

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN FERMENTADOR MECÁNICO AUTOMATIZADO DE CACAO PARA ZONAS RURALES DEL PERÚ

RESUMEN

Esta investigación presenta el diseño y el desarrollo de un sistema automatizado de fermentación mecánica para el procesamiento del cacao en zonas rurales del Perú. El sistema integra componentes mecatrónicos, como motores, sensores, temporizadores y controladores, para permitir una fermentación controlada y uniforme y mejorar la calidad y la consistencia de los granos de cacao. Construido con materiales accesibles y diseñado para facilitar su operación en localidades remotas, el fermentador optimiza parámetros de fermentación como la temperatura, la humedad y la velocidad de rotación. Los análisis comparativos entre métodos mecánicos y tradicionales de fermentación demuestran una mayor eficiencia, una reducción de defectos y el cumplimiento de estándares internacionales de calidad. Las evaluaciones económicas indican un retorno de la inversión favorable debido a los bajos costos de diseño, lo que respalda la viabilidad y la sostenibilidad de la tecnología para agricultores de pequeña y mediana escala. Este fermentador automatizado contribuye al desarrollo socioeconómico de las comunidades cacaoteras promoviendo prácticas sostenibles, aumentando el valor del producto y facilitando el acceso a mercados premium.

Palabras clave: DFMA, optimización, mechanical-fermentation-of-cocoa, VDI 2222, FEA

DESIGN AND CONSTRUCTION OF AN AUTOMATED MECHANICAL COCOA FERMENTER FOR RURAL AREAS OF PERU

ABSTRACT

This research presents the design and development of an automated mechanical fermenter system for cacao processing in rural areas of Peru. The system integrates mechatronic components, including motors, sensors, timers, and controllers, to enable controlled and uniform fermentation, thereby improving the quality and consistency of cacao beans. Constructed with accessible materials and designed for ease of operation in remote locations, the fermenter optimizes fermentation parameters, including temperature, humidity, and rotation speed. Comparative analyses between mechanical and traditional fermentation methods demonstrate enhanced efficiency, reduced defects, and compliance with international quality standards. Economic evaluations indicate a favorable return on investment, supporting the viability and sustainability of the technology for small and medium-scale farmers. This automated fermenter contributes to the socio-economic development of cacao-producing communities by promoting sustainable practices, increasing product value, and facilitating access to premium markets.

Key words: DFMA, optimization, Fermentacion-mecánica-del-cacao, VDI 2222, FEA

INTRODUCCIÓN

La actividad agrícola dedicada a la producción de cacao es básica y su consumo ha aumentado a nivel mundial (Fernández-Niño et al., 2021). En muchos países en vías de desarrollo, entre ellos Perú, Brasil, Ecuador, Ghana y Costa de Marfil, millones de pequeños productores dependen de la producción de cacao como actividad que les proporciona sustento económico y social (Carangui, 2024). La fermentación postcosecha aprovecha de manera preferencial una etapa fundamental en toda la cadena productiva, pues desde las características del grano de cacao que se obtienen a partir de la misma se determinan las

propiedades organolépticas y químicas del cacao, las cuales son determinantes para su aceptación en los mercados de destino, sean estos nacionales o internacionales (Balkhaya et al., 2020).

Sin embargo, los métodos tradicionales de fermentación basados en métodos de tipo artesanal, presentan limitaciones importantes puesto que no cuentan con un control estricto de las variables que son claves en la fermentación como son la temperatura, la humedad y el tiempo de fermentación y como resultado de este hecho se obtienen variaciones en la calidad del producto final lo que a su vez impide a los productores acceder a mercados que exigen un producto de calidad o de tipo premium (Guzmán et al., 2021; Ríos & Lévano, 2022). Por otro lado, utilizan una excesiva mano de obra, lo que encarece los costos finales, quitándoles aún más ventajas en el mercado nacional e internacional de cacao (Guzman et al., 2020).

En este sentido, el desarrollo y la puesta en práctica de sistemas mecanizados y automatizados para la fermentación del cacao se han reconocido como tecnologías mejorables de dicho proceso, lo cual resalta la homogeneidad, la eficiencia (Albarracín & Maposita, 2018) y la adecuación a normas técnicas de dicha materia (por ejemplo, la Norma Técnica Peruana NTP 208.040:2017), cuyo desempeño será contrastado con criterios económicos (Farahdiba et al., 2023). Dichos sistemas consideran tecnologías baratas para la construcción de estructuras, así como la inclusión de componentes eléctricos y sensores de control (Espinales et al., 2023), elementos todos que ayudan también a la adopción de prácticas sostenibles y al incremento de la competitividad de los productores (Torrez & Quevedo, 2019), con especial atención a aquellos que están ubicados en áreas rurales o de acceso difícil (Delgado & Lazarte, 2025; Jiménez & Pizango, 2024).

Han existido diversas investigaciones que han demostrado que la inversión en fermentadores mecánicos resulta económicamente viable, dado que consideraban factores

financieros favorables (VAN y TIR positivos) y tasas de rentabilidad cercanas al 22%. Estos resultados corroboran que la mecanización del proceso de fermentación puede impulsar la inclusión de pequeños y medianos agricultores en cadenas de valor de mayor calidad. A su vez, la fermentación mecanizada ayuda a reducir las pérdidas postcosecha y a mejorar la calidad interna del grano, así como los atributos sensoriales más valorados en el mercado internacional (Guzmán et al., 2021; Jiménez, 2024).

El presente trabajo de investigación tiene como finalidad el diseño, la construcción y la validación de un fermentador mecánico automatizado para cacao, utilizando los principios de la ingeniería electrónica y la ingeniería mecánica en el desarrollo de los sistemas de control de procesos. Se detallan los criterios de selección de los materiales, las especificaciones técnicas de los motores y de los sistemas eléctricos, así como los procesos de validación del desempeño a partir de análisis físico-químicos y sensoriales, y la comparación con los métodos tradicionales. En definitiva, con esta investigación se pretende ofrecer una solución tecnológica que impulse mejoras en el proceso de fermentación del cacao, favorezca el desarrollo económico y social de las comunidades productoras de cacao amazónico, y promueva la innovación y la sostenibilidad en toda su cadena de producción (Delgado & Lazarte, 2025; Ríos & Lévano, 2022).

MÉTODO

La presente investigación aborda el diseño y la construcción de un sistema automatizado de fermentación mecánica para cacao, orientado a mejorar los estándares de calidad conforme a la Norma Técnica Peruana NTP 208.040:2017. Para ello, se aplicó una metodología combinada basada en el Diseño Centrado en el Usuario (User-Centered Design, UCD) y el Diseño para la Fabricación y el Ensamblaje (Design for Manufacturing and Assembly, DFMA), priorizando las necesidades y capacidades de los agricultores como usuarios finales del sistema (Delgado & Lazarte, 2025).

El proceso de diseño se desarrolló con software especializado en modelado y simulación. Para ello, se empleó SolidWorks, con el que se elaboraron modelos tridimensionales y ensamblajes, y se realizaron análisis estructurales mediante el método de elementos finitos (Finite Element Analysis, FEA). Este último permitió evaluar la resistencia mecánica, las deformaciones y los factores de seguridad del sistema, lo que aseguró la viabilidad técnica del prototipo.

Adicionalmente, se definieron y calcularon las condiciones térmicas, de humedad y de aireación necesarias para el proceso de fermentación óptima, integrando un sistema de control automatizado con sensores y actuadores que regulan estas variables en tiempo real. La selección de componentes eléctricos y mecánicos se basó en criterios de eficiencia, durabilidad y facilidad de mantenimiento, con el fin de optimizar el rendimiento y la usabilidad del fermentador.

Esta integración tecnológica responde a la necesidad de controlar parámetros críticos como temperatura y Ph para homogeneizar la fermentación y mejorar la calidad sensorial final del cacao, como se afirma en sistemas inteligentes basados en Deep Learning y control automático, que han demostrado que la fermentación convencional supera las limitaciones de la fermentación convencional (Jimenez & Pizango, 2024). La integración de sensores de monitorización de gases, como el oxígeno y el dióxido de carbono, y de sistemas automáticos de agitación también ha demostrado incrementar la eficiencia y la trazabilidad del proceso (Sabila et al., 2025).

El criterio para la selección de componentes eléctricos y mecánicos ha de basarse en criterios de eficiencia, durabilidad y mantenimiento para mejorar la productividad y la simplicidad de uso del fermentador. El criterio para los componentes es importante para llevar a la viabilidad de la adopción y la sostenibilidad del sistema en el contexto rural, donde

la simplicidad y la robustez son requeridas (Importancia de los dispositivos usados en la fermentación de cacao (Rios & Lévano, 2022).

Finalmente, se construyó un prototipo funcional con capacidad para 80 kg de cacao en baba, que fue sometido a pruebas experimentales para validar el diseño y evaluar su desempeño en condiciones reales de operación, con el objetivo de demostrar la mejora en la calidad del cacao fermentado mediante la automatización del proceso. (Guzmán et al., 2021; Jimenez & Pizango, 2024; Santander et al., 2025).

PROCESAMIENTO DEL CACAO

Figura 1

Etapas en la fermentación del grano de cacao



RESULTADOS

Diseño Para Fabricación y Ensamblaje (DFMA)

Se obtuvo información sobre las necesidades de los clientes a partir de observaciones de campo provenientes de diversas fuentes. Dicha información proviene de resultados de investigaciones previas en las siguientes provincias y distritos. En la provincia de Condorcanqui (Amazonas), se entrevistó a grupos de productores de las comunidades nativas Awajún: Urakusa, Huaracayo, Cayamás, Wawain, Mamayaque, Tuutin, Sua-San Antonio y Huampami. Y en el distrito de Medio Santiago: se entrevistaron productores de las comunidades Wampís de El Progreso Kamit Entsa y La Poza. En total, allí se entrevistó, 37 propietarios y productores de cacao que además realizan la fermentación del cacao en forma artesanal, Figura 2

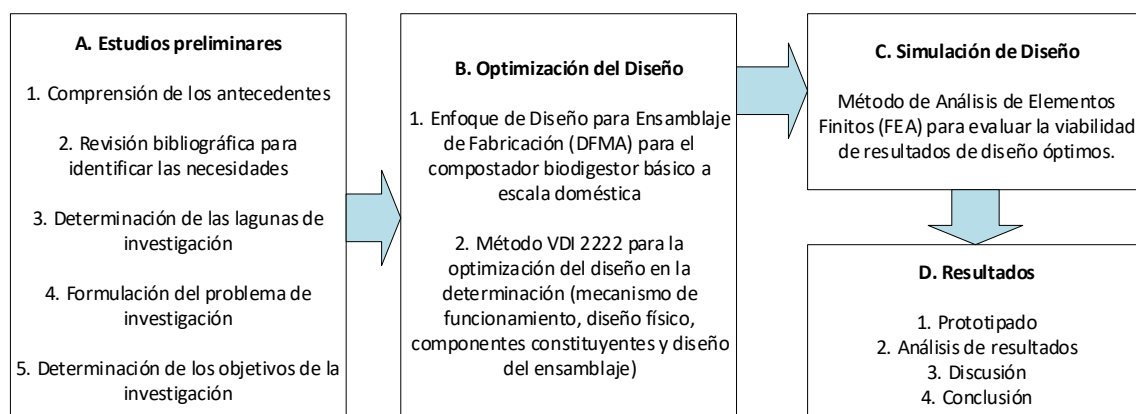
Figura 2

Localización de la zona de estudio y realidad de los productores locales



Nota: Adaptado de "Productores Awajún en Amazonas", por Comisión Nacional para el Desarrollo y Vida Sin Drogas, 2025, Gob.pe

Esta información se utilizó para determinar las necesidades específicas que debe satisfacer el diseño final de la máquina (Tabla 1). Estas necesidades se convierten en especificaciones técnicas del concepto de diseño y forman parte de los objetivos que debe alcanzar la máquina, por lo que los resultados se contrastarán con el diseño final para verificar si la máquina cumple dichas necesidades (Figura 3).

Figura 3*Dinámica del flujo de trabajo en la investigación***Tabla 1***Tabla de objetivos del diseño*

No.	Objetivo	Descripción específica para el fermentador de cacao
01	Fácil de usar	Diseño accesible para agricultores, con operación sencilla y automatizada.
02	Seguro de usar	Materiales inoxidables y una estructura robusta que garantizan la seguridad durante el proceso.
03	Práctico	Automatiza la remoción y la mezcla del cacao, evitando el trabajo manual constante.
04	Producción eficiente	Permite una fermentación homogénea y controlada, mejorando la calidad y la rapidez del proceso.
05	Sin olores	Control adecuado de la fermentación para minimizar los olores desagradables.
06	No fuente de patógenos	Diseño que evita contaminación y mantiene condiciones higiénicas durante la fermentación
07	Fácil de monitorear	Incluye sensores de temperatura y temporizadores para control del proceso

Nota: Definición de los objetivos, que servirán de base para el diseño conceptual de la máquina

La siguiente etapa se centra en definir el diseño conceptual óptimo de la máquina.

Para esto, se aplica el método VDI 2222 con el fin de identificar, en primer lugar, los sistemas

de funcionamiento óptimos del fermentador mecánico de cacao doméstico, y luego, dentro de estos sistemas, los mecanismos más adecuados según su función y los objetivos definidos, como se muestra en las Tablas 2 y 3.

En la primera etapa, se determina los sistemas críticos de funcionamiento del sistema que en este caso son tres 1; la parte que contiene a todo el material de procesamiento y fermentación, aquí se presentan los cambios químicos de todo el proceso, este componente es llamada la “Cama de fermentación”, 2: La parte sólida, fija o rígida (Marco), que da soporte tanto a la cama de fermentación como a todos los componentes móviles. 3: El sistema de remoción es la parte móvil compuesta principalmente por los ejes y paletas; 4: El sistema de locomoción le da la energía para el movimiento de los ejes y paletas. 5: El sistema eléctrico automatizado encargado de los controles del proceso.

En la segunda etapa, se seleccionan tres posibles mecanismos de funcionamiento del concepto de diseño del fermentador mecánico.

En tercer lugar, se deben realizar estudios de propiedades mecánicas observando los procesos de trabajo de las máquinas comúnmente disponibles. Esto también profundiza en los resultados de la evaluación y presenta alternativas al mecanismo que pueden aplicarse.

En cuarto lugar, se determinan las variaciones del mecanismo del sistema, asegurando que los resultados críticos del mecanismo del sistema cumplan con las especificaciones objetivo deseadas (Tabla 1) mediante la aplicación del método VDI 2222. En esta etapa se evaluó la calidad (CQ) de la disponibilidad de los componentes y mecanismos que conforman el sistema crítico. Posteriormente, cada componente del sistema fue evaluado por varios expertos en fabricación de equipos mecánicos para la fermentación de cacao, así como por expertos en diseño y en propiedades mecánicas. Esta evaluación sirve para utilizar las especificaciones objetivo como parámetros de control.

Tabla 2*Tabla de determinación de los mecanismos de la máquina*

Sistema crítico	Detalle	Nodo	Variaciones del mecanismo			Especificación del objetivo
			1	2	3	
Sistema de Agitación	Remover el cacao en baba para asegurar una fermentación homogénea y evitar el trabajo manual constante.	Y1		Sistemas de paletas oscilantes.		1, 2, 3, 4, 7, 8, 9
Sistema de Control de Temperatura	Controlar y mantener la temperatura óptima durante la fermentación	Y2	Sensores de temperatura.	Termostatos mecánicos.	Ventilación pasiva controlada	1, 2, 3, 7, 8, 9, 10
Sistema de Temporización	Automatizar los ciclos de remoción para evitar la supervisión continua.	Y3	Temporizadores digitales.	Controladores lógicos programables (PLC).	Control manual con alarmas	1, 2, 3, 7, 8, 9, 10
Sistema Estructural	Proveer durabilidad y resistencia a la corrosión, y facilitar la manipulación del fermentador.	Y4	Uso de acero para mayor resistencia.	Aluminio anodizado para menor peso.	Plásticos reforzados	2, 3, 4, 8, 9, 10
Sistema de Capacidad	Contener el cacao durante el proceso de fermentación.	Y5	Cámaras modulares para escalabilidad.	Válvulas o compuertas de carga y descarga.		1, 2, 3, 5, 6, 8, 9, 10
Sistema de Operación	Permitir flexibilidad en la operación según las necesidades del usuario.	Y6	Manual con asistencia mecánica.	Operación totalmente con sensores.		1, 2, 3, 4, 7, 8, 9

Nota: Determinación de los sistemas de mecanismos de funcionamiento de la máquina

Los resultados de la Tabla 2 pueden organizarse en el siguiente modelo matemático.

$$Y = Y_{12} + Y_{21} + Y_{32} + Y_{41} + Y_{51} + Y_{62}$$

A continuación, se elaboró un diseño físico detallado para determinar el mecanismo de funcionamiento óptimo de la máquina fermentadora de cacao, para esto se desglosó los sistemas en sus componentes principales, para los cuales se halló una serie de variantes que

cumplían con los principios de trabajo a los que serían sometidos. Los resultados del diseño se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 3

Tabla de componentes de la máquina

Mecanismo	Componente	Nodo	Alternativas de selección			Costos
			1	2	3	
Y12	Tambor	A1	Semi-Cilíndrico	Cilíndrico	Trapezoidal	2814.3
	Agitador	A2	Hélice de paso largo	Tambor inclinado	Eje con paletas	1130.17
Y21	Herr. de medición	B1	Sensores digitales	Modulo microcontrolador	Registro digital	71.29
	Herr. de control	B2	Ventilación On/Off	Controlador PID	Termostatos	234.8
Y32	Herr. de medición	C1	Reloj RTC	Indicador digital		182.5
	Herr. de control	C2	Controlador programable	Temporizador	Rele	247.3
Y41	Marco	D1	Acero revestido	Acero galvanizado	Acero inoxidable	1145.2
	Soporte	D2	Sistema fijo	Patas de apoyo	Equipo sobre ruedas	938.6
Y51	Herr. de medición	E1	Sensores de nivel	Varillas de nivel	Registro manual	213.4
	Herr. de control	E2	Módulos de contención	Compuertas mecánicas	Calendario de rotación	346.4
Y62	Panel eléctrico	F1	Panel termoplástico	Panel de placas	Panel de fibra de vidrio	428.7
	Botoneras	F2	Pulsador	Interruptor selector		86.4
	Cableado	F3	AWG	NYA	NYAF	124.3

Nota: Determinación de los componentes constituyentes de los sistemas de la máquina fermentadora de cacao.

Los resultados de la determinación del concepto de diseño de los componentes de la máquina fermentadora de cacao, diseñada para una escala de producción familiar, se presentan en la tabla 3. Se pueden organizar según el siguiente modelo matemático.

$$Y_{12} = A_{11} + A_{23}$$

$$Y_{21} = B_{11} + B_{22}$$

$$Y_{32} = C_{12} + C_{21}$$

$$Y_{41} = D_{13} + D_{22}$$

$$Y_{51} = E_{11} + E_{21}$$

$$Y_{62} = F_{11} + F_{22} + F_{31}$$

En referencia a los resultados de la Tabla 3, un análisis más detallado sobre el cálculo del Costo Total (CT) en IDR para cada sistema se puede ver en los siguientes resultados.

$$TC Y_{12} = 1814.3 + 580.17 = \text{IDR } 2394.47$$

$$TC Y_{21} = 71.29 + 634.8 = \text{IDR } 706.09$$

$$TC Y_{32} = 162.5 + 247.3 = \text{IDR } 409.8$$

$$TC Y_{41} = 885.2 + 328.6 = \text{IDR } 1213.8$$

$$TC Y_{51} = 223.4 + 398.4 = \text{IDR } 621.8$$

$$TC Y_{62} = 369.3 + 98.4 + 146.3 = \text{IDR } 614.0$$

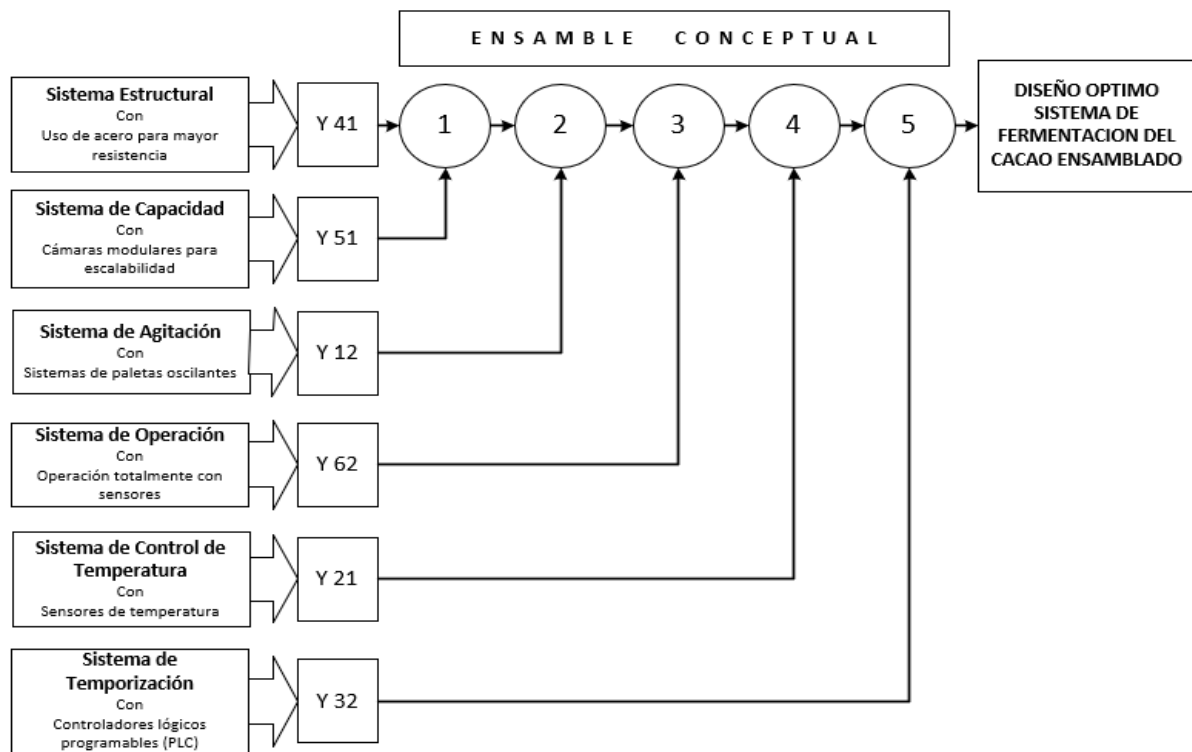
$$TCY_{TOTAL} = TC Y_{12} + TC Y_{21} + TC Y_{32} + TC Y_{41} + TC Y_{51} + TC Y_{62}$$

$$= 2394.47 + 706.09 + 409.8 + 1213.8 + 621.8 + 614.0 = \text{IDR } 5959.96$$

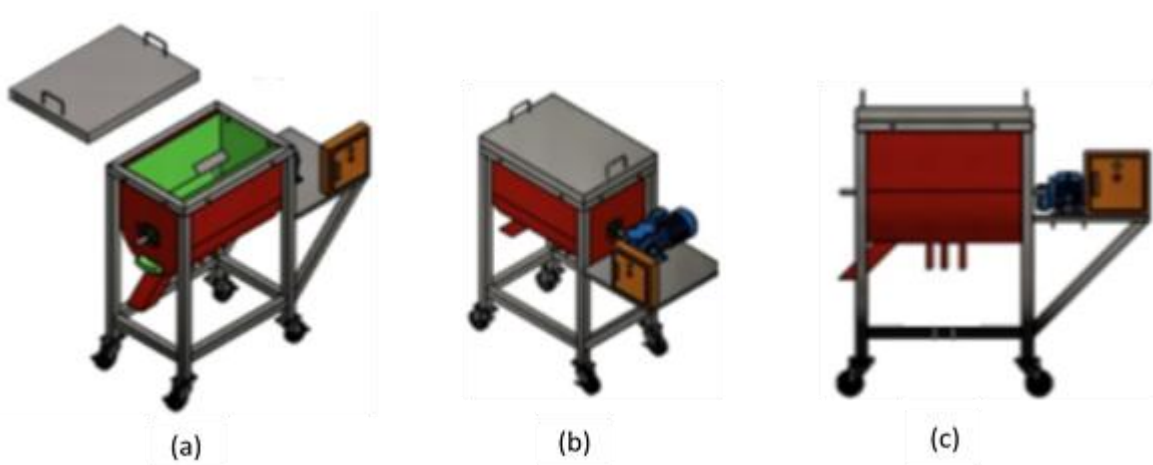
El cálculo muestra que el costo óptimo para implementar el diseño conceptual de una máquina fermentadora de cacao es de IDR 5960 S/. A continuación, se desarrolla el diseño conceptual del ensamblaje, que permite determinar el orden más eficiente para integrar los componentes del fermentador de cacao. Los resultados del diseño del ensamblaje se muestran en la Figura 4.

Figura 4

Diseño del diagrama de ensamblaje de la máquina fermentadora de cacao

**Figura 5**

Diseño físico de la máquina fermentadora de cacao. (a) Vista mostrando el interior de la cama de fermentación, (b) Vista mostrando la posición del motor lateral izquierdo, (c) Vista frontal



Análisis de Elementos Finitos (FEA)

A continuación, se aplica el método FEA para evaluar los resultados óptimos del diseño de los principales componentes de los sistemas mencionados en el diseño conceptual, determinados mediante simulaciones en sistemas CAD. Su objetivo es evaluar la viabilidad técnica del equipo. El método FEA permite medir el rendimiento del diseño sin necesidad de una implementación física, lo que reduce los costos de las pruebas físicas y permite una aproximación más certera al prototipo óptimo. La etapa inicial de la implementación del método FEA es el proceso de mallado, relacionado con el diseño óptimo de los componentes del fermentador, obtenido mediante el método VDI 2222 anterior. La configuración de propiedades para la prueba de bastidor se muestra a continuación (Tabla 4).

Diseño de la cama del fermentador o marco de soporte

Tabla 4

Configuración de las propiedades del marco o bastidor

Sección	Propiedades	Valor sistema de soporte, marco del fermentador
A	Ajuste de malla	
	Tamaño medio del elemento	0.1
	Tamaño mínimo del elemento	0.2
	Factor de nivelación	1.5
	Ángulo de giro máximo:	60 grados
B	Propiedades del material	
	Material	Acero AISI 304
	Densidad de masa	8.03 g/cm ³
	Límite elástico	206.8 MPa
	Resistencia máxima a la tracción	515 MPa
	Módulo de Young	210.00 GPa
	Relación de Poisson	0.3 ul
	Módulo de corte	78.315 GPa

C Condiciones de funcionamiento

Tipo de carga	Fuerza 1
Magnitud	529.11 lbf
Vector X	0,000 lbf
Vector Y	-529,11 lbf
Vector Z	0.000 lbfa
Tipo de carga	Fuerza 2
Magnitud	0
Vector X	0
Vector Y	0
Vector Z	0

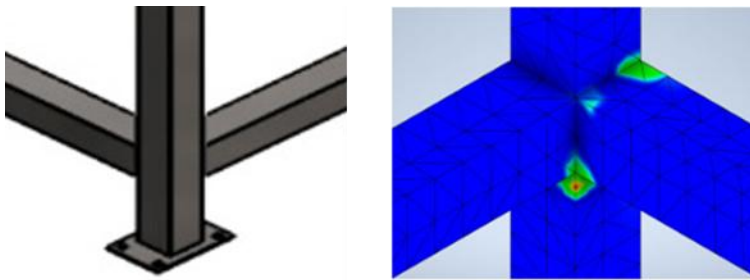
Nota: Datos fundamentales para el proceso de análisis en elementos finitos para el bastidor.

El punto de fluencia del acero inoxidable AISI 304 es de aproximadamente 206.8 MPa (mega pascales) o 30,000 psi (libras por pulgada cuadrada). Este valor se encuentra en las fichas técnicas y hojas de datos que las empresas distribuidoras de acero

Con base en los ajustes de la Tabla 4, la calidad del proceso de mallado para el análisis óptimo del diseño del bastidor de la máquina biodigestora compostera fue de 65,513 nodos y 32,923 elementos. El número de nodos y elementos se determina a partir del tipo de malla triangular, debido al giro máximo del ajuste del ángulo de 60 grados, como se muestra en la Figura 6. Esta investigación utiliza diversos parámetros de prueba en el análisis FEA, incluyendo la tensión de Von Mises, la tensión principal, el desplazamiento, el factor de seguridad, la deformación equivalente y la deformación principal. El proceso de prueba se realiza en el bastidor, componente vital de la máquina, ya que soporta la tensión de la carga. La técnica de análisis FEA utiliza el software de simulación SolidWorks. Los resultados de la simulación FEA para el análisis de tensión de Von Mises se muestran en la Figura 7.

Figura 6

Calidad del proceso de mallado del marco

**Figura 7**

Análisis de tensiones de Von Mises en el diseño del bastidor de la máquina fermentadora de cacao

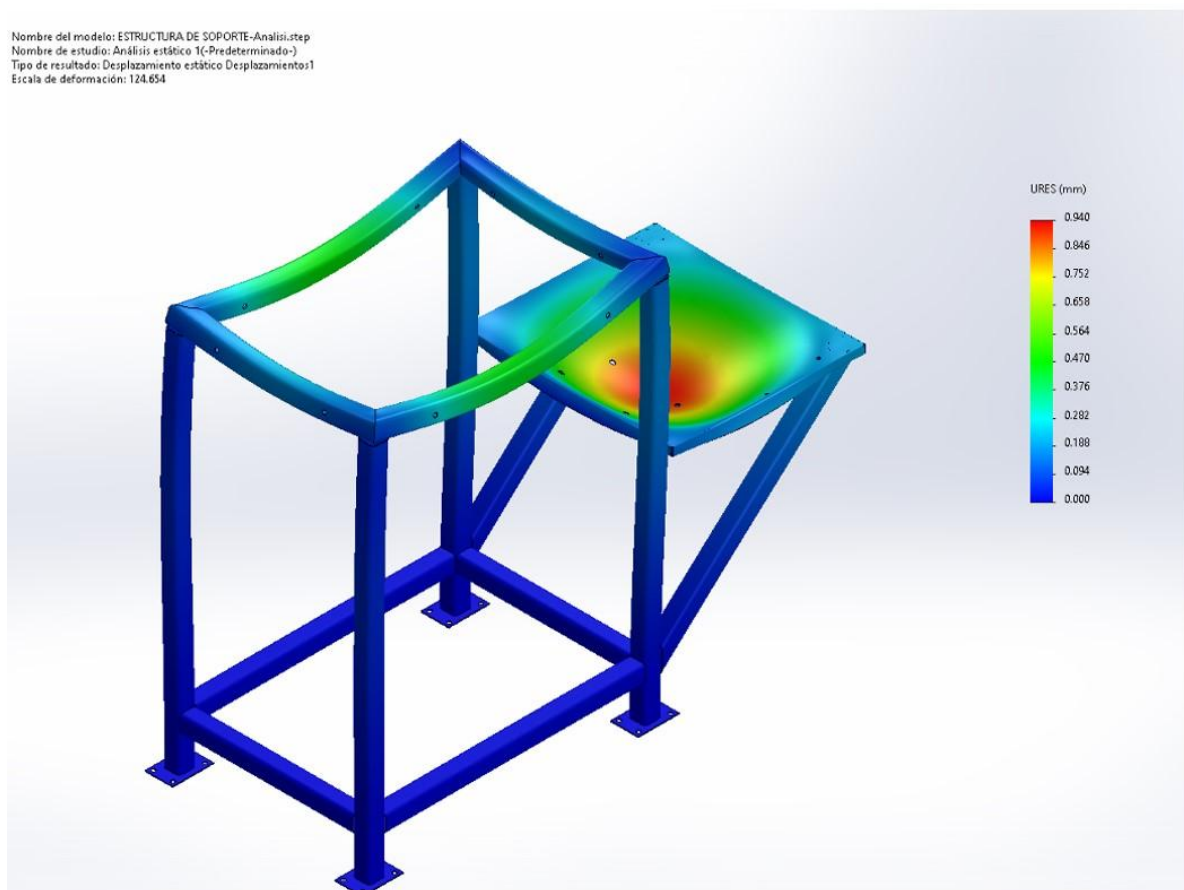


Tabla 5*Tabla de resultados análisis de elementos finitos para el marco o bastidor*

Nombre	Mínimo	Máximo
Tensión de von Mises	0.000132517 MPa	4.134 MPa
1. ^a tensión principal	0.427 MPa	3.614 MPa
3. ^a tensión principal	3.576 MPa	0.0146 MPa
Desplazamiento	0 mm	0.85 mm
Factor de seguridad	38.583 ul	424.38 ul
Tensión XX	- 3.425 MPa	3.314 MPa
Tensión XY	1.312 MPa	1.117 MPa
Tensión XZ	- 0.0021 MPa	0.00825 MPa
Tensión YY	- 4.134 MPa	1.284 MPa
Tensión YZ	. 0.127 MPa	0.0983 MPa
Esfuerzo ZZ	- 0.251 MPa	0.381 MPa
Desplazamiento X	- 0.0571 mm	0.8471 mm
Desplazamiento Y	- 0.615274 mm	0.003517 mm
Desplazamiento Z	- 0.0327 mm	0.041735 mm
Deformación equivalente	0.000000002517 mm	0.000471399 mm
1. ^a deformación principal	- 0.00000 8371 ul	0.0007419 ul
3. ^a deformación principal	- 0.000086153 ul	0.0000075426 ul
Deformación XX	- 0.00080637 ul	0.000703185 ul
Cepa XY	- 0.000471864 ul	0.00037194 ul
Cepa XZ	- 0.000217364 ul	0.000176159 ul
Cepa YY	- 0.000617355 ul	0.000157319 ul
Cepa YZ	- 0.0000837168 ul	0.000082471 ul
Cepa ZZ	- 0.00013847299 ul	0.00049315 ul

Nota: Tabla de salida de resultados de la prueba de elementos finitos (SolidWorks)

Los resultados de la simulación de la Figura 7 se indican en la Tabla 5, lo que indica que teniendo en consideración 200 kg como peso de la máquina funcionando a plena carga, más el peso del motor, se tiene 220 kg de peso que al ingresar en la tabla de las condiciones

de funcionamiento del SolidWorks nos da como resultado un total de 529.11 lbf, con las que se hallaron los esfuerzos en las zonas críticas de la estructura de la cama del fermentador.

Estos esfuerzos son bastante bajos (4.134 MPa) en comparación con el límite de fluencia del material (206.8 MPa); esto indica que tanto los esfuerzos de compresión como los de flexión que actúan sobre la estructura de soporte y la cama de la máquina están por debajo de los niveles que podrían causar un fallo estructural. Esta apreciación es validada con el factor de seguridad expresado en la misma tabla, la cual da un valor bastante alto, siendo el valor mínimo (el más crítico) igual a 224.583, *el* cual clasifica como bueno, ninguno de los elementos estructurales tiene un valor de 0 o incluso menos.

Por otro lado, el patrón de color azul indica que la mayoría se forma a partir de la condición del bastidor cuando se aplica tensión, y solo unos pocos son verdes en el punto de apoyo de la carga. Por lo tanto, el diseño del bastidor de la máquina es viable en cuanto a los factores de seguridad. Se puede asumir que es seguro para uso futuro si la máquina se construye como prototipo.

Diseño del sistema de remoción: ejes y paletas

El sistema de remoción es el encargado de mezclar o remover los granos de cacao en baba que se encuentran en la cama fermentadora. Este proceso se realiza mediante paletas adheridas al eje principal, cuyo movimiento es controlado por el motor eléctrico. El acero inoxidable utilizado para estas funciones es el acero AISI 304 el cual presenta diversas propiedades mecánicas destacadas. Su resistencia a la tracción varía entre 460 y 1,100 MPa, mientras que su módulo de elasticidad se encuentra en el rango de 190 a 210 GPa. En cuanto a su dureza, registra entre 160 y 190 HBW en la escala Brinell. Para evaluar con precisión la capacidad y la resistencia del eje de la máquina, se utilizó el método de elementos finitos (FEA), cuyos datos de entrada para el análisis se presentan en la Tabla 6.

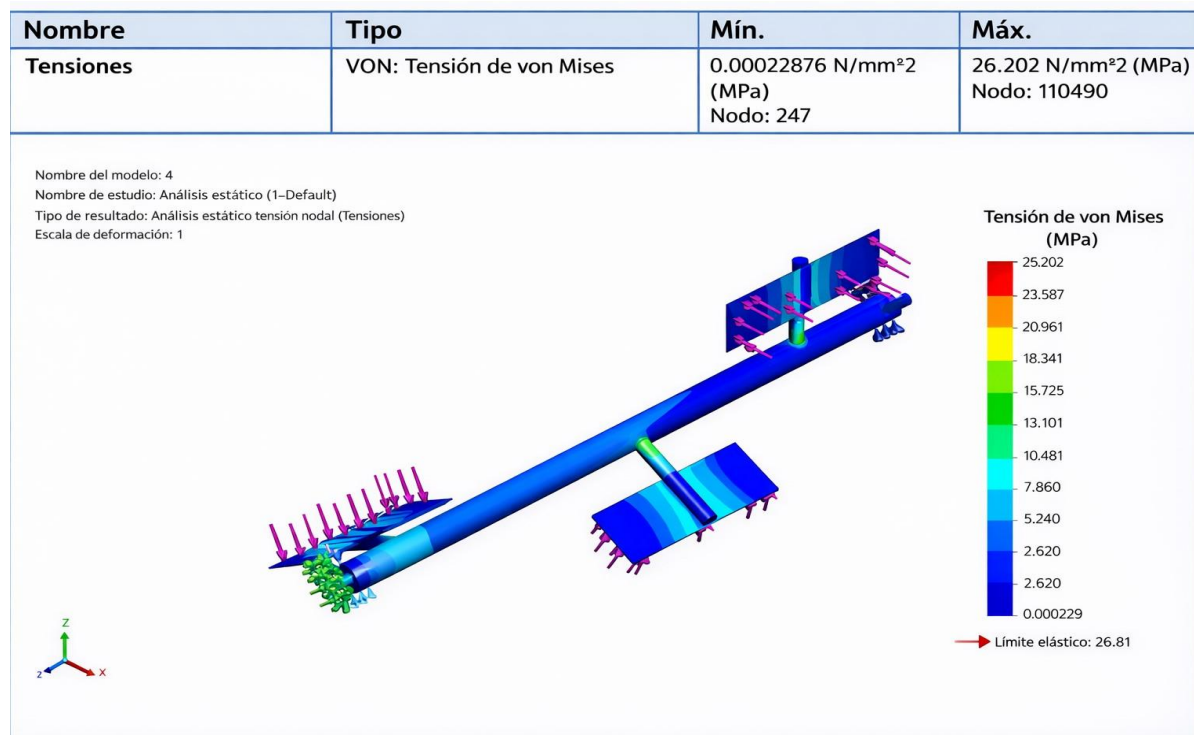
Tabla 6*Tabla de configuración de las propiedades para el sistema de remoción del fermentador*

Sección	Propiedades	Valor sistema de remoción ejes y paletas
A	Ajuste de malla	
	Tamaño medio del elemento	0.1
	Tamaño mínimo del elemento	0.2
	Factor de nivelación	1.5
	Ángulo de giro máximo:	60 grados
B	Propiedades del material	
	Material	Acero AISI 304
General	Densidad de masa	8.03 g/cm ³
	Límite elástico	206.8 MPa
	Resistencia máxima a la tracción	516 MPa
	Módulo de Young	210.00 GPa
	Relación de Poisson	0.3 ul
	Módulo de corte	78.315 GPa
C	Condiciones de funcionamiento	
	Tipo de carga	Fuerza 2
	Magnitud	187.393 lbf
	Vector X	187,393 lbf
	Vector Y	0.000 lbf
	Vector Z	0.000 lbf
	Tipo de carga	Fuerza 3
	Magnitud	0
	Vector X	0
	Vector Y	0
	Vector Z	0

Nota: Propiedades del material y cargas de trabajo para el sistema de remoción de ejes y paletas en el fermentador

Figura 8

Proceso de mallado de cuadros y acción de las fuerzas en el diseño del brazo removedor

**Figura 9**

Análisis de tensiones de Von Mises en el diseño del brazo removedor

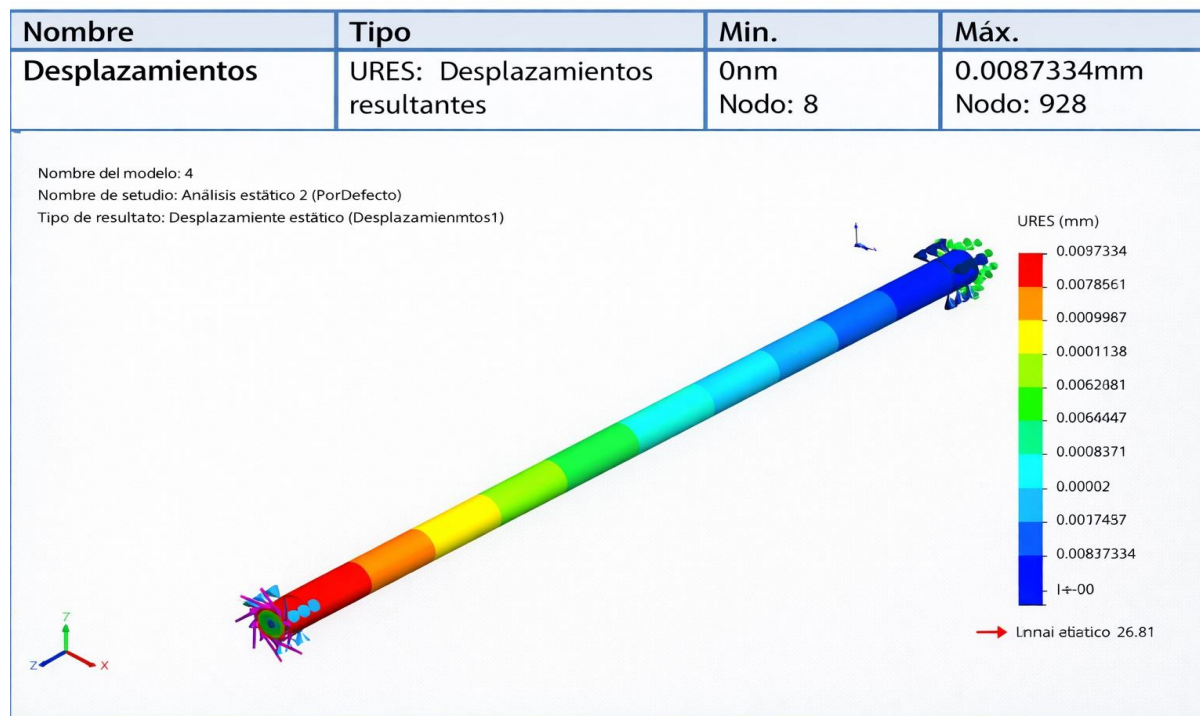


Tabla 7*Tabla de resultados análisis de elementos finitos para el sistema de remisión*

Nombre	Mínimo	Máximo
Tensión de von Mises	0.000011739 MPa	26.2 MPa
1. ^a tensión principal	- 0.7612 MPa	23.4715 MPa
3. ^a tensión principal	- 23.9271 MPa	0.03816 MPa
Desplazamiento	0 mm	0.0087334 mm
Factor de seguridad	12.264726	47.537861 ul
Tensión XX	- 22.647255 MPa	25.837194 MPa
Tensión XY	- 4.837 MPa	3.517 MPa
Tensión XZ	- 1.4721 MPa	0.5835 MPa
Tensión YY	- 25.715 MPa	8.327 MPa
Tensión YZ	- 4.6147 MPa	3.9513 MPa
Esfuerzo ZZ	- 10.4851 MPa	14.8215 MPa
Desplazamiento X	0 mm	0.0087334 mm
Desplazamiento Y	- 0.0008737 mm	0.003517 mm
Desplazamiento Z	- 0.0005271 mm	0.0006153 mm
Deformación equivalente	0.00000000719 mm	0.0000034579 mm
1. ^a deformación principal	- 0.00000 2873 ul	0.00002451 ul
3. ^a deformación principal	- 0.000006251 ul	0.000000372 ul
Deformación XX	- 0.00002073 ul	0.000040718 ul
Cepa XY	- 0.00001384 ul	0.00037194 ul
Cepa XZ	- 0.000005732 ul	0.000000153 ul
Cepa YY	- 0.000003257 ul	0.000007539 ul
Cepa YZ	- 0.0000035761 ul	0.000002749 ul
Cepa ZZ	- 0.000008923 ul	0.000003713 ul

Nota: Tabla de salida de resultados de la prueba de elementos finitos (SolidWorks)

Aunque las cargas netas del sistema de remoción son más bajas que las de la cama del fermentador, al incluir las cargas dinámicas en el análisis, se determinó una carga total de 84 kgf para el proceso de remoción, lo que nos da un valor de ingreso como condiciones de

funcionamiento en el sistema de simulación del SolidWorks de 187.393 lbf, con las que se hallaron los esfuerzos en las zonas críticas del brazo de remoción. Estos esfuerzos son bajos (26.2 MPa) en comparación con el límite de fluencia del material (206,8 MPa) (Tabla 7).

Esto indica que tanto los esfuerzos de compresión como los de flexión que actúan sobre el brazo del sistema de remoción están muy por debajo de los niveles que podrían provocar un fallo estructural. Esto se valida con el factor de seguridad encontrado en la simulación, el cual nos da valores entre 12.26 y 47.53 (Tabla 8), Tomando el valor más bajo como factor de seguridad crítico (12.26) indica que ninguno de los elementos estructurales en el sistema de remoción fallará. Por lo tanto, el diseño del sistema de remoción de la máquina es viable en términos de rigidez estructural y de factores de seguridad. Se puede asumir, por lo tanto, que es seguro para uso futuro si la máquina se construye como prototipo.

La evaluación del factor de seguridad (F_s) se basa en los valores obtenidos con SolidWorks en las simulaciones realizadas para los elementos sometidos a cargas críticas del sistema de fermentación de cacao. Se afirma que el acero AISI 304 y el límite elástico requerido por Joseph P. Vidosic cumplen con los estándares de seguridad, como se muestra en la Tabla 8. El factor de seguridad resultante puede considerarse adecuado en relación con las propiedades del material empleado en la simulación.

Tabla 8

Tabla de ubicación para el resultado del factor de seguridad

Valor del factor de seguridad (S_f) (ul)	Resultados	Análisis
1.25 – 1.5		Las condiciones controladas y los voltajes de trabajo pueden conocerse con certeza.
1.5 – 2		Para materiales ampliamente conocidos en condiciones de funcionamiento relativamente constantes y cargas fácilmente determinables.

2 – 2.5		Para materiales generales que operan en condiciones normales y están sujetos a cargas específicas.
2.5 – 3		Para materiales menos probados o frágiles en condiciones y cargas normales de funcionamiento.
3 – 4		Para materiales que no han sido probados en condiciones normales de funcionamiento y de carga.
> 4	MÍNIMO (12.26 ul)	Para materiales probados bajo condiciones de funcionamiento y cargas inciertas.

Nota. Tabla que te permite analizar el valor del factor de seguridad según las normas para ingeniería

Ensamblados de los componentes diseñados (Planos)

Figura 10

Plano 1, Estructura de soporte de cama de la máquina fermentadora de cacao

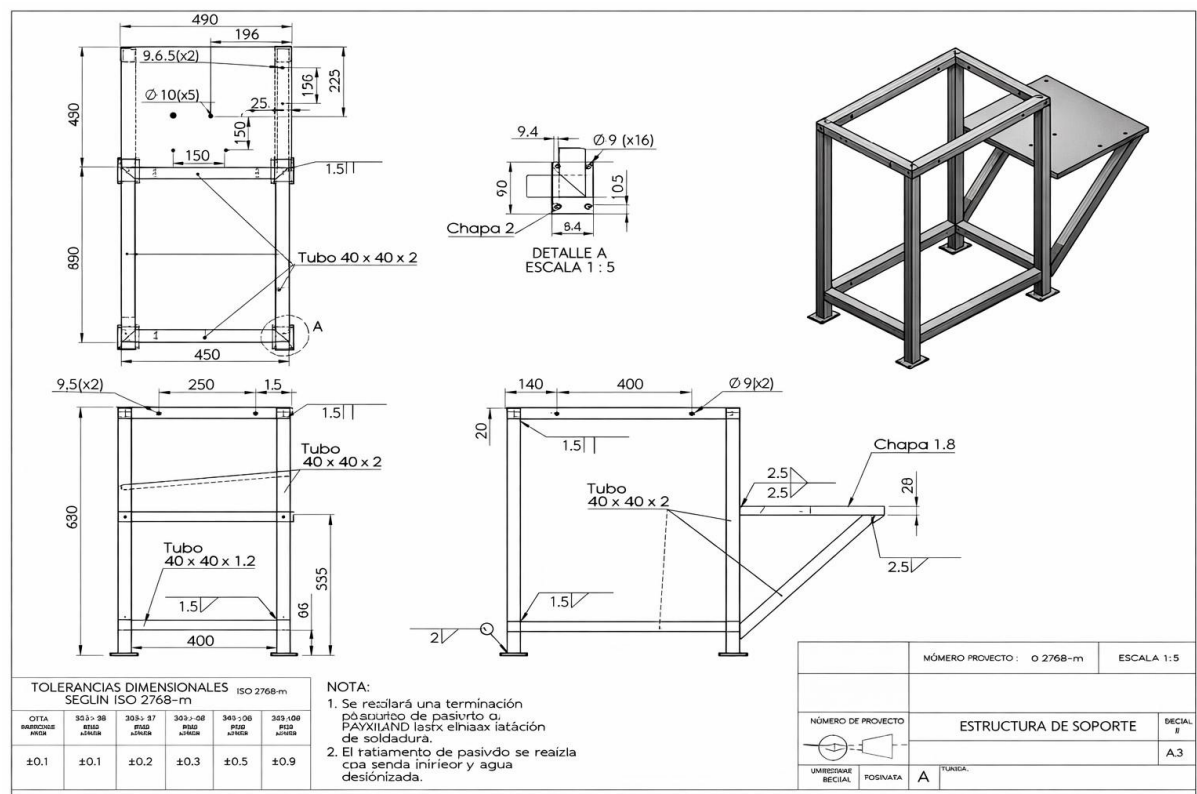


Figura 11

Plano 2, Ensamble y detalles de la cama de la máquina fermentadora de cacao

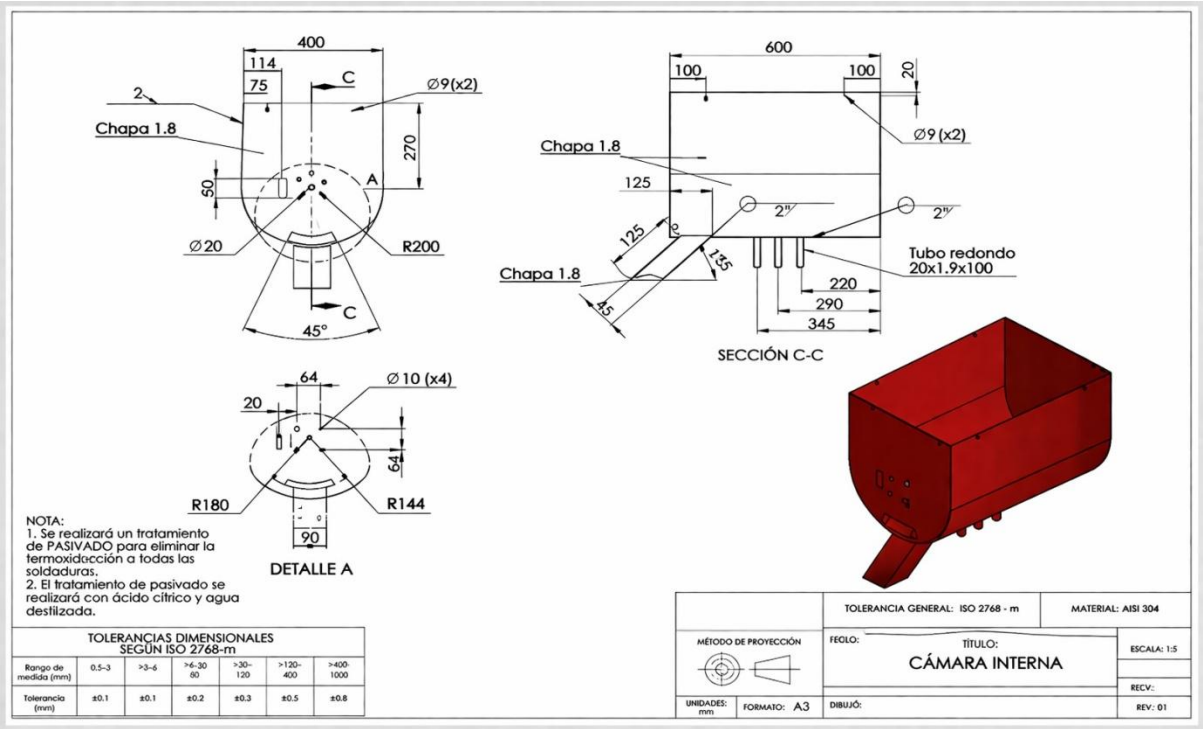
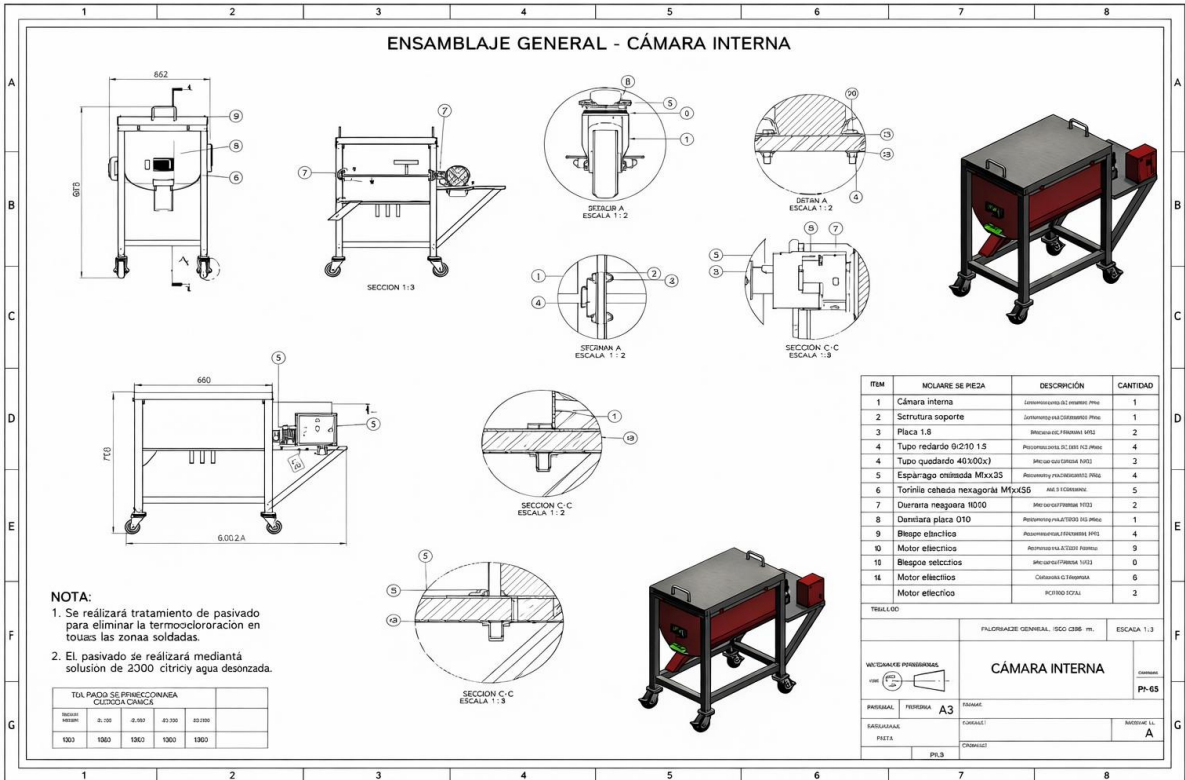


Figura 12

Plano 3, Ensamble total y detalles últimos de la máquina fermentadora de cacao



Prototipo Construido

Figura 13

Prototipo de la máquina fermentadora de cacao doméstica; (a) Soporte y cama del fermentador, (b) Sistema de remoción (paletas y varillas giratorias), (c) Tapa del fermentador



(a)



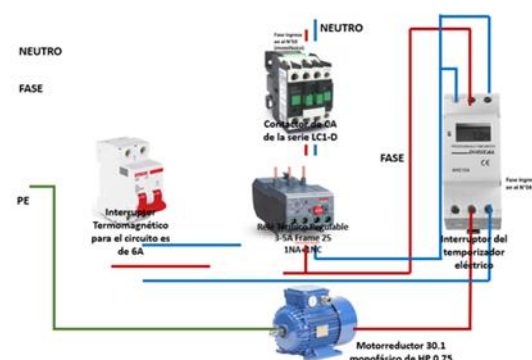
(b)



(c)

Figura 14

Prototipo de la máquina fermentadora de cacao doméstica; ensamblado total y detalles del ensamble del sistema eléctrico



Esta investigación indica que las especificaciones objetivo pueden alcanzarse de manera eficiente mediante el desarrollo de un concepto de diseño óptimo para una máquina de fermentación mecánica doméstica. El uso de dos métodos —el método VDI 2222 para la etapa de desarrollo del concepto de diseño hasta la creación de prototipos y el método FEA para la evaluación de los resultados técnicos del diseño basados en análisis de simulación— contribuye al éxito de esta investigación.

CONCLUSIONES

El presente estudio llevó a cabo el diseño funcional conceptual correspondiente al fermentador mecánico para cacao dirigido a su implementación en las áreas rurales del Perú, utilizando métodos de diseño estructurado como DFMA y VDI 2222 para obtener un sistema manufacturable, barato y adecuado para pequeños productores, así como un proceso sistemático de evaluación que permitiera elegir un concepto que cumpla con las necesidades de operación, de ensamblaje, de resistencia estructural, así como de viabilidad económica que permite asegurar el diseño de bajo coste para este tipo de sistemas.

El análisis estructural mediante el método de elementos finitos (FEA) mostró que el bastidor del fermentador tiene un comportamiento mecánico adecuado cuando se somete a las cargas operativas esperadas, con unos resultados que mostraron máximas tensiones de Von Mises dentro de márgenes adecuados, con unas muy bajas deformaciones equivalentes y unos factores de seguridad superiores al mínimo deseado, confirmando que la estructura es estable, fiable y segura durante su operación, soportando tensiones normales cortantes y mostrando reducidos desplazamientos, permitiendo así que su integridad se mantenga en situaciones rurales donde no están controladas las condiciones de entorno.

La validación experimental mediante un prototipo con una capacidad de aproximadamente 80 kg evidenció mejoras en la eficiencia de la fermentación,

principalmente en la homogeneización de la temperatura interna, la reducción de defectos en el grano y el cumplimiento de las normas internacionales de calidad. La integración de un sistema automatizado de monitoreo de la temperatura, humedad, y rotación favoreció la reducción de la variabilidad del proceso, apuntalando la estabilidad del producto final.

Reunidos, los resultados avalan que el fermentador representa una alternativa tecnológica viable, de bajo costo y alto potencial de impacto en la productividad y competitividad del cacao producido en comunidades rurales del Perú, fomentando prácticas más eficientes y sostenibles.

Figura 15

Vista real de la máquina fermentadora de cacao trabajando en el proceso de producción de pasta de cacao en la selva del departamento de Amazonas

1. Ingreso del cacao en baba a la máquina de fermentación mecánica



2. Inicio del proceso de fermentación mecánica



3. Cierre de la máquina, encendido del motor y del termómetro



4. Después de 5 días apertura de la máquina



5. Salida del cacao fermentado

REFERENCIAS

- Albarracín, M., & Moposita, K. (2018). Diseño y simulación de una máquina clasificadora por visión artificial y despulpadora de cacao [*Tesis de ingeniería, Universidad Técnica Estatal de Quevedo*]. *Repositorio Institucional*. <https://repositorio.uteq.edu.ec/handle/43000/3784>
- Balkhaya, N. D., Candra, A. D., & Anugrenr, F. (2020). Designing an Arduino-based automatic cocoa fermentation tool. *Jurnal and Penelitian Teknik Informatika*, 5(1), 92–99. <https://doi.org/10.33395/sinkron.v5i1.10611>
- Carangui, J. (2024). Diseño de una máquina trituradora de cáscara de cacao en la empresa Chocotics [*Tesis de ingeniería mecatrónica, Universidad Politécnica Salesiana, Sede Cuenca*]. *Repositorio Institucional*. <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/26988>
- Delgado, S. R., & Lazarte, J. J. (2025). Diseño de fermentador de cacao automático basado en proceso tradicional. *Revista I+i*. <https://doi.org/10.71701/sr4t3a61>
- Espinales, A., Pastor, E., Mera, C., & Bustamante, I. (2023). Diseño y simulación de una máquina despulpadora de cacao con motor de 2 hp. *Revista Social Fronteriza*, 3(5), 11–27. <https://revistasocialfronteriza.com/ojs/index.php/rev/index>
- Farahdiba, A. U., Warmadewanthi, I. D., Fransiscus, Y., Rosyidah, E., Hermana, J., & Yuniartom, A. (2023). The present and proposed sustainable food waste treatment technology in Indonesia: A review. *Environmental Technology & Innovation*, 32(3), 103256. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2023.103256>
- Fernández, M., Rodríguez, J. M., Herrera, F., Anzola, J., Cepeda, L. M., Aguirre, L. J., Chica, J. M., & Gonzalez, A. F. (2021). Diseción de fermentaciones industriales de cacao fino de aroma mediante análisis metagenómico. *Scientific Reports*, 11, 8638. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-88048-3>

- Guzmán, L., Castro, M., Cruz, G., & Arbulú, A. (2021). Diseño de un fermentador cilíndrico automatizado para la fermentación de cacao criollo piurano. *Revista de Innovación y Transferencia Productiva*, 1(2), e002. <https://doi.org/10.54353/ritp.v1i2.e002>
- Guzmán, L., Castro, S., Cruz, G., & Arbulu, A. (2020). Design of an automated cylindrical fermenter to the fermentation of Piura native cocoa. *Revista de Innovación y Transferencia Productiva*, 1(2), 57–69. <https://revistas.itp.gob.pe/index.php/ritp/article/view/11/52>
- Jimenez, F., & Pizango, G. E. (2024). Intelligent system based on deep learning for optimizing cocoa fermentation. *Revista Amazonía Digital*, 2(1), 277. <https://doi.org/10.55873/rad.v2i1.277>
- Rios, J., & Lévano, D. (2022). Importancia de los dispositivos usados en la fermentación de cacao (*Theobroma cacao* L.). *Revista Agrotecnológica Amazónica*, 2(1), e281. <https://doi.org/10.51252/raa.v2i1.281>
- Sabila, L. Y., Dwiyono, L. R., Hakim, A. R., Karuana, A. N., Hakika, D. C., & Hanum, F. F. (2025). Design of oxygen and carbon dioxide monitoring system in cocoa fermentation with Internet of Things and automatic stirring system. *Jurnal Nasional Teknik Elektro*. <https://jnte.ft.unand.ac.id/index.php/jnte/article/view/1245>
- Santander, M., Leguizaman, L., Vaillant, F., Boulanger, R., Zuluaga, M., Maraval, I., Rodriguez, J., LLana, S., Sammerer, N., Meudec, E., Meter, A., & Escobar, S. (2025). Influence of driven fermentation of cacao in bioreactors on quality: Decoding the effect of temperature, mixing, and pH on metabolomic, sensory, and volatile profiles. *LWT - Food Science and Technology*, 231, 118313. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2025.118313>

Torrez, C., & Quevedo, S. (2019). Diseño y construcción de una máquina cortadora y despulpadora de cacao con una capacidad de 2400 mazorcas por hora para mejorar la productividad del agricultor [*Tesis de ingeniería mecánica, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo*]. Repositorio Institucional.
<https://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/11539>

Carlos Javier Salas Peña^{1*}; Alexis Enrique Rubio Valle^{2*}; Josue Eliezer Alata Rey^{3*}

Marilyn Aurora Buendía Molina⁴; Santoyo Mendoza, Raúl Eduardo⁵

^{1*} Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, Perú

carlosalas@lamolina.edu.pe.

<https://orcid.org/0000-0003-3510-2261>

^{2*} Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú

arubiov@lamolina.edu.pe.

<https://orcid.org/0000-0002-4430-8694>

^{3*} Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú.

josue@lamolina.edu.pe

<https://orcid.org/0000-0003-1531-8516>

^{4*} Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú

marilynbuendia@lamolina.edu.pe

<https://orcid.org/0000-0003-2896-0778>

^{5*} Universidad Tecnológica del Perú, Lima, Perú.

U19204612@utp.edu.pe