

DESARROLLO DE UN PROTOTIPO A ESCALA DE PLANTA DE TRATAMIENTO PARA
CAFÉ: INTEGRACIÓN DE DESPULPADO Y LAVADO EN UN DISEÑO EFICIENTE

ANDERSON JULIAN BARAJAS SANABRIA
JONATHAN MATEUS QUITIAN

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA

2025

DESARROLLO DE UN PROTOTIPO A ESCALA DE PLANTA DE TRATAMIENTO PARA
CAFÉ: INTEGRACIÓN DE DESPULPADO Y LAVADO EN UN DISEÑO EFICIENTE

ANDERSON JULIAN BARAJAS SANABRIA
JONATHAN MATEUS QUITIAN

Trabajo de Grado para optar al título de
Ingeniero Mecánico

Director
ISNARDO GONZÁLEZ JAIMES
Ingeniero Mecánico

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA

2025

DEDICATORIA

Este logro es el reflejo de un camino lleno de esfuerzo, sacrificios y aprendizajes, que no habría sido posible sin el apoyo de quienes han sido mi mayor fortaleza.

Dedico este proyecto, en primer lugar, a mis padres, Alexander Barajas López y Carmensa Sanabria Cordero, quienes, con su amor incondicional, ejemplo de disciplina y constantes enseñanzas me guiaron a lo largo de la vida y me inspiraron a nunca rendirme.

A mis hermanos, Diego Andrés Barajas y Adriana Camila Barajas, compañeros de vida que, con sus palabras de ánimo y compañía, han hecho de este camino uno más llevadero y significativo.

A mi novia, Brenda Albarracín, por su paciencia, comprensión y respaldo inquebrantable en cada etapa de mi formación. Gracias por creer en mí incluso en los momentos más difíciles y por recordarme siempre la importancia de seguir adelante.

A mis amigos y conocidos, que con su apoyo, consejos y compañía me regalaron la motivación necesaria para superar los retos del día a día.

Finalmente, dedico este trabajo a todas las personas que, de una u otra manera, me acompañaron en este proceso. Cada palabra, gesto y acción de aliento se ve reflejada en la culminación de este sueño, que hoy no solo es mío, sino también de todos ustedes.

ANDERSON JULIAN BARAJAS SANABRIA

DEDICATORIA

Con todo mi amor y gratitud, dedico las páginas de este esfuerzo:

A mi papá, José Alfredo, y a mi mamá, Marlen, por ser el ejemplo más claro de perseverancia y entrega. Por trabajar incansablemente para darme las oportunidades que ellos no tuvieron. Por cada palabra de aliento y cada lección de vida, gracias.

A mis hermanos, Alexander y Jakeline, mis primeros amigos y cómplices. Gracias por aguantar mis malos humores, por distraerme cuando más lo necesitaba y por celebrar conmigo cada pequeña victoria.

Y a ti, Laura Vanesa, mi amor. Por ser mi motivación más grande, por aguantar las largas noches de estudio y por llenar cada día de razones para sonreír. Sin tu apoyo, este viaje no hubiera sido el mismo.

Este título lleva el nombre de todos ustedes.

JONATHAN MATEUS QUITIAN

AGRADECIMIENTOS

Los autores de este proyecto de grado expresamos nuestra más sincera gratitud a todas las personas que hicieron posible la culminación de este proceso académico y personal.

Agradecemos, en primer lugar, a nuestras familias, por ser la base de nuestro esfuerzo, por su apoyo incondicional, enseñanzas y confianza.

A nuestras novias, quienes con paciencia, amor y comprensión nos acompañaron en los momentos más exigentes de la carrera, brindándonos siempre aliento y motivación.

De manera especial, reconocemos a la familia Bueno: Mario, Jhonatan y Raúl, así como a César Fonseca, por su apoyo, orientación y valiosos aportes en este camino.

También a nuestro director Isnardo González, por ser guía y amigo en este proceso académico.

A nuestros amigos, compañeros y conocidos, quienes con sus consejos, respaldo y compañía hicieron este recorrido más enriquecedor y llevadero.

Finalmente, agradecemos a todas las personas e instituciones que de alguna forma contribuyeron a la realización de este proyecto, pues cada aporte, por pequeño que haya sido, resultó fundamental para alcanzar este logro.

ANDERSON JULIAN BARAJAS SANABRIA

JONATHAN MATEUS QUITIAN

CONTENIDO

	Pág.
1. GENERALIDADES DEL PROCESO DEL CAFÉ	20
1.1. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.....	20
1.2. OBJETIVOS.....	21
1.2.1. Objetivo general	21
1.2.2. Objetivos específicos.....	21
1.3. JUSTIFICACIÓN.....	22
2. CARACTERIZACIÓN DEL CAFÉ	23
2.1. BOTÁNICA DEL CAFÉ	23
2.2. PROPIEDADES QUÍMICAS DEL CAFÉ	23
2.3. PROPIEDADES FÍSICAS DEL CAFÉ	24
3. ETAPAS DE PRODUCCIÓN DEL CAFÉ	27
4. DISEÑO CONCEPTUAL	28
4.1. ANALISIS DE LA INFORMACIÓN RECOPIADA.....	28
4.2. DESPLIEGUE DE LA FUNCIÓN DE CALIDAD (QFD).....	31
4.2.1. Requerimientos del consumidor	31
4.2.2. Organización de requerimientos.....	32
4.2.3. Criterios de diseño	32
4.2.4. Matriz de calidad	33
4.2.5. Resultados ponderados	33
4.2.6. Planteamiento de alternativas	34
4.2.7. Evaluación de alternativas	37
4.2.8. Dimensionamiento de la máquina	40

4.2.9. Sistema general: Planta de tratamiento de café	40
4.2.10. Subsistemas de la maquina.....	41
4.2.10.1. Alimentación	41
4.2.10.2. Tren motriz	42
4.2.10.3. Sistema de despulpado.....	43
4.2.10.4. Sistema de lavado	44
4.2.10.5. Sistema de aprovechamiento hídrico.....	44
5. DISEÑO DETALLADO	46
5.1. Potencia del motor.....	46
5.2. Vida útil de la chumacera	47
5.3. TOLVA DE ALIMENTACIÓN.....	47
5.4. EJE Y TAMBOR DESPULPADOR.....	51
5.4.1. Análisis de fatiga eje tambor despulpador.....	56
5.5. EJE DOSIFICADOR (ALIMENTADOR).....	58
5.5.1. Análisis de Fatiga eje alimentador.....	62
5.6. ESTRUCTURA MÓDULO 1 (DESCEREZADO).....	64
5.7. MÓDULO 2 (SISTEMA DE LAVADO).....	68
5.7.1. Cálculos para la bomba de agua	68
5.7.2. Sistema de lavado a presión	70
5.7.3. Estructura Módulo 2	71
5.7.4. Diseño tornillo sin fin.....	74
5.7.5. Análisis de fatiga punta sin fin motriz.....	78
5.8. ESTRUCTURA MÓDULO 3 (BASE DE LA MÁQUINA)	80
5.9. ANALISIS DE FRECUENCIA NATURAL	83
6. CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO	85

6.1. EJECUCIÓN: ¿CÓMO SE HIZO?	85
6.2. Adquisición de materiales y componentes	85
6.3. Fabricación y montaje del prototipo	86
6.4. Hojas de ruta	86
6.4.1. Hoja de ruta para construcción del tambor despulpador	87
6.4.2. Hoja de ruta para construcción de piñón doble	88
6.4.3. Hoja de ruta para construcción del tornillo sin fin	89
6.4.4. Hoja de ruta para la construcción de los filtros de agua recirculada	90
7. PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO Y CALIDAD	91
7.1. Evaluación de la capacidad de café descerezado	91
7.2. Evaluación de la calidad de entrega del grano	92
7.2.1. Consumo hídrico.	96
8. EVALUACIÓN ECONÓMICA	98
9. CONCLUSIONES	102
BIBLIOGRAFÍA	103

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Propiedades químicas, principales compuestos contenidos en el café almendra.	24
Tabla 2. Dimensiones ortogonales E1, E2, P y diámetro característico (mm).	25
Tabla 3. Masa fresca, masa seca y contenido de humedad (base húmeda) del fruto de café.	25
Tabla 4. QFD.	33
Tabla 5. Resultados ponderados global.	34
Tabla 6. Resultados ponderados de evaluación de alternativas.	37
Tabla 7. Cálculos de potencia requerida en el sistema.	46
Tabla 8. Cálculos del volumen útil y resistencia de la tolva de alimentación.	48
Tabla 9. Cálculos de resistencia del eje del tambor despulpador.	52
Tabla 10. Cálculos de resistencia del eje alimentador.	59
Tabla 11. Cargas distribuidas presentes en el módulo 1.....	65
Tabla 12. Perdidas en el sistema de bombeo.	69
Tabla 13. Cálculo de grupos de perforaciones para sistema de lavado a presión.....	71
Tabla 14. Cargas distribuidas presentes en el módulo 2.....	71
Tabla 15. Cargas y reacciones dadas por el tornillo sin fin.	75

Tabla 16. Cargas distribuidas presentes en el módulo 3.....	81
Tabla 17. Hoja de ruta del tambor despulpador.....	87
Tabla 18. Hoja de ruta del piñón doble.....	88
Tabla 19. Hoja de ruta del tornillo sin fin.....	89
Tabla 20. Hoja de ruta para el filtro.....	90
Tabla 21. Resultados de capacidad de procesamiento de la máquina.	92
Tabla 22. Parámetros de calidad de despulpado.....	92
Tabla 23. Consumo de agua por kilogramo de café cereza.	97
Tabla 24. Lista de compras de materia prima e insumos.....	98
Tabla 25. Costos de producción y construcción del prototipo.	99
Tabla 26. Costos totales del proyecto.....	100
Tabla 27. Resultados de VPN y TIR	101

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Recolección de café.	21
Figura 2. Planos de simetría del fruto de café cereza.	25
Figura 3. Resumen de las etapas de producción del café.	27
Figura 4. Requerimientos organizados.	32
Figura 5. Ilustración de la alternativa 1.	34
Figura 6. Ilustración de la alternativa 2.	35
Figura 7. Ilustración de la alternativa 3.	36
Figura 8. Ilustración de la alternativa 4.	36
Figura 9. Boceto rediseñado de la alternativa ganadora.	39
Figura 10. Dimensionamiento general del prototipo.	41
Figura 11. Tolva de alimentación y alimentador.	42
Figura 12. Transmisión de potencia.	42
Figura 13. Tambor de despulpado.	43
Figura 14. Pechera.	43
Figura 15. Módulo de lavado.	44

Figura 16. Sistema de aprovechamiento hídrico y filtrado.....	45
Figura 17. Cálculos de vida útil de la chumacera.....	47
Figura 18. Tolva de alimentación.....	48
Figura 19. Detalles de sujeción en la tolva.....	49
Figura 20. Detalles de carga distribuida en la tolva.	49
Figura 21. Tensión de Von Mises en la tolva.....	50
Figura 22. Desplazamientos resultantes tolva.	51
Figura 23. Ensamble de eje y tambor despulpador.	52
Figura 24. Detalles de sujeción, eje del tambor despulpador.	53
Figura 25. Detalles de carga distribuida, eje del tambor despulpador.....	54
Figura 26. Tensión de Von Mises, eje del tambor despulpador.	55
Figura 27. Desplazamientos resultantes, eje del tambor despulpador.....	56
Figura 28. Propiedades del modelo, eje tambor despulpador.....	56
Figura 29. Análisis de fatiga daño acumulado, eje tambor despulpador.....	57
Figura 30. Análisis de fatiga vida total, eje tambor despulpador.	58
Figura 31. Ensamble de eje alimentador y piñón doble.	59

Figura 32. Detalles de carga distribuida del eje alimentador.	60
Figura 33. Detalles de carga aplicada al eje alimentador.	60
Figura 34. Tensión de Von Mises del eje alimentador.	61
Figura 35. Desplazamientos resultantes del eje alimentador.	62
Figura 36. Propiedades del modelo eje alimentador.	62
Figura 37. Análisis de fatiga daño acumulado, eje alimentador.	63
Figura 38. Análisis de fatiga vida total, eje alimentador.	64
Figura 39. Estructura Modulo 1.	65
Figura 40. Detalles de sujeción del módulo 1.	66
Figura 41. Detalles de carga distribuida del módulo 1.	66
Figura 42. Tensión de Von Mises del módulo 1.	67
Figura 43. Desplazamientos resultantes del módulo 1.	68
Figura 44. Curva característica de la bomba y curva de eficiencia.	70
Figura 45. Detalles de sujeción del módulo 2.	72
Figura 46. Detalles de carga distribuida del módulo 2.	72
Figura 47. Tensión de Von Mises del módulo 2.	73
Figura 48. Desplazamientos resultantes del módulo 2.	74

Figura 49. Tornillo sin fin.	75
Figura 50. Detalles de sujeción en puntas del tornillo sin fin.	76
Figura 51. Detalles de carga distribuida en puntas del tornillo sin fin.	76
Figura 52. Tensión de Von Mises en puntas del tornillo sin fin.....	77
Figura 53. Desplazamientos resultantes en puntas del tornillo sin fin.	78
Figura 54. Propiedades del modelo punta sin fin motriz.....	78
Figura 55. Análisis de fatiga daño acumulado, punta sin fin motriz.....	79
Figura 56. Análisis de fatiga vida total, punta sin fin motriz.	80
Figura 57. Detalles de sujeción del módulo 3.	81
Figura 58. Detalles de carga distribuida del módulo 3.....	82
Figura 59. Tensión de Von Mises del módulo 3.	82
Figura 60. Desplazamientos del módulo 3.	83
Figura 61. Módulo 1 y motor para analisis de vibraciones.....	84
Figura 62. Ejecución del desarrollo y construcción de prototipo.....	85
Figura 63. Tornillo sin fin fabricado.	90
Figura 64. Café pesado para despulpar.....	91

Figura 65. Salida de café del sistema.	93
Figura 66. Muestra de café despulpado y lavado.	93
Figura 67. Pulpa de café cereza después del proceso de descerezado.....	94
Figura 68. Café despulpado y lavado obtenido.	94
Figura 69. Café pergamino pesado después del lavado.....	95
Figura 70. Café pergamino seco.....	95
Figura 71. Aprovechamiento de la pulpa de café cereza.	96
Figura 72. Placa de información de la Bomba.	97
Figura 73. Gráfico de VPN.....	100

LISTA DE ANEXOS

Ver anexos adjuntos en el repositorio institucional

ANEXO A. ETAPAS DE PRODUCCIÓN DEL CAFÉ

ANEXO B. ANALISIS DE VIBRACIONES

ANEXO C. COMPLEMENTOS DE FABRICACIÓN

ANEXO D. CATÁLOGOS

ANEXO E. PLANOS

ANEXO F. MANUAL DE USUARIO

ANEXO G. MANUAL DE MANTENIMIENTO

RESUMEN

TÍTULO: DESARROLLO DE UN PROTOTIPO A ESCALA DE PLANTA DE TRATAMIENTO PARA CAFÉ: INTEGRACIÓN DE DESPUPADO Y LAVADO EN UN DISEÑO EFICIENTE. *

AUTORES:

ANDERSON JULIÁN BARAJAS SANABRIA, JONATHAN MATEUS QUITIAN.**

PALABRAS CLAVE:

Despulpado, Lavado, Prototipo, Diseño, Optimización.

DESCRIPCIÓN: El presente proyecto de grado tiene como propósito el diseño, construcción y evaluación de un prototipo a escala de una planta de tratamiento para café, específicamente orientado a integrar los procesos de despulpado y lavado en un solo sistema modular eficiente. Esta propuesta busca responder a las necesidades de pequeños caficultores ubicados en zonas rurales de Colombia, donde el acceso a equipos industriales es limitado y el proceso tradicional requiere un uso intensivo de mano de obra, tiempo y recursos hídricos.

La metodología empleada incluye la caracterización física y las características químicas del café, el análisis de las etapas tradicionales del beneficio húmedo, y el diseño conceptual y detallado de una máquina multifuncional basada en principios de la ingeniería mecánica. La solución propuesta tiene una capacidad operativa estimada entre 280 y 350 kg/h, integra sistemas de alimentación, despulpado por tambor, lavado a presión y recirculación de agua, y permite su operación mediante un motor monofásico y la distribución de agua con ayuda de una motobomba.

Las pruebas de funcionamiento y calidad confirmaron que el prototipo cumple con los requisitos técnicos establecidos, especialmente en cuanto a eficiencia del despulpado, ahorro de agua y facilidad de transporte. Finalmente, la evaluación económica sugiere que este sistema ofrece una alternativa viable y sostenible para aumentar la productividad y calidad en fincas de pequeña escala, aportando al desarrollo del sector caficultor colombiano.

* Proyecto de grado.

** Facultad de Ingenierías Físicomecánicas, Escuela de Ingeniería Mecánica, Director. Ing. Mecánico Isnardo González Jaimes.

ABSTRACT

TÍTULO: DEVELOPMENT OF A SCALE PROTOTYPE COFFEE PROCESSING PLANT: INTEGRATION OF DEPULPING AND WASHING IN AN EFFICIENT DESIGN. *

AUTHORS:

ANDERSON JULIÁN BARAJAS SANABRIA, JONATHAN MATEUS QUITIAN. **

KEYWORDS:

Pulping, Washing, Prototyping, Design, Optimization.

DESCRIPTION: The purpose of this degree project is to design, build, and evaluate a scale prototype of a coffee processing plant, specifically aimed at integrating the pulping and washing processes into a single efficient modular system. This proposal seeks to respond to the needs of small coffee growers located in rural areas of Colombia, where access to industrial equipment is limited and the traditional process requires intensive use of labor, time, and water resources.

The methodology used includes the physical characterization and chemical characteristics of coffee, the analysis of the traditional stages of wet processing, and the conceptual and detailed design of a multifunctional machine based on mechanical engineering principles. The proposed solution has an estimated operating capacity of between 280 and 350 kg/h, integrates feeding, drum pulping, pressure washing, and water recirculation systems, and can be operated by a single-phase motor and water distribution with the aid of a motor pump.

Functional and quality tests confirmed that the prototype meets the established technical requirements, especially in terms of pulping efficiency, water savings, and ease of transport. Finally, the economic evaluation suggests that this system offers a viable and sustainable alternative to increase productivity and quality on small-scale farms, contributing to the development of the Colombian coffee sector.

* Project of grade.

** PhysicMechanical Faculty of Engineering, School of Mechanical Engineering, Director. Mechanical Engineer Isnardo González Jaimes.

INTRODUCCIÓN

La caficultura en Colombia constituye una de las principales actividades económicas del sector rural y es fuente de sustento para miles de familias. No obstante, a pesar de su importancia histórica y cultural, gran parte de la producción de café del país proviene de pequeños productores que enfrentan múltiples desafíos para mantener y mejorar la calidad del grano. Entre estos retos se encuentra la falta de acceso a tecnologías apropiadas, procesos ineficientes en el tratamiento del café y una dependencia excesiva de mano de obra en condiciones poco óptimas. Estos factores influyen directamente en la productividad y rentabilidad del cultivo, lo cual afecta la sostenibilidad de la caficultura a pequeña escala.

Actualmente, muchas fincas cafetaleras realizan el beneficio del café de manera manual o con equipos convencionales poco eficientes. Este proceso, que incluye el despulpado, la remoción del mucílago, el lavado y el secado, suele consumir grandes volúmenes de agua y requiere una alta dedicación de tiempo y esfuerzo físico. Además, el uso inadecuado del recurso hídrico genera impactos ambientales negativos, especialmente en zonas donde el acceso al agua potable es limitado o se encuentra contaminado. Estas condiciones hacen que los pequeños caficultores deban enfrentarse a una brecha tecnológica que limita su competitividad.

Tanto los caficultores como nosotros somos conscientes de esta problemática, este proyecto de grado plantea una solución técnica que integra el conocimiento de la ingeniería mecánica, involucrando el diseño modular, eficiencia energética e hídrica, y facilidad de operación. Se propuso diseñar, construir y evaluar un prototipo funcional que permita a los pequeños productores de café realizar el beneficio del grano de manera más eficiente, reduciendo costos operativos, mejorando la calidad del producto y disminuyendo el impacto ambiental.

Este documento describe el desarrollo completo de dicha propuesta, partiendo desde el análisis del problema hasta la evaluación del prototipo construido. Se dieron a conocer los criterios de diseño, las decisiones técnicas adoptadas, los resultados obtenidos de las pruebas de funcionamiento y la proyección económica del sistema desarrollado. A través de esta iniciativa se buscó aportar una herramienta concreta al fortalecimiento de la caficultura colombiana desde una perspectiva tecnológica y socialmente incluyente.

1. GENERALIDADES DEL PROCESO DEL CAFÉ

1.1. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

La caficultura tiene un gran impacto en la sociedad colombiana, un delicioso café en las mañanas hace pensar en el proceso que requiere tener este gran producto en nuestros hogares, el café es uno de los productos que precisa de un arduo trabajo en mano de obra, para llevarlo desde su proceso de plantación hasta la obtención de una taza de café, tanto así que “más del 70% del costo final del café es pago a la mano de obra, a su vez es una gran fuente de empleos cuando se habla de las zonas rurales, proporcionando una demanda superior a los 800 mil empleos directos permanentes en el ámbito de labores agrícolas, siendo de esta manera el equivalente al 40% del empleo agropecuario.”¹

“En Colombia 22 de los 32 departamentos del país son cafeteros, en estos departamentos se ubica un estimado de más de 555.692 familias que se dedican a la caficultura, en donde esta población abarca con sus fincas más de 931.746 hectáreas en café, siendo producto número 1 de exportaciones no petrolera ni minera, es de gran importancia conocer que el 96% de los productores son pequeñas fincas caficultoras que en promedio tienen 1,3 hectáreas en cultivo,”² como la gran parte de las zonas cafeteras están ubicadas en terrenos pendientes, genera un problema para realizar el proceso de despulpado y lavado de café, el difícil acceso provoca que los trabajadores se vean obligado a transportar el café recién recolectado, realizando grandes esfuerzos físicos como se observa en la figura 1, hasta un punto de encuentro en donde se pueda realizar el respectivo proceso de despulpado, separación y lavado del café, esto puede tener repercusiones y dificultades para instalar infraestructuras, además el proceso del despulpado se hace de manera manual y el lavado por medio de almacenamiento en tanque, lo cual lo hace un proceso ineficiente y demorado.

¿El desarrollo de un sistema mecánico modular que integre el despulpado, separación y lavado teniendo en cuenta la norma ISO 2090 en la producción de café en pequeñas fincas caficultoras, tendrá un impacto en el desarrollo de esta industria?

¹ Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. (2017). FNC en cifras. Bogotá: Federación Nacional de Cafeteros de Colombia.

² Ibid., p. 1.

Figura 1. Recolección de café.



Fuente: Infobae (2020). Recuperado de <https://acortar.link/WDzuh>

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo general

Desarrollar un sistema mecánico de despulpado y lavado de café, diseñado específicamente para satisfacer las necesidades de los pequeños caficultores de la región, para cumplir con la misión de la escuela de ingeniería mecánica de la Universidad Industrial de Santander, proporcionando una herramienta para avanzar hacia el progreso y una mejor calidad de vida en la industria cafetera.

1.2.2. Objetivos específicos

- Diseñar un prototipo funcional de maquina despulpadora con sistema integrado de lavado de café, incorporando un sistema de lavado automático, mediante la aplicación de principios de ingeniería mecánica, que cumpla con las siguientes especificaciones:
 1. Despulpado completo.
 2. Capacidad de 280 a 350 Kg/h de café cereza.
 3. Fácil transporte.
 4. Sistema modular.

- Construir el prototipo de la planta de tratamiento para café.

- Realizar las pruebas de funcionamiento del prototipo:

1. Capacidad de café descerezado.
2. Análisis de calidad del despulpado, teniendo en cuenta la norma ICONTEC 2090.

1.3. JUSTIFICACIÓN

Teniendo en cuenta las averiguaciones e investigaciones realizadas por la Federación Nacional de Cafeteros y Cenicafé se reporta que anualmente en una finca de 1,3 hectáreas se producen aproximadamente entre 300 a 325 arrobas de café pergamino seco por cosecha, los pequeños caficultores tienen despulpadoras manuales, y realizan un proceso de separación manual de la cascara y la pulpa, así mismo por medio de tanques llenos de agua retiran el mucilago de la pulpa; son actividades que requieren de uno o más operarios para realizar el proceso.

Se desea disponer de un sistema mecánico modular de fácil transporte y ensamble, accionado por un motor para realizar el proceso de despulpado automático de la cereza del café, adicional un sistema de separación y lavado del café de la misma manera, con el fin de proporcionar un mayor valor al café, y una baja en los costos de producción de este.

2. CARACTERIZACIÓN DEL CAFÉ

2.1. BOTÁNICA DEL CAFÉ

“Cafeto, es la denominación que se le da al árbol que produce el café.”³ Es de gran importancia reconocer cuales son las zonas donde el café tiene mejor desarrollo para su producción, estas zonas son áreas tropicales, en donde se deben tener en cuenta factores tales como: temperatura, humedad y altitud. Principalmente existen los siguientes dos tipos de semillas del café, arábica y robusta.

En primer lugar, la arábica es la semilla más común, la cual toma mucho aprecio por sus consumidores por tener un sabor suave, delicado, con un tono frutal y floral. Por otra parte, la semilla robusta es un poco más fuerte, esto es viable para poder cultivarla en altitudes más bajas, debido a su mayor cantidad de cafeína esta presenta un sabor más amargo. Cada tipo de café tiene sus factores y seguidores, por lo tanto, se pueden disfrutar en variedad de presentaciones y preparaciones.

Debido a la demanda mundial que tiene el café arábico, en Colombia se produce y cultiva en mayor medida, no obstante, también existen otras variedades de café que se cultivan en Colombia estas son: Típica, Borbón, Maragogipe, tabí, Caturra y Variedad Colombiana.

Según la cartilla de la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, “las semillas de Caturra y Variedad Colombia son los granos con mayor número de cosechas en el país, ya que se puede sembrar hasta 10.000 cafetos en una hectárea y por su tamaño es más fácil la recolección.”⁴

2.2. PROPIEDADES QUÍMICAS DEL CAFÉ

Entender las propiedades químicas del café es crucial para asegurar su calidad, sabor, aroma y valor nutricional. Estas características afectan el procesamiento, almacenamiento y consumo, lo que ayuda a optimizar cada fase de producción. Elementos como la composición de ácidos, azúcares y

³ Asociación Española del Café. El cafeto: La planta del café y el viaje del fruto al grano. Disponible en: <https://www.asociacioncafe.com/cafeto-fruto-y-grano/>.

⁴ NESCAFÉ® Colombia. (s.f.). Descubre los tipos de semillas de café. Recuperado de <https://www.nescafe.com/co/cultura-cafe/conocimiento/semillas-de-cafe>

compuestos fenólicos influyen en el perfil sensorial del café, mientras que la cantidad de cafeína, lípidos y proteínas afecta su valor nutricional y sus efectos en la salud. Además, conocer los cambios químicos que ocurren durante el tostado y la fermentación permite mejorar los métodos de procesamiento y asegurar un producto final de alta calidad.

Tabla 1. Propiedades químicas, principales compuestos contenidos en el café almendra.

Compuesto	Rango café arábica verde (% base seca)	Influencia en los atributos sensoriales	Fuente
Sacarosa	5.3–9.3; 6.25–8.45; 8.0	Precursor del sabor, aroma, acidez y color	Clifford, 1985; Clarke y Macrae, 1985; Puerta, 2011
Cafeína	0.6–1.5; 0.9–1.2; 1.7±0.02; 1.20; 1.0	Amargo	Clifford, 1985; Clarke y Macrae, 1985; Franca et al., 2005; Puerta, 2011
Trigonelina	1.0–1.2; 0.64±0.28; 1.34±0.5; 1.0	Precursor del aroma	Clarke y Macrae, 1985; Franca et al., 2005; Farah, 2005; Puerta, 2011
Ácidos clorogénicos	5.5–8.0; 6.2–7.9; 6.90; 10–14	Acidez, astringencia y amargo	Clarke y Macrae, 1985; Clifford, 1985; Marín y Puerta, 2008
Lípidos	12.0–18; 11.13±0.13; 16.2	Precusores del sabor y cuerpo de la bebida	Clarke y Macrae, 1985; Franca et al., 2005; Puerta, 2011
Minerales	3.0–4.2	-	Clarke y Macrae, 1985

Fuente: PABÓN USAQUÉN, Jenny Paola; OSORIO PÉREZ, Valentina. Factores e indicadores de la calidad física, sensorial y química del café. En: Aplicación de ciencia, tecnología e innovación en el cultivo del café ajustado a las condiciones particulares del Huila. [s.l.]: [s.e.], [s.f.], p. 164-186.

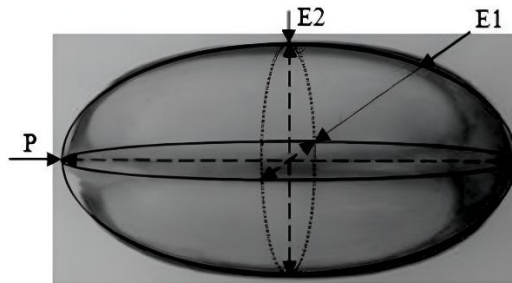
2.3. PROPIEDADES FÍSICAS DEL CAFÉ

Conocer las propiedades físicas del café es clave para conocer las mejores condiciones para el almacenamiento, procesamiento y calidad final del producto. Algunos factores como la dureza de grano tienen impacto en la molienda, y algunas características como el color y la textura, indican que calidad de café se le está presentando al consumidor. Es por eso que conocer estos factores se puede llegar a mejorar la eficiencia en la producción y garantizar experiencias más agradables al consumidor final.

Para entender de mejor manera las propiedades físicas recopiladas, se cuenta con los planos de

simetría del fruto de café, como se ve en la figura 2, se detallan las dimensiones ortogonales del fruto

Figura 2. Planos de simetría del fruto de café cereza.



Fuente: CARVAJAL HERRERA, José Jaime; ARISTIZÁBAL TORRES, Iván Darío; OLIVEROS TASCÓN, Carlos Eugenio. *Evaluación de propiedades físicas y mecánicas del fruto de café (Coffea arabica L. var. Colombia) durante su desarrollo y maduración.* Dyna, 2012, vol. 79, no. 173, p. 116-124.

Teniendo en cuenta lo mencionado anteriormente se puede observar en la tabla 2 las dimensiones ortogonales, a su vez el diámetro característico (Dc) del fruto de café, los parámetros se han tomado en diferentes estados de desarrollo del fruto (DDA), estos datos especificados en la tabla 2 y 3 se tomaron para calcular el volumen de café que cabe en la tolva de alimentación.

Tabla 2. Dimensiones ortogonales E1, E2, P y diámetro característico (mm).

DDA	E1	CV (%)	E2	CV (%)	P	CV (%)	Dc	CV (%)				
182	11,39 ^{a*}	ab ^{**}	4,76	12,68 ^b	ab	3,88	15,49 ^c	abc	5,73	13,13 ^d	ab	3,55
189	11,22 ^a	a	4,73	12,56 ^b	a	4,63	15,32 ^c	a	7,69	12,98 ^d	a	3,83
196	11,47 ^a	b	4,73	12,74 ^b	ab	3,73	15,73 ^c	cd	6,65	13,25 ^d	b	3,54
203	11,41 ^a	ab	4,00	12,65 ^b	ab	3,73	15,64 ^c	abc	6,04	13,17 ^d	b	3,34
210	11,51 ^a	b	4,78	12,85 ^b	b	4,35	15,69 ^c	bcd	6,72	13,29 ^d	b	3,79
217	11,96 ^a	c	6,14	13,30 ^b	c	5,82	15,36 ^c	ab	6,95	13,50 ^b	c	4,97
224	12,46 ^a	d	4,87	14,37 ^b	d	6,28	15,57 ^c	abc	6,48	14,10 ^d	d	4,88
231	12,81 ^a	e	6,36	14,84 ^b	e	6,63	16,53 ^c	e	8,68	14,68 ^b	e	6,55
238	12,79 ^a	e	6,43	14,53 ^b	d	6,34	15,98 ^c	d	6,76	14,40 ^b	f	5,67

Fuente: Ibid., p. 119.

En la tabla 3 se presentan los valores promedio de la masa fresca (M), la masa seca (Ms) y el contenido de humedad en base húmeda (Mc) en los distintos estados de desarrollo del café en cereza.

Tabla 3. Masa fresca, masa seca y contenido de humedad (base húmeda) del fruto de café.

DDA	M (g)		CV (%)	Ms (g)		CV (%)	Mc (%)		CV (%)
182	1,32	a*	11,85	0,40	a	14,34	69,63	d	2,35
189	1,30	a	9,99	0,40	a	14,74	69,28	cd	1,30
196	1,37	ab	11,98	0,44	b	15,31	67,62	ab	0,85
203	1,37	ab	10,77	0,46	b	13,32	66,50	a	0,50
210	1,40	b	12,53	0,46	b	14,33	66,82	a	0,46
217	1,48	c	14,49	0,50	c	16,36	66,47	a	1,10
224	1,72	d	16,05	0,54	d	19,91	68,23	bc	2,44
231	1,94	f	19,96	0,58	c	19,19	70,34	d	0,93
238	1,80	c	18,07	0,61	f	18,83	66,33	a	2,09

Fuente: Ibid., p. 120.

3. ETAPAS DE PRODUCCIÓN DEL CAFÉ

Es importante tener una noción de cuáles son las etapas por las cuales debe pasar el café para lograr obtener una de las bebidas más consumidas a nivel mundial.

“El proceso más común de producción suele dividirse en etapas diferentes que se inician con la obtención de frutos de cafeto, que es la planta de la que se obtiene esta infusión. Proviene de la familia de las conocidas rubiáceas y puede ser de diferentes tipos, aunque la arábica y la robusta cubren un 98% de la producción. Existe un tercer tipo con una producción muy residual, conocido como café ibérico. Cada variedad presenta diferentes características que la hacen peculiar y única.”⁵ En la figura 3 se puede apreciar un resumen acerca de las etapas de producción. En el anexo A se complementa la información de esta sección

Figura 3. Resumen de las etapas de producción del café.



⁵ NESCAFÉ® Colombia, Op. Cit.

4. DISEÑO CONCEPTUAL

4.1. ANALISIS DE LA INFORMACIÓN RECOPIADA

Para comprender mejor el alcance del proyecto y orientar su diseño de manera efectiva, se han consultado empresas con presencia en el mercado local, nacional e internacional. Esto ha permitido recopilar información clave sobre la maquinaria disponible, lo que servirá como referencia para desarrollar el proyecto de la mejor manera posible.

➤ **PENAGOS HERMANOS & CÍA. S.A**

Panorama general: Bucaramanga concentra un considerable número de empresas dedicadas a la fabricación de maquinaria para el procesamiento de café, desde tostadoras y molinillos hasta equipos de beneficio húmedo y seco. La mayoría de estas empresas se ubican en el sector industrial de la ciudad, con una fuerte presencia de talleres metalmecánicos y empresas de ingeniería.

Tecnología y desafíos: La tecnología utilizada varía según la empresa y el tipo de maquinaria, pero en general se observa un uso creciente de tecnologías CNC, automatización y control de procesos. Las empresas se enfrentan a retos como la competencia internacional, la obsolescencia tecnológica y la falta de mano de obra especializada.

Trayectoria y enfoque: Penagos es una empresa familiar con más de 50 años de experiencia en la fabricación de maquinaria para procesamiento de café. Se especializa en equipos de beneficio húmedo y seco, como despulpadoras, desmucilagadoras, lavadoras y secadoras. Cuenta con una planta de producción moderna y un equipo de ingenieros altamente calificado. Penagos se destaca por su enfoque en la innovación y la calidad, lo que le ha permitido posicionarse como una marca reconocida a nivel nacional e internacional.

Fortalezas y debilidades: Entre sus fortalezas se encuentran la experiencia, la calidad de sus productos, el servicio al cliente y la capacidad de adaptación a las necesidades específicas de cada cliente. Como debilidades se pueden mencionar la falta de presencia en el mercado digital, la limitada participación en ferias internacionales y la necesidad de diversificar su portafolio de productos.

Oportunidades de crecimiento: El crecimiento del mercado cafetero colombiano y mundial, la demanda por maquinaria más eficiente y sostenible, y el aumento de la tecnificación del sector cafetero, presentan oportunidades para que Penagos aproveche su experiencia y conocimiento para desarrollar maquinaria innovadora y sostenible que atienda las necesidades del mercado actual.

Conclusión: La fabricación de maquinaria procesadora de café en Bucaramanga es un sector con un alto potencial de crecimiento. Penagos es una empresa líder en este sector con una amplia experiencia y un fuerte compromiso con la calidad. La empresa enfoca la fabricación de su maquinaria en diversos campos de producción, principalmente en medianos caficultores.

➤ **JM ESTRADA**

Panorama general: La fabricación de maquinaria para procesamiento de café en Colombia se caracteriza por la presencia de empresas de diversos tamaños y niveles de tecnificación. Las principales áreas de producción se ubican en los departamentos de Antioquia, Caldas, Risaralda y Valle del Cauca, donde se concentra la mayor actividad cafetera del país.

Tecnología y tendencias: Se observa una tendencia creciente hacia la adopción de tecnologías más eficientes y sostenibles en la fabricación de maquinaria. Las empresas líderes, como JM Estrada, están invirtiendo en automatización, control de procesos, y el uso de materiales ecológicos.

Trayectoria y enfoque: JM Estrada es una empresa familiar con más de 60 años de experiencia en la fabricación de maquinaria para procesamiento de café. Se especializa en equipos de beneficio húmedo y seco, tostadoras, molinos y soluciones integrales para la industria cafetera. Cuenta con una planta de producción moderna en Medellín, un equipo de ingenieros altamente calificado y una amplia red de distribución a nivel nacional e internacional.

Fortalezas y liderazgo: JM Estrada se destaca por su enfoque en la innovación, la calidad y la sostenibilidad. La empresa ha desarrollado tecnologías patentadas como el sistema ECOMILL-CENICAFÉ, que reduce significativamente el consumo de agua y la contaminación en el proceso de beneficio. Además, JM Estrada es pionera en la fabricación de maquinaria con energía solar y otros sistemas de eficiencia energética.

Oportunidades y desafíos: El crecimiento del mercado cafetero colombiano y mundial, la demanda por maquinaria más eficiente y sostenible, y la creciente tecnificación del sector, presentan oportunidades para que JM Estrada consolide su liderazgo y expanda su presencia en mercados internacionales. Sin embargo, la empresa también enfrenta desafíos como la competencia internacional, la obsolescencia tecnológica y la falta de mano de obra especializada.

Conclusión: JM Estrada es una empresa líder en la fabricación de maquinaria procesadora de café en Colombia. Su enfoque en la innovación, la calidad y la sostenibilidad la posiciona como un referente en el mercado nacional e internacional. La empresa tiene la capacidad de aprovechar las oportunidades del mercado cafetero para seguir creciendo y consolidarse como un actor de referencia en la industria a nivel mundial, enfocada en grandes plantas de tratamiento a nivel industrial.

➤ **PINHALENSE**

Panorama general: Los principales actores en la fabricación de maquinaria para procesamiento de café a nivel internacional se ubican en Europa, América del Norte y Asia. Las empresas líderes se caracterizan por su alto nivel de tecnificación, inversión en investigación y desarrollo, y una amplia red de distribución global.

Tecnología y tendencias: Las tendencias en la industria se enfocan en la automatización, la eficiencia energética, la sostenibilidad y la trazabilidad. Las empresas líderes están desarrollando soluciones innovadoras que optimicen el procesamiento del café, reduzcan el impacto ambiental y brinden mayor control y seguimiento a la cadena de valor.

Trayectoria y enfoque: Pinhalense es una empresa brasileña con más de 80 años de experiencia en la fabricación de maquinaria para procesamiento de café. Se especializa en equipos de beneficio húmedo y seco, tostadoras, molinos y soluciones integrales para la industria cafetera. Cuenta con plantas de producción en Brasil y oficinas en varios países, lo que le permite tener una presencia global.

Fortalezas y reconocimiento: Pinhalense se destaca por su enfoque en la innovación, la calidad y la atención al cliente. La empresa ha desarrollado tecnologías patentadas como el sistema de secado

por aire caliente PH-DRY, que reduce significativamente el consumo de energía y el tiempo de secado. Además, Pinhalense es reconocida por su amplia experiencia en la fabricación de maquinaria para cafés especiales.

Oportunidades y desafíos: El crecimiento del mercado cafetero mundial, la demanda por maquinaria más eficiente y sostenible, y la creciente tecnificación del sector, presentan oportunidades para que Pinhalense consolide su posición en el mercado internacional. Sin embargo, la empresa también enfrenta desafíos como la competencia internacional, las regulaciones ambientales y la fluctuación de las monedas.

Conclusión: Pinhalense es una empresa líder en la fabricación de maquinaria procesadora de café a nivel internacional. Su enfoque en la innovación, la calidad y la atención al cliente la posiciona como un referente en el mercado global. La empresa tiene la capacidad de aprovechar las oportunidades del mercado cafetero para seguir creciendo y consolidarse como un actor de referencia en la industria a nivel mundial enfocada en altas producciones de café.

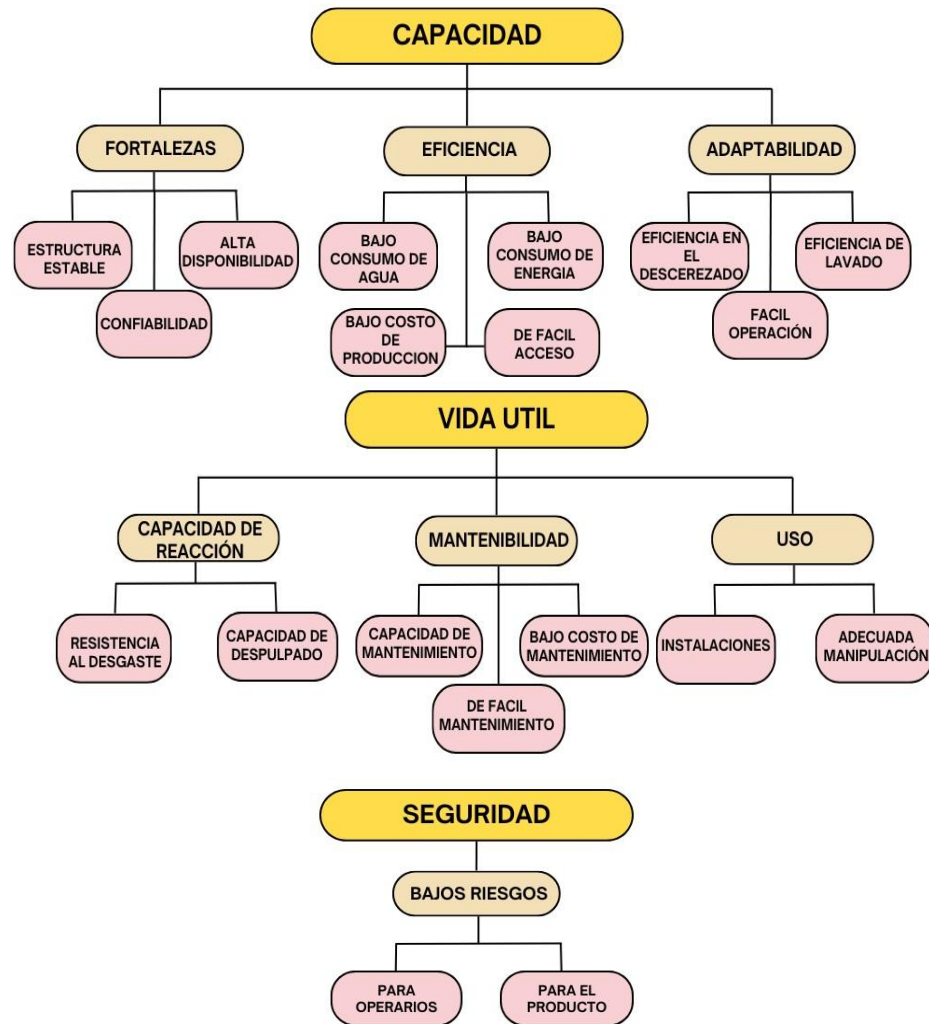
4.2. DESPLIEGUE DE LA FUNCIÓN DE CALIDAD (QFD)

4.2.1. Requerimientos del consumidor Se presenta un listado de los requerimientos que se tuvieron en consideración para los futuros usuarios de este equipo:

- ✓ Bajo consumo de energía.
- ✓ Larga vida útil.
- ✓ Modular.
- ✓ Alta eficiencia de descerezado.
- ✓ Bajo costo de producción.
- ✓ Alta eficiencia en el lavado.
- ✓ Bajo consumo de agua.
- ✓ Resistencia al desgaste.
- ✓ Fácil operación.
- ✓ Seguridad al operario.
- ✓ De fácil acceso.
- ✓ Facilidad de transporte.

4.2.2. Organización de requerimientos Para facilitar y tener más claros los requerimientos de los usuarios se ha optado por usar un método asociativo y formar subgrupos como se observa en la figura 4, con el fin de que sea más fácil su evaluación, seguido a esto a cada componente se le ha asignado un grado de importancia para realizar su respectiva evaluación dentro del QFD.

Figura 4. Requerimientos organizados.



4.2.3. Criterios de diseño Se ha realizado un listado de variables técnicas de ingeniería que se tuvieron en cuenta al momento de evaluar las alternativas y poder escoger que cualidades toman más relevancia dentro del proyecto.

- ✓ Fuente de poder.
- ✓ Bajo peso.
- ✓ Materiales.

- ✓ Capacidad de procesamiento.
- ✓ Tamaño de la máquina.
- ✓ Facilidad de limpieza y mantenimiento.
- ✓ Automatización.
- ✓ Consistencia en calidad del café.
- ✓ Consumo de agua.
- ✓ Consumo de energía.
- ✓ Perdida de granos de café.

4.2.4. Matriz de calidad Como se puede observar en la Tabla 4, se presenta la matriz de calidad en donde se relacionan los requerimientos del consumidor y las variables necesarias para lograr su realización.

Tabla 4. QFD.

		IMPORTANCIA	Fuente de Poder	Bajo peso	Capacidad de procesamiento	Tamaño de la maquina	Facilidad de limpieza y mantenimiento	Automatización	Consistencia en calidad del café	Consumo de agua	Consumo de energía	Perdida de granos de café	Modular	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11		
CAPACIDAD	Fortalezas	Estructura estable	5	0	1	0	3	0	0	0	0	0	9	
		Confiabilidad	7	3	1	9	3	0	3	9	3	3	9	5
		Alta disponibilidad	9	9	0	1	1	3	0	0	3	9	3	3
	Eficiencia	Bajo consumo de agua	7	0	0	3	0	0	0	1	9	3	1	0
		Bajo costo de producción	7	9	1	3	3	1	9	9	9	9	0	0
		De fácil acceso	5	9	3	3	9	9	3	0	3	3	0	1
	Adeptabilidad	Bajo consumo de energía	7	9	0	0	3	0	3	0	0	9	0	0
		Eficiencia en el descerezado	7	0	0	9	9	9	3	1	1	1	9	1
		Fácil operación	5	0	0	0	3	3	9	1	0	0	0	0
VIDA ÚTIL	Capacidad de reacción	Eficiencia de lavado	7	1	0	1	1	3	3	9	9	9	0	0
		Resistencia al desgaste	7	0	0	3	3	9	1	3	1	1	3	3
	Mantenibilidad	Capacidad de despulpado	3	3	1	9	3	3	3	9	1	1	9	0
		Capacidad de mantenimiento	3	0	0	0	0	9	0	0	0	0	0	3
		De fácil mantenimiento	3	1	0	1	9	9	3	1	0	0	0	0
	Uso	Bajo costo de mantenimiento	5	0	0	0	0	9	3	0	3	3	0	0
		Instalaciones	5	3	0	0	9	0	3	9	3	3	0	0
		Adecuada manipulación	3	0	0	9	3	3	9	9	0	0	3	5
	SEGURIDAD	Bajos riesgos	Para operarios	9	0	0	0	9	3	0	0	0	0	5
Para el producto			9	0	0	9	0	9	0	9	0	0	9	5
TOTAL			307	37	358	409	466	289	412	299	374	298	254	

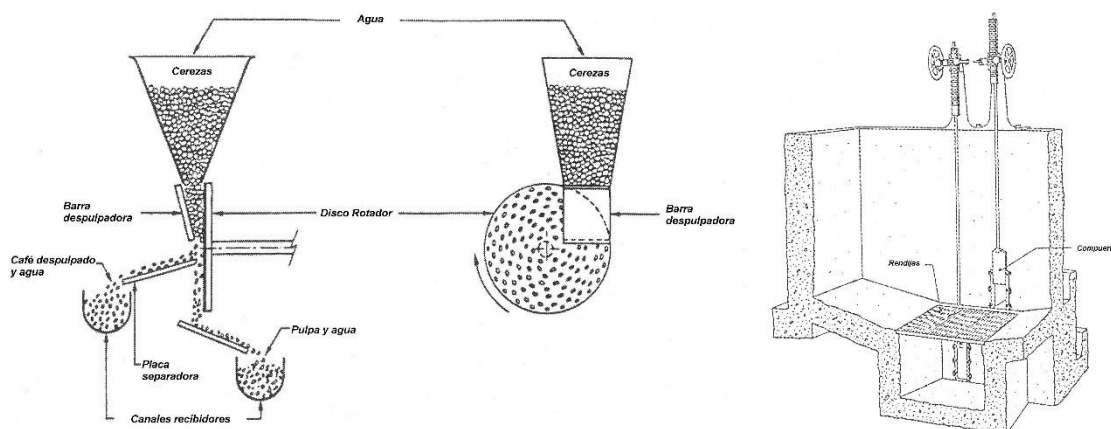
4.2.5. Resultados ponderados Finalmente, en la tabla 5, se obtienen los resultados y se evidencia la importancia que cada variable toma dentro de este proceso.

Tabla 5. Resultados ponderados global.

Criterios de evaluación	Valor (%)
Facilidad de limpieza y mantenimiento	13,30
Consistencia en calidad del café	11,76
Tamaño de la máquina	11,68
Consumo de energía	10,68
Capacidad de procesamiento	10,22
Fuente de poder	8,76
Consumo de agua	8,54
Pérdida de granos de café	8,51
Automatización	8,25
Modular	7,25
Bajo peso	1,06

4.2.6. Planteamiento de alternativas Alternativa 1. Tecnología Integrada disco y tanque: Este método aprovecha la maquinaria especializada para realizar el despulpado aplicando la tecnología de descortezado mediante disco de fricción realizando una correcta separación entre corteza y fruto del café y posteriormente el lavado de manera tanque de almacenamiento. los equipos de tanques de desmucilaginación garantizan un lavado por fermentación de los granos. Esta integración de tecnologías asegura un proceso completo y controlado para obtener un café de alta calidad.

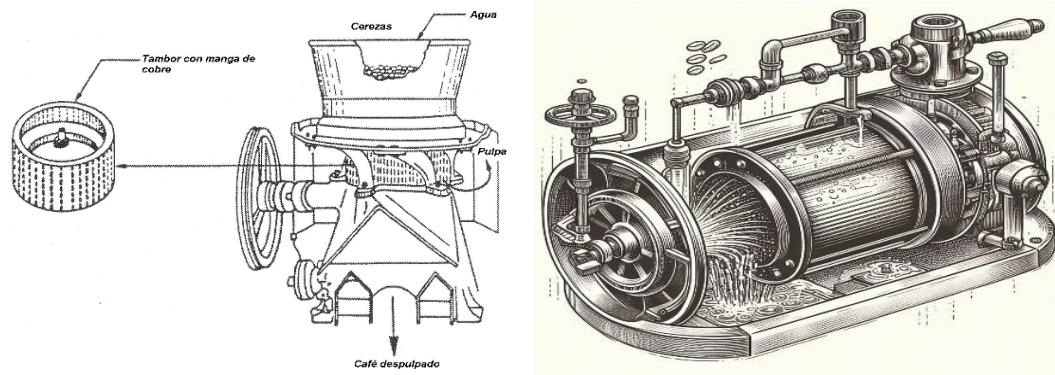
Figura 5. Ilustración de la alternativa 1.



Fuente: 1.2.2 TÉCNICAS y sistemas de despulpado [Anónimo]. CoopSol [página web]. [Consultado el 10, mayo, 2024]. Disponible en Internet: <<https://escoopsol.wordpress.com/seccion-1-en-la-finca/1-2-el-beneficio-humedo/1-2-2-tecnicas-y-sistemas-de-despulpado/>>.

Alternativa 2. Proceso de Alta Precisión con Despulpado por Tambor y Lavado a Presión: Este enfoque combina la precisión del despulpado por tambor con la potencia del lavado a presión. Los tambores garantizan un despulpado delicado pero efectivo, mientras que el lavado a presión asegura una limpieza a fondo de los granos. Este método es ideal para productores que buscan mantener la integridad de los granos mientras aseguran la máxima calidad.

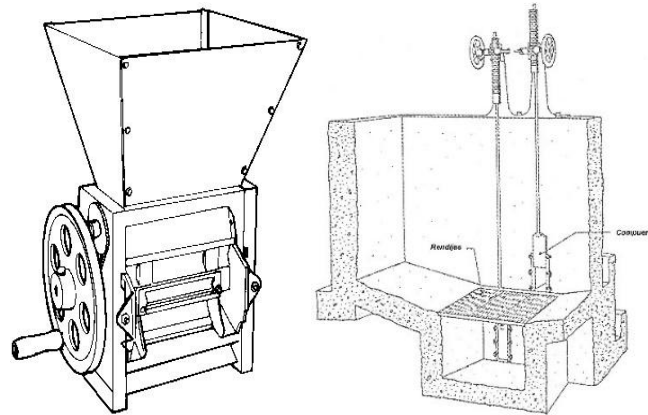
Figura 6. Ilustración de la alternativa 2.



Fuente: 1.2.2 TÉCNICAS y sistemas de despulpado [Anónimo]. CoopSol [página web]. [Consultado el 10, mayo, 2024]. Disponible en Internet: <<https://escoopsol.wordpress.com/seccion-1-en-la-finca/1-2-el-beneficio-humedo/1-2-2-tecnicas-y-sistemas-de-despulpado/>>.

Alternativa 3. Proceso mecánico manual y lavado en tanques: Este método emplea elementos mecánicos para un procesamiento del café. Los equipos mecánicos garantizan un despulpado eficiente y uniforme, mientras que el lavado en tanques de desmucilaginación elimina completamente los mucílagos. Este enfoque proporciona una limpieza exhaustiva y mejora la calidad del café de manera significativa.

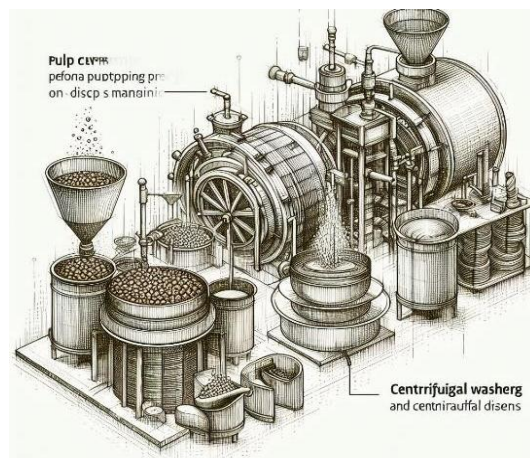
Figura 7. Ilustración de la alternativa 3.



Fuente: 1.2.2 TÉCNICAS y sistemas de despulpado [Anónimo]. CoopSol [página web]. [Consultado el 10, mayo, 2024]. Disponible en Internet: <<https://escoopsol.wordpress.com/seccion-1-en-la-finca/1-2-el-beneficio-humedo/1-2-2-tecnicas-y-sistemas-de-despulpado/>>.

Alternativa 4. Proceso Automatizado de Alta Calidad: Este método aprovecha la automatización para un procesamiento eficiente del café. Los equipos de pulpa realizan el despulpado mediante disco o discos de manera precisa, mientras que las lavadoras centrífugas garantizan un lavado completo de los granos. Esta combinación de tecnologías asegura una producción rápida y consistente de café de alta calidad.

Figura 8. Ilustración de la alternativa 4.



Fuente: SOLUCIONES DE inteligencia artificial | IA de Microsoft [Anónimo]. Your request has been blocked. This could be due to several reasons. [página web]. [Consultado el 10, mayo, 2024]. Disponible en Internet: <<https://www.microsoft.com/es-es/ai>>.

4.2.7. Evaluación de alternativas Con el fin de saber cuál de las alternativas presentadas es la más viable se hizo una evaluación, se presenta en la tabla 6, donde se hizo uso de la ponderación para escoger cual es la alternativa que cumple con los objetivos y requerimientos ya propuestos.

Tabla 6. Resultados ponderados de evaluación de alternativas.

Criterios de evaluación (%)		Alternativa 1		Alternativa 2		Alternativa 3		Alternativa 4	
Facilidad de limpieza y mantenimiento	13,30	3	0,399	4	0,532	4	0,532	1	0,133
Consistencia en calidad del café	11,76	4	0,470	5	0,588	4	0,470	4	0,470
Tamaño de la maquina	11,68	3	0,350	4	0,467	3	0,350	1	0,117
Consumo de energía	10,68	3	0,320	3	0,320	2	0,214	1	0,107
Capacidad de procesamiento	10,22	4	0,409	4	0,409	1	0,102	5	0,511
Fuente de Poder	8,76	2	0,175	5	0,438	1	0,088	2	0,175
Consumo de agua	8,54	3	0,256	3	0,256	2	0,171	1	0,085
Perdida de granos de café	8,51	2	0,170	3	0,255	1	0,085	5	0,425
Automatización	8,25	2	0,165	3	0,248	5	0,413	1	0,083
Modular	7,25	3	0,218	3	0,218	1	0,073	3	0,218
Bajo peso	1,06	3	0,032	2	0,021	3	0,032	1	0,011
TOTAL	100,00	2,715		3,513		2,424		2,106	

Finalmente, la alternativa seleccionada es la numero dos, predomina por tener un enfoque innovador, se caracteriza por su sistema modular, diseñado para facilitar su transporte e implementación en diversas ubicaciones. Este sistema versátil se adaptó para opciones de acoplamiento tanto para un motor monofásico como para un motor de combustión interna de pequeña escala, brindando flexibilidad y adaptabilidad a las necesidades específicas de los productores.

El proceso se inicia con una tolva de ingreso que permite la alimentación continua de granos de café, asegurando una operación fluida y eficiente. A continuación, los granos son sometidos a un proceso de despulpado por tambor, donde se garantiza una extracción efectiva sin comprometer la integridad de los granos, asegurando una calibración adecuada de la pechera para que los granos resultantes del proceso no sean mordidos ni trillados por la máquina.

Posteriormente, un sistema de separación por compresión de la pulpa entre el tambor despulpador y los canales de la pechera, permite que el café procesado continúe su trayectoria hacia la siguiente

etapa del proceso, mientras que las cáscaras de café son dirigidas por el arrastre de los dientes de la camisa de despulpado hacia las guías de salida de la máquina para ser recolectadas y aprovechadas como abono.

Finalmente, el café procesado entra en una fase de lavado a presión, donde se empleó agua para asegurar una limpieza completa y exhaustiva, el sistema cuenta con un sistema de inyección de agua para la cual se dio uso a un impulsor que envía el agua a presión elevada el cual cuenta con un acoplamiento para tener la opción de alimentar de agua de diversas formas ya sea con un tanque auxiliar o una fuente hídrica cercana. Este paso crucial garantiza que los granos de café alcancen los estándares de calidad de despulpado mencionados en la norma ICONTEC 2090, una vez culminó el proceso el café pergamino seco estuvo listo para ser comercializado y apreciado por los amantes del café en todo el mundo.

➤ **Rediseño del boceto y aplicación de alternativa ganadora para sistema modular.** En el boceto presentado en la figura 9, se generaliza la forma inicial en la cual estaría distribuido el sistema modular, teniendo esta base definimos los siguientes conceptos para la creación del diseño, estos son:

- **Tren motriz:** la máquina deberá estar impulsada por un único motor, este podrá ser de combustión interna o eléctrico dependiendo el entorno de uso, para el cual se debe facilitar un acople universal para el uso de fuentes de maquinarias que posea el campesino si este no cuenta con los recursos para adquirir uno nuevo.

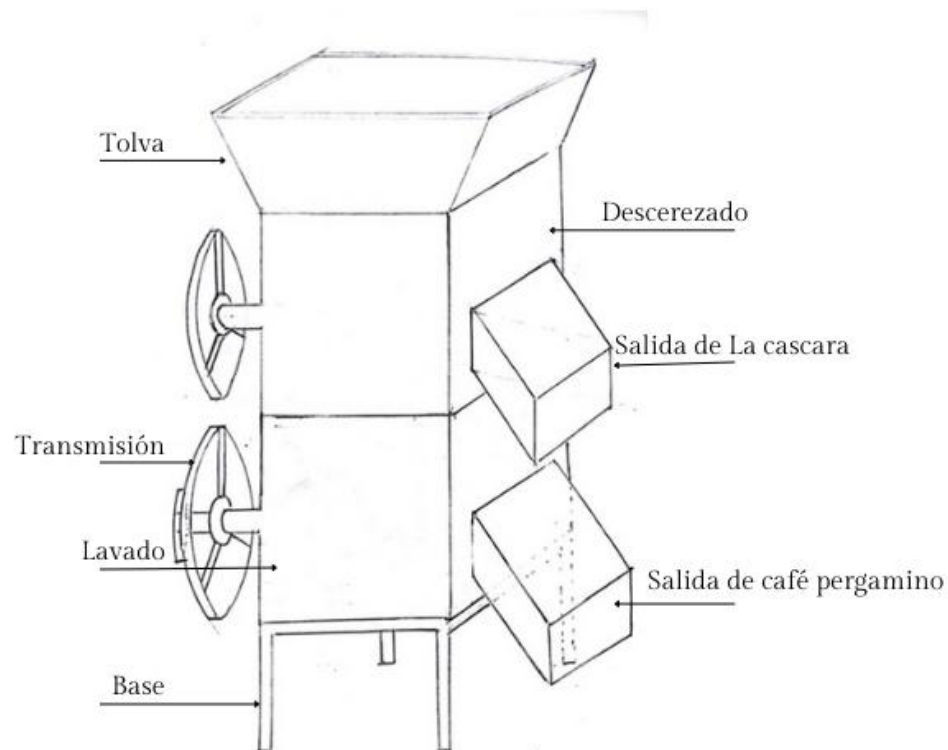
- **Sistema de transmisión:** inicialmente se piensa un sistema de transmisión por poleas pero debemos tener en cuenta que requerimos más torque que velocidad para la realización de los procesos, por lo cual no descartamos sistema de engranajes o cadenas, adicional sabemos que requerimos 3 puntos de transmisión: el numero uno para el eje principal de la descortezadora, el numero dos para el tornillo sin fin que transporta los granos en el lavado y el número tres para el eje del impulsor que genera la presión para el sistema hidráulico de lavado para retirar el mucilago.

- **Sistema modular:** el diseño de los subsistemas (base, lavado, descerezado y clasificación, tolva) deberá contar con sistemas de anclaje entre sí totalmente iguales, para asegurar correctamente los

módulos.

- **Contenedores:** el sistema en general cuenta con las siguientes salidas de material, ver figura 9:
 - Salida de cortezas de café lado diagonal al sistema de descortezado.
 - Salida de granos de café pergamino en el costado derecho del sistema de lavado.
 - Salida de líquido con mucilago y demás en la parte inferior del sistema.
 - Se planteo no incluir depósitos para evitar el aumento de costos de fabricación, de modo que el usuario pueda utilizar cualquier contenedor disponible para los diferentes aspectos de almacenamiento.
- **Sistema Hidráulico:** el sistema cuenta con un sistema hidráulico de distribución de agua a inyección para el descortezado (evitando maltratar el café en este proceso), para el lavado (limpiando el mucilago) para el cual se planteó un sistema con un impulsor el cual debe contar con un tanque de suministro de agua ubicado en la parte inferior de la máquina de tal forma que el agua que cae del sistema luego de pasar por un filtro pueda ser reutilizada en el proceso aportando en gran medida al gasto generado en recurso hídrico.

Figura 9. Boceto rediseñado de la alternativa ganadora.



4.2.8. Dimensionamiento de la máquina En esta sección se muestra en detalle la alternativa seleccionada y desarrollada a lo largo del proyecto. A continuación, se expone el dimensionamiento de la máquina, así como una explicación detallada de su funcionamiento. Para ello, se describen los sistemas que la componen, así como sus respectivos subsistemas.

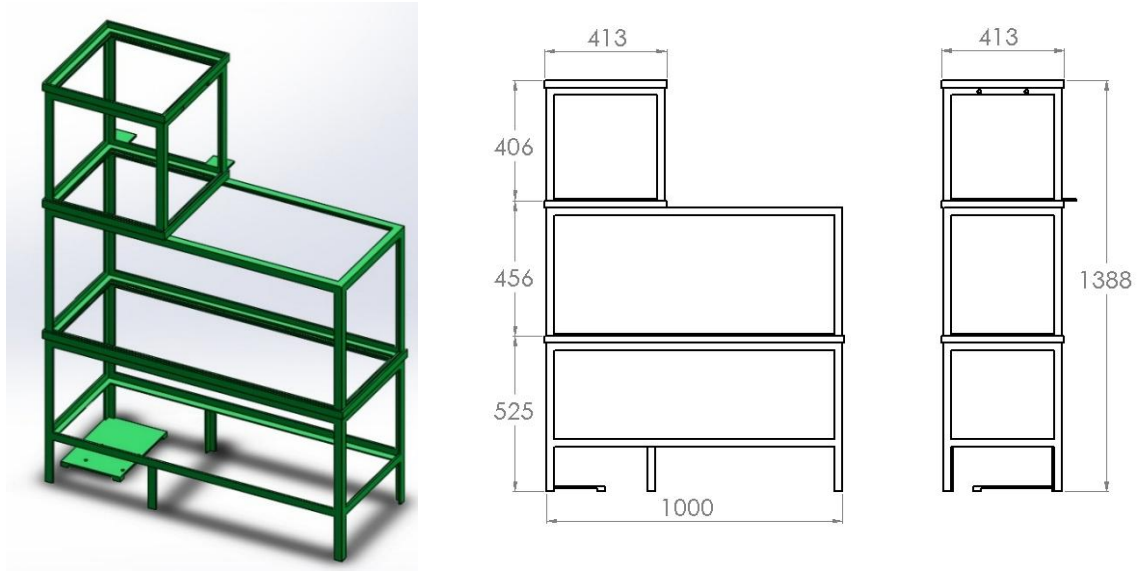
4.2.9. Sistema general: Planta de tratamiento de café En términos generales y como se ha explicado con anterioridad la planta de tratamiento de café que se ha estructurado en tres módulos de la siguiente manera:

- Modulo 1: Este módulo, está compuesto por el despulpado del café cereza, cuando este está en su punto adecuado de maduración para ser recolectado y procesado. Dentro del mismo módulo por autonomía mecánica y de diseño de la máquina se realiza la clasificación del fruto despulpado y el desperdicio en este caso la cáscara o recubrimiento que tenía el café.
- Modulo 2: El segundo módulo es donde se realiza el lavado del café, retirando el mucílago del fruto para posteriormente secarlo.
- Modulo 3: Finalmente el tercer modulo es donde se encuentra el sistema de filtrado y aprovechamiento de recurso hídrico su finalidad fue reducir el desperdicio de agua con un sistema de recirculación de agua asegurando un consumo hídrico bajo, así mismo funciona como base estructural de la máquina.

En términos generales, y como se observa en la figura 10, se aprecia la dimensión estructural de la máquina, diseñada con el fin de que un operario pueda alimentarla fácilmente desde el suelo.

El sistema fue diseñado de tal manera que sea de fácil ensamble, lo que lo convierte en un sistema modular para facilitar el transporte de la máquina. Cada módulo está hecho a la medida para encajar en los demás, las dimensiones presentadas en el dibujo están expresadas en milímetros.

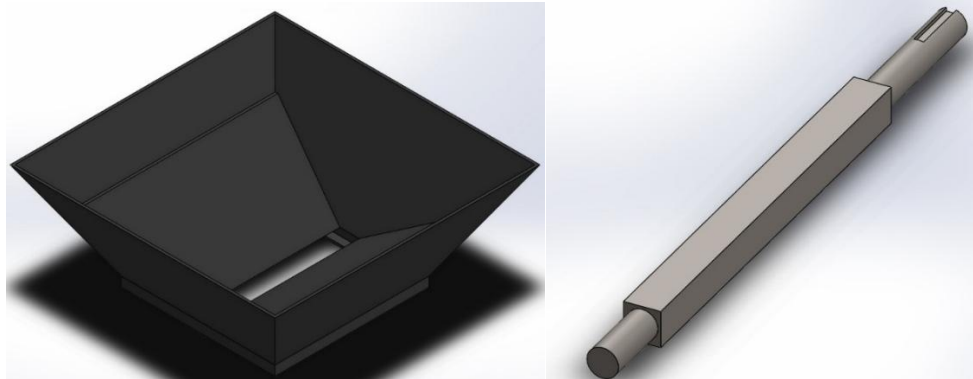
Figura 10. Dimensionamiento general del prototipo.



4.2.10. Subsistemas de la maquina A continuación, se explica con detalle el contenido de cada módulo, a su vez se explican los demás componentes que caracterizan la funcionalidad de la máquina con el fin de entender el porqué de su diseño.

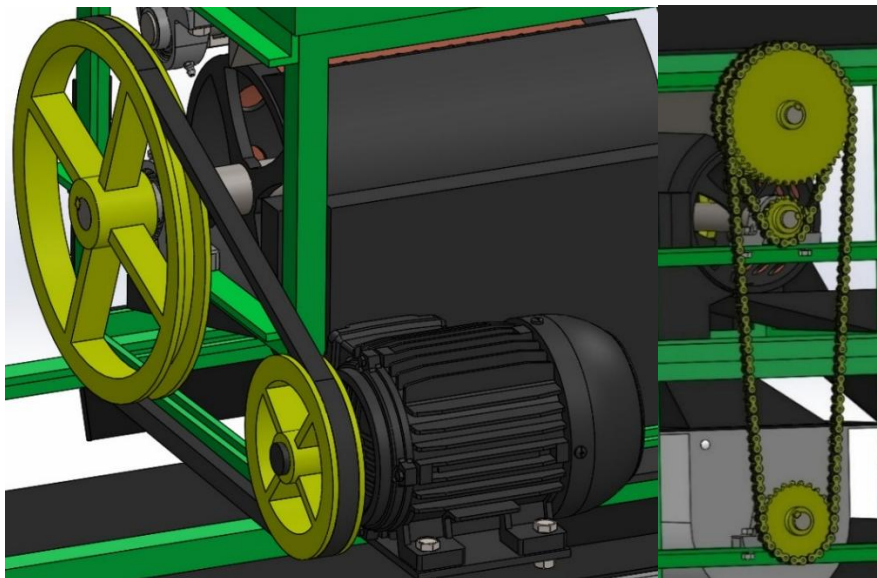
4.2.10.1. Alimentación El sistema de alimentación cuenta con una tolva, como se observa en la figura 11, con una capacidad volumétrica aproximada de 44 kg de café cereza. La tolva fue diseñada con un ángulo de reposo tal que se evite el estancamiento del grano, permitiendo su circulación hasta que se despulpe la totalidad del café. En la parte inferior se encuentra un dosificador compuesto por un eje cuadrado, el cual asegura un flujo constante del café e impide que la máquina se atasque. Finalmente, se dispone de una tolva secundaria que funciona como guía, evitando que el café se desvíe de su curso y garantizando que caiga directamente en el siguiente elemento, conocido coloquialmente por los caficultores como piña de despulpado.

Figura 11. Tolva de alimentación y alimentador.



4.2.10.2. Tren motriz El tren de potencia de la máquina se compone de un conjunto de elementos que permiten transmitir y distribuir la energía del motor hacia los distintos sistemas. Inicialmente, la potencia se transfiere mediante poleas y correas, que garantizan una transmisión suave hacia el tambor despulpador, reduciendo vibraciones y desalineamientos. Luego, el movimiento se transmite al eje dosificador a través de piñones y cadenas, asegurando una velocidad constante y una dosificación uniforme del material. Las chumaceras presentan una tolerancia que permite desplazarlas ligeramente, facilitando el alineamiento de los ejes y al mismo tiempo el tensado adecuado de la cadena. Finalmente, mediante un doble piñón diseñado a la medida, la potencia se dirige al sistema de lavado, que acciona un tornillo sin fin encargado de transportar el producto.

Figura 12. Transmisión de potencia.



4.2.10.3. Sistema de despulpado El sistema de despulpado, ubicado en el módulo 1, está compuesto por dos elementos principales. En primera instancia, una pieza conocida coloquialmente por los caficultores como piña de despulpado, ver figura 13, la cual corresponde a un tambor de fundición cubierto con una camisa dentada fabricada en cobre. Este material, al ser dúctil y maleable, resulta adecuado para evitar daños en el grano durante el proceso. En este mismo módulo se encuentra la pechera, ver figura 14, también fabricada en fundición y considerada uno de los componentes más importantes de la máquina, ya que en ella se realiza el proceso de despulpado. Dicho proceso se lleva a cabo a partir de la fuerza de compresión ejercida entre el tambor despulpador y la pechera, mediante canales que se reducen de manera seccional, permitiendo separar cuidadosamente la semilla de la pulpa y garantizar que el grano pase al siguiente módulo de lavado.

Figura 13. Tambor de despulpado

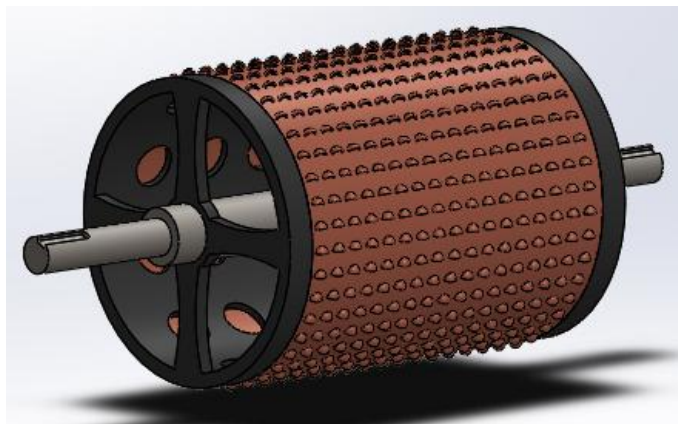
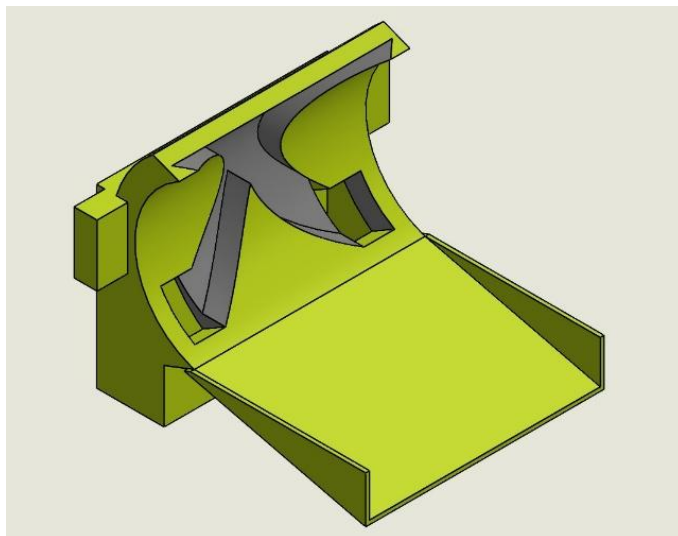
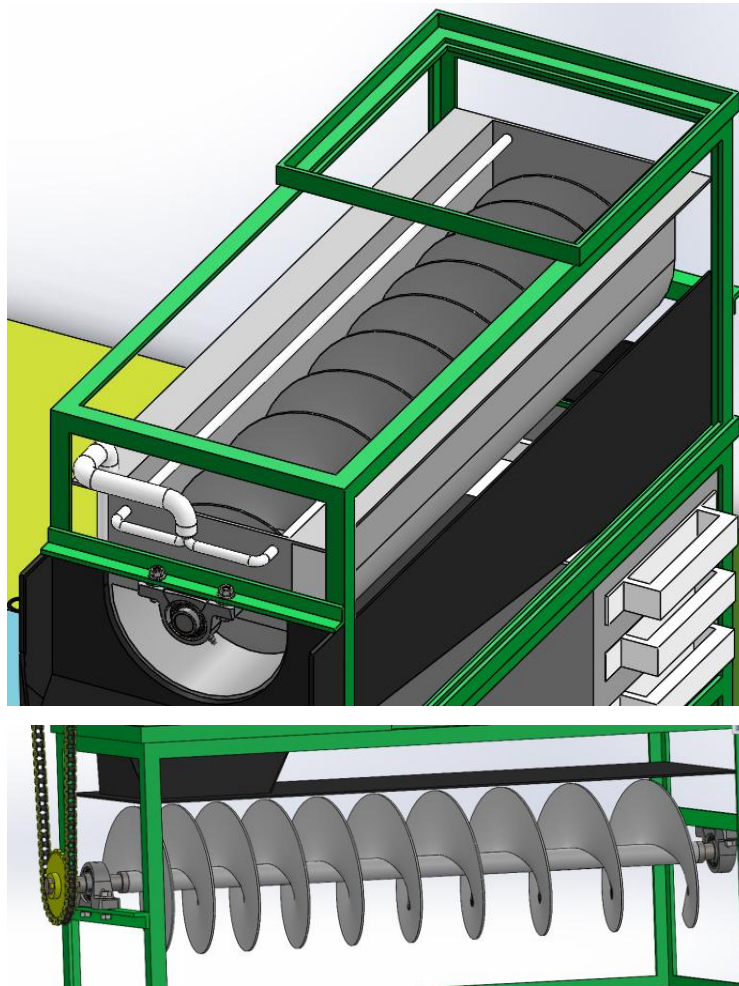


Figura 14. Pechera.



4.2.10.4. Sistema de lavado Después de realizar el despulpado, la semilla de café con mucílago cae al sistema de lavado. Este sistema está compuesto por un tornillo sinfín que transporta el café de un extremo a otro, permitiendo que, durante su recorrido, sea lavado con agua a presión proveniente de dos tubos paralelos dispuestos en la parte superior del módulo 2, en el capítulo cinco, diseño detallado de este libro se explican los cálculos relacionados a este sistema de lavado. Una vez el café llega al extremo del tornillo sinfín, queda listo para ser recolectado y continuar con su posterior proceso de secado.

Figura 15. Módulo de lavado.

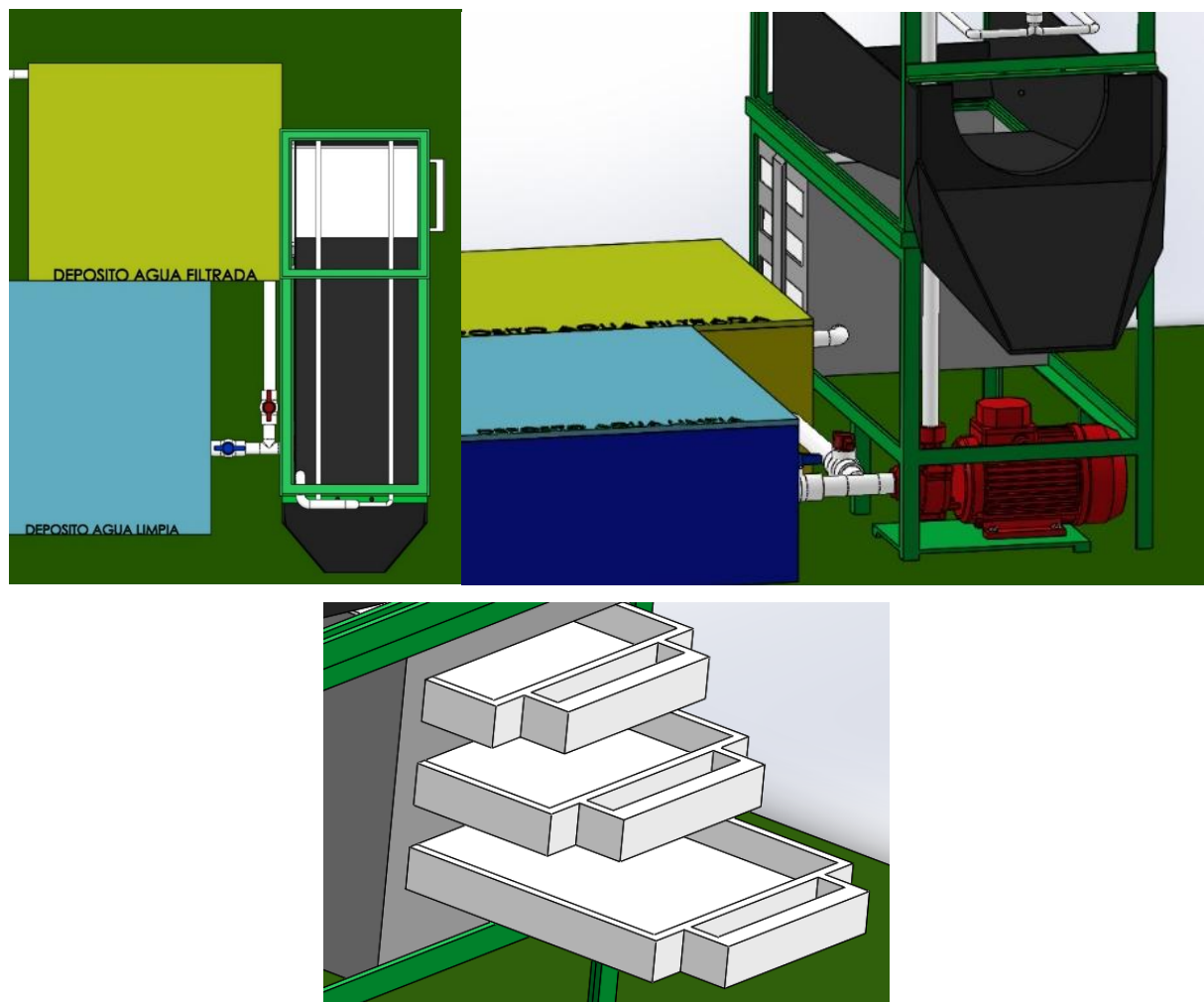


4.2.10.5. Sistema de aprovechamiento hídrico Finalmente, el último subsistema que compone la máquina corresponde a la captación del agua utilizada en el proceso. Mediante un conjunto de guías y canales, toda el agua empleada es recolectada y conducida hacia un sistema de filtrado de tres niveles, este sistema permite limpiar los filtros evitando parar la máquina, mejorando la

eficiencia al separar los sólidos arrastrados durante el lavado del café. Para el diseño de este sistema, se tuvo en cuenta el número de malla o “mesh” del filtrado, conforme a la norma ASTM E11, seleccionándose una malla #80, equivalente a una abertura aproximada de 177 micras, adecuada para el filtrado de líquidos con presencia de sólidos finos, como residuos de pulpa o partículas pequeñas de café.

Posteriormente, el agua filtrada se almacena en tanques auxiliares, distribuidos en tres funciones: uno destinado al agua limpia, otro al agua captada y un tercero para el desbordamiento. Dentro del mismo sistema, se recircula un porcentaje del agua captada, mezclada con una proporción de agua limpia, con el fin de mantener el equilibrio en la limpieza del café sin riesgo de contaminación.

Figura 16. Sistema de aprovechamiento hídrico y filtrado.



5. DISEÑO DETALLADO

El presente capítulo precisa los cálculos y el dimensionamiento respectivo que se lleva a cabo para lograr un diseño confiable y funcional de la planta de tratamiento de café.

5.1. POTENCIA DEL MOTOR

Para el cálculo de la potencia requerida en el sistema, se determinó la energía necesaria para vencer la inercia de la máquina. Los datos físicos de la cereza de café se obtuvieron de las Tablas 3 y 4. A partir de este análisis, se obtuvo un valor aproximado de 0,573 HP. Asimismo, se evaluó la fuerza necesaria para despulpar un grano de café, considerando la cantidad de cerezas que cabían a lo largo del tambor despulpador; sin embargo, por motivos de brevedad, solo se presentaron los resultados finales de los cálculos. Con base en estos valores, se seleccionó un motor de 1 HP con el fin de garantizar un factor de seguridad que asegurara el funcionamiento adecuado y la durabilidad del equipo. Se destacó la importancia de emplear un motor de buena calidad, entendido como aquel eficiente, resistente al desgaste y capaz de mantener una potencia constante, lo que reduce la probabilidad de fallos y prolonga la vida útil del sistema. No obstante, por razones de costo en la construcción del prototipo, se utilizó un motor de 2 HP alquilado, lo que permitió disminuir la inversión inicial sin afectar las pruebas de funcionamiento del equipo.

Tabla 7. Cálculos de potencia requerida en el sistema.

POTENCIA REQUERIDA POR EL SISTEMA				
ECUACIONES				
$N_c = \frac{CD}{m_c}$		Pot= $F_D * V_T$	$W = \frac{2\pi n}{60}$	$V_T = w * r_T$
VARIABLE	VALOR	UNIDADES	DESCRIPCIÓN	
F_D	13	Kgf	Fuerza para despulpar un grano de café	
E_1	11,22	mm	Diámetro Longitudinal	
E_2	12,56	mm	Diámetro ortogonal	
P	15,32	mm	Diámetro perimetral	
D_c	12,98	mm	Diámetro promedio	
m_c	1,3	g	Masa promedio de cereza de café	
\emptyset_c	210	mm	Diámetro del tambor	
L_c	260	mm	Longitud del cilindro	
CD	2800	Kg/Dia	Capacidad máxima de despulpado estimada	
V_T	305	rpm	Velocidad del Tambor	

N_C	2153845,2	Cerezas	Numero de cerezas
m_T	3806,4	Kg/Dia	Masa de cereza total por día
w	610π	rev/min	Velocidad angular del tambor
r_T	0,105	m	Radio del Tambor
V_t	3,3536	m/seg	Velocidad tangencial del tambor
Pot	0,573	Hp	Potencia requerida

5.2. VIDA ÚTIL DE LA CHUMACERA

La vida útil calculada para la chumacera UCP205, varía significativamente según la potencia transmitida: para 0,5 kW supera las 660 000 h, para 1 kW ronda las 83 000 h y para 2 kW cae a unas 10 400 h, siendo siempre el rodamiento del lado de los piñones en donde es más exigido. Se seleccionó la chumacera tipo UCP205 (con inserto YAR 205-100, $C = 14$ kN, $C_0 = 7,8$ kN) porque ofrece una adecuada capacidad de carga y vida útil para potencias de hasta 1 kW, manteniendo un margen de seguridad frente a cargas estáticas y dinámicas, además de ser un modelo estándar, económico y de fácil montaje y mantenimiento.

Figura 17. Cálculos de vida útil de la chumacera.

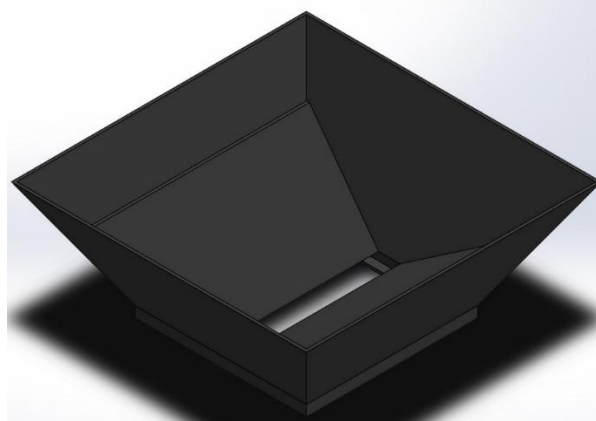
VIDA UTIL DE LA CHUMACERA					
ECUACIONES					
$w = \frac{2\pi n}{60}$ $\tau = \frac{P * 1000}{w}$ $F_t = \frac{\tau}{r_s}$ $Pequiv = \frac{R}{1000}$ $L10 = \left(\frac{C}{Pequiv}\right)^p$ $L10h = \left(\frac{10^6}{60n}\right) * L10$					
VARIABLE	VALOR			UNIDADES	DESCRIPCIÓN
	0,5	1	2	kW	
w	31,416	31,416	31,416	rad/s	Velocidad angular
τ	15,915	31,831	63,662	Nm	Par
F_t	488,97	977,94	1955,88	N	Fuerza tangencial en piñón
R	611,21	1222,42	2444,85	N	Reacción
Pequiv	0,6122	1,2234	2,4458	kN	Carga dinámica equivalente
VN	3311,8	414,9	51,9	Mill. De rev	Vida nominal L10
Vh	664444	83254	10419	h	Vida en horas
S_0	12,74	6,38	3,19	S0	Chequeo estático

5.3. TOLVA DE ALIMENTACIÓN

Para el diseño de la tolva se seleccionó lámina de acero SAE 1045 de espesor 1/16 de pulgada. Para la construcción, la lámina fue cortada en secciones y unida con soldadura 6013, como se observa en la figura 18. La estructura cuenta con una base cuadrada de 40 cm de ancho y 40 cm de

largo, con una altura de 27,5 cm, y finalmente una parte superior también cuadrada de 68,8 cm de ancho y 68,8 cm de largo, dando como resultado la forma observada en la imagen.

Figura 18. Tolva de alimentación.



Se determinó la capacidad volumétrica de la tolva de alimentación con el fin de establecer la cantidad de café necesaria para mantener el funcionamiento continuo de la máquina, información que el operario debía conocer para facilitar el proceso. Para el diseño de la tolva, se tuvo en cuenta el ángulo de reposo del café cereza, estimado entre 35° y 40°, con el propósito de garantizar un flujo adecuado del material por gravedad, evitando la acumulación o el atasco del producto dentro del sistema de alimentación.

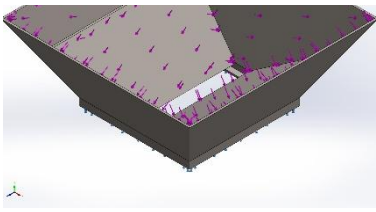
Tabla 8. Cálculos del volumen útil y resistencia de la tolva de alimentación.

VOLUMEN ÚTIL DE LA TOLVA Y RESISTENCIA			
ECUACIONES			
$V = \frac{h}{3}(A_1 + A_2 + \sqrt{A_1 A_2})$		$m = \rho * V$	
		$P = \frac{m * g}{A_1}$	
VARIABLE	VALOR	UNIDADES	DESCRIPCIÓN
h	27,5	cm	Altura de la tolva
A ₁	1600	cm ²	Área de la base inferior
A ₂	4734,44	cm ²	Área de la base superior
V	80227,7	cm ³	Volumen útil de la tolva
m	44,13	Kg	Masa de café cereza
ρ	550	Kg/m ³	Densidad de café cereza
g	9,81	m/s ²	Gravedad
P	2,7	kPa	Presión ejercida en la base

Posteriormente, con ayuda del software SolidWorks, se realizó un análisis por elementos finitos

para determinar diferentes factores que influyen en el diseño de la tolva. Como se observa en la figura 19, se asignaron al sólido los detalles de sujeción y los lugares en donde se aplicará la respectiva fuerza.

Figura 19. Detalles de sujeción en la tolva.

Nombre de sujeción	Imagen de sujeción	Detalles de sujeción		
Fijo-1		Entidades:	1 cara(s)	
		Tipo:	Geometría fija	
Fuerzas resultantes				
Componentes	X	Y	Z	Resultante
Fuerza de reacción(N)	-0,0016114	263,154	0,00610034	263,154
Momento de reacción (N.m)	0	0	0	0

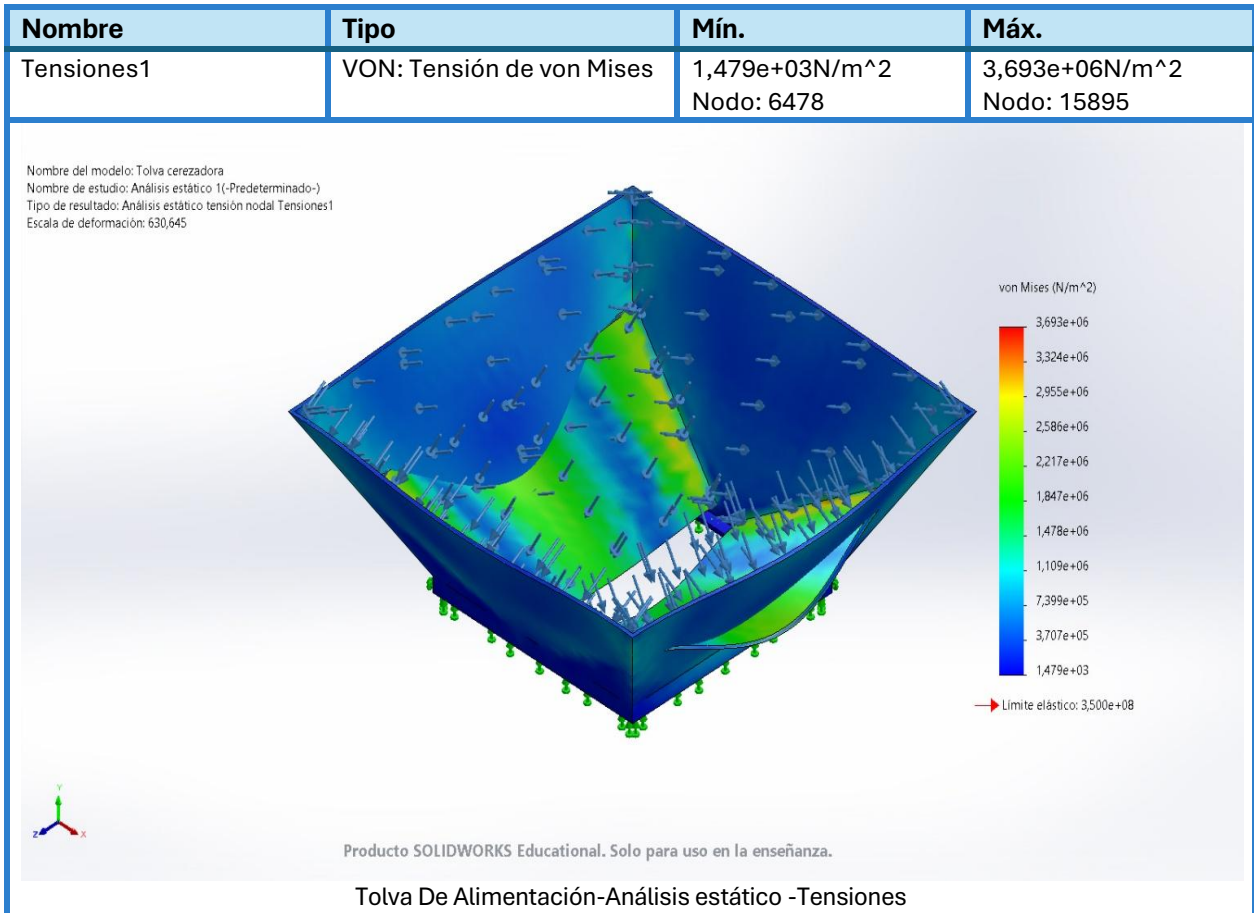
Siendo más específicos, los detalles de la carga aplicada sobre la tolva se muestran a continuación en la figura 20.

Figura 20. Detalles de carga distribuida en la tolva.

Nombre de carga	Cargar imagen	Detalles de carga		
Fuerza-1		Entidades:	6 cara(s)	
		Tipo:	Aplicar fuerza normal	
		Valor:	44 kgf	

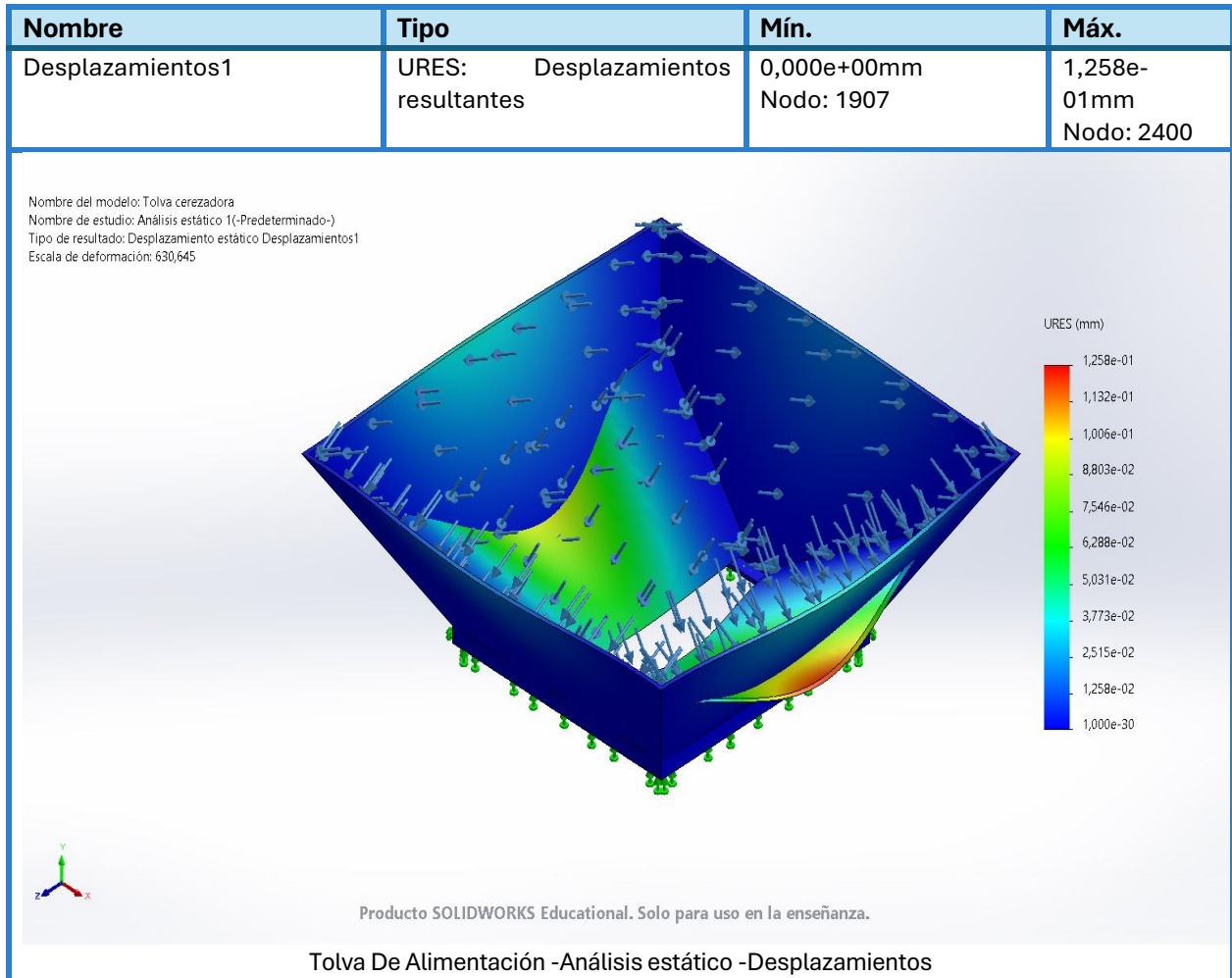
Siguiendo el estudio realizado en el software, los resultados obtenidos se aprecian en la figura 21, donde se evidencia la tensión de Von Mises y se muestra visualmente la escala de colores: desde el azul, que representa bajas deformaciones en el sólido, hasta el rojo, que indica altas deformaciones. En este caso, las deformaciones resultantes se encuentran dentro de rangos aceptables.

Figura 21. Tensión de Von Mises en la tolva.



Finalmente, en la figura 22 y en los datos obtenidos del estudio se pueden apreciar los desplazamientos mínimos y máximos resultantes, los cuales son soportados por la tolva con el diseño ya establecido.

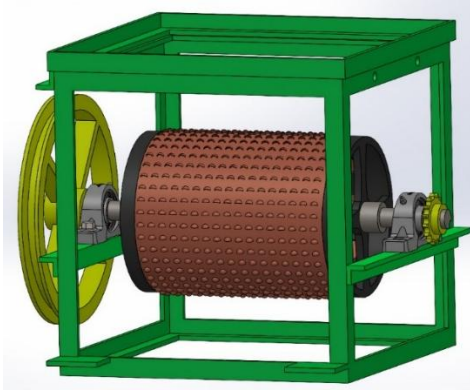
Figura 22. Desplazamientos resultantes tolva.



5.4. EJE Y TAMBOR DESPULPADOR

El eje que sostiene el tambor despulpador y transmite la potencia al resto del sistema tiene un diámetro de 1” y una longitud de 55 cm. Va soportado en dos chumaceras, una en cada extremo. En uno de los extremos, el eje da soporte a una polea tipo A de aluminio de 14”, la cual provee la transmisión de potencia para generar el movimiento de la totalidad de los componentes de la máquina. En el centro del eje se encuentra el tambor despulpador, fabricado en fundición gris, con una longitud de 30 cm y un diámetro de 21 cm. Finalmente, en el otro extremo del eje se ubica un piñón que transmite la potencia al siguiente componente: el eje alimentador. Los detalles se ilustran en la figura 23.

Figura 23. Ensamble de eje y tambor despulpador.



En la Tabla 9 se presentaron los cálculos realizados para determinar la resistencia del eje, con el fin de verificar si este cumplía con las condiciones de diseño adecuadas. En dichos cálculos se incluyó el módulo de sección, el cual indica qué tan bien la forma geométrica de una pieza resiste la flexión, siendo un parámetro fundamental para evaluar la capacidad del eje de soportar los esfuerzos flectores sin superar los límites de resistencia del material. El material seleccionado para la fabricación de los ejes fue acero común AISI 1045, debido a su buena resistencia mecánica, facilidad de mecanizado y amplia disponibilidad en el mercado, lo que lo hace adecuado para componentes sometidos a esfuerzos moderados de torsión y flexión.

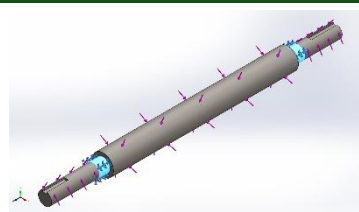
Tabla 9. Cálculos de resistencia del eje del tambor despulpador.

EJE DEL TAMBOR DESPULPADOR			
ECUACIONES			
$T = \frac{P * 60}{2\pi * 300} \quad F_t = \frac{T}{r} \quad M_{m\acute{a}x} = \frac{R_A * a * b}{L} \quad V = \pi h(R_e^2 - R_i^2)$			
$M_{Total} = \sqrt{M_v^2 + M_h^2} \quad S = \frac{\pi r^2}{4} \quad N = \frac{\sigma_{Acero}}{\sigma} \quad \sigma = \frac{M_{total}}{S}$			
VARIABLE	VALOR	UNIDADES	DESCRIPCIÓN
P	1	Hp	Potencia del motor
n	300	rpm	Rev. por minuto del eje
T	23,74	N	Torque en el eje
r	7	in	Radio polea conducida
$F_{t,Polea}$	113,5	N	Fuerza tangencial en polea
L	30	cm	Longitud del tambor
D	21	cm	Diámetro exterior del tambor
ρ	7200	Kg/m^3	Densidad de fundición gris
t	1,5	cm	Espesor del tambor
V	0,002754	m^3	Vol. Aprox. Del tambor

m	18,83	Kg	Masa del tambor
W	194,6	N	Peso del Tambor
r_p	32,4	mm	Radio de paso del piñón
p	12,7	mm	Paso del piñón
$F_{t,piñón}$	732,7	N	Fuerza tangencial en piñón
T	23,74	Nm	Torsión sobre el eje
a	23,5	cm	Distancia de A al peso
b	20,5	cm	Distancia del peso a B
Lc	44	cm	Longitud entre chumaceras
$M_{máx}$	9,978	Nm	Flexión vertical máxima
$M_{Flex,total}$	4,71	Nm	Flexión horizontal máxima
M_{Total}^l	11,06	Nm	Momento Flector total
r_e	12,7	mm	Radio del eje
S	6400	mm^3	Módulo de sección
σ	1,73	Mpa	Tensión por Flexión
N	306		Factor de seguridad

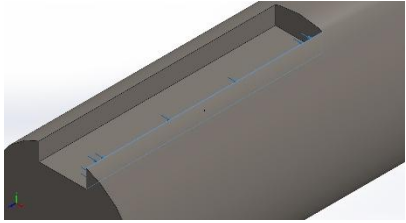
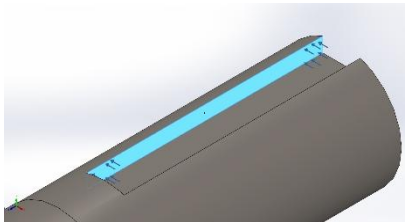
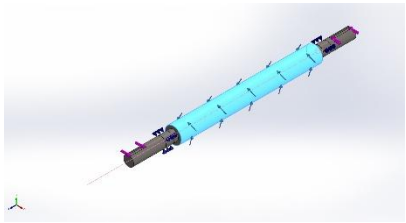
Una vez más, utilizando la herramienta SolidWorks, se realizó una simulación con las cargas halladas anteriormente. En la figura 24 se muestran los detalles de la sujeción y las fuerzas de reacción sobre el componente.

Figura 24. Detalles de sujeción, eje del tambor despulpador.

Nombre de sujeción	Imagen de sujeción	Detalles de sujeción		
Fijo-1		Entidades:	2 cara(s)	
		Tipo:	Geometría fija	
Fuerzas resultantes				
Componentes	X	Y	Z	Resultante
Fuerza de reacción(N)	-3.470,39	-6,96033	3,60583	3.470,39
Momento de reacción (N.m)	0	0	0	0

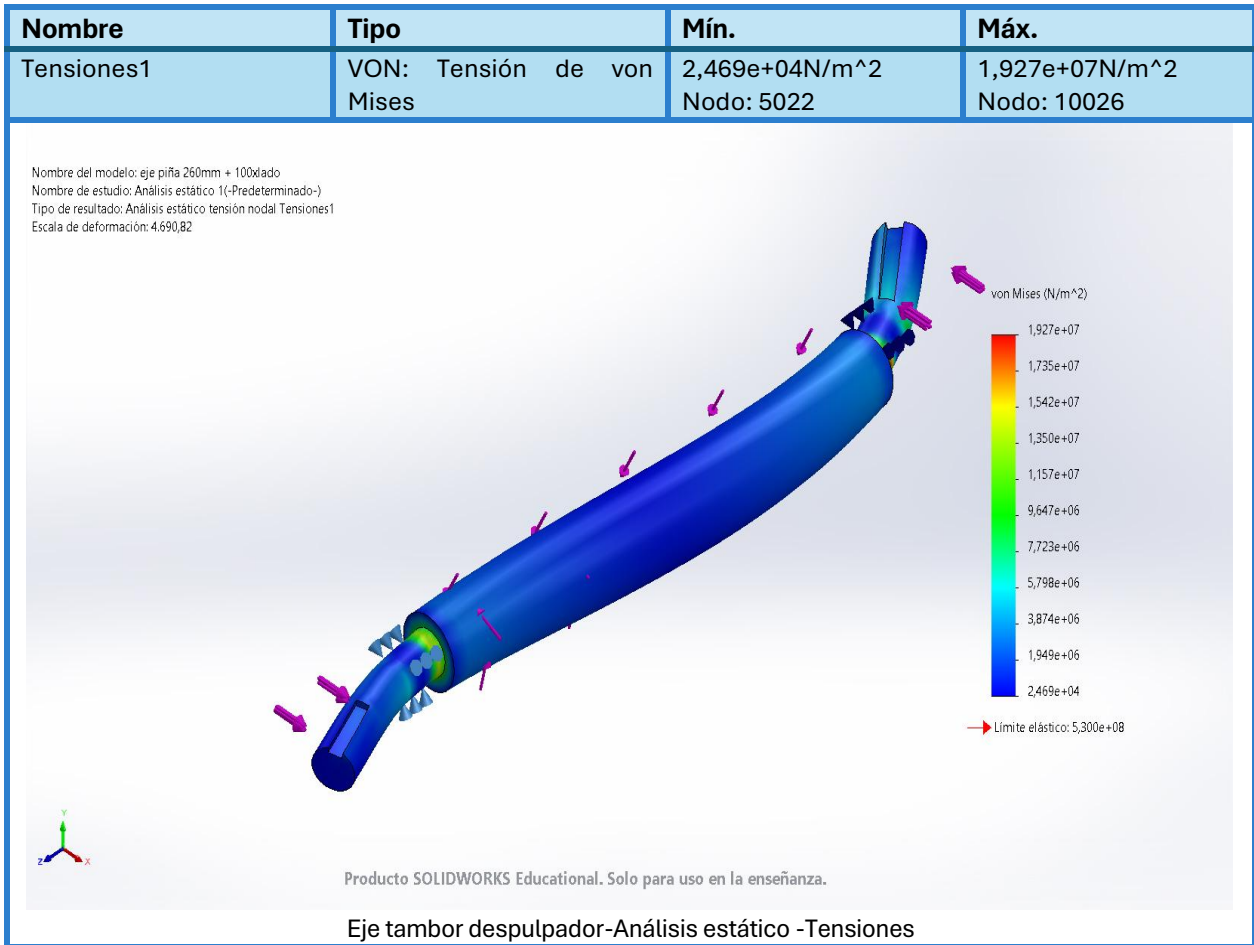
Teniendo definidas las sujeciones del eje, ubicadas en los extremos donde se encuentran las chumaceras, se aplican las cargas como una carga total distribuida, junto con los esfuerzos por torsión sobre el eje, tal como se aprecia en la figura 25.

Figura 25. Detalles de carga distribuida, eje del tambor despulpador.

Nombre de carga	Cargar imagen	Detalles de carga
Fuerza-1		Entidades: 1 cara(s) Tipo: Aplicar fuerza normal Valor: 136 N
Fuerza-2		Entidades: 1 cara(s) Tipo: Aplicar fuerza normal Valor: 382 N
Torsión-1		Entidades: 1 cara(s) Referencia: Eje1 Tipo: Aplicar momento torsor Valor: 41,6 N.m

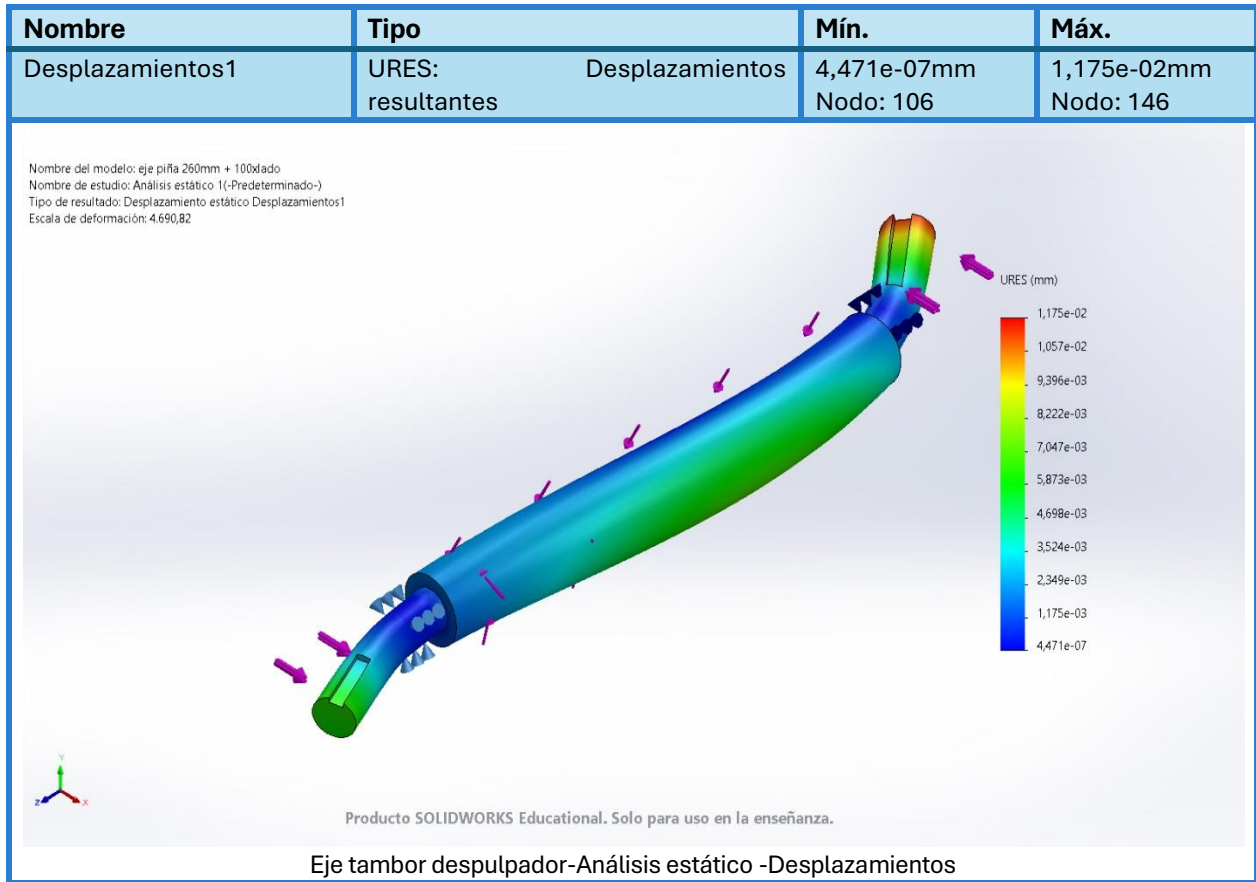
En la figura 26 se observa el estudio de tensión de Von Mises realizado para este eje en específico, donde se evidencia que las deformaciones son mínimas, tanto al analizar los valores obtenidos como al detallar visualmente los colores arrojados por el estudio.

Figura 26. Tensión de Von Mises, eje del tambor despulpador.



En cuanto a los desplazamientos sufridos en la pieza, como se observa en la figura 27, se presenta un desplazamiento mínimo de $4,471e-07$ mm y un máximo de $1,175e-02$


Figura 27. Desplazamientos resultantes, eje del tambor despulpador.

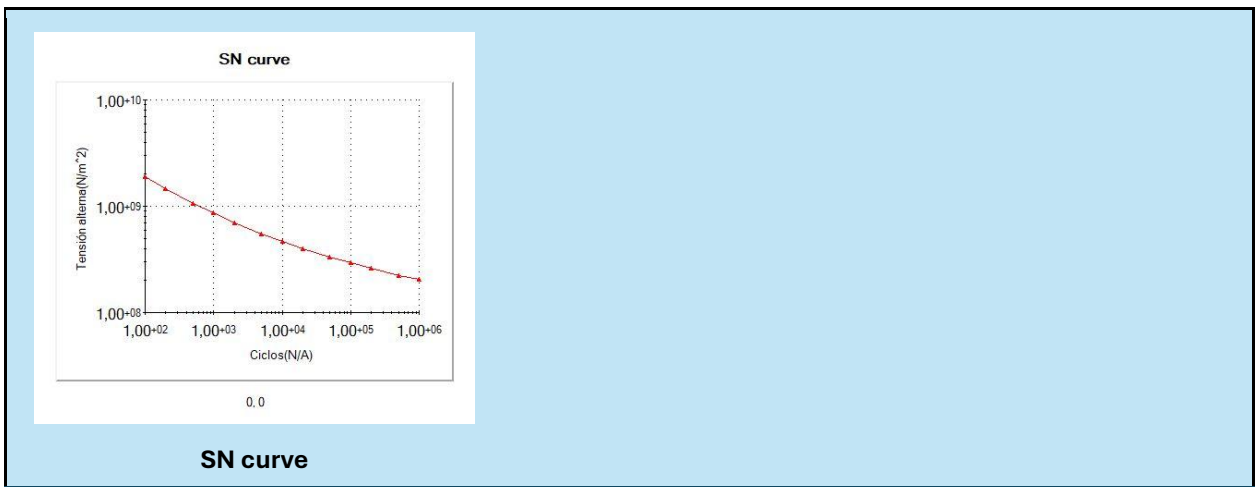


5.4.1. Análisis de fatiga eje tambor despulpador

En la Figura 28, se observan las propiedades del material para su modelamiento y su curva característica.

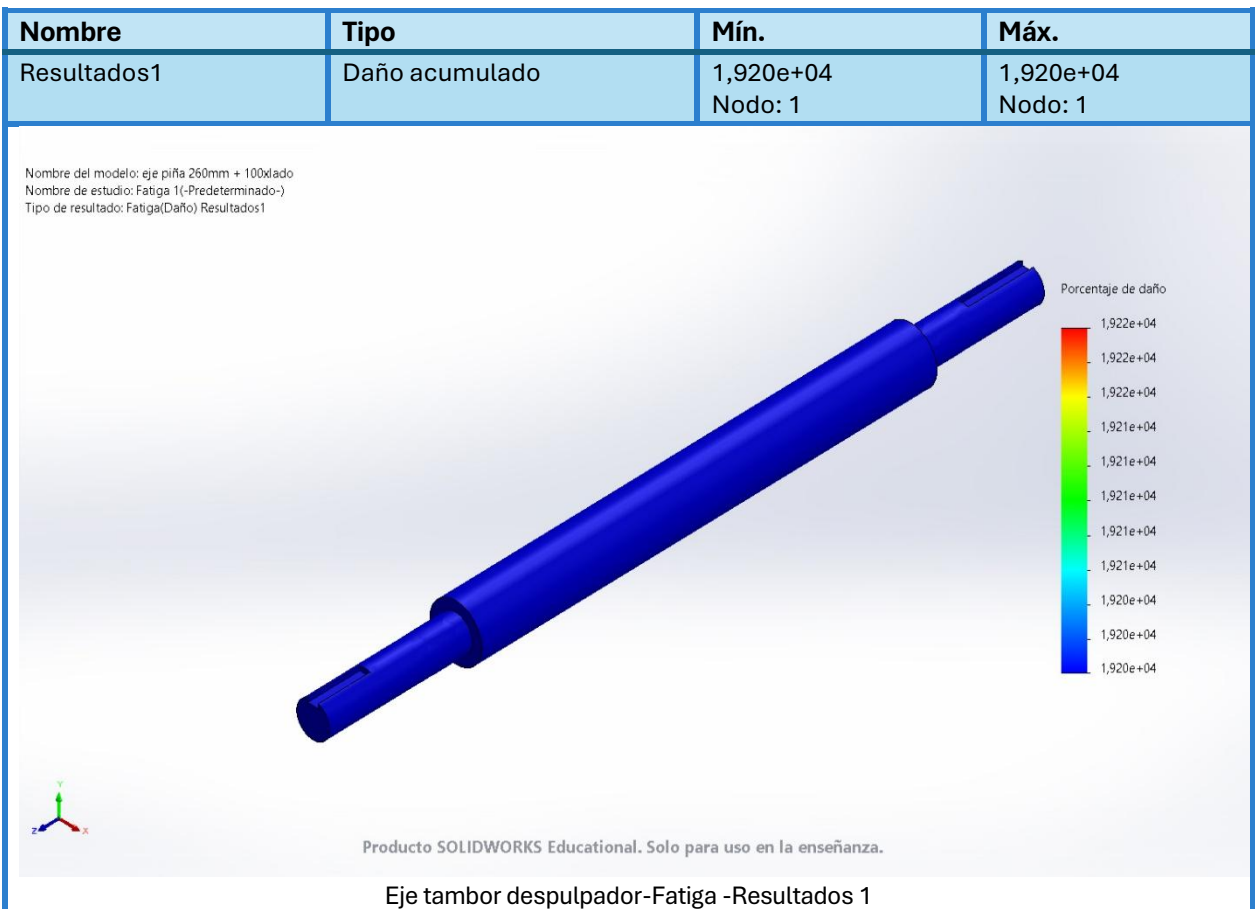
Figura 28. Propiedades del modelo, eje tambor despulpador.

Referencia de modelo	Propiedades	Componentes
	Nombre: AISI 1045 Acero estirado en frío Tipo de modelo: Isotrópico elástico lineal Criterio de error predeterminado: Tensión de von Mises máx.	Eje tambor despulpador
Datos de curva:		



En la figura 29 se presenta el resultado del análisis de fatiga aplicado al eje del tambor despulpador, donde se evalúa el daño acumulado a lo largo del ciclo de vida del componente.

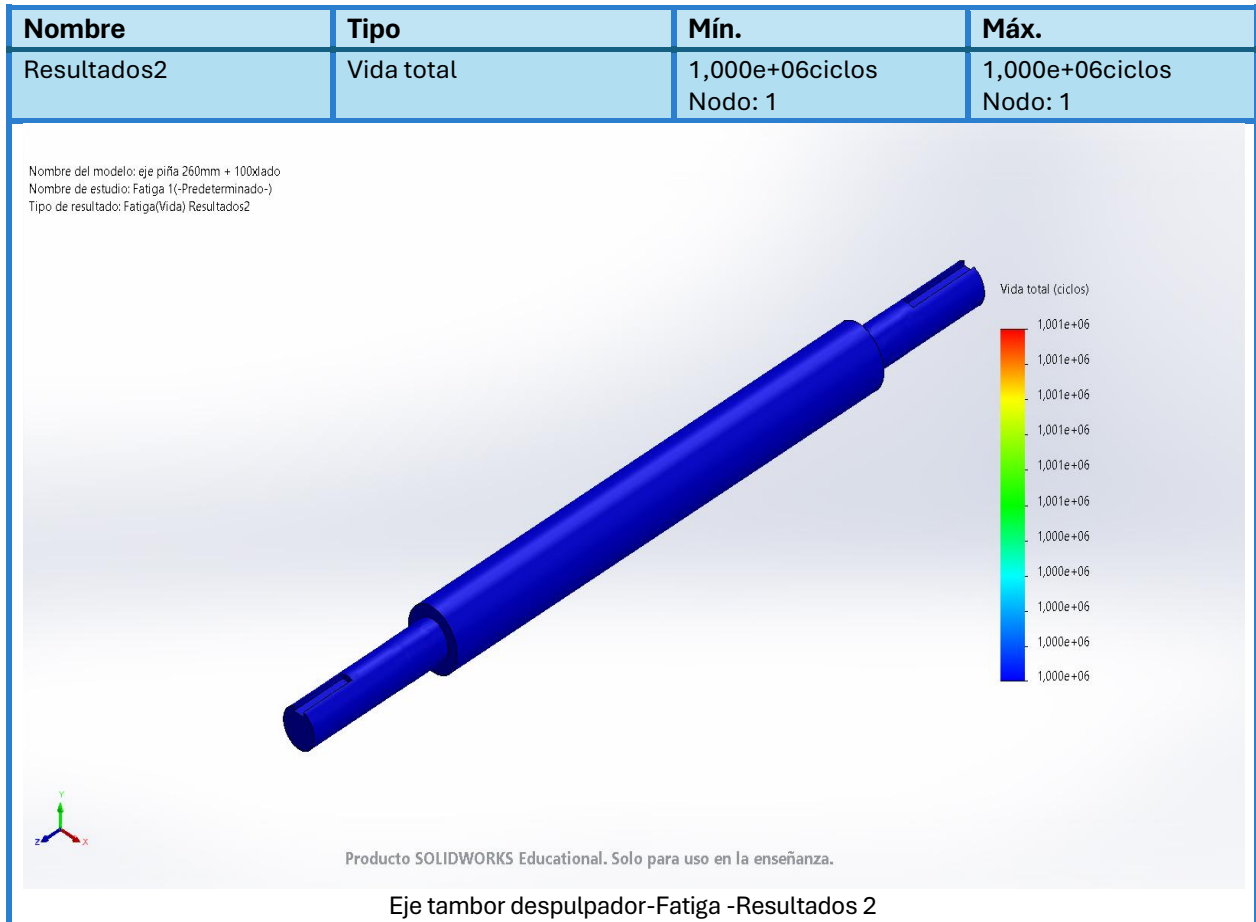
Figura 29. Análisis de fatiga daño acumulado, eje tambor despulpador.



Gracias al estudio de fatiga se determinó la vida útil total del eje del tambor despulpador,

evidenciando que el componente cuenta con una durabilidad adecuada frente a las cargas cíclicas de operación y cumple con los criterios de resistencia mecánica establecidos en el diseño.

Figura 30. Análisis de fatiga vida total, eje tambor despulpador.

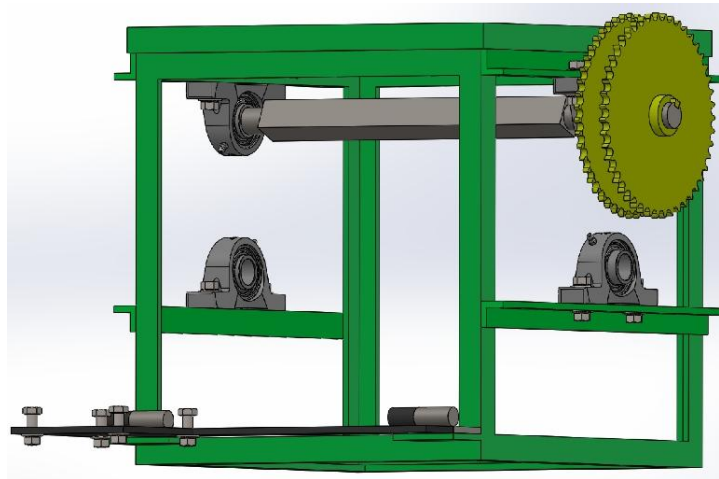


5.5. EJE DOSIFICADOR (ALIMENTADOR)

El eje alimentador cumple un papel fundamental en la máquina, ya que su función es dosificar el café cereza para evitar que el tambor de despulpado se atasque por exceso de fruto. Consta de un eje cuadrado de una pulgada de lado, cuyas puntas estaban cilindradas a un diámetro de una pulgada. La longitud total del eje es de 51 cm. Uno de los extremos cilindrados, de 6 cm de longitud, esta soportado por una chumacera ubicada a 3 cm de la punta del eje. El otro extremo, de 12 cm de longitud, se encuentra anclado a una segunda chumacera situada a 9 cm de la punta, y en este último extremo se acopla un piñón doble que transmite la potencia proveniente del eje del tambor de descerezado. El material definido para la fabricación del eje fue acero AISI 1045, seleccionado por su buena resistencia mecánica, facilidad de mecanizado y comportamiento adecuado frente a

esfuerzos de torsión y flexión. En la Figura 31 se aprecia el esquema descrito anteriormente.

Figura 31. Ensamble de eje alimentador y piñón doble.




En la tabla 10 se presentan los cálculos necesarios para definir el estudio de simulación y garantizar la fiabilidad del diseño propuesto.

Tabla 10. Cálculos de resistencia del eje alimentador.

EJE ALIMENTADOR			
ECUACIONES			
$J = \frac{a^4}{6}$	$\sigma_{VM} = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2}$	$\sigma = \frac{M_{m\acute{a}x}}{S}$	
$\tau_{m\acute{a}x} = \frac{T * a/2}{J}$	$M_{m\acute{a}x} = F * d$	$S = \frac{a^3}{6}$	
VARIABLE	VALOR	UNIDADES	DESCRIPCIÓN
$T_{Alimentador}$	71,22	Nm	Torque en el alimentador
r_p	97	mm	Radio piñón
F_t	734,23	N	Fuerza tangencial en el piñón
J	$1,73 \times 10^{-8}$	m^4	Momento polar de inercia
$\tau_{m\acute{a}x}$	52,2	Mpa	Modulo resistente a torsión
$M_{m\acute{a}x}$	36,71	Nm	Momento flector máximo
S	$2,73 \times 10^{-6}$	m^3	Módulo de sección
σ	13,45	MPa	Tensión por flexión
σ_{VM}	91	MPa	Criterio de Von Mises
N	5,8		Factor de seguridad

En la figura 32 se aprecian las propiedades dadas al eje alimentador, mencionando sus características principales.

Figura 32. Detalles de carga distribuida del eje alimentador.

Referencia de modelo	Propiedades	Componentes
	<p>Nombre: AISI 1045 Acero estirado en frío</p> <p>Tipo de modelo: Isotrópico elástico lineal</p> <p>Criterio de error predeterminado: Desconocido</p> <p>Límite elástico: 5,3e+08 N/m²</p> <p>Límite de tracción: 6,25e+08 N/m²</p> <p>Módulo elástico: 2,05e+11 N/m²</p> <p>Coefficiente de Poisson: 0,29</p> <p>Densidad: 7.850 kg/m³</p> <p>Módulo cortante: 8e+10 N/m²</p> <p>Coefficiente de dilatación térmica: 1,2e-05 /Kelvin</p>	Eje alimentador
Datos de curva:N/A		

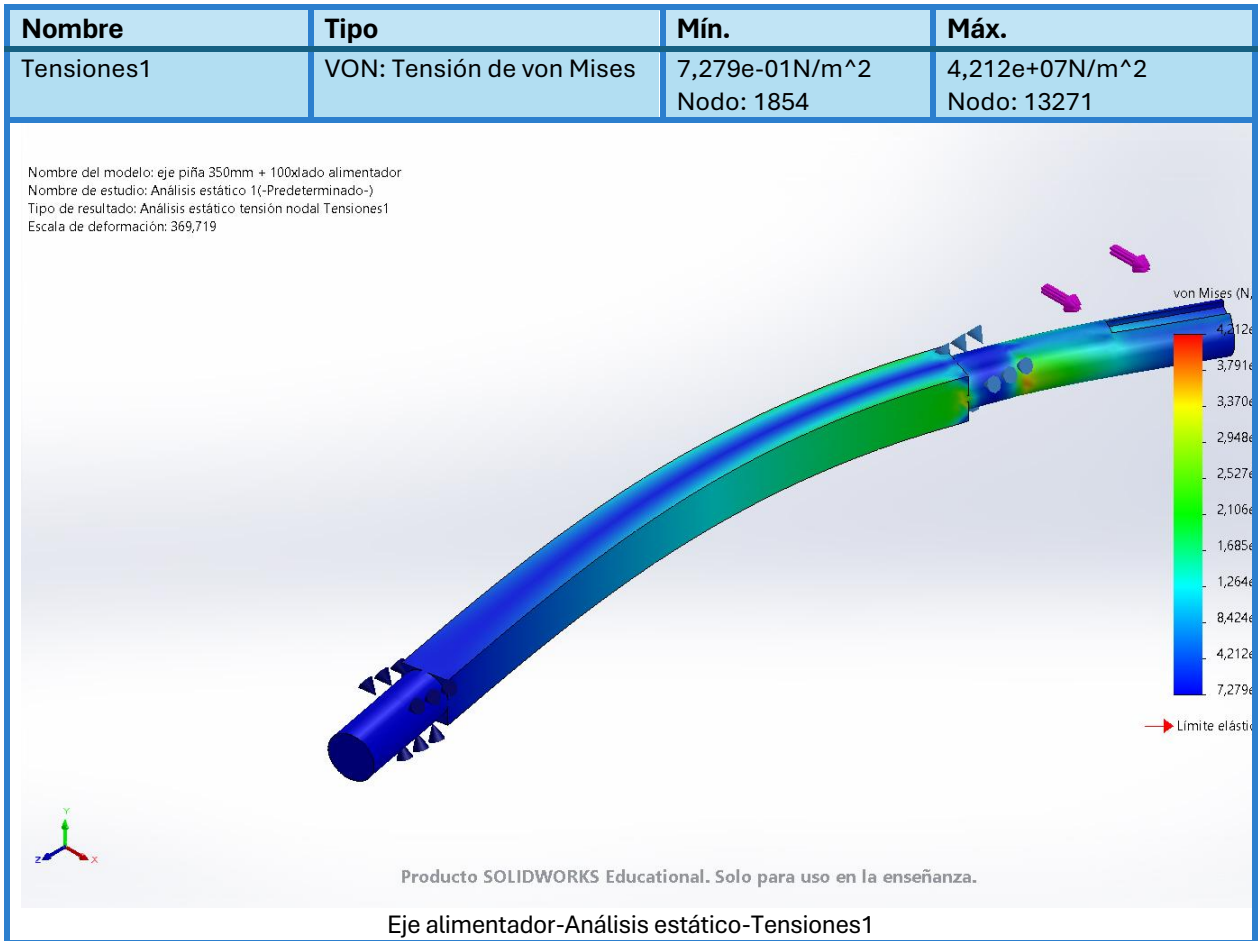
En la figura 32 se aprecia la carga aplicada sobre el eje alimentador, ubicada en la zona del cuñero.

Figura 33. Detalles de carga aplicada al eje alimentador.

Nombre de carga	Cargar imagen	Detalles de carga
Fuerza-3		<p>Entidades: 1 cara(s)</p> <p>Tipo: Aplicar fuerza normal</p> <p>Valor: 734 N</p>

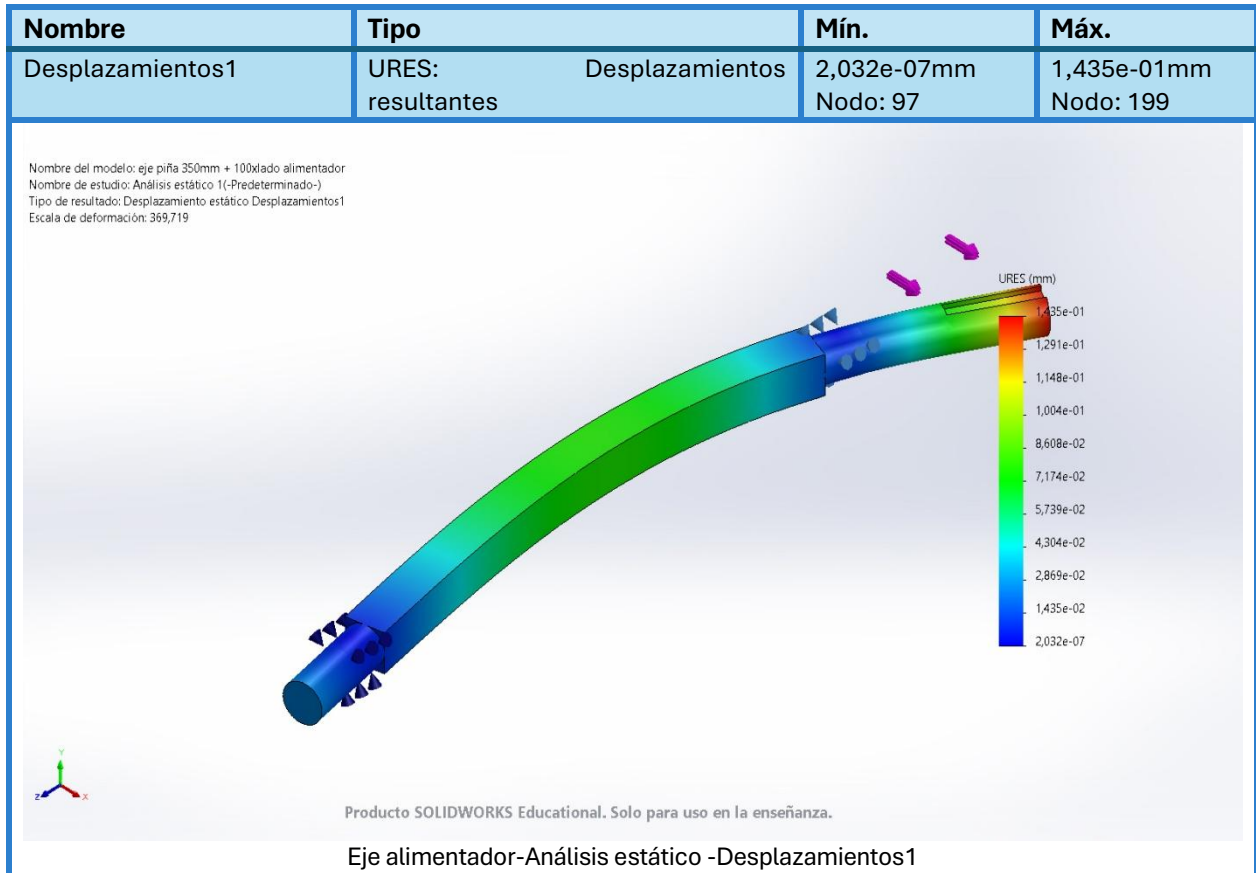
En la figura 34 se resalta con mayor claridad la deformación del eje en comparación con la del tambor despulpador, debido a que en este caso el eje alimentador, en su extremo derecho, soporta el piñón doble encargado de transmitir la potencia hacia el sistema de lavado y al tornillo sinfín, lo que implica un mayor esfuerzo en el material.

Figura 34. Tensión de Von Mises del eje alimentador.



El hecho de que la simulación muestre una deformación visualmente exagerada no representa un problema, se aprecia en la figura 35 que el desplazamiento máximo en el extremo del eje es de 1,435e-01 mm.

Figura 35. Desplazamientos resultantes del eje alimentador.

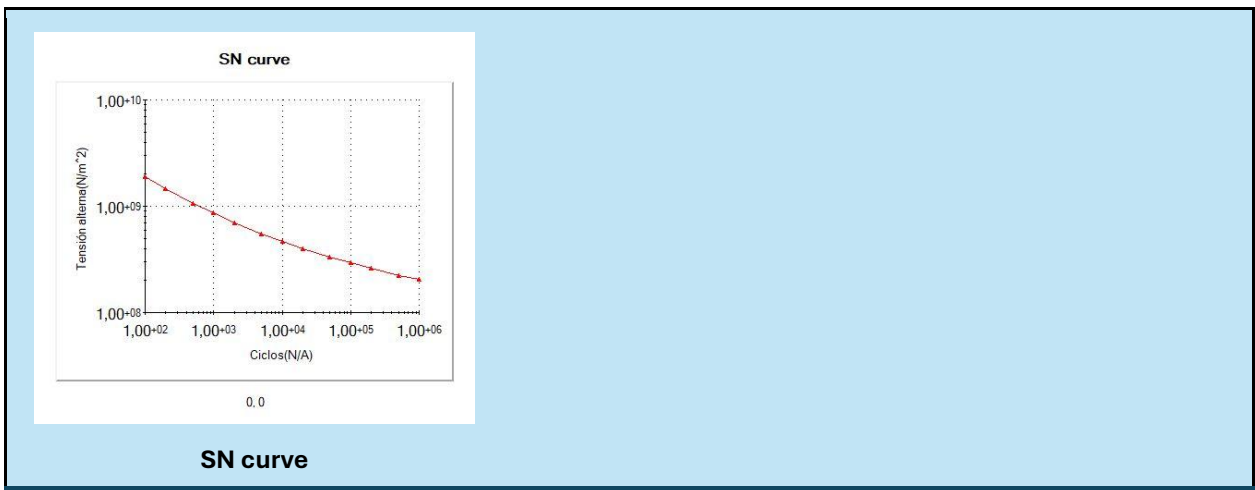


5.5.1. Análisis de Fatiga eje alimentador

A continuación, en la Figura 36 se muestran las propiedades de referencia empleadas en el modelamiento del estudio de fatiga, base para estimar el comportamiento del material y su vida útil bajo carga cíclica.

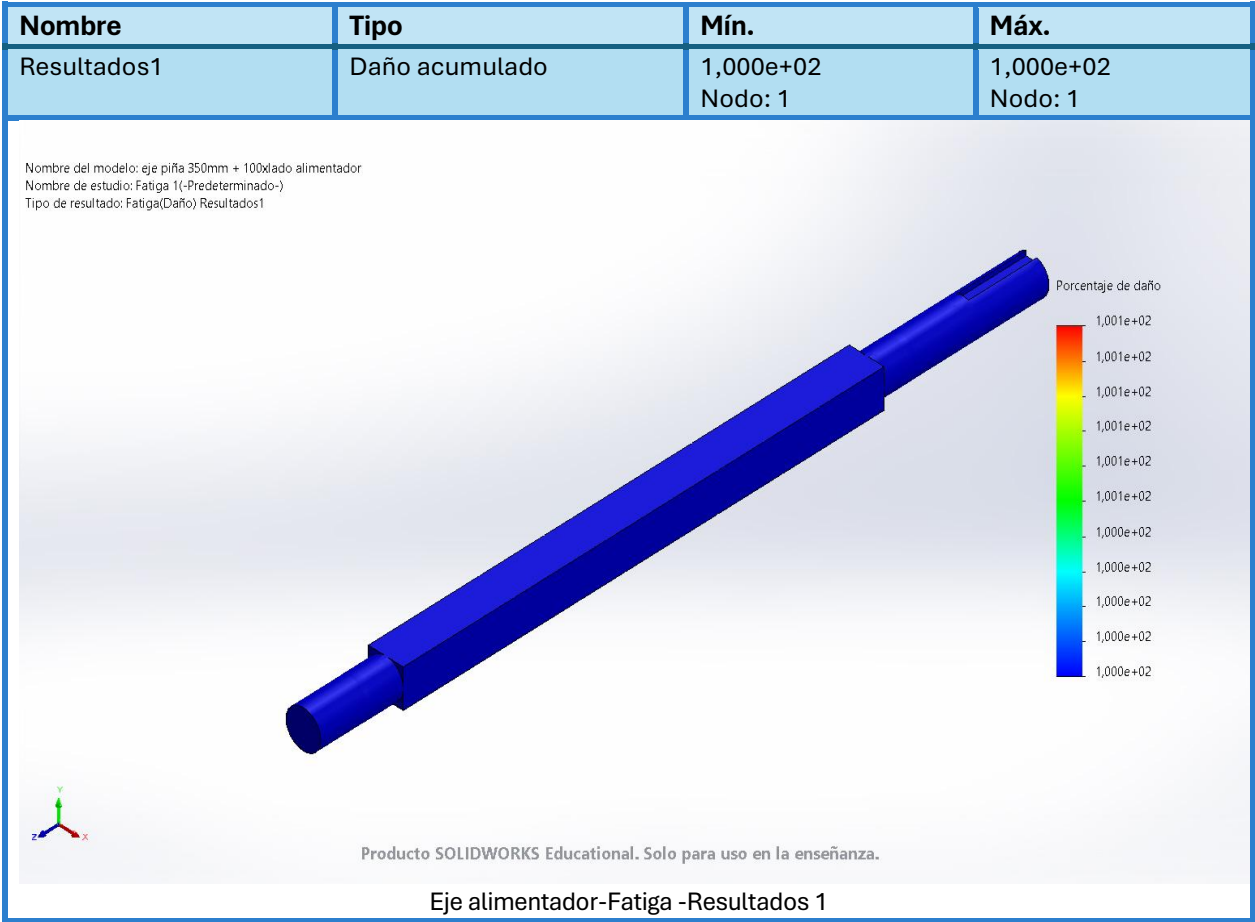
Figura 36. Propiedades del modelo eje alimentador.

Referencia de modelo	Propiedades	Componentes
	Nombre: AISI 1045 Acero estirado en frío Tipo de modelo: Isotrópico elástico lineal Criterio de error predeterminado: Tensión de von Mises máx.	Eje alimentador
Datos de curva:		



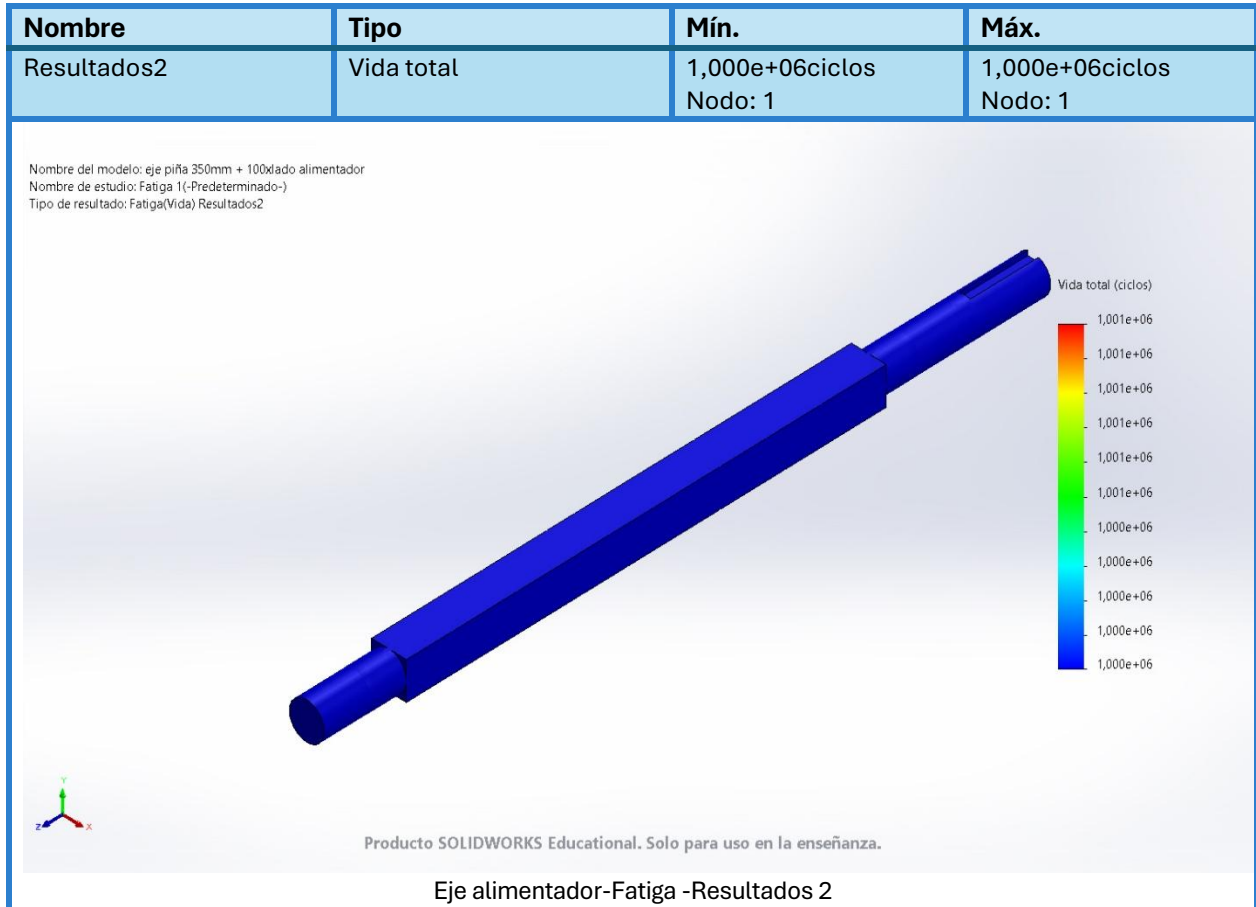
Por medio del estudio de fatiga mostrado en la Figura 37 se evidencia el daño acumulado presente en el eje alimentador, resultado que permite evaluar su comportamiento ante esfuerzos repetitivos durante la operación.

Figura 37. Análisis de fatiga daño acumulado, eje alimentador.



Finalmente, en la Figura 38 se determinó la vida total del eje alimentador mediante el análisis realizado con el software, confirmando que el componente cumple con la durabilidad prevista en el diseño

Figura 38. Análisis de fatiga vida total, eje alimentador.



5.6. ESTRUCTURA MÓDULO 1 (DESCEREZADO)

La estructura que soportaba el módulo se fabricó en ángulo de 1" x 1/4" de espesor, el cual se cortó y soldó en sus extremos utilizando electrodos revestidos E6013 de 3/32" (2,4 mm de diámetro), seleccionados teniendo en cuenta los costos de fabricación del prototipo y porque la aplicación de la soldadura se realizó en posición horizontal. Este diámetro de electrodo se eligió por ser adecuado para uniones estructurales livianas, proporcionando buen control del cordón, adecuada penetración y acabado uniforme. Como resultado, se obtuvo una estructura de soporte en forma de cubo, reforzada con un par de ángulos soldados que sostenían las chumaceras, las cuales soportaban los ejes del módulo.

El módulo presentaba dimensiones de 40 cm × 40 cm × 40 cm. En una de sus caras se ubicaron dos goznes que sostenían una base donde se encontraba anclado el motor, encargado de transmitir la potencia al sistema; adicionalmente, dicha base contaba con un tensor para ajustar la tensión de la correa. Lo anterior se ilustró en la Figura 39.

Figura 39. Estructura Modulo 1.



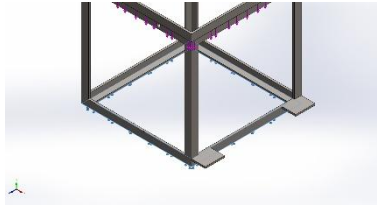
Las cargas o pesos presentes en el módulo se encuentran en la tabla 11, correspondiendo a cargas puntuales generadas por los diferentes componentes que lo conforman.

Tabla 11. Cargas distribuidas presentes en el módulo 1.

CARGAS DISTRIBUIDAS EN EL MÓDULO 1			
VARIABLE	VALOR	UNIDADES	DESCRIPCIÓN
W_1	275	N	Peso tambor fundición
W_2	19,6	N	Peso Polea aluminio
W_3	9,8	N	Peso Piñón de transmisión
W_4	49	N	Peso Eje del tambor de Fundición
W_5	176	N	Peso Motor
W_{Total}	530	N	Carga total sobre la estructura

La sujeción del módulo 1 se encuentra en su parte inferior, donde encaja en una guía ubicada en el módulo 2, con un sistema de acople sencillo y práctico, ver figura 40.

Figura 40. Detalles de sujeción del módulo 1.

Nombre de sujeción	Imagen de sujeción	Detalles de sujeción		
Fijo-1		Entidades: 1 cara(s) Tipo: Geometría fija		
Fuerzas resultantes				
Componentes	X	Y	Z	Resultante
Fuerza de reacción(N)	-0,00906825	100,003	0,00265324	100,003
Momento de reacción (N.m)	0	0	0	0

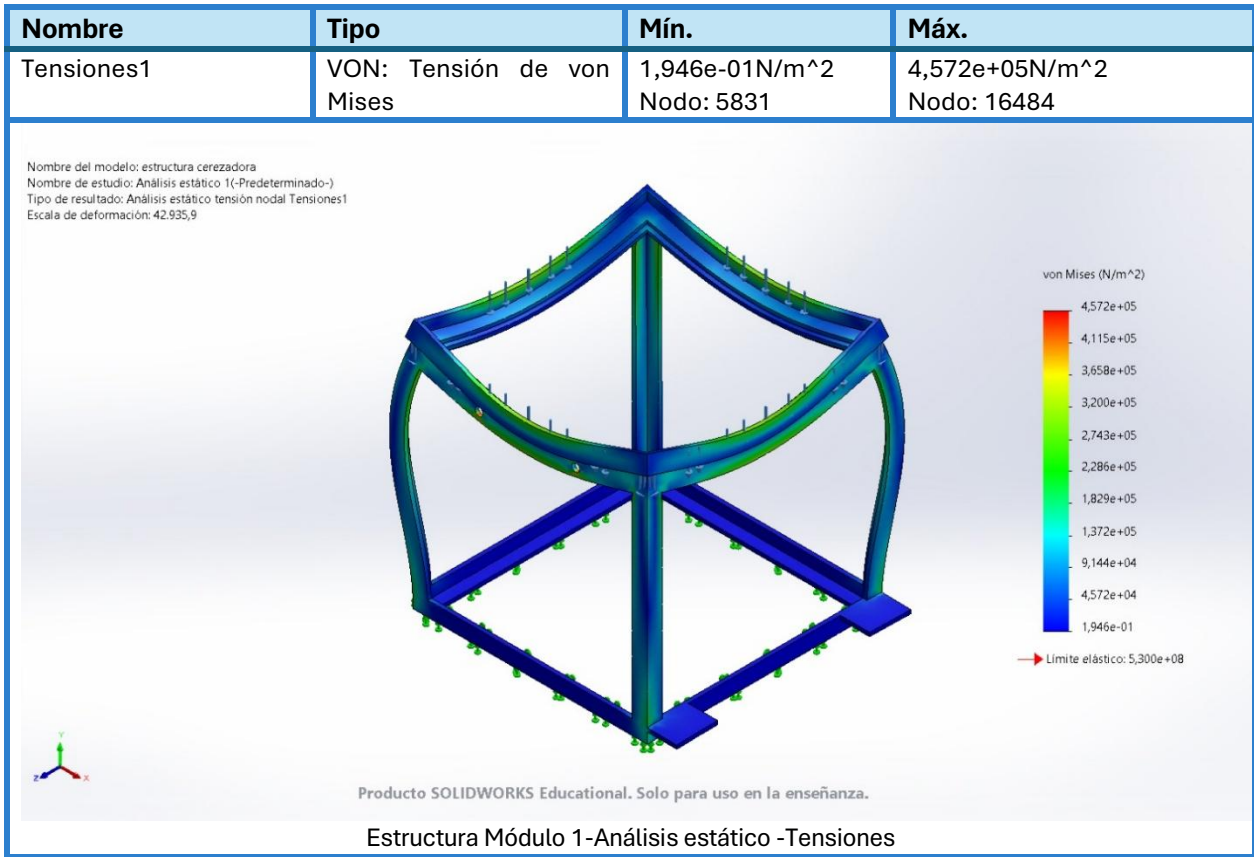
La carga total en el módulo se representa como una carga distribuida, tal como se observa en la figura 41.

Figura 41. Detalles de carga distribuida del módulo 1.

Nombre de carga	Cargar imagen	Detalles de carga		
Fuerza-1		Entidades: 1 cara(s) Tipo: Aplicar fuerza normal Valor: 100 N		

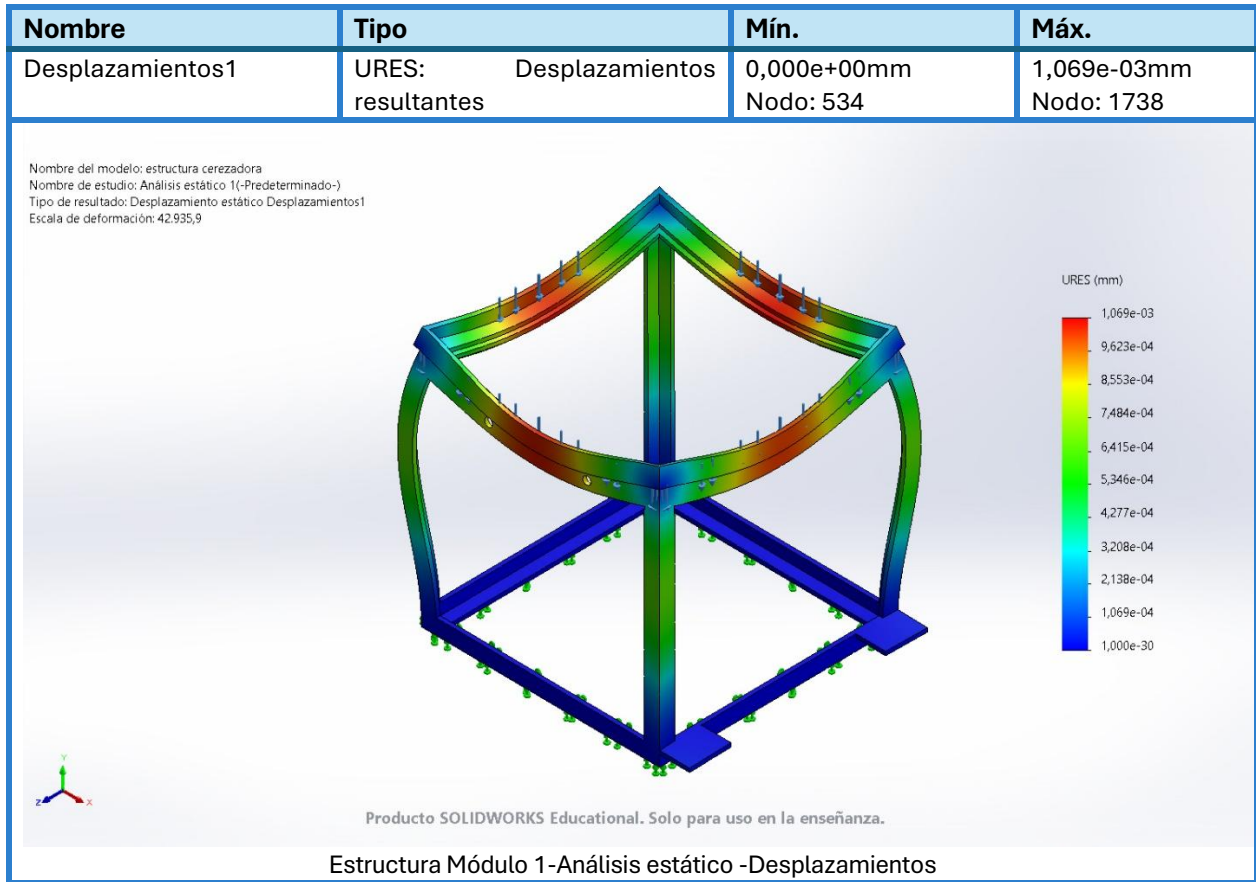
Posteriormente, en la figura 42 se observan las deformaciones en el módulo 1, las cuales se acentúan principalmente en la parte central, a lo largo de los ángulos que soportan la estructura del módulo.

Figura 42. Tensión de Von Mises del módulo 1.



Los desplazamientos resultantes, como se muestra en el estudio de la figura 36, son inferiores a 0,001069 mm, lo que se traduce en una deformación prácticamente nula o inexistente.

Figura 43. Desplazamientos resultantes del módulo 1.



5.7. MÓDULO 2 (SISTEMA DE LAVADO)

El módulo de lavado cuenta con un mecanismo que recibe el café directamente en un extremo de un tornillo sinfín, el cual transporta el grano recién despulpado a lo largo de su recorrido. Durante este proceso, el café es lavado con agua a presión para eliminar el mucílago y, finalmente, trasladar el café pergamino aún húmedo hacia el proceso de secado.

5.7.1. Cálculos para la bomba de agua

Para definir la presión requerida de agua, se realizan diversas pruebas manuales, obteniendo como resultado que la presión necesaria para el lavado de un grano de café es aproximadamente 1.5 Bar. Por lo tanto, se define como punto de partida una bomba de ½ hp para la construcción del prototipo, ya que esta provee en promedio entre 2.1 y 3.5 Bar.

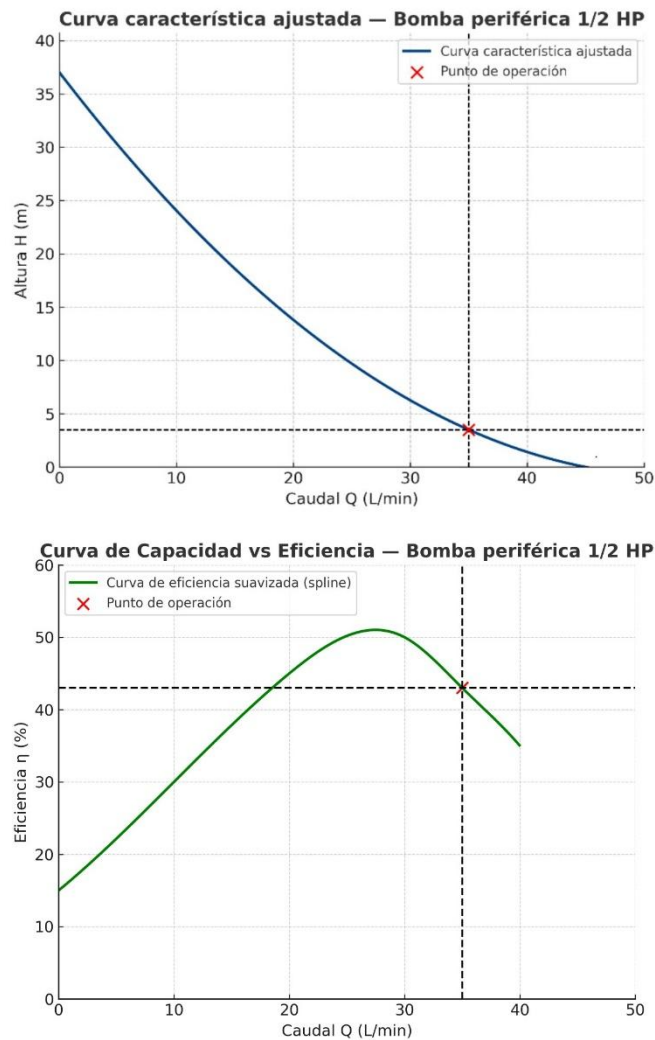
Tabla 12. Perdidas en el sistema de bombeo.

SISTEMA DE BOMBEO			
ECUACIONES			
$h_f = f * \frac{L}{D} * \frac{v^2}{2g}$		$A = \frac{\pi D^2}{4}$	
VARIABLE	VALOR	UNIDADES	DESCRIPCIÓN
Q	35	L/min	Caudal Total Bomba
P_B	2,1-3,5	Bar	Presión Disponible Bomba
P_R	0,187	Bar	Presión mínima requerida en el sistema
SUCCIÓN			
A	80	%	Porcentaje succión de agua del tanque A
B	20	%	Porcentaje succión de agua del tanque B
$A_{3/4"}$	$2,835 \times 10^{-4}$	m^2	Área interna tubo PVC 3/4"
v_A	1,64	m/s	Velocidad tramo tanque A
v_B	0,41	m/s	Velocidad tramo tanque B
v_{T-B}	2,06	m/s	Velocidad desde la T a la Bomba
f_{PVC}	0,025		Factor de pérdida del PVC
h_{fA}	0,17	m	Pérdidas en tramo A
h_{fB}	0,011	m	Pérdidas en tramo B
$h_{f,T-B}$	0,28	m	Pérdidas tramo de la T a la Bomba
K_T	0,6		Factor de pérdida en accesorio tipo T
$h_{f,T}$	0,13	m	Pérdida por accesorios
$h_{Total,S}$	0,591	m	Pérdidas totales en succión
DESCARGA			
$A_{1"}$	$5,309 \times 10^{-4}$	m^2	Área interna manguera flexible de 1"
v_m	1,1	m/s	Velocidad tramo de manguera
$f_{manguera}$	0,03		Factor de pérdida de manguera flexible
$h_{manguera}$	0,14	m	Pérdidas en tramo de manguera
K_{Codo}	0,9		Factor de pérdida en accesorio tipo codo
$h_{accesorios}$	0,14	m	Pérdidas por accesorios
$h_{Galvanizado}$	0,24	m	Pérdidas en ramales de Galvanizado
h_{Altura}	0,8	m	Pérdidas por altura
$h_{Total,D}$	1,32	m	Pérdidas totales en la descarga

La selección de una bomba periférica de 1/2 HP resulta adecuada porque este tipo de bomba está diseñada para generar altas presiones a caudales relativamente bajos. Como se aprecia en la figura 37 en la curva característica de la bomba y a su vez en la de eficiencia, el punto de operación del sistema de 35 L/min y 3,4 m de altura se encuentra dentro de la zona estable de la bomba, trabajando con una eficiencia cercana al 45 %, muy próxima al máximo que puede alcanzar la máquina, lo que garantiza un buen aprovechamiento energético y un funcionamiento confiable. Además, la bomba ofrece un caudal suficiente y la presión requerida para el lavado del café, con un margen

adicional que permite compensar posibles pérdidas de carga en tuberías, válvulas o filtros, e incluso posibilita futuras ampliaciones del sistema. Al tratarse de un equipo compacto, económico y diseñado específicamente para bombear agua limpia, condición asegurada mediante los filtros instalados en la succión, asegura una operación estable, un consumo eléctrico reducido en relación con la potencia nominal disponible y un mantenimiento sencillo, consolidándose, así como una opción técnica eficiente y práctica para el prototipo.

Figura 44. Curva característica de la bomba y curva de eficiencia



5.7.2. Sistema de lavado a presión Se diseña la salida de agua mediante dos tubos ciegos con 10 orificios en cada uno, para los cuales se realizan los cálculos presentados en la tabla 13. La presión remanente útil se encuentra en un rango de 1,91 a 3,31 bar, valor suficiente para llevar a cabo el lavado del café.

Tabla 13. Cálculo de grupos de perforaciones para sistema de lavado a presión.

AGUJEROS DE SALIDA DE TUBOS DE GALVANIZADO			
ECUACIONES			
$A_{Total} = \frac{\pi D^2}{4}$	$A_{orificio,1} = \frac{A_1}{6}$	$d_1 = \sqrt{\frac{4A}{\pi}}$	
VARIABLE	VALOR	UNIDADES	DESCRIPCIÓN
D	1	in	Diámetro de descarga
A_{Total}	$5,067 \times 10^{-4}$	m^2	Área de salida total
$A_{orificio,1}$	$1,688 \times 10^{-5}$	m^2	Área de salida de orificios pequeños
d_1	4,64	mm	Diámetro de agujeros pequeños
$A_{orificio,2}$	$2,53 \times 10^{-5}$	m^2	Área de salida de orificios medianos
d_2	5,68	mm	Diámetro de agujeros medianos
$A_{orificio,3}$	$3,16 \times 10^{-5}$	m^2	Área de salida de orificios grandes
d_3	6,34	mm	Diámetro de agujeros grandes

5.7.3. Estructura Módulo 2 La estructura de este módulo está conformada de manera similar a la del primero, con la diferencia de que en este caso soporta todo el peso y los esfuerzos generados por el módulo 1. De igual forma, en la tabla 14 se presentan las cargas y esfuerzos que actúan sobre la estructura del módulo 2.

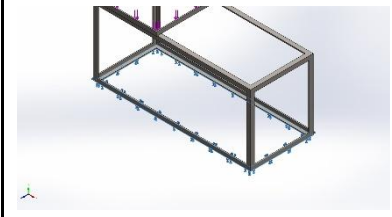
Tabla 14. Cargas distribuidas presentes en el módulo 2.

CARGAS DISTRIBUIDAS EN EL MÓDULO 2			
ECUACIONES			
$M_{m\acute{a}x} = \frac{W_{Total} * L}{4}$	$\sigma_{m\acute{a}x} = \frac{M_{m\acute{a}x}}{Z}$	$N = \frac{\sigma_{Fluencia}}{\sigma_{m\acute{a}x}}$	
VARIABLE	VALOR	UNIDADES	DESCRIPCIÓN
W_1	79,5	N	Peso tornillo sin fin
W_2	1097,7	N	Peso Modulo 1
W_{Total}	1177,2	N	Carga total sobre Modulo 2
E	200	GPa	Módulo elasticidad acero 1045
$\sigma_{Fluencia}$	530	MPa	Limite elástico acero 1045
$M_{m\acute{a}x}$	294,25	Nm	Momento máximo
Z	1,25	cm^3	Módulo resistente plástico ángulo 1"x1/4"
$\sigma_{m\acute{a}x}$	235,4	MPa	Esfuerzo máximo
N	2,25		Factor de seguridad

La estructura de sujeción, en este caso, es un poco más grande en comparación con la del módulo

1. De igual forma, cuenta con un sistema de encaje para el ajuste y sujeción entre módulos.

Figura 45. Detalles de sujeción del módulo 2.

Nombre de sujeción	Imagen de sujeción	Detalles de sujeción			
Fijo-1		Entidades:	1 cara(s)		
		Tipo:	Geometría fija		
Fuerzas resultantes					
Componentes	X	Y	Z	Resultante	
Fuerza de reacción(N)	0,59599	1.569,65	-0,121576	1.569,65	
Momento de reacción (N.m)	0	0	0	0	

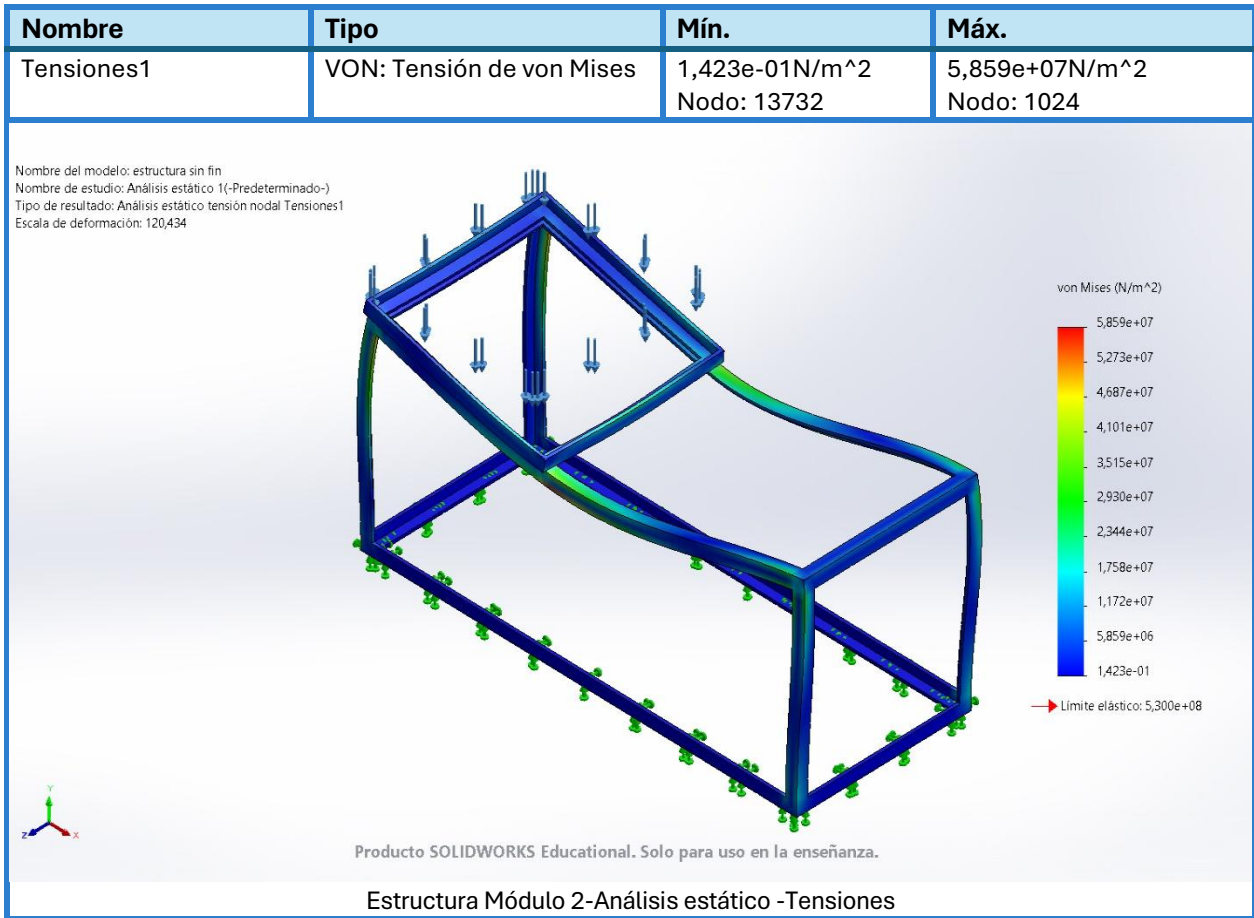
La carga recae únicamente en la zona donde se encaja el módulo 1 como se aprecia en la figura 46.

Figura 46. Detalles de carga distribuida del módulo 2.

Nombre de carga	Cargar imagen	Detalles de carga			
Fuerza-1		Entidades:	1 cara(s)		
		Tipo:	Aplicar fuerza normal		
		Valor:	1.569,6 N		

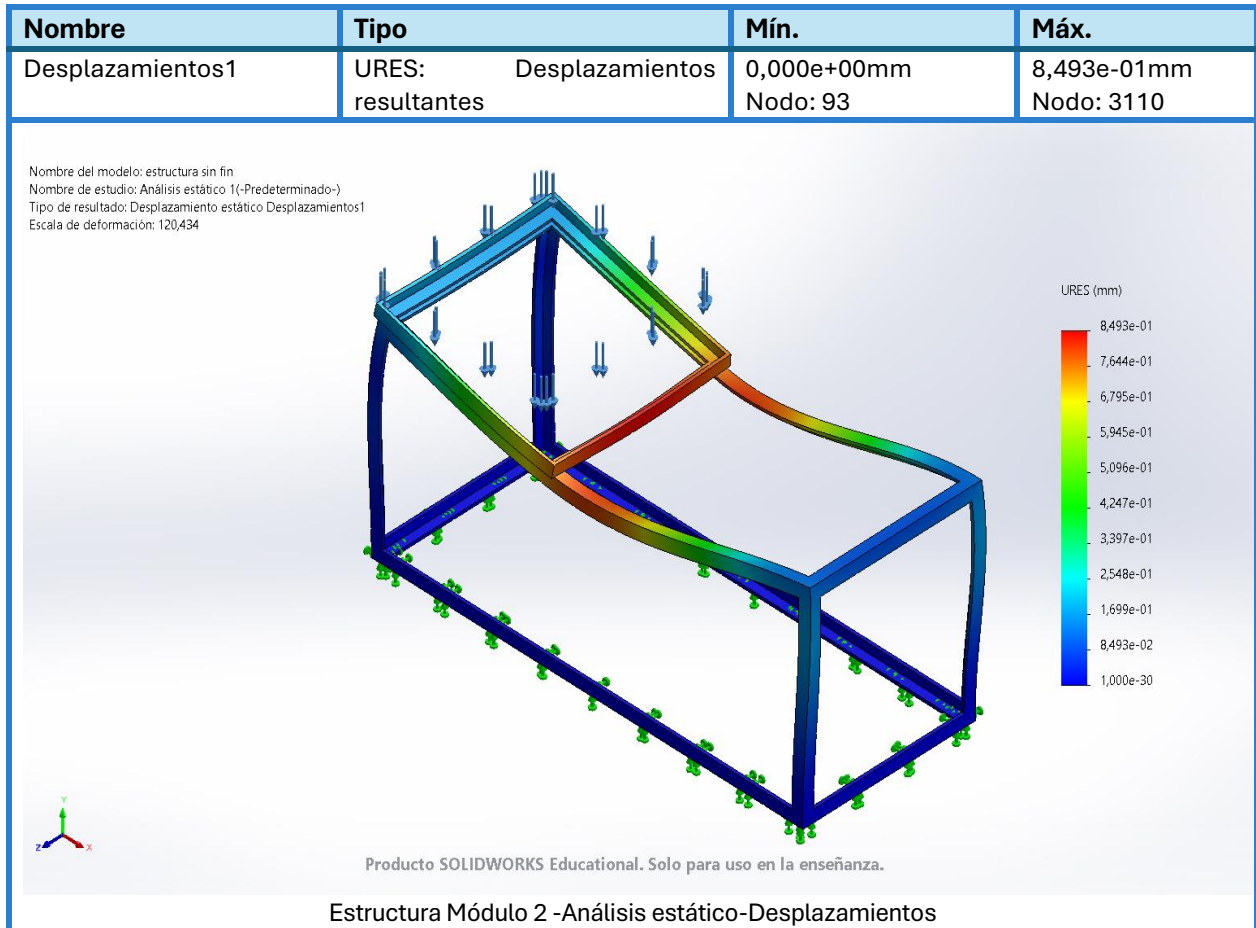
Las tensiones resultantes obtenidas en el estudio se encuentran muy por debajo del límite elástico del material.

Figura 47. Tensión de Von Mises del módulo 2.



Los desplazamientos resultantes en este módulo son ligeramente más elevados, alcanzando un máximo de 0,8493 mm. Esto se debe a que el módulo tiene una mayor longitud, lo que permite que el material tienda a flectar.

Figura 48. Desplazamientos resultantes del módulo 2.



5.7.4. Diseño tornillo sin fin

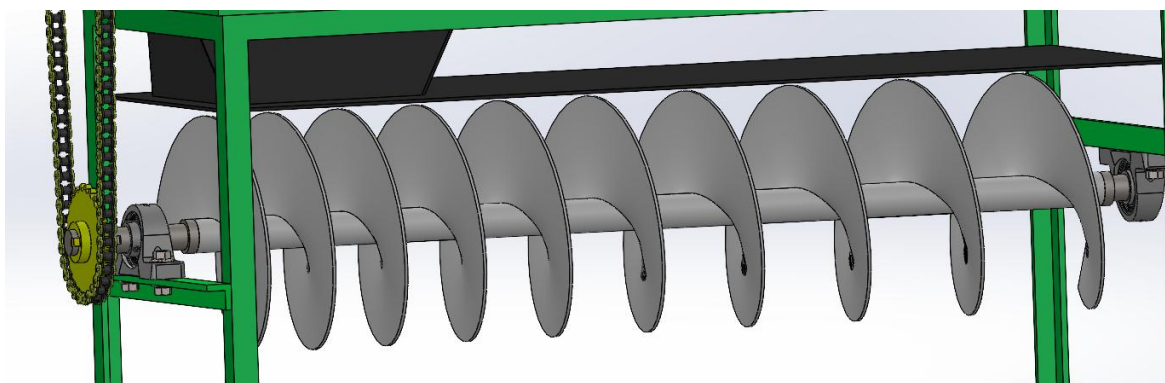
El tornillo sin fin está compuesto por cuatro partes: dos puntas de eje, un tubo de 1" calibre 14 y diez espiras cortadas y soldadas en forma de espiral, que conforman el tornillo. La punta del lado motriz, donde se encuentra el piñón de transmisión de potencia, tiene una longitud de 23 cm, de los cuales 12 cm sobresalen hacia el exterior. En esta sección se apoya la chumacera, colocada contra un tope escalonado en el eje de 1 ¼", ubicado a 12 cm de la punta.

Los otros 12 cm de la punta se encuentran en el extremo opuesto, introducidos dentro del tubo de 1". Esta unión se refuerza mediante dos tornillos pasantes de ½", colocados perpendicularmente, que fijan la punta del sin fin al tubo. Adicionalmente, la punta está soldada al tubo utilizando soldadura 6013.

El tubo tiene una longitud de 94 cm. La otra punta del sin fin presenta 5 cm de lado libre, 1 cm de escalón a 1 ¼" y 12 cm que también se insertan en el tubo. Las espiras fueron fabricadas con

láminas de acero 1045 de 1/8” de espesor, cortadas en forma de círculos y unidas en espiral utilizando soldadura 6013, para luego ser soldadas al tubo, completando así la construcción del tornillo sinfín, ver figura 42 para entender con más detalle el diseño realizado.

Figura 49. Tornillo sin fin.



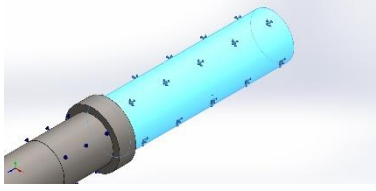
A continuación, en la tabla 15 se presentan las cargas y reacciones que actúan sobre el tornillo sinfín.

Tabla 15. Cargas y reacciones dadas por el tornillo sin fin.

TORNILLO SIN FIN			
ECUACIONES			
$T = \frac{9550 * P}{n} \quad J = \frac{\pi}{32} d^4 \quad \tau = \frac{T * r}{J} \quad w = \frac{W_{Sin\ fin}}{L} \quad R = \frac{w * L}{2}$			
VARIABLE	VALOR	UNIDADES	DESCRIPCIÓN
T	19,1	Nm	Torque en el sin fin
J	32575	mm ⁴	Momento polar de inercia
r	12,7	mm	Radio eje puntas del sin fin
τ	7,44	MPa	Módulo resistente a torsión
L	0,94	m	Longitud del tubo
N	71,2		Factor de seguridad
$W_{Sin\ fin}$	79,46	N	Peso total del sin fin
w	84,53	N/m	Carga distribuida sobre el tubo
R1 y R2	39,73	N	Reacciones en las chumaceras

Para el estudio se analizan las puntas macizas del sinfín, ya que constituyen los elementos clave de esta pieza mecánica. En la figura 50 se observa la sujeción a través de una chumacera.

Figura 50. Detalles de sujeción en puntas del tornillo sin fin.

Nombre de sujeción	Imagen de sujeción	Detalles de sujeción		
Fijo-1		Entidades: 1 cara(s) Tipo: Geometría fija		
Fuerzas resultantes				
Componentes	X	Y	Z	Resultante
Fuerza de reacción(N)	-225,751	0,560684	-0,35419	225,752
Momento de reacción (N.m)	0	0	0	0

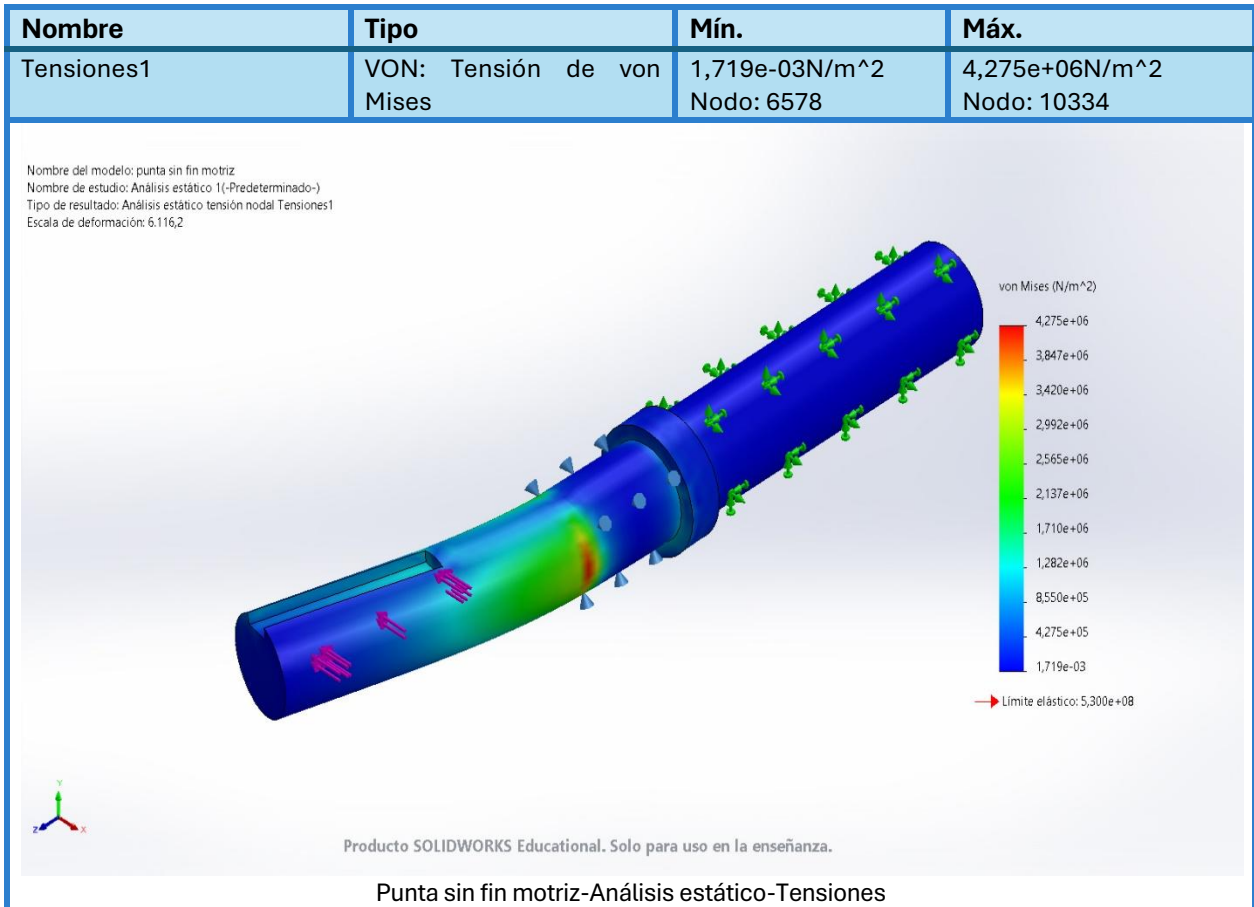
Se detalla en la figura 51, la carga existente en la punta de eje del sin fin, en este caso el momento torsor aplicado sobre el eje.

Figura 51. Detalles de carga distribuida en puntas del tornillo sin fin.

Nombre de carga	Cargar imagen	Detalles de carga		
Fuerza-1		Entidades: 1 cara(s) Tipo: Aplicar fuerza normal Valor: 79,46 N		

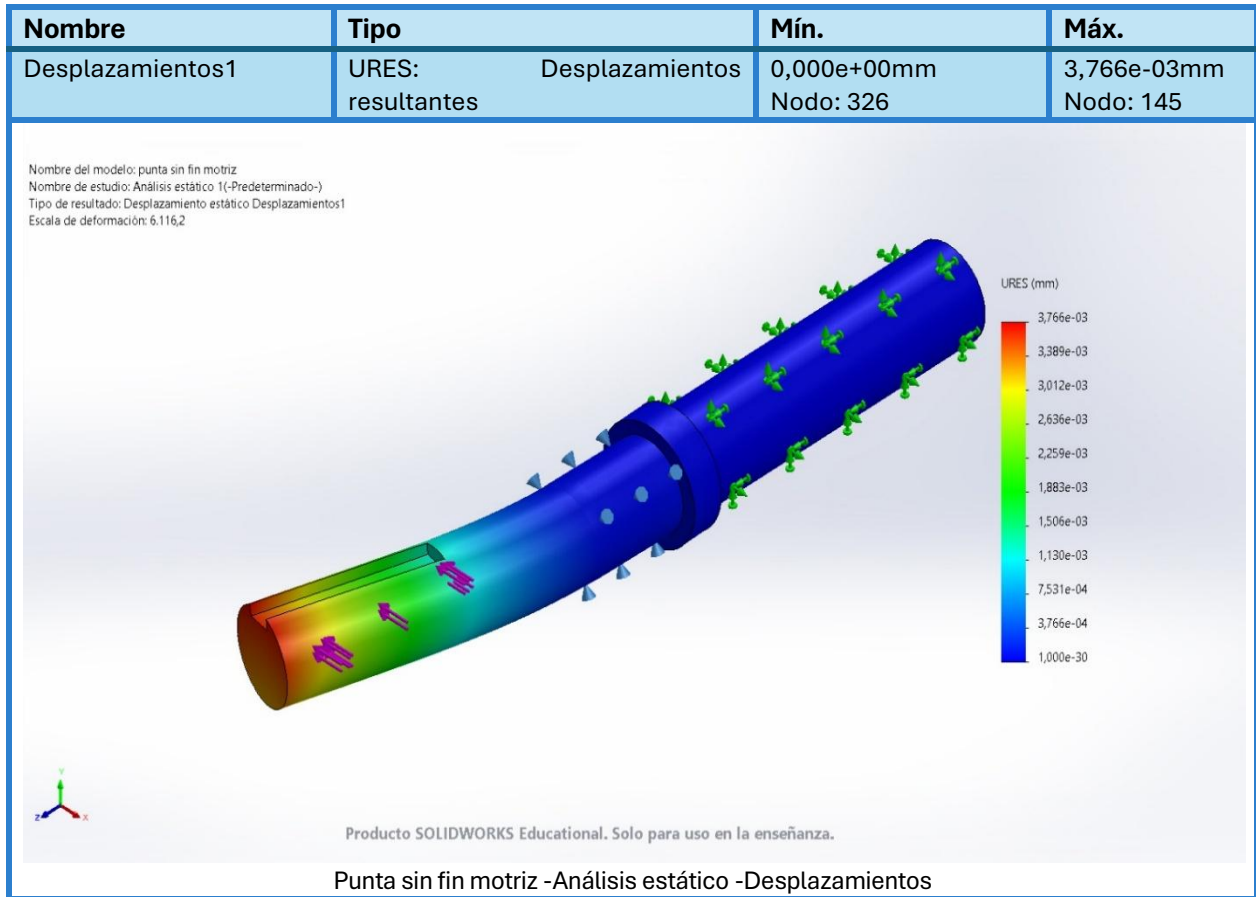
El estudio se llevó a cabo en la punta del sinfín donde se ubica el piñón encargado de transmitir la potencia, ya que es el extremo que recibe la mayor carga y esfuerzo. Los resultados, presentados en la figura 52, muestran que la tensión máxima se mantiene por debajo del límite elástico del material.

Figura 52. Tensión de Von Mises en puntas del tornillo sin fin.



Los desplazamientos en la punta del eje fueron mínimos, satisfaciendo en gran medida el diseño propuesto.

Figura 53. Desplazamientos resultantes en puntas del tornillo sin fin.

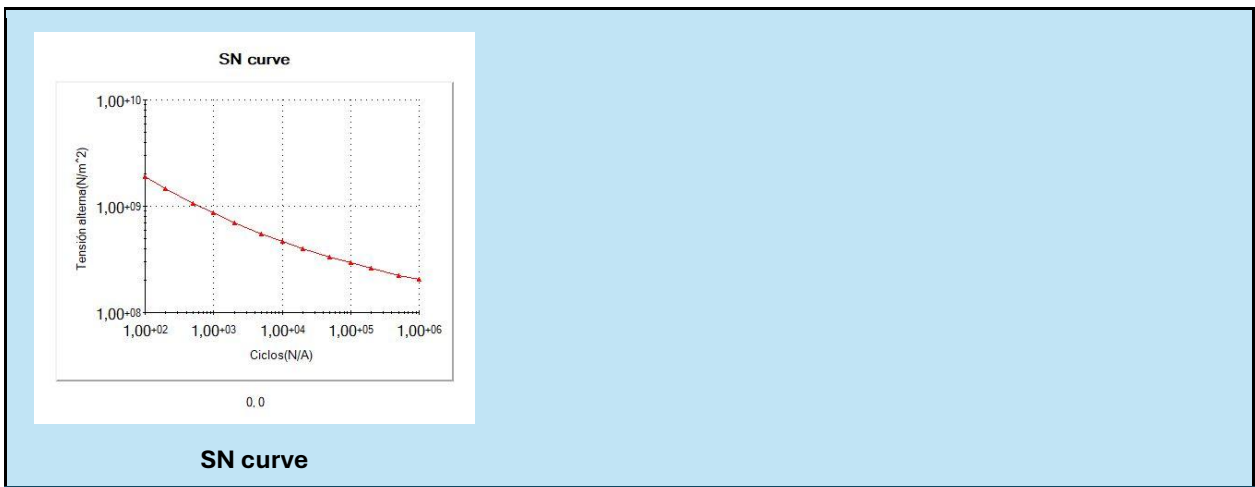


5.7.5. Análisis de fatiga punta sin fin motriz

A continuación, se presentan las propiedades de la punta del sinfín motriz utilizadas para el modelamiento del estudio de fatiga.

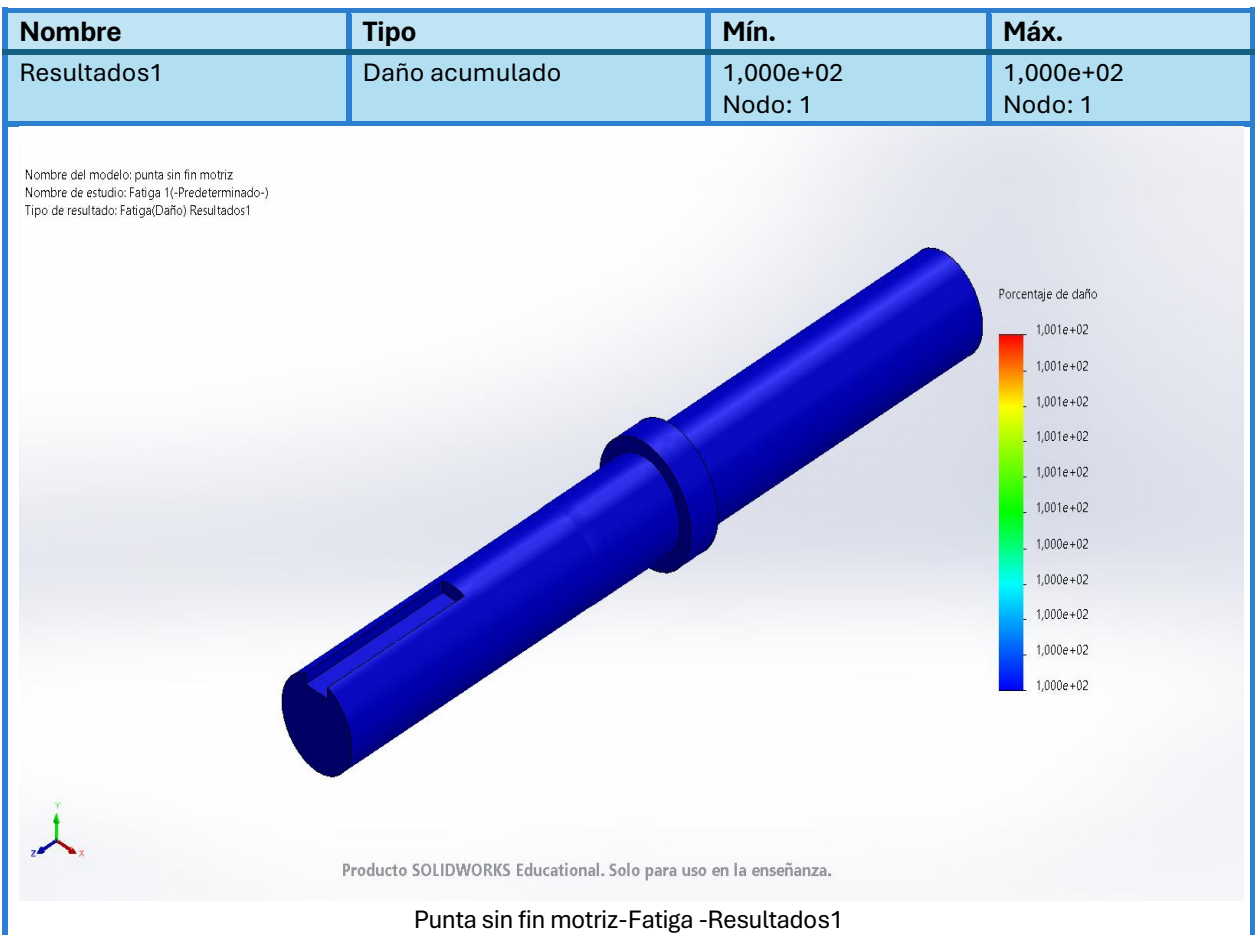
Figura 54. Propiedades del modelo punta sin fin motriz.

Referencia de modelo	Propiedades	Componentes
	Nombre: AISI 1045 Acero estirado en frío Tipo de modelo: Isotrópico elástico lineal Criterio de error predeterminado: Tensión de von Mises máx.	Punta sin fin motriz
Datos de curva:		



En la Figura 55 se presenta el daño acumulado en el eje de la punta del sinfín motriz, resultado obtenido a partir del análisis de fatiga realizado en el software de simulación.

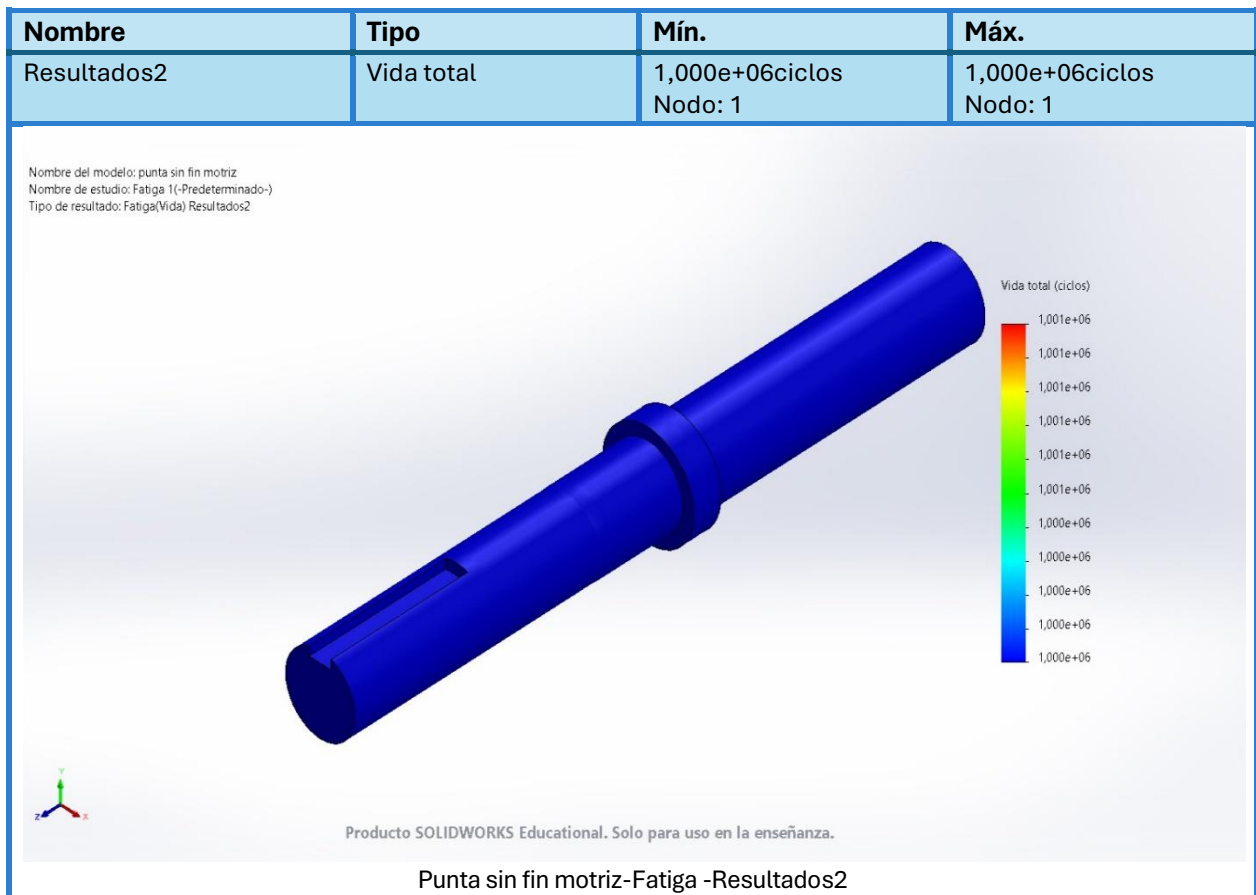
Figura 55. Análisis de fatiga daño acumulado, punta sin fin motriz.



Por último, en la Figura 56 se presenta el análisis de vida total de la punta del sinfín motriz,

mediante el cual se estimó su durabilidad bajo condiciones de carga cíclica.

Figura 56. Análisis de fatiga vida total, punta sin fin motriz.



5.8. ESTRUCTURA MÓDULO 3 (BASE DE LA MÁQUINA)

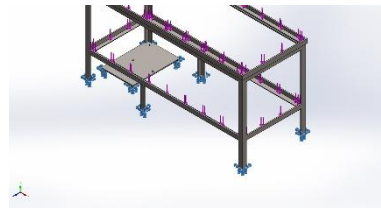
La estructura del módulo 3 fue el elemento más propenso a presentar deformaciones, ya que sobre ella recaían las cargas de los módulos 1 y 2. Por esta razón, el módulo fue reforzado para garantizar su rigidez. El material utilizado correspondió a acero estructural ASTM A36 laminado en caliente (HR), empleado comúnmente en perfiles angulares por su buena resistencia mecánica, soldabilidad y facilidad de conformado. Este acero presenta un límite elástico cercano a 250 MPa y una resistencia a la tracción entre 400 y 550 MPa, lo que lo hace adecuado para soportar los esfuerzos del sistema. En la Tabla 16 se presentan las cargas y esfuerzos que actuaron sobre el módulo.

Tabla 16. Cargas distribuidas presentes en el módulo 3.

CARGAS DISTRIBUIDAS EN EL MÓDULO 3			
ECUACIONES			
	$R = \frac{W_{Total}}{6}$	$M_{m\acute{a}x} = \frac{qL^2}{8}$	$\sigma = \frac{M}{Z}$
VARIABLE	VALOR	UNIDADES	DESCRIPCIÓN
$W_{superior}$	2452,5	N	Peso total Módulo 1 y 2
W_{Tanque}	117,72	N	Peso tanque de filtrado
W_{Total}	2570,2	N	Carga total sobre el Módulo 3
R	428,37	N	Peso que soporta cada pata
VERIFICACIÓN RESISTENCIA DE ÁNGULO L 1"x 1/4"			
A	322,58	mm ²	Área del ángulo
Z	30	mm ³	Módulo de sección
σ_y	250	Mpa	Límite de Fluencia de Acero A36
q	2452,5	N/m	Carga Distribuida en travesaños horizontales
L	1	m	Largo del ángulo
$M_{m\acute{a}x}$	306,6	Nm	Momento máximo en viga
σ	102,2	MPa	Esfuerzo máximo
N	2,45		Factor de seguridad
σ_{patas}	1,33	MPa	Esfuerzo máximo en cada pata

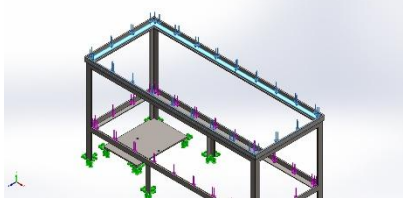
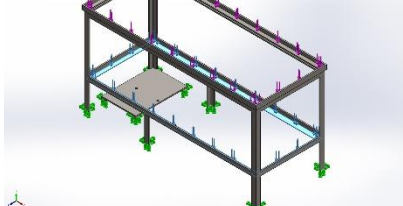
La sujeción del módulo 3 se logra mediante el propio peso de la máquina, lo que garantiza su estabilidad y anclaje al piso, evitando así vibraciones.

Figura 57. Detalles de sujeción del módulo 3.

Nombre de sujeción	Imagen de sujeción	Detalles de sujeción		
Fijo-1		Entidades: 9 cara(s) Tipo: Geometría fija		
Fuerzas resultantes				
Componentes	X	Y	Z	Resultante
Fuerza de reacción(N)	-0,0664043	2.570,34	-0,065083	2.570,34
Momento de reacción (N.m)	0	0	0	0

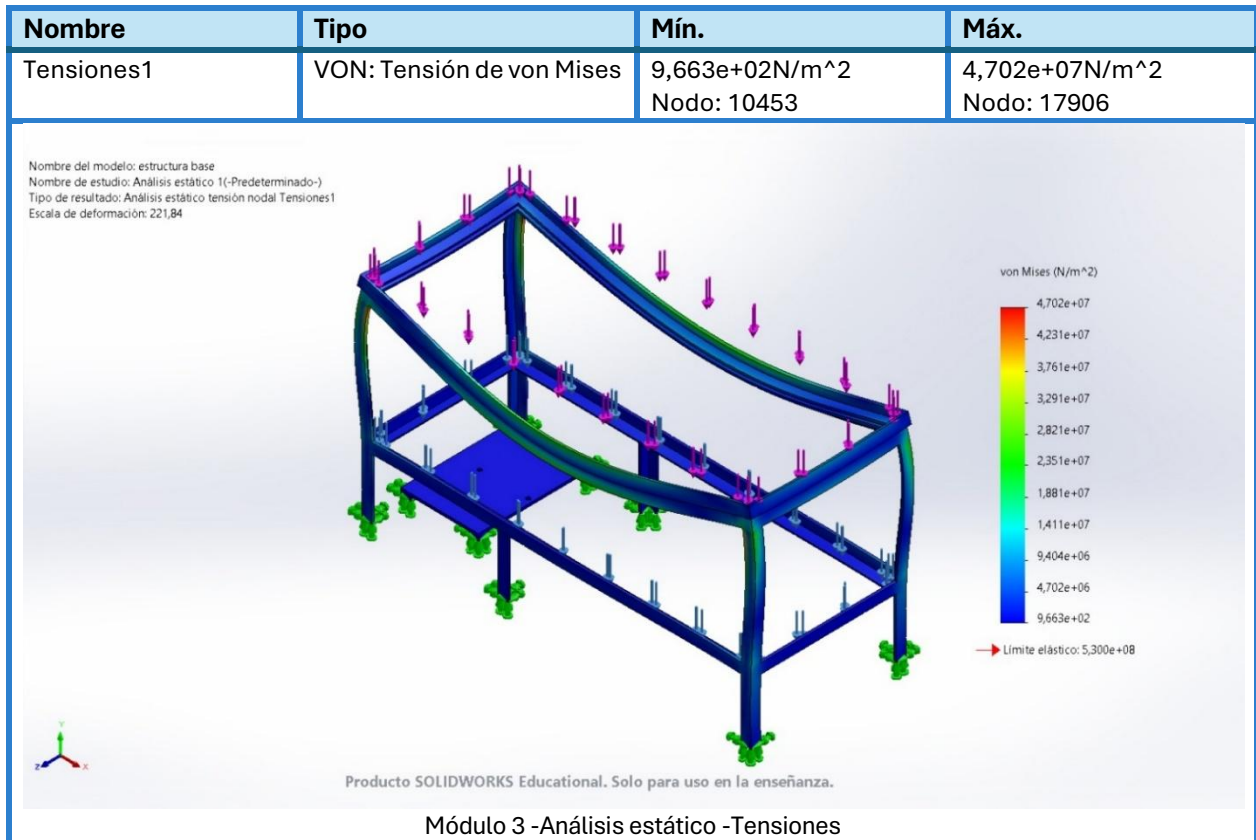
La carga que soporta el módulo recae sobre el cuadro de ángulos superior, donde reposan los módulos superiores.

Figura 58. Detalles de carga distribuida del módulo 3.

Nombre de carga	Cargar imagen	Detalles de carga
Fuerza-1		Entidades: 1 cara(s) Tipo: Aplicar fuerza normal Valor: 2.452,5 N
Fuerza-2		Entidades: 1 cara(s) Tipo: Aplicar fuerza normal Valor: 117,72 N

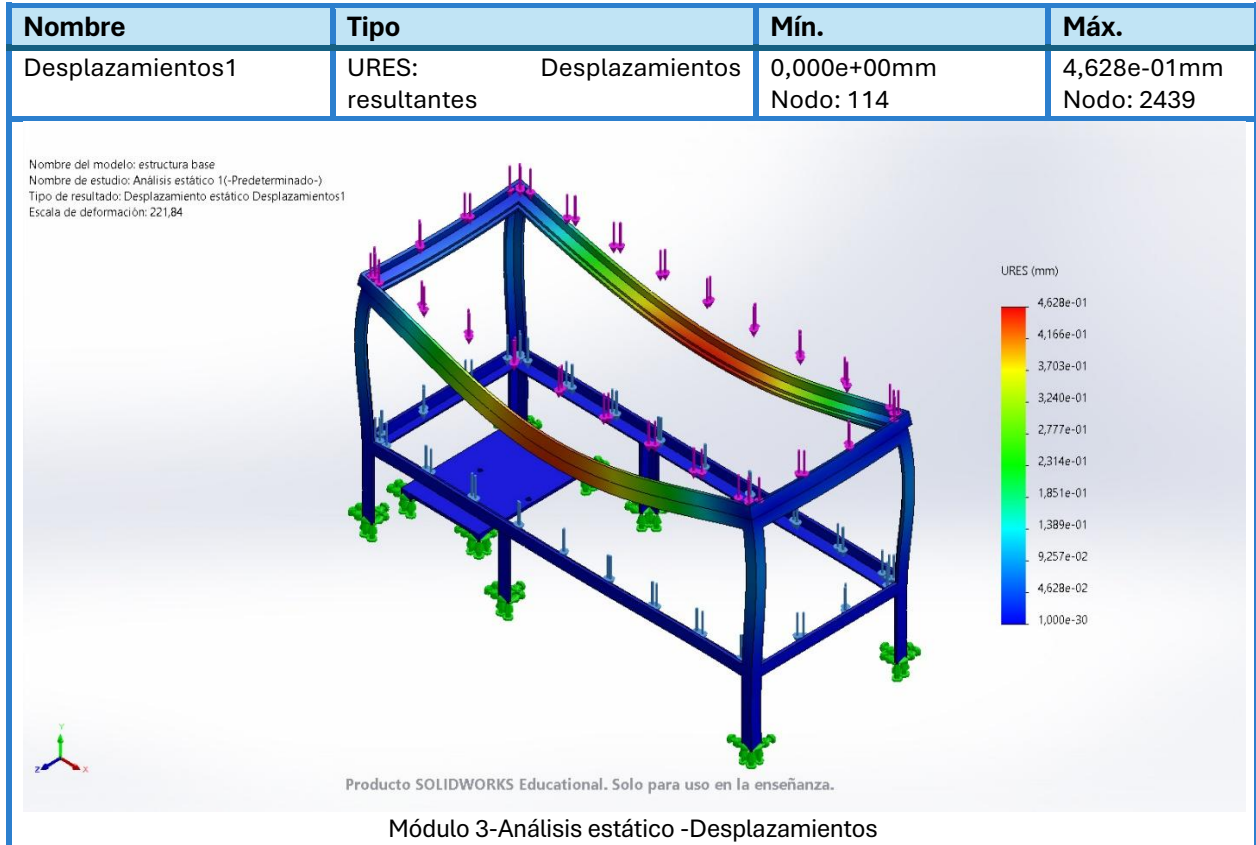
Como se aprecia en la figura 59, las tensiones no exceden el límite elástico y se mantienen al mínimo gracias al diseño y refuerzos en la estructura.

Figura 59. Tensión de Von Mises del módulo 3.



No se perciben irregularidades en los desplazamientos resultantes, manteniéndose dentro de márgenes bajos y con una deformación mínima.

Figura 60. Desplazamientos del módulo 3.



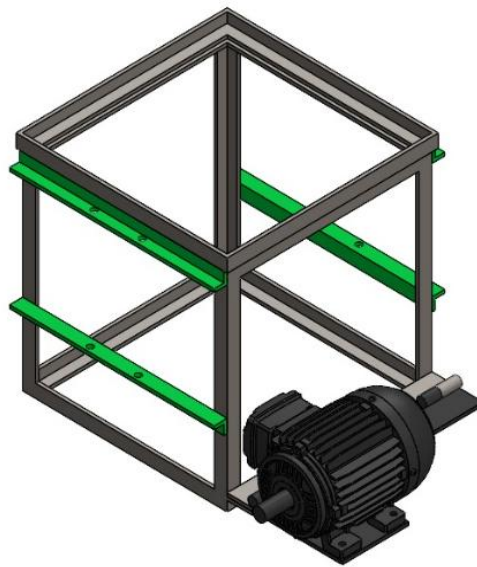
5.9. ANALISIS DE FRECUENCIA NATURAL

La realización del análisis de vibraciones en la estructura fue fundamental, ya que permitió conocer cómo respondía ante fuerzas externas, como cargas dinámicas, impactos o el funcionamiento de los motores. Este estudio ayudó a identificar las frecuencias naturales de la estructura, aspecto clave para evitar la resonancia, puesto que, si la máquina operaba a una frecuencia cercana a una de estas, las vibraciones podían amplificarse y causar daños graves o fallas por fatiga. En el diseño de la máquina, el análisis de vibraciones permitió optimizar la geometría y los materiales de sus componentes, haciéndola más estable, reduciendo el desgaste, el ruido y mejorando su desempeño general.

Se realizó un análisis de vibraciones con ayuda del software SolidWorks, en el cual se estudió la vibración producida por el motor en el módulo donde este se encontraba, como se muestra en la

Figura 52, ya que dichos elementos presentaban mayor movimiento y un pico de vibraciones durante el arranque del motor. Para consultar el estudio completo, véase el Anexo B: Análisis de frecuencia natural.

Figura 61. Módulo 1 y motor para analisis de vibraciones.



6. CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO

6.1. EJECUCIÓN: ¿CÓMO SE HIZO?

Como se aprecia en la Figura 62, se definieron seis etapas para el desarrollo y construcción del prototipo. A su vez, dichas etapas se abordaron mediante tareas específicas, con el fin de que su realización fuera más organizada y efectiva.

Figura 62. Ejecución del desarrollo y construcción de prototipo.



6.2. ADQUISICIÓN DE MATERIALES Y COMPONENTES

Uno de los aspectos más importantes durante la construcción del prototipo fue la adquisición de los materiales y componentes necesarios para su fabricación, procurando obtener materiales de buena calidad al menor costo posible. En este contexto, se entiende por materiales de buena calidad aquellos que presentan adecuadas propiedades mecánicas, buena resistencia al desgaste, facilidad de mecanizado y compatibilidad con los procesos de fabricación, garantizando así un desempeño confiable durante las pruebas

No obstante, debido a que se trató de un prototipo experimental, se buscó optimizar los costos de construcción. Por ello, se adquirieron herramientas y materiales en ferreterías confiables, como electrodos para soldadura, herramientas para torno, discos de corte, ángulos de acero y tornillos de diferentes tamaños, con el fin de asegurar que el proceso de ensamblaje fuera eficiente y duradero. Complementariamente, se decidió buscar materiales de segunda mano en compraventas, almacenes de ocasión y chatarrerías, con el propósito de reducir los costos del proyecto. En estos lugares fue posible encontrar piezas metálicas, bombas de agua, poleas de aluminio, soportes, chumaceras y otros componentes que, tras una revisión y limpieza exhaustiva, resultaron funcionales y seguros para su uso en el prototipo. Este proceso requirió una evaluación cuidadosa, verificando que los elementos no presentaran daños estructurales ni desgaste excesivo.

Cabe destacar que, para la construcción de la máquina destinada a producción en masa, se seleccionarán exclusivamente materiales nuevos y de la mejor calidad, es decir, aquellos certificados bajo normas industriales, con mayor durabilidad, resistencia y uniformidad, a fin de garantizar la fiabilidad, seguridad y vida útil del equipo.

6.3. FABRICACIÓN Y MONTAJE DEL PROTOTIPO

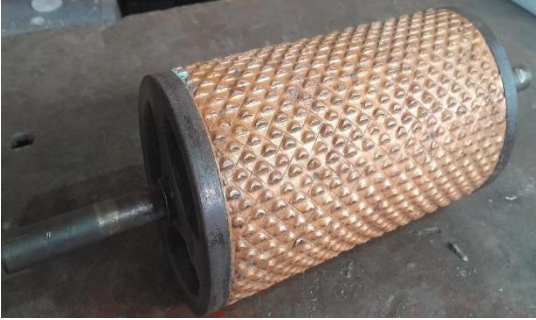
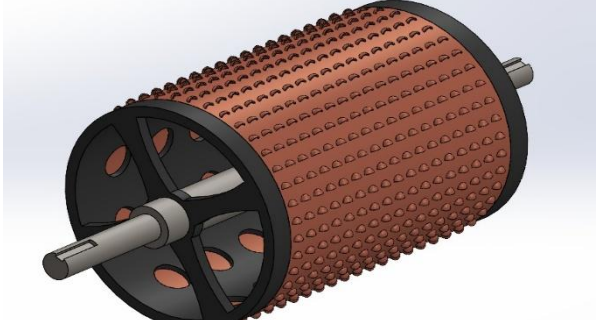
La construcción del prototipo se llevó a cabo en un taller de metalmecánica de la familia Bueno, quienes nos brindaron su apoyo y facilitaron el uso de todas las herramientas con las que cuentan. Las herramientas utilizadas en el proyecto incluyeron un torno convencional, taladro de banco, taladro de mano, pulidora, equipo de soldadura, entre otras. En el anexo C se presentan los equipos utilizados en la construcción, así como las piezas y componentes que conforman la máquina en su totalidad, además de algunos procesos de fabricación de dichas piezas.

6.4. HOJAS DE RUTA

Las hojas de ruta en la construcción de la máquina sirvieron para planear, organizar y mantener bajo control todo el proceso, desde el diseño hasta la fabricación y el armado final. En esencia, permitieron que cada etapa se desarrollara en orden, de manera eficiente y dentro del tiempo y los recursos disponibles. A continuación, se presentan las hojas de ruta de las piezas más complejas de la máquina, con el propósito de facilitar su construcción y evitar errores durante el ensamble final.


6.4.1. Hoja de ruta para construcción del tambor despulpador

Tabla 17. Hoja de ruta del tambor despulpador.

Hoja de ruta de construcción		Fecha: 10/03/2025	
Subensamble 002		Nombre de pieza: Tambor despulpador	
			
Item	Operación	Maquina y/o herramienta	Tiempo de operación (min)
1	Fabricación del tambor, fundición gris	Fábrica de fundición por moldeo	120
2	Mecanizado, Rectificado de medidas al tambor, diámetro y longitud	Torno convencional	35
3	Compra de camisa dentada de Cobre	Ferretería de maquinaria agrícola	15
4	Ensamble de camisa sobre el tambor, con remaches y puntillas	Remachadora, martillo	25
5	Compra de eje redondo SAE 1045 de 1 pulgada de diámetro	Ferretería todo bronces	15
6	Mecanizado de eje y cuñeros	Torno convencional	60
7	Ensamble de eje y tambor despulpador	Flexómetro	20

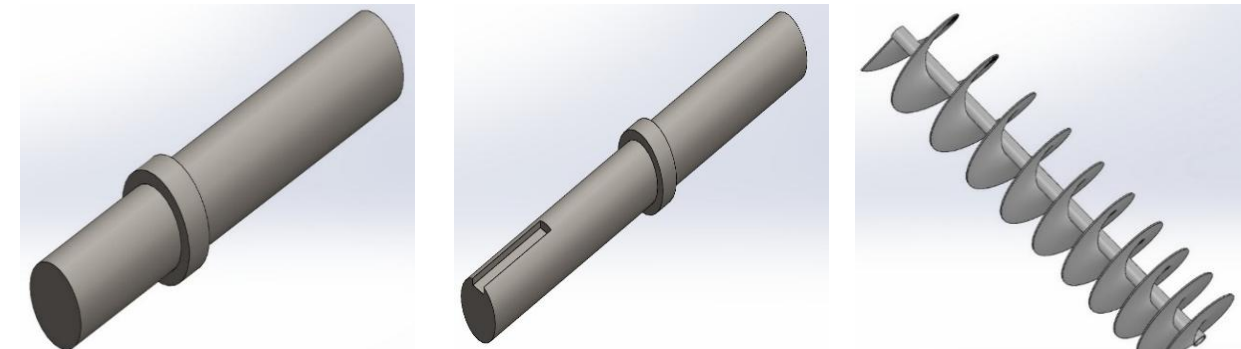
6.4.2. Hoja de ruta para construcción de piñón doble

Tabla 18. Hoja de ruta del piñón doble.

Hoja de ruta de construcción		Fecha: 10/03/2025	
Subensamble 001		Nombre de pieza: Piñon Doble	
			
Item	Operación	Maquina y/o herramienta	Tiempo de operación (min)
1	Compra de material, Disco macizo, eje redondo acero 1045 y piñonearía	Ferretería todo bronces	30
2	Mecanizado, dar ajustes para soldar moñón	Torno convencional	60
3	Mecanizado del moñón para soldar al disco	Torno convencional	30
4	Unir moñón y disco junto con los piñones, con soldadura	Equipo de soldadura, Furius mini fix	15
5	Acabados, pulido y pintura	Compresor, pistolas para pintar	35

6.4.3. Hoja de ruta para construcción del tornillo sin fin

Tabla 19. Hoja de ruta del tornillo sin fin.

Hoja de ruta de construcción		Fecha: 10/03/2025	
Subensamble 004		Nombre de pieza: Tornillo sin fin	
			
Item	Operación	Máquina y/o herramienta	Tiempo de operación (min)
1	Compra de materiales, tubo, eje redondo y lamina para discos de sinfin	Ferretería todo bronces	15
2	Corte de discos a la medida	Pulidora	120
3	Rectificado de discos	Torno convencional	120
4	Estirado de discos para el tornillo sin fin	Máquina de estirado de discos casera	60
5	Ajuste y soldada de espiras de sin fin	Equipo de soldadura, Furius mini fix	45
6	Mecanizado de puntas	Torno convencional	60
7	Ensamble de puntas, ajuste y pintura	Compresor, pistolas de pintura	30
8	Rectificado del tornillo completo	Torno convencional	25

En la Figura 63 se muestra el resultado del proceso de fabricación del tornillo sin fin, correspondiente a la hoja de ruta anterior.

Figura 63. Tornillo sin fin fabricado.



6.4.4. Hoja de ruta para la construcción de los filtros de agua recirculada

Tabla 20. Hoja de ruta para el filtro.

Hoja de ruta de construcción		Fecha: 10/03/2025	
Subensamble 003		Nombre de pieza: Filtro	
Item	Operación	Maquina y/o herramienta	Tiempo de operación (min)
1	Compra de materiales, Angulo de 1 x 3/16 pulgadas	Ferretería Agrotodo	15
2	Corte de ángulos a la medida con puntas a 45°	Pulidora	25
3	Soldar el cuadrante del filtro, soldadura 6013	Equipo de soldadura, Furius mini fix	15
4	Perforaciones para sujeción de malla de filtrado	Taladro	25
5	Pulido y pintura de la estructura	Compresor, pistolas de pintura	30
6	Sujeción de malla de filtrado, con remaches	Remachadora	15

7. PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO Y CALIDAD

7.1. EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD DE CAFÉ DESCEREZADO

Para realizar las pruebas de funcionamiento de la máquina, se efectuó una búsqueda exhaustiva en los alrededores de la zona metropolitana de Bucaramanga, hasta conseguir una muestra de café de 2 arrobas en la vereda Rosa Blanca, km 15 vía Cúcuta. Esta labor resultó algo compleja, ya que los cultivos no se encontraban en cosecha en la fecha de las pruebas; solo había algunos frutos maduros por ser el inicio del ciclo, etapa que los caficultores denominan coloquialmente pepiado del cultivo. Por esta razón, la muestra de café utilizada no corresponde a la mejor calidad y presenta un ligero porcentaje de frutos verdes y pintones. Inicialmente se toman muestras por peso de aproximadamente 12,5 lb de café con ayuda de una balanza.

Figura 64. Café pesado para despulpar.



Los resultados obtenidos se presentan en la tabla 21, a partir de los cuales se determina la capacidad de procesamiento de la máquina. Para ello, se realizó un muestreo mediante tomas de tiempo en las que se registró el paso de cada porción de café durante el proceso de despulpado, obteniéndose finalmente una capacidad de procesamiento promedio de 320,8 kg/h de café cereza.

Tabla 21. Resultados de capacidad de procesamiento de la máquina.

Muestra	Peso de cereza ingresado (lb)	Tiempo de despulpado (min)	Capacidad de despulpado (lb/min)	Capacidad en (Kg/h)
1	12,5	1	12,5	340,1946821
2	12,5	1,12	11,16071429	303,7452519
3	12,5	0,99	12,62626263	343,630992
4	12,5	1,15	10,86956522	295,8214627
Prom.	12,5	1,065	11,78913553	320,8480972

7.2. EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DE ENTREGA DEL GRANO

La evaluación de la calidad del despulpado se realizó teniendo en cuenta los parámetros establecidos por la norma ICONTEC 2090, la cual indica que el café despulpado debe cumplir con las siguientes características dadas en porcentajes (en peso):

Tabla 22. Parámetros de calidad de despulpado.

ANÁLISIS DE CALIDAD DE DESPULPADO	
Pulpa en el café despulpado	< 2%
Granos sin despulpar	< 1%
Granos mordidos	< 0.5%
Granos trillados	< 0.5%

Fuente: AMADOR, Pedro Enrique. Fundamentos del beneficio del café. Chinchiná: Cenicafé, 2009. 116 p. ISBN 978-958-44-3879-5.

Una vez el café pasa por el sistema, se evalúa su calidad de despulpado. Para ello, se toma la salida de cada muestra y se examina de manera visual y al tacto. Posteriormente, se separa la pulpa que ha ingresado al módulo de lavado con el fin de determinar su porcentaje y verificar si cumple con lo establecido en la norma.

Figura 65. Salida de café del sistema.



Concluida la evaluación del primer parámetro, se procede a analizar los demás con la muestra ya más limpia y clasificada, con el fin de identificar los granos que no fueron despulpados, los que resultaron mordidos o trillados durante el proceso, y determinar cómo corregir estos errores mediante el ajuste de la pechera.

Finalmente, se evaluó la calidad de lavado del sistema, la cual se determinó mediante una inspección visual y al tacto realizada por un operario, verificando que no quedaran residuos de mucílago en el café pergamino y que se observara el color característico de un grano bien lavado: un tono beige claro o amarillento uniforme, indicativo de limpieza y ausencia de impurezas.

Figura 66. Muestra de café despulpado y lavado.



Se realiza una inspección cuidadosa de la cáscara y los residuos que salen del proceso de despulpado, con el objetivo de verificar que no se esté perdiendo café pergamino junto con los desechos. Esta revisión permite asegurar que la pechera tenga el ajuste correcto, ya que un mal calibrado puede provocar que granos enteros o parcialmente despulpados se mezclen con la pulpa y sean desechados por error. De esta manera, se garantiza un mejor aprovechamiento del café procesado y se reduce al mínimo la pérdida del producto.

Figura 67. Pulpa de café cereza después del proceso de descerezado.



Al final del proceso, se obtiene un café despulpado y lavado de buena calidad, con una producción rápida por parte de la máquina.

Figura 68. Café despulpado y lavado obtenido.



Se realiza el pesaje del café lavado, obteniendo como resultado que por cada arroba de café cereza se obtiene aproximadamente un 42,95 % de café pergamino listo para iniciar el proceso de secado. Esto significa que por cada 11,502 kg de café cereza se obtienen 4,94 kg de café húmedo listo para secar.

Figura 69. Café pergamino pesado después del lavado.



Una vez se secó el café, el peso final del producto completamente procesado fue de 2,06 kg de café pergamino seco, listo para su venta, con un contenido de humedad de aproximadamente 10–12 %, cumpliendo lo establecido en la Norma Técnica Colombiana NTC 2441.

Figura 70. Café pergamino seco.



Para aprovechar en su totalidad los residuos o pulpa del café, estos se reutilizan como abono orgánico en los mismos cultivos de café. Después del proceso de despulpado, la pulpa se recoge y se lleva a zonas de compostaje o directamente al campo, donde se descompone de forma natural y enriquece el suelo con nutrientes. Este aprovechamiento no solo reduce los desechos del proceso, sino que también contribuye a una producción más sostenible y amigable con el medio ambiente, cerrando el ciclo productivo del café de manera eficiente.

Figura 71. Aprovechamiento de la pulpa de café cereza.



7.2.1. Consumo hídrico Para el procesamiento de café cereza con el método tradicional, que incluía el lavado del grano y su fermentación natural, “se utilizan entre 40 y 50 litros de agua por kilogramo de café cereza.”⁶ Este consumo resulta bastante alto y poco sostenible. Con el sistema prototipo diseñado, el gasto de agua se redujo considerablemente, ya que solo se requirieron alrededor de 7 litros por kilogramo de café cereza, lo que representó un ahorro significativo e hizo que el proceso fuera mucho más eficiente y amigable con el medio ambiente.

A continuación, se presenta la placa de la bomba utilizada para la realización del prototipo, en la

⁶ Cenicafé. Beneficio del café [Libro]. Pereira, Colombia: Centro Nacional de Investigaciones de Café (Cenicafé); Año de publicación. ISBN: [número ISBN]. Disponible en: https://www.cenicafe.org/es/publications/Final_libro_Beneficio_isbn.pdf

cual se mencionan las características más importantes de la misma.

Figura 72. Placa de información de la Bomba.



Con la captación del agua usada en el sistema de lavado, junto con su filtrado y la separación de partículas, se diseñó un sistema de filtrado de líquidos con presencia de sólidos finos, como residuos de pulpa o pequeñas partículas de café. En este caso, y como se muestra en la tabla 23, se buscó recuperar hasta un 80 % del agua utilizada, la cual pasa por un proceso de filtrado de tres niveles para eliminar impurezas y residuos. Al mismo tiempo, el agua recuperada se mezcló con un 20 % de agua limpia para mantener un balance adecuado en el lavado y evitar que el café se contamine o pierda sus propiedades al usar únicamente agua reciclada. Este sistema permitió aprovechar mejor el recurso hídrico, y hacer el proceso de producción más sostenible sin afectar la calidad del producto.

Tabla 23. Consumo de agua por kilogramo de café cereza.

	Valor	Unidad
Consumo de Bomba	35	L/min
Agua recirculada	80	%
Agua Limpia	20	%
Consumo total agua limpia	7	L/min

8. EVALUACIÓN ECONÓMICA

Se realizó una evaluación económica del proyecto para determinar su viabilidad, con el fin de argumentar si se trata de una iniciativa que contribuya al desarrollo y beneficie a los pequeños caficultores del país, reduciendo costos e impulsando el valor del café al acelerar el nivel de producción.

Tabla 24. Lista de compras de materia prima e insumos.

MATERIA PRIMA E INSUMOS				
Planta de tratamiento de café				
DESCRIPCIÓN	CANT.	VAL. UNITARIO	VAL. TOTAL	
Angulo 1" X 3/16" de 6 m	5	\$	51.681	\$ 258.403
Disco T1 Corte 4 1/2" Sranley-10	15	\$	2.000	\$ 30.000
Grata Flap 4 1/2" G80 Thom King	6	\$	3.500	\$ 21.000
Soldadura 6013 Weld Alloy por Kg	5	\$	13.000	\$ 65.000
Vidrio De Soldar #11	1	\$	1.260	\$ 1.260
Mantenimiento Pulidora	1	\$	10.000	\$ 10.000
Chumaceras 1" Y 3/4"	6	\$	20.000	\$ 120.000
Disco Macizo Acero 1045	1	\$	42.000	\$ 42.000
Varilla Cuadrada 1"	1	\$	23.000	\$ 23.000
Tornillos, Tuercas, Arandelas	10	\$	2.000	\$ 20.000
Polea De Aluminio Tipo A 14" Y 2 1/2", Tensor	1	\$	50.000	\$ 50.000
Tubo De 1" 1/4"	1	\$	10.000	\$ 10.000
Bisagra Redonda 1/2"	2	\$	5.000	\$ 10.000
Tornillos Prisionero 8 MM	4	\$	800	\$ 3.200
Compota De Masilla	1	\$	5.000	\$ 5.000
Buril Barra Iso9 5/16"	1	\$	13.000	\$ 13.000
Buril Barra Iso9 1/4"	1	\$	12.000	\$ 12.000
Cable Calibre 12 (EN METROS)	9	\$	3.300	\$ 29.700
Tornillos 8 MM	26	\$	800	\$ 20.800
Tuercas Tipo Mariposa	15	\$	800	\$ 12.000
Bomba periférica Wolfox De 1/2 Hp	1	\$	120.000	\$ 120.000
Abrazaderas Pequeñas	2	\$	2.500	\$ 5.000

Abrazaderas Grandes	2	\$	7.500	\$	15.000
Abrazaderas Medianas	2	\$	5.000	\$	10.000
Abrazaderas Medianas-Grandes	2	\$	5.800	\$	11.600
Cinta Teflón	1	\$	1.500	\$	1.500
Mantenimiento Pulidora (Escobillas)	1	\$	15.000	\$	15.000
Depósitos, Tanques	2	\$	3.000	\$	6.000
Malla Acero Inox 304	1	\$	70.000	\$	70.000
Angulo 1 X 3/4	1	\$	21.000	\$	21.000
Pintura (Amarillo, Verde, Negro, Plateado)	1	\$	85.000	\$	85.000
Tiner 1 Gl	1	\$	25.000	\$	25.000
Tubería Y Accesorios Pvc	1	\$	59.000	\$	59.000
Tubería Y Accesorios Galvanizado	1	\$	135.200	\$	135.200
Lija Grano 120 Y 100	4	\$	1.100	\$	4.400
Café @	2	\$	60.000	\$	120.000
TOTAL DEL PROTOTIPO				\$	1.460.063
TOTAL MAQUINA				\$	4.600.000

Se determinan en la tabla 25 los distintos costos asociados a la producción y construcción que implicó la elaboración del prototipo. Adquisición de componentes, alquiler de herramientas adicionales, transporte, mano de obra y cualquier otro recurso necesario para llevar a cabo el proyecto. Esta información permite tener una visión más clara y completa del presupuesto total invertido en el desarrollo del prototipo.

Tabla 25. Costos de producción y construcción del prototipo.

OTROS COSTOS				
Planta de tratamiento de café				
DESCRIPCIÓN	CANT.	VAL. UNITARIO	VAL. TOTAL	
Torneado de piezas	3 horas	\$ 70.000	\$	210.000
Alquiler de Motor	1	\$ 80.000	\$	80.000
Transporte y Asesorías	89 días	\$ 20.000	\$	1.780.000
Ingeniería y Diseño	100 horas	\$ 18.400	\$	1.840.000
TOTAL			\$	3.910.000

Finalmente, se aprecia en la tabla 26 los costos totales del proyecto, dando como resultado \$9.361.000 COP, con el objetivo de realizar un estudio de viabilidad económica. Para ello, se

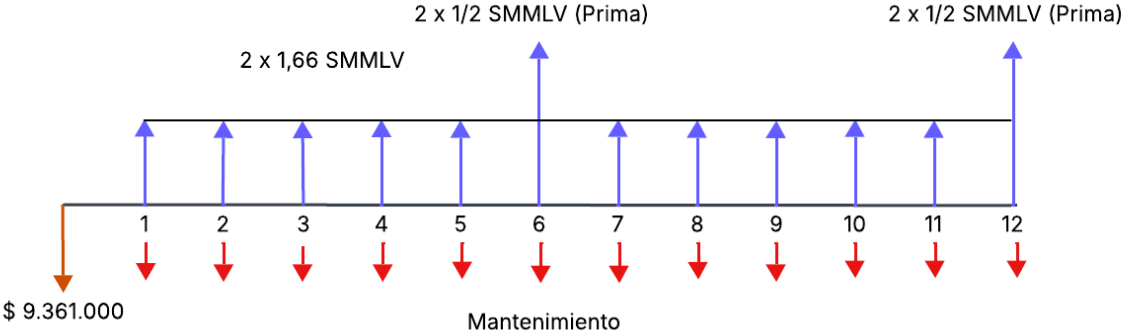
aplicaron herramientas de análisis financiero como el Valor Presente Neto (VPN) y la Tasa Interna de Retorno (TIR), que permiten evaluar si la inversión realizada en el prototipo es rentable a largo plazo.

Tabla 26. Costos totales del proyecto.

COSTOS TOTALES	
Planta de tratamiento de café	
DESCRIPCIÓN	VALOR
Materia Prima e Insumos	\$ 4.600.000
Otros Costos	\$ 3.910.000
SUBTOTAL:	\$ 8.510.000
Imprevistos 10%	\$ 851.000
TOTAL	\$ 9.361.000

Para el proceso de descerezado y lavado del café se requieren, como mínimo, tres empleados, a quienes se les paga un salario mínimo legal vigente, incluyendo todas las prestaciones de ley, como seguridad social, cesantías, primas y vacaciones. Este gasto representa una carga significativa para los pequeños caficultores, especialmente en épocas de cosecha, donde la demanda de mano de obra es mayor. Por consiguiente, con la implementación de la planta de tratamiento de café, se busca optimizar el proceso y reducirlo a una sola persona, lo que permite disminuir considerablemente los costos operativos, aumentar la eficiencia y facilitar el manejo del café en fincas de pequeña escala. En la figura 73 se aprecia el grafico de VPN, evaluando los flujos de caja resultantes de la disminución del personal.

Figura 73. Gráfico de VPN.



La tasa de interés utilizada para el análisis económico es del 14,97 % anual, la cual corresponde a

la ofrecida por Bancolombia para proyectos de libre inversión. Esta tasa fue seleccionada por ser la mínima posible disponible en el mercado financiero para este tipo de iniciativas. Su inclusión en el estudio permite realizar una evaluación más realista de la viabilidad del proyecto, considerando escenarios de financiamiento accesibles para pequeños productores o emprendedores del sector caficultor. A continuación, en la tabla 27 se aprecian los resultados obtenidos del estudio económico.

Tabla 27. Resultados de VPN y TIR

CÁLCULO DE VPN Y TIR			
ECUACIONES			
	$i_m = (1 + i_a)^{1/m} - 1$		$VP_i = VF / (1 + i_m)^m$
	$VPN = -I \pm \sum (VP_i)$		$VP_i = VF / (1 + TIR_{MENSUAL})^m$
VARIABLE	VALOR	UNIDADES	DESCRIPCIÓN
i_a	14,97	%	Tasa interés anual
m_a	1	Años	Periodo en años
m_m	12	Meses	Periodo en meses
i_m	1,169292	%	Tasa de interés mensual
I	5.907.070	COP	Inversión inicial
VPN	16.756.639,50	COP	Valor presente neto (VPN)
TIR	23	%	Tasa interna de retorno (TIR)

Con base en los resultados obtenidos a través del análisis del VPN y la TIR, se concluye que el proyecto es económicamente viable. Los indicadores muestran que genera utilidades por encima del costo del capital, lo que lo convierte en una inversión rentable. Además, representa una alternativa sostenible para los pequeños caficultores, ya que permite reducir costos operativos, optimizar procesos y aumentar la productividad. Esto justifica plenamente la inversión realizada en el prototipo.

9. CONCLUSIONES

Como resultado del desarrollo de este proyecto de grado, se construyó un prototipo a escala de una planta de tratamiento para café, el cual cumple con los objetivos propuestos y demuestra que sí es viable desde el punto de vista técnico, práctico y económico para ser usado por pequeños productores en zonas rurales.

1. Se diseñó una máquina modular que integra el proceso de despulpado con el lavado mecánico del café. Cada parte del sistema (tolva, tambor despulpador, sistema de lavado a presión y recirculación de agua) se pensó para que fuera fácil de armar y adaptar en diferentes lugares rurales. Durante el diseño se tuvieron en cuenta las necesidades reales de los caficultores, seleccionando materiales accesibles, de bajo costo y que pudieran funcionar con motores monofásicos o de combustión. Esto permitió crear una solución práctica, eficiente y ajustada a las condiciones de las zonas cafeteras en Colombia.

2. El prototipo se fabricó con materiales disponibles en el mercado nacional, pensando en que fuera resistente, fácil de mantener y que se pudiera replicar en el campo. Para el funcionamiento de la máquina se usó un sistema de poleas y correas conectado al motor, lo que ayuda a reducir costos de operación. Durante el montaje se comprobó que los módulos eran fáciles de ensamblar, compatibles entre sí y con buena estabilidad. También se revisaron aspectos como la comodidad para el usuario, la seguridad en la operación y el flujo del café dentro del equipo.

3. En las pruebas de funcionamiento, el prototipo procesó en promedio 320,8 kg/h de café cereza, cumpliendo con las metas planteadas en el diseño. El despulpado fue eficiente de acuerdo con los parámetros de la norma ICONTEC 2090 y el lavado logró eliminar el mucílago. Además, el sistema de recirculación permitió reducir notablemente el consumo de agua, aportando a la sostenibilidad ambiental. La máquina resultó sencilla de operar, con poco tiempo de mantenimiento requerido, lo cual la hace una opción práctica y accesible para pequeños caficultores. Los resultados muestran que este prototipo no solo es funcional, sino que también puede ser escalable para beneficiar a más productores en el país.

BIBLIOGRAFÍA

ALARCÓ LÓPEZ, Alicia. Modelo de gestión productiva para el cultivo de café (*Coffea arabica* L.) en el sur de Ecuador. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid; 2011.

ARCILA PULGARÍN, Jaime. Densidad de siembra y productividad de los cafetales. En: Sistemas de producción de café en Colombia. Chinchiná: Cenicafé; 2003. p. 132-133.

CENICAFÉ. Biblioteca digital [en línea]. Disponible en: <https://biblioteca.cenicafe.org/handle/10778/882> [Citado: 24 jul. 2025].

FARFÁN VALENCIA, Fernando; JARAMILLO ROBLEDO, Álvaro. Sombrío para el cultivo del café según la nubosidad de la región. Chinchiná: Cenicafé; 2009. (Revista Cenicafé). <https://doi.org/10.38141/10779/0379>.

FEDERACIÓN NACIONAL DE CAFETEROS. Nueva despulpadora para una caficultura competitiva [en línea]. Disponible en: <https://caldas.federaciondecafeteros.org/app/uploads/sites/11/2020/07/AVT0294-Nueva-despulpadora-para-una-caficultura-competitiva..pdf> [Citado: 24 jul. 2025].

FEDERACIÓN NACIONAL DE CAFETEROS DE COLOMBIA. Cartilla cafetera No. 1: establecimiento del cultivo. Bogotá: FNC; 2006.

FEDERACIÓN NACIONAL DE CAFETEROS DE COLOMBIA. Cartilla cafetera No. 19: recolección del café. Bogotá: FNC; 2008.

FEDERACIÓN NACIONAL DE CAFETEROS DE COLOMBIA. Guía tecnológica del cultivo del café. Bogotá: Federación Nacional de Cafeteros; 2006. p. 51-53.

IMBACHÍ QUINCHUA, Luis Carlos; MEDINA-RIVERA, Rubén Darío; SANZ-URIBE, Juan Rodrigo. Tamaño del grano despulpado en las nuevas variedades de café. *Revista Cenicafé*, 2023, vol. 74, no. 2, e74206. <https://doi.org/10.38141/10778/74206>.

INTERMEC. Cuñas y cuñeros estándar [en línea]. Disponible en: https://www.intermec.com.co/Pdf/cunas_y_cuneros_estandar.pdf [Citado: 24 jul. 2025].

LA PATRIA MANIZALES. ¿Cómo funciona la despulpadora de café? [en línea]. YouTube. Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=Pj7Z-f5vpKQ> [Citado: 24 jul. 2025].

LAGOS BURBANO, Tulio César; CRIOLLO ESCOBAR, Hernando; GARCÍA ALZATE, Javier; MUÑOZ BELALCAZAR, Johanna; LÓPEZ GÓMEZ, Julieth; BENAVIDES ARTEAGA, Viviana; DULCE DELGADO, Javier. El cultivo del café (*Coffea arabica* L.) en Nariño: cartilla divulgativa. San Juan de Pasto: Universidad de Nariño; 2019. ISBN: 978-958-8958-60-6.

LLORENTE ESPITIA, Carlos Alberto; VALERO VILLABONA, Anderson. Diseño y construcción de una máquina cernidora de dos niveles para separar cascarilla de palma africana molida en diferentes tamaños. Trabajo de grado (Ingeniería Mecánica). Universidad Industrial de Santander, Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas, Bucaramanga; 2023. Director: Isnardo González Jaimes.

NKS. Aceros inoxidables 316 [en línea]. Disponible en: <https://nks.com/es/distribuidor-de-acero-inoxidable/aceros-inoxidables-316/> [Citado: 24 jul. 2025].

OLARTE ZAMORA, Andrea Estefanía. Diseño y construcción de una despulpadora de café para el recinto Estero del Plátano, parroquia Galera, cantón Muisne, provincia Esmeraldas. Trabajo de grado (Ingeniería Mecánica). Universidad Politécnica Salesiana, Quito; 2016. Tutor: Pablo Mesías Almeida Molina.

PENAGOS. Despulpadoras y módulos clasificadores [en línea]. Disponible en: <https://penagos.com/categoria-producto/despulpadoras-y-modulos-clasificadores/> [Citado: 24 jul. 2025].

PENAGOS COMPANY. Canales del pechero de la despulpadora [en línea]. YouTube. Disponible en: https://www.youtube.com/watch?v=_BCDGhH3t2w [Citado: 24 jul. 2025].

RUEDA MEJÍA, Sara Lucía. Armado de despulpadora [en línea]. YouTube. Disponible en:

<https://www.youtube.com/watch?v=FuzLTr-yMRs> [Citado: 24 jul. 2025].

SKF. SY 40 TF – Unidades de rodamientos de bolas [en línea]. Disponible en: <https://www.skf.com/co/products/mounted-bearings/ball-bearing-units/pillow-block-ball-bearing-units/productid-SY%2040%20TF> [Citado: 24 jul. 2025].

SKF PTP. Catálogo de poleas [en línea]. Disponible en: <http://www.skfptp.com/CategorySearch/Index/2> [Citado: 24 jul. 2025].

SURTIACEROS. Ángulo 1/4 x 1 x 20 [en línea]. Disponible en: <https://surtiaceros.com/producto/angulo-1-4-x-1-x-20/> [Citado: 24 jul. 2025].

TEKNOLOSUNGEN. Catálogo de cierres [en línea]. Disponible en: <https://www.teknolosungen.com/wp-content/uploads/CATALOGO-CIERRES.pdf> [Citado: 24 jul. 2025].

TRACEPARTS. Catálogo de motores con reductor [en línea]. Disponible en: <https://www.traceparts.com/es/search/clasificacion-de-traceparts-electrico-motores-electricos-motores-de-ca-motorreductores-engranajes-rectos?CatalogPath=TRACEPARTS%3ATP09005001001004> [Citado: 24 jul. 2025].

TRACEPARTS. Catálogo de partes 3D [en línea]. Disponible en: <https://www.traceparts.com/es> [Citado: 24 jul. 2025].

UNIVERSIDAD DE AMÉRICA. Diseño de despulpadora [en línea]. Disponible en: <https://repository.uamerica.edu.co/handle/20.500.11839/469> [Citado: 24 jul. 2025].

WESCO. Material estructura en ángulos [en línea]. Disponible en: <https://www.wesco.com.co/default.asp?iId=GFLKLF> [Citado: 24 jul. 2025].