) Caracterización de propiedades mecánicas del fruto de la uchuva (*Physalis peruviana* L.),” vol. 31, no. 1, p. 7, 2013, [Online]. Available: <http://www.scielo.org.co/pdf/agc/v31n1/v31n1a09.pdf>.
- [34] J. A. Linares, B. Castillo, and M. T. Londoño, “Characterization of the mechanical properties of the sweet passion fruit (*Passiflora ligularis* Juss.),” *Agron. Colomb.*, vol. 31, no. 2, pp. 208–214, 2013.
- [35] L. Giongo, M. Ajelli, P. Poncetta, M. Ramos-García, P. Sambo, and B. Farneti,

- “Raspberry texture mechanical profiling during fruit ripening and storage,” *Postharvest Biol. Technol.*, vol. 149, no. December 2018, pp. 177–186, 2019, doi: 10.1016/j.postharvbio.2018.11.021.
- [36] M. A. Rao, *Rheology of Fluid and Semisolid Foods Principles and Applications*, Second. New York: Springer, 2007.
- [37] J. R. M. B. Vidal, D. H. Pelegrine, and C. A. Gasparetto, “Efeito da temperatura no comportamento reológico da polpa de manga (mangífera indica L-Keitt),” *Ciência e Tecnol. Aliment.*, vol. 24, no. 1, pp. 39–42, 2004, doi: 10.1590/s0101-20612004000100008.
- [38] R. D. Andrade, R. Torres, E. J. Montes, O. A. Pérez, L. E. Restan, and R. E. Peña, “Efecto de la temperatura en el comportamiento reológico de la pulpa de níspero (*Achras sapota* L.),” *Rev. la Fac. Agron.*, vol. 26, no. 4, pp. 599–612, 2009.
- [39] C. W. Isidoro Haminiuk, M. R. Sierakowski, D. R. Izidoro, G. M. Maciel, A. de P. Scheer, and M. L. Masson, “Comportamento reológico de sistemas pécticos de polpas de frutas vermelhas,” *Cienc. e Tecnol. Aliment.*, vol. 29, no. 1, pp. 225–231, 2009.
- [40] P. E. D. Augusto, M. Cristianini, and A. Ibarz, “Effect of temperature on dynamic and steady-state shear rheological properties of siriguela (*Spondias purpurea* L.) pulp,” *J. Food Eng.*, vol. 108, no. 2, pp. 283–289, 2012, doi: 10.1016/j.jfoodeng.2011.08.015.
- [41] D. Manayay Sánchez, W. Castillo Martínez, S. Quezada Berru, L. Palacios Ambrocio, and S. López Rivera, “Caracterización del comportamiento al flujo de pulpa simple y concentrada de manzana variedad San Antonio,” *Agroindustrial Sci.*, vol. 3, pp. 47–51, 2013.
- [42] A. Santos Lopes, R. de A. Mattietto, H. Castle de Menezes, L. H. Meller da Silva, and R. da Silva Pena, “Rheological behavior of Brazilian Cherry (*Eugenia uniflora* L.) pulp at pasteurization temperatures,” *Food Sci. Technol.*, vol. 33, no. 1, pp. 26–31, 2013, doi: 10.1590/s0101-20612013005000001.
- [43] L. Moscicki, *Extrusion-Cooking Techniques*. 2011.
- [44] P. Jiménez P, L. Masson S, and V. Quitral R, “Composición química de semillas de chía, linaza y rosa mosqueta y su aporte en ácidos grasos omega-3,” *Rev. Chil. Nutr.*, vol. 40, no. 5, p. 623, 2013.
- [45] E. Alvárez G, W. Murillo A, E. Murillo P, B. A. Rojano, and J. J. Méndez A, “Caracterización y extracción lipídica de las semillas (*Theobroma grandiflorum*),” *Cienc. en Desarro.*, vol. 7, no. 1, pp. 103–109, 2016, [Online]. Available: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0121-74882016000100013.
- [46] E. Gimeno, “Frutos Secos y Frutas,” *Ámbito Farm.*, vol. 21, pp. 90–96, 2002.
- [47] C. Rauwendaal *et al.*, *Polymer Extrusion*, Quinta., vol. 65, no. 12. Munich, 2014.
- [48] T. Osswald and N. Rudolph, *Polymer Rheology Fundamentals and Applications*, Hanser. Munich, 2002.
- [49] B. Launay and J. M. Lisch, “Twin-screw extrusion cooking of starches: Flow behaviour of starch pastes, expansion and mechanical properties of extrudates,” *J. Food Eng.*, vol. 2, no. 4, pp. 259–280, 1983, doi: 10.1016/0260-8774(83)90015-8.
- [50] J. L. Doublier, P. Colonna, and C. Mercier, “Extrusion Cooking and Drum Drying of Wheat Starch. II. Rheological Characterization of Starch Pastes.,” *Cereal Chemistry*, vol. 63. pp. 240–246, 1986.
- [51] W. Michaeli, *Extrusion dies for plastics and rubber*, Tercera. Munich: Hanser Gardner Publications, Inc, 2003.
- [52] D. E. Osorio Orellana, “Estudio, puesta en marcha y porposición de ensayos para un

- transportador de tornillo de laboratorio,” Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, 2018.
- [53] Z. Tadmor and C. G. Gogos, *Principles of polymer processing*, Second., no. 1. 2003.
- [54] V. S. Shubin and C. Pedre, “Diseño de Maquinaria Industrial,” J. J. Amador, Ed. Editorial Pueblo y Educación, 1977, p. 186.
- [55] Grupo SKF, “Catálogo General SKF.” Suecia, p. 1135, 2008.
- [56] P. M. Kurowski, *Finite Element Analysis for Design Engineers, Second Edition*. 2016.
- [57] A. Fadeyibi, Z. D. Osunde, A. . Gbabo, and E. C. Egwim, “Design of single screw extruder for homogenizing bulk solids,” *Agric. Eng. Int. CIGR J.*, vol. 18, no. 4, pp. 222–231, 2016.
- [58] R. Reyes Cuesta, S. Bastidas Pérez, and E. Peña Rojas, “Caracterización de frutos de chontaduro(*Bactris gasipaes* K)de la región de Tumaco Colombia,” *Revista de Ciencias Agrícolas*. pp. 1–9, 1997.
- [59] E. M. Castillo, “Caracterización química de la harina de un fruto del amazonas (*Bactris gasipaes*) crudo y procesado.,” Universidad Simón Bolívar, 2006.
- [60] A. Pasquel, A. Del Castillo, V. Sotero, and D. García, “Extracción del aceite de la cáscara de *Bactris gasipaes* HBK usando dióxido de carbono presurizado,” *Rev. Amaz. Investig. Aliment.*, vol. 2, no. 1, pp. 1–14, 2002.
- [61] L. Hurtado, “Extracción de aceite rojo de Chontaduro (*Bactris gasipaes* HBK),” pp. 1–15, 1999.
- [62] Matweb, “AISI 316 Stainless Steel Austenitic.” *MatWeb*, 2015. <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=50f320bd1daf4fa7965448c30d3114ad>
- [63] Matweb, “AISI 1020 Steel cold rolled (CR),” *MatWeb*, 2015. <http://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?MatGUID=ff6d4e6d529e4b3d97c77d6538b29693>.
- [64] N. Sierra, C. E. Plazas, L. F. Guillén, and P. A. Rodríguez, “Protocolo para el control de calidad de envases de plástico , utilizados en la industria farmacéutica , de cosméticos y de alimentos Resumen Quality control guide of the packing employed in the Introducción,” *Rev. Colomb. Ciencias Químico-Farmacéuticas*, vol. 39, no. 2, pp. 149–167, 2010.
- [65] N. Motion&control, “Desgaste,” 2021. <https://www.nskamericas.com/es/services/troubleshooting/ball-screws/wear-ball-screws.html> (accessed Sep. 25, 2021).
- [66] M. Heinze, “Wear resistance of hard coatings in plastics processing,” *Surf. Coatings Technol.*, vol. 105, no. 1–2, pp. 38–44, 1998, doi: 10.1016/S0257-8972(98)00449-6.
- [67] Dynisco, “The Screw and Barrel System,” vol. 1, no. 508, pp. 1–31, 2017, [Online]. Available: www.dynisco.com.
- [68] J.-M. Bouvier and O. H. Campanella, *Extrusion Processing Technology*. 2014.
- [69] O. B. Aluko, G. O. Oluwadare, I. A. Ola, and G. A. Makanjuola, “Rapid comparative wear evaluation of oilseed screw press maintenance materials in Nigeria,” *J. Food Eng.*, vol. 59, no. 2–3, pp. 111–116, 2003, doi: 10.1016/S0260-8774(02)00437-5.
- [70] M. Tawfk, “THE SCREW WEAR INFLUENCE ON THE PERFORMANCE OF AN OILSEED EXPELLER,” 2016.
- [71] M. A. Cifuentes Riaño, “Estudio del acero inoxidable pulvimetalúrgico AISI 316 con adiciones de 3% Molibdeno y 0.4% Titanio,” Universidad pedagógica y tecnológica de Colombia, 2017.
- [72] J. A. Galán Avila, D. F. Avendaño Rodríguez, and D. E. Villalobos Correa, “Design and simulation of mechanical press for testing of coining tools with nanostructured

coatings," *Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia*, 2020, Accessed: Nov. 13, 2021. [Online]. Available:

<https://revistas.udea.edu.co/index.php/ingenieria/article/view/343287/20805829>.

- [73] S. Surley, "Screw wear: Understanding causes, effects, and solutions," *Plast. Technol.*, vol. 64, no. 10, pp. 52–54, 2018.

7. ANEXOS

- Anexo 1.** Diseño de una máquina de extracción de aceite de chontaduro (Bactris Gasipaes)
- Anexo 2.** Explosionado
- Anexo 3.** Diseño de la Tolva
- Anexo 4.** Desarrollo de la lámina de la tolva.
- Anexo 5.** Diseño del barril.
- Anexo 6.** Diseño del tornillo de extracción.
- Anexo 7.** Diseño de la cuña.
- Anexo 8.** Diseño de los bujes.
- Anexo 9.** Diseño de la tapa del barril.
- Anexo 10.** Desarrollo de la lámina de la tapa del barril.
- Anexo 11.** Diseño del soporte.
- Anexo 12.** Desarrollo de la lámina del soporte.
- Anexo 13.** Diseño de la mesa del motor.
- Anexo 14.** Desarrollo de la lámina de la mesa del motor.
- Anexo 15.** Tapa deslizante de la mesa-motor.
- Anexo 16.** Diseño de la mesa.
- Anexo 17.** Diseño de las láminas de la mesa.
- Anexo 18.** Diseño de los soportes de la mesa.
- Anexo 19.** Diseño de la guía inferior.
- Anexo 20.** Tanque de almacenamiento de aceite.
- Anexo 21.** Ficha técnica del motor.
- Anexo 22.** Artículo sustentado en la ponencia del Congreso Internacional De Ingeniería Mecánica, Mecatrónica Y Automatización