

Design and construction of a prototype for cocoa bean fermentation

Emerita Delgado-Plaza, , Gabriel Mora-Tacle ; Rimer Loo-Suarez, , Kleber Barcia ,Juan Peralta-Jaramillo; José Reinoso-Tigre
ESPOL Polytechnic University, Escuela Superior Politécnica del Litoral, ESPOL. Centro de Desarrollo Tecnológico Sustentable,
Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la producción, Km 30.5 Campus Gustavo Galindo 30.5 vía Perimetral.
eadelgad@espol.edu.ec

ABSTRACT- The study focuses on designing and building a prototype cocoa bean fermenter, aiming for a cleaner and more controlled process to avoid contamination. It also collects and utilizes mucilage exudate as raw material. Criteria from the client were analyzed, and various designs were reviewed, with the drum-type fermenter meeting requirements best. After construction, cocoa beans were inserted for fermentation, with frequent removals of the fermenting mass and data collection for temperature analysis. Following completion, drying and quality tests were conducted according to INEN 176 regulations. Results showed over 75% of beans properly fermented, with approximately 1125 ml of mucilage collected. The prototype successfully met objectives, allowing for automated optimization of removal, ensuring complete mass turnover, and uniform temperature distribution within the fermentation chamber.

Keywords: Cocoa mucilage, fermenter, rotary prototype, fermentation temperature, mechanical design.

Digital Object Identifier: (only for full papers, inserted by LACCEI).
ISSN, ISBN: (to be inserted by LACCEI).
DO NOT REMOVE

Diseño y construcción de un prototipo para fermentación de cacao en baba

Emerita Delgado-Plaza, , Gabriel Mora-Tacle ; Rimer Loor-Suarez, Kleber Barcia ,Juan Peralta-Jaramillo; José Reinoso-Tigre
ESPOL Polytechnic University, Escuela Superior Politécnica del Litoral, ESPOL. Centro de Desarrollo Tecnológico Sustentable,
Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la producción, Km 30.5 Campus Gustavo Galindo 30.5 vía Perimetral.
eadelgad@espol.edu.ec

Resumen—El estudio se centra en el diseño y la construcción de un fermentador de granos de cacao, buscando un proceso más limpio y controlado para evitar la contaminación. También recoge y utiliza el exudado de mucílago como materia prima. Se analizaron los criterios del cliente y se revisaron varios diseños, siendo el fermentador tipo tambor el que mejor cumplía con los requisitos. Después de la construcción, se inició la fermentación insertando los granos de cacao, realizando remociones frecuentes de la masa fermentada y recopilando datos para el análisis de la temperatura. Tras completar el proceso, se llevó a cabo el secado y pruebas de calidad según la normativa INEN 176. Los resultados mostraron que más del 75% de los granos fermentaron correctamente, con aproximadamente 1125 ml de mucílago recolectado. El prototipo cumplió con éxito los objetivos, permitiendo la optimización automatizada de la remoción, garantizando el volteo completo de la masa y una distribución uniforme de la temperatura dentro de la cámara de fermentación.

Palabras clave—Mucílago de cacao, fermentador, prototipo rotatorio, temperatura de fermentación, diseño mecánico.

I. INTRODUCCIÓN

El cacao es una planta originaria de la zona alta amazónica de América del Sur, comprendido por Perú, Colombia y Ecuador. Actualmente, el cacao se cultiva en muchos países de zonas tropicales [1]. El cacao en el Ecuador tiene un rol importante en el cambio de la matriz productiva debido a que su producción se realiza en la mayoría de las provincias, teniendo como principal fuente de cultivo las provincias del litoral, las zonas cercanas a la cordillera occidental y las provincias del noroeste del país [2].

Según datos del Banco Central del Ecuador (BCE), en el año 2017 la producción de cacao ocupó el tercer lugar dentro de las exportaciones (no petroleras) de mayor relevancia, solo después del banano, plátano y camarón, teniendo una producción de alrededor de 308 mil toneladas y dejando ingresos de alrededor de 689 millones de dólares. En el país la producción de cacao de cualquier tipo genera empleo para alrededor de 100 mil familias dentro de los productores; además, en la cadena de producción participan otras 200 mil familias, teniendo una influencia directa de alrededor de 600 mil personas [3].

El Ecuador está buscando mejoras en el desarrollo de procesos industriales del cacao. Si bien es cierto que la calidad

del cacao depende de factores como: origen del grano, tratamiento postcosecha y tostado, es en el proceso de fermentación donde se desarrolla los compuestos responsables del aroma, color y sabor [4].

El proceso de fermentación comienza poco después de la cosecha de los frutos, que se obtienen de los árboles del género *Theobroma cacao*. Una vez que los frutos son recolectados, se abren para extraer las semillas, que son los granos de cacao. Estos granos están recubiertos por una pulpa dulce y mucilaginoso. La fermentación del cacao difiere dependiendo de la zona en la que se desarrolla, del tiempo y del tipo de fermentador que se utiliza durante el proceso, teniendo como los más comunes: tanques de plásticos, sacos de yute, amontonamiento de cacao en cajones de cemento y cajas de madera [5-6]. En la figura 1, se aprecia dichos recipientes utilizados para el proceso de fermentación.

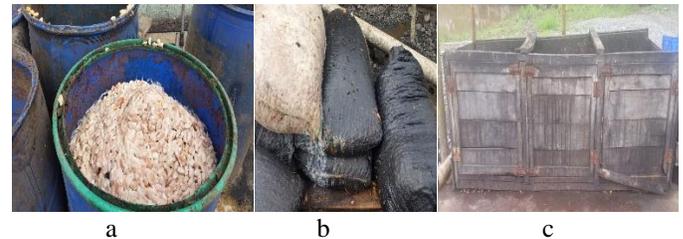


Fig. 1 Recipientes: a) tanques de plásticos. b) sacos de yute. c) caja de madera

Este procedimiento de fermentación puede tomar entre cinco a siete días según el genotipo del cacao, en Ecuador se cultiva el cacao fino de aroma (o también llamado cacao Nacional) y el CCN51. Durante este tiempo, los agricultores deben voltear y mezclar regularmente los granos para garantizar una fermentación uniforme y prevenir la proliferación de microorganismos no deseables. Por consiguiente, un buen control sobre el proceso de fermentación garantiza la calidad del cacao [1] [8].

A. Definición del problema

Los productores utilizan diferentes métodos en la fermentación del cacao con características y efectos en el proceso. La fermentación en bolsas o sacos es el método tradicional más utilizado por los agricultores, se usa con mayor frecuencia en pequeñas plantaciones o en áreas con limitados recursos y espacio [9]. Consiste en colocar los granos de cacao y la pulpa en bolsas o sacos de fibra natural, como yute o

Digital Object Identifier: (only for full papers, inserted by LACCEI).

ISSN, ISBN: (to be inserted by LACCEI).

DO NOT REMOVE

polipropileno. Las bolsas se colocan en montones o en el suelo y se voltean periódicamente para asegurar una fermentación uniforme. Si bien este método facilita el control de la fermentación y evita la mezcla con otros lotes, tal proceso genera que el producto se llene de mosquillas y atraiga a otros animales del área.

El mucílago (baba de cacao) liberado durante la fermentación se acumula en la parte inferior del saco por falta de mezcla y distribución uniforme, lo que conlleva a una mayor cantidad de desperdicio que no se incorpora eficazmente a los granos de cacao. Debido a tal acumulación, el mucílago puede actuar como una barrera entre los granos y los microorganismos responsables del proceso bioquímico de la fermentación, lo que dificulta el acceso y la interacción de estos con los azúcares presentes en los granos, afectando negativamente la calidad de la fermentación y los sabores resultantes. El mucílago no solo es una pérdida de recurso para el agricultor, sino que también puede generar problemas ambientales al no gestionarse adecuadamente. Por otra parte, los residuos de pulpa y cascara, no son aprovechados por los agricultores, siendo desechados en terrenos cercanos a sus fincas, originando un problema de contaminación del suelo y cuerpos hídricos, además de ocasionar malos olores en las inmediaciones [5] [10]

La fermentación de granos de cacao es un proceso crucial en la producción de chocolate de calidad. Este estudio propone realizar un diseño y construcción de un equipo para la fermentación del cacao, que garantice la calidad del producto final y aborde preocupaciones ambientales y de eficiencia. El fermentador permitirá que se facilite el proceso de fermentación del producto, permita el drenaje de los líquidos que se desprenden de la semilla en los primeros días de fermentación, permitiendo recolectar el exudado del mucílago para ser aprovechado para otros productos. Además, La metodología propuesta aborda la necesidad de un sistema que mantenga la temperatura adecuada, promueva la aeración y la homogeneidad en la fermentación.

B. Objetivo general

Desarrollar un prototipo fermentador de cacao en baba, con capacidad para extracción del líquido fermentado, además permita la obtención de granos de cacao con propiedades organolépticas que cumplan con los estándares de calidad aceptados por los agricultores.

II. METODOLOGÍA

La metodología propone desarrollar un prototipo de fermentación de los granos de cacao, tomando en cuenta un sistema en el cual se logre mantener la temperatura en el rango adecuado de fermentación entorno a los 50°C; además, que facilite la remoción y aeración dentro de la cámara de fermentación y por último que logre recolectar el mucílago de los granos para ser utilizados en otros procesos productivos y evitar la contaminación de los suelos.

1- **Diseño del Fermentador:** Se exploraron tres alternativas de diseño que cumplen con los requisitos fundamentales de temperatura, agitación, higiene y recolección

de mucílago. La solución final se seleccionó mediante un análisis cualitativo basado en la matriz de decisiones. ver Fig. 2.

2- **Requerimientos de diseño** fueron dispuestos según las necesidades del cliente, basados en las características fundamentales para un fermentado óptimo y de calidad.

1) *Capacidad de fermentación:* El fermentador debe tener una capacidad máxima de 6 kg de granos de cacao.

2) *Control de temperatura:* La cámara debe ser capaz de mantener y controlar la temperatura de fermentación entre 45 y 50 °C para garantizar una fermentación adecuada y consistente.

3) *Sistema de agitación:* El diseño debe incluir un sistema de volteo y aireación eficiente que permita mezclar los granos de manera uniforme, promoviendo una fermentación homogénea y evitando que los granos se adhieran entre sí.

4) *Diseño higiénico:* El fermentador debe contar con un diseño y materiales que faciliten la limpieza y el mantenimiento de la cámara, evitando la acumulación de residuos, la proliferación de hongos y el riesgo de contaminación cruzada entre lotes de cacao.

5) *Sistema de drenaje:* El diseño debe incluir un sistema capaz de drenar y recolectar el exudado del mucílago de los granos de cacao.

6) *Adaptabilidad:* El diseño se debe adaptar a diferentes condiciones y requisitos de fermentación, considerando que la duración y la intensidad del proceso depende del tipo de cacao a fermentar.

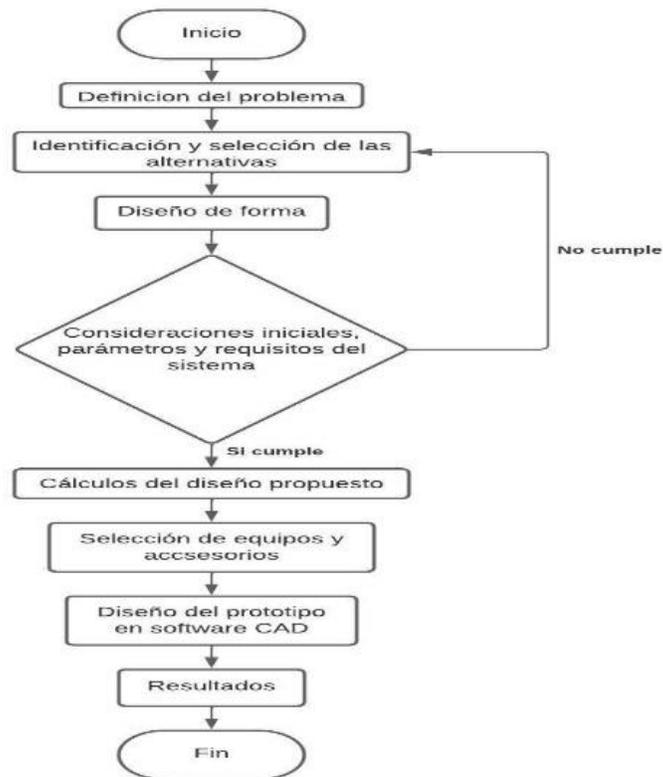


Fig. 2 Diagrama de flujo de la metodología

3- **Selección de criterio de diseño:** Los criterios de diseño seleccionados para el estudio fueron:

1) *Eficiencia:* El fermentador debe garantizar un proceso eficiente, asegurando la correcta transformación química de los granos de cacao y promoviendo el desarrollo de sabores y aromas característicos.

2) *Temperatura:* El diseño debe permitir un control de la temperatura durante el proceso de fermentación, asegurando que se mantenga dentro del rango óptimo para obtener resultados de calidad.

3) *Homogeneidad:* El fermentador debe proporcionar una agitación adecuada que permita una distribución uniforme de la temperatura y de los microorganismos en los granos de cacao, logrando así una fermentación homogénea.

4) *Facilidad de uso:* El diseño debe permitir a los productores realizar el proceso de fermentación de manera sencilla y eficiente.

5) *Mantenimiento:* El fermentador debe contar con un diseño que facilite la limpieza y el mantenimiento, minimizando la acumulación de residuos y la proliferación de bacterias, garantizando la higiene y el correcto funcionamiento del equipo.

6) *Durabilidad:* El fermentador debe ser resistente, utilizando materiales duraderos que soporten las condiciones de fermentación y las del medio, asegurando una extensa vida útil.

4- Método de Comparación por Pares: Con la finalidad de conocer el grado de importancia de cada uno de los criterios planteados, se aplicó el método de comparación por pares; dando valores de cero, uno y dos según la relevancia de cada criterio, siendo cero el de menor relevancia y dos el de mayor relevancia. Luego se procedió a realizar la Tabla I para darle la respectiva ponderación a cada uno de los criterios planteados.

TABLA I

COMPARACIÓN POR PARES PARA EL PROTOTIPO DE FERMENTADOR DE CACAO

Criterios de selección	Eficiencia	Temperatura	Homogeneidad	Facilidad de uso	Mantenimiento	Durabilidad	Calificación	Peso	
Eficiencia	-	0	0	2	2	2	6	0,19	
Temperatura	2	-	1	2	2	2	9	0,29	
Homogeneidad	2	1	-	2	2	2	9	0,29	
Facilidad de uso	0	0	0	-	1	2	3	0,10	
Mantenimiento	0	0	0	1	-	2	3	0,10	
Durabilidad	0	0	0	0	1	-	1	0,03	
	Total							31	1

Los criterios de mayor relevancia fueron los de temperatura y homogeneidad con un peso de 0,29. Estos valores obtenidos fueron necesarios para poder plantear la matriz de decisiones y escoger la mejor solución de entre todas las alternativas.

Es importante mencionar que la Consideraciones Éticas y de Seguridad del diseño y la implementación del fermentador debe de cumplan con las regulaciones éticas y de seguridad pertinentes. Se prestará especial atención a la salud y el medio ambiente durante todo el proceso

A. Identificación y Selección de las Alternativas

A partir de los requerimientos y criterios establecidos, se presentaron tres diferentes alternativas de diseño. A continuación, se detallan cada uno de estos diseños.

La alternativa 1. Consiste en un prototipo construido de acero inoxidable, el material garantiza la ausencia de contaminación del producto. El control de temperatura se llevará a cabo mediante un sensor ubicado en el interior del fermentador. Para facilitar la agitación necesaria, la cámara de fermentación estará equipada con un eje que podrá ser accionado manualmente o mediante un motor. Este sistema se encargará de asegurar una adecuada aireación de la masa. Además, la cámara estará perforada con agujeros de 8 mm de diámetro, dispuestos a una distancia de 5 a 8 cm entre sí, con el propósito de recolectar el exudado del grano de cacao.

La alternativa 2 El prototipo estará construido con madera de laurel, siendo un material ampliamente utilizado por los agricultores debido a su disponibilidad y durabilidad. Se incorporará un sensor de temperatura para monitorear el punto máximo alcanzado por los granos durante el proceso de fermentación. La extracción de la masa se llevará a cabo mediante la rotación completa del tambor, impulsada por un motor instalado en el exterior del fermentador. Además, la base del fermentador estará perforada con agujeros de 8 mm de diámetro y separados entre sí por una distancia de 5 a 8 cm, con el fin de permitir el drenaje de los líquidos iniciales generados durante la fermentación.

La alternativa 3 El prototipo estará fabricado con plástico libre de BPA (Bisfenol A), garantizando la seguridad y la ausencia de contaminantes en el proceso de fermentación. Al igual que las dos alternativas anteriores, incluirá un sensor de temperatura ubicado en el interior del fermentador para monitorear con precisión las condiciones térmicas. La agitación de la masa se logrará mediante el movimiento completo del tambor. Para el sistema de destilado y recolección del exudado, la base estará perforada con agujeros de 8 mm de diámetro, dispuestos a una distancia de 5 a 8 cm entre sí.

Una vez analizadas las posibles alternativas de diseño, se procederá a establecer una matriz de decisiones que cumpla de manera óptima con los requerimientos y criterios predefinidos. En la Tabla II se presenta la matriz de decisión. Como resultado, se seleccionará un prototipo de fermentador con cambio de tambor, fabricado con una combinación de madera y acero inoxidable, con el propósito de analizar de manera precisa la temperatura alcanzada.

TABLA II

MATRIZ DE DECISIONES DEL PROTOTIPO DE FERMENTADOR DE CACAO

Criterio	Peso	Alternativas de fermentador					
		Acero inoxidable		Madera		Plástico	
Eficiencia	0,19	3	0,57	3	0,57	2	0,38
Temperatura	0,29	2	0,58	2	0,58	1	0,10
Homogeneidad	0,29	3	0,87	3	0,87	3	0,87
Facilidad de uso	0,10	2	0,20	3	0,30	3	0,30
Mantenimiento	0,10	3	0,30	2	0,20	2	0,20
Durabilidad	0,03	3	0,09	1	0,06	2	0,06
Total	1		2,61		2,58		2,39

B. Diseño de Forma y Cálculos del Diseño Propuesto

1) Diseño de la cámara de fermentación: Según Mitchell et al, 2006, el material con el cual se fabrica la cámara de fermentación es determinante para una fermentación óptima y por ende un producto final de calidad [6]. En la selección del material se tomó un coeficiente de transferencia de calor sea alto, manteniendo la temperatura dentro de la cámara de fermentación en 45°C aproximadamente, para que el embrión del grano de cacao muera y se genere la actividad enzimática.

Para conocer las dimensiones y el volumen de la cámara se partió de la ecuación (1) para hallar el volumen del cacao.

$$\rho_{Cacao} = \frac{m_{Cacao}}{V_{Cacao}} \quad (1)$$

Donde:

$$\begin{aligned} \rho_{Cacao} &: \text{Densidad del cacao} = 719 \text{ Kg}/\text{m}^3 \\ m_{Cacao} &: \text{Masa de cacao} = 10 \text{ Kg} \\ V_{Cacao} &: \text{Volumen de cacao} \end{aligned}$$

Según Castillo, 2019, la masa del cacao debe ocupar menos del 50% de la cámara de fermentación [7], por lo que se determinó que el volumen del cacao será igual al 40% del volumen total de la cámara de fermentación, ver ecuación (2).

$$V_{Cacao} = 0.4 * V_{cámara} \quad (2)$$

Sabiendo que la cámara de fermentación tiene forma de prisma octogonal, se obtiene la ecuación (3).

$$V_{Cacao} = 0.4 * 4 * L * a * h \quad (3)$$

Donde:

$$\begin{aligned} L &: \text{Lado de la base del hexagono} \\ a &: \text{Apotema del hexagono} \\ h &: \text{Longitud del prisma hexagonal} \end{aligned}$$

2) Criterio de selección del material del eje de transmisión y armadura de la cámara de fermentación: La selección se la realizó en base a las propiedades mecánicas de cada material. El acero inoxidable AISI 304 y el acero ASTM A36, fueron los seleccionados debido a su bajo costo y condiciones de carga.

Para realizar el diseño del eje de transmisión, se consideraron todas las cargas presentes que actúan en el sistema, tal y como se muestra en la Fig. 3.

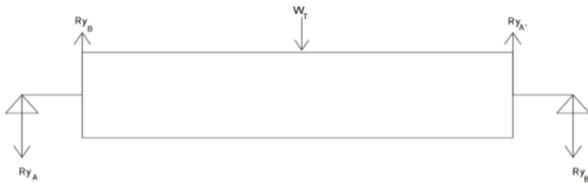


Fig.3. Diagrama de cuerpo libre del eje de transmisión

A partir del diagrama de cuerpo libre se obtiene la ecuación (4) que permite calcular la carga total del cacao.

$$W_T = W_{Carga\ Cacao} + W_g \quad (4)$$

Donde:

$$\begin{aligned} W_T &: \text{Carga total sobre el sistema de fermentacion} \\ W_g &: \text{Carga de madera y estructura de acero} \\ W_{Carga\ Cacao} &: \text{Carga de cacao (masa de 10 Kg)} \end{aligned}$$

La carga de madera y estructura de acero que la recubre W_g , se obtiene a partir de la ecuación (5).

$$W_g = W_{madera} + W_{estructura} \quad (5)$$

W_{madera} se obtiene resolviendo la ecuación (6).

$$W_{madera} = (m_{frontal})(g)(8) + (m_{lateral})(g)(2) \quad (6)$$

Donde:

$$\begin{aligned} m_{frontal} &: \text{La masa de los tablonos frontales de madera} \\ m_{lateral} &: \text{La masa de los tablonos laterales de madera} \\ g &: \text{Aceleracion debido a la gravedad} \end{aligned}$$

Para $W_{estructura}$ se debe tomar en cuenta ciertas consideraciones dadas por el fabricante; se escogió un perfil de acero ASTM A36, el cual tiene un peso por metro lineal de $W_{perfil} = 1,19 \text{ Kg}/\text{m}$, ver ecuación (7).

$$W_{estructura} = (W_{perfil})(L)(8)(2) \quad (7)$$

Donde: L : Longitud del tablon ,

W_{perfil} : Peso del perfil de acero

3) Fuerza de tiro para generar rotación del baúl de fermentación: Se debe calcular la fuerza de tiro para saber cuál es momento torsor que necesita el motor para hacer rotar el sistema de fermentación, ver ecuación (8). Para esto se considera a la cámara de fermentación con carga como un sólido rígido con centro de rotación en su centro de masa.

$$\sum M = I * \alpha \quad (8)$$

Donde: I : Inercia de la cámara de fermentación ,
 α : aceleración angular

Para obtener la inercia de la cámara de fermentación, se usa la ecuación (9).

$$I = m_i * R_i^2 \quad (9)$$

Donde: m_i : masa del sólido , R_i : radio del sólido

Mientras que para obtener el valor de α se usa la ecuación (10):

$$\alpha = \frac{\omega_f - \omega_0}{t} \quad (10)$$

Donde:

ω_f : Velocidad angular final
 ω_0 : Velocidad angular inicial
 t : Tiempo

La fuerza de tiro con la que la cámara de fermentación rotará se obtiene de la ecuación (11).

$$T = F * d \quad (11)$$

Esta ecuación se la iguala con la ecuación (8) del momento torsor, quedando: $F * d = I * \alpha$, de donde se despeja F resultando la ecuación (12).

$$F = \frac{I * \alpha}{d} \quad (12)$$

Donde: F : Fuerza de tiro, d : Distancia

4) **Diseño del eje de transmisión por fatiga:** Se consideró un factor de seguridad $FS \geq 2,5$ para vida infinita; se determinó el diámetro del eje, tomando en cuenta el momento torsor generado por el motor al arrancar, para este caso se analizó que no existían esfuerzos torsores alternantes por lo que el esfuerzo de torsión medio es 0. Además, se tomó en cuenta esfuerzos fluctuantes de flexión en el punto crítico "A", ver Fig. 4 y 5, estos existirán por la caída por gravedad del cacao al rotar la cámara de fermentación.

Según norma ASME, la ecuación para determinar el diámetro de un eje bajo condiciones de carga alternativa es:

$$d = \left\{ \frac{32N_f}{\pi} \left[\left(K_f * \frac{Ma}{Se} \right)^2 + \frac{3}{4} \left(K_{fsm} * \frac{T_m}{S_y} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right\}^{\frac{1}{3}} \quad (13)$$

Donde:

$$Se = C_{CA} \cdot C_R \cdot C_{Te} \cdot C_{TA} \cdot C_{SU} \cdot [0,5 \cdot S_{ut}] \quad (14)$$

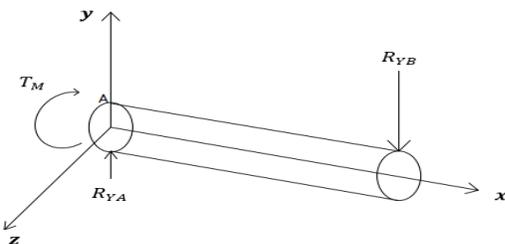


Fig. 4 Diagrama de cuerpo libre del eje de transmisión y punto crítico "A"

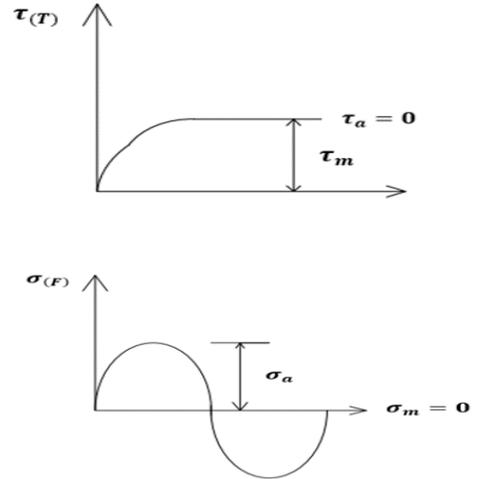


Fig. 5 Esfuerzos fluctuantes de flexión en el punto crítico "A"

C. Selección del equipos y accesorios

1) **Selección del diámetro de poleas:** Se considera la ecuación (15) para realizar la selección de las poleas que conformaron el sistema de transmisión del fermentador.

$$D_1 \omega_1 = D_2 \omega_2 \quad (15)$$

Donde: D_1 : Diámetro de la polea menor, ω_1 : Velocidad de rotación del motor, D_2 : Diámetro de la polea mayor, ω_2 : Velocidad de rotación del eje

Obteniendo la ecuación (16) que describe la relación de transmisión y permite encontrar los diámetros referenciales de las poleas a partir de la velocidad de salida del motor reductor y la velocidad de giro del eje de transmisión.

$$i = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{D_2}{D_1} \quad (16)$$

2) **Longitud de la banda de transmisión:** Para realizar una correcta selección de la banda fue necesario tomar en cuenta los valores obtenidos para las poleas de la sección anterior. Al reemplazar dichos valores en la ecuación (17), se logró hallar la longitud de la banda con la que trabajará el sistema.

$$L_p = 2a + 1,57(D_2 + D_1) + \frac{(D_2 + D_1)^2}{4a} \quad (17)$$

Donde: L_p : Longitud de la banda de transmisión
 a : Distancia entre ejes de las poleas

D. Diseño del prototipo en software CAD

El modelado del prototipo de fermentador de cacao, en base a los requerimientos y criterios de diseño, fue desarrollado

con la ayuda del software CAD considerando todos los cálculos mencionados en el literal anterior, ver Apéndice A.

III. RESULTADOS

Los resultados obtenidos del diseño a partir del análisis teórico y experimentaciones del prototipo construido se detallan en esta sección, así como también, el costo total del proyecto.

A. Resultados del diseño

1) **Dimensiones de la cámara de fermentación:** En la Tabla III, se detallan los datos preliminares de la cantidad de producto y densidad del cacao en baba a fermentar. En la tabla IV se presenta las dimensiones de la cámara de fermentación; obtenidas a partir de la ecuación (3). En la Fig. 6 se presenta el bosquejo de las dimensiones de la cámara de fermentado [11]

TABLA III
PRODUCTO: MASA Y DENSIDAD DE CACAO EN BABA

Masa de cacao [kg]	10
Densidad de cacao [kg/m ³]	719

TABLA IV
DIMENSIONES DE LA CÁMARA DE FERMENTACIÓN

Forma	Octagonal
Longitud de la cámara [cm]	44
Lado de la cara lateral [cm]	15
Volumen de la cámara [LT]	34
Volumen de cacao [LT]	13,6

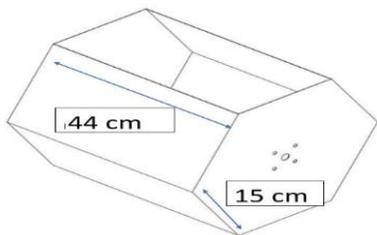


Fig. 6 Dimensiones de la cámara de fermentación

2) **Carga total sobre el sistema de fermentación:** Se deben considerar ciertos parámetros de madera, estructura metálica y la carga otorgada por la masa de cacao en baba, ver Tabla V.

TABLA V
PARÁMETROS DE LA ESTRUCTURA DE CÁMARA

Masa del tablón lateral de la cámara de fermentación [kg]	0,47
Masa del tablón frontal de la cámara de fermentación [kg]	0,77
Densidad de madera de laurel [kg/m ³]	580
Peso del perfil de aluminio [kg/m]	1,19
Longitud del perfil lateral [m]	0,15
Longitud del perfil frontal [m]	0,44

Con los datos de la Tabla V se evaluaron las cargas totales del tambor, permitiendo determinar la potencia del motor que

girará cada cierto tiempo para que el cacao en baba se fermente mejor y no se dañe. Los resultados se presentan en la tabla VI.

TABLA VI
CARGAS PUNTUALES QUE ACTÚAN SOBRE EL FERMENTADOR DE CACAO

Carga del cacao [N]	95,93
Carga de la madera [N]	60,23
Carga de la estructura [N]	28,02
Carga W _g [N]	88,25
Carga total sobre el fermentador [N]	184,18

3) **Fuerzas de rotación:** Para calcular la fuerza requerida del motor reductor que permita rotar la cámara de fermentación, fue necesario asumir ciertos parámetros tales como; velocidad angular, tiempo y distancia. Dichos parámetros se muestran en la tabla VII.

TABLA VII
PARÁMETROS PARA EL CÁLCULO DE LA FUERZA DE ROTACIÓN DEL MOTOR REDUCTOR

Velocidad angular inicial ω_0 [rev/min]	20
Velocidad angular final ω_f [rev/min]	0
Distancia [m]	0,10

Con los valores de la Tabla VII se procede a calcular la aceleración angular, ver Tabla VIII.

TABLA VIII
FUERZA DE ROTACIÓN DE LA CÁMARA DE FERMENTACIÓN

Aceleración angular [rad/s ²]	2,09
Inercia [kg*m ²]	0,34
Momento [N*m]	0,71
Fuerza de rotación [N]	7,08

4) **Diseño del eje:** Para el diseño del eje del fermentador, se aplica la norma ASME, ver la Tabla IX.

TABLA IX
CRITERIOS ASUMIDOS PARA DETERMINAR EL DIÁMETRO DEL EJE DEL FERMENTADOR

C_{CA}	1
C_{TE}	1
C_{TA}	1
C_{SU}	0,84
C_R	1
Su_t [MPa]	500
S_y [MPa]	200
K_t	3,5
K_{ts}	2
K_f	2,25
K_{fs}	1,57
N_f	2,5
T_m [Lb * in]	42,22
M_a [Lb * in]	152,14

Posteriormente se determinan los diámetros nominales para el eje del fermentador. Los valores se presentan en la Tabla X.

TABLA X
RESULTADOS DEL DISEÑO DEL EJE DEL FERMENTADOR

S_e [Kpsi]	30,24
Diámetro menor d [mm]	9,14
Diámetro mayor D [mm]	14,48

5) **Selección del motor reductor:** Se asumió la velocidad de giro de baja revolución aproximadamente 5 RPM para que no dañe el cacao en baba dentro de la cámara. El cálculo del motor fue de 1250 RPM para vencer las cargas del tambor. Se procedió a la selección de un reductor con relación 1:50 obteniendo una salida de 25 RPM. Posteriormente, se reduce la velocidad con un juego de poleas y banda alcanzando la velocidad inicialmente establecida. En Tabla XI se presentan los resultados obtenidos y en la Tabla XII el tipo de motor seleccionado.

TABLA XI
DATOS PARA LA SELECCIÓN DEL MOTOR REDUCTOR

Fuerza de giro [N]	7,0851
Potencia necesaria [Hp]	0,0198
Torque nominal [Nm]	2,63

TABLA XII
ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL MOTOR REDUCTOR SELECCIONADO

Motor- reductor	4GN180K-C10-GIV
Potencia del motor [W]	25
Velocidad de salida del motor [rpm]	1250
Relación de reducción	1:50
Velocidad de salida del reductor [rpm]	25

6) **Diámetros de las poleas de transmisión:** Para obtener los valores de los diámetros de las poleas, fue necesario asumir un diámetro referencial comercial para la polea menor. En la Tabla XIII, se presentan los diámetros obtenidos para la selección de las poleas del sistema de transmisión.

TABLA XIII
RELACIÓN DE TRANSMISIÓN Y DIÁMETROS DE LAS POLEAS DEL SISTEMA DE TRANSMISIÓN

Relación de transmisión	5
Diámetro menor [mm] (asumido)	50,8
Diámetro mayor [mm]	127
Distancia entre ejes [mm]	720

7) **Selección de banda de transmisión:** Se logró obtener la longitud de la banda necesaria para el sistema de transmisión; además, el perfil y tipo de banda viene dado también por el tipo de polea que se utilizó, ver Tabla XIV.

TABLA XIV
ESPECIFICACIONES DE LA BANDA DE TRANSMISIÓN

Tipo de banda	Tipo "V"
Perfil de banda	Tipo "A"
Longitud de banda [mm]	1683,31

B. Construcción del equipo

En esta sección, se especifica materiales utilizados y procedimiento empleado para la construcción.

1) **Materiales:** Los materiales utilizados para la implementación del prototipo de fermentador de cacao fueron los siguientes:

- ✓ Madera de laurel de 20 mm de espesor. (cámara 1)
- ✓ Acero inoxidable de 1mm de espesor (cámara 2)
- ✓ Tubo cuadrado de acero ASTM A36 1 ½" x 1.5 mm.
- ✓ Ángulo de acero ASTM A36 1 x 1/8".
- ✓ Eje de acero inoxidable de 1".
- ✓ Chumacera de piso de 13 mm.
- ✓ Chumacera de pared de 20 mm.
- ✓ Motor 4IK25W-C1-GN-XG de 100V / 1HP / 1250 RPM.
- ✓ Reductor 4GN180K-C10-GIV relación de reducción 1:50.
- ✓ Polea de aluminio de 2".
- ✓ Polea de aluminio de 5".
- ✓ Banda de transmisión.
- ✓ Garruchas de 2".

2) **Procedimiento de construcción:** Se inicia con la construcción de la cámara de fermentación fabricada en madera de laurel con las medidas especificadas, la cámara cuenta puerta y la sección de huecos para escurrir material recubierta con una malla para no entrar insectos. Después, se construye la base de recolección de la baba o mucilago o exudado construido de madera de laurel.

Posteriormente se construyó la estructura de soporte del fermentador y demás componentes que lo conforman, que incluye la base del motor y la superficie que recoge el mucilago. Debido al considerable peso que debe soportar el armazón, fue fabricado con acero estructural ASTM A36. Por último, se realizó la construcción del eje de transmisión con acero inoxidable AISI 304.

Una vez fabricados los principales componentes del fermentador, se realiza en ensamblado del prototipo. En la Fig. 7 y Fig. 8 se muestra el prototipo de fermentador armado y listo para su funcionamiento.



Fig. 7 Fermentador de cacao con tambor de madera



Fig. 8 Fermentador de cacao con tambor de acero inoxidable

C. Experimentación:

1) **Primera muestra:** Para esta fermentación, se decidió experimentar con cacao CCN-51 recién cosechado y desgranado el mismo día, para comparar el efecto de este cambio con respecto a la primera muestra; en esta prueba se ingresaron 7 Kg de cacao en baba dentro de la cámara para realizar la fermentación durante 6 días. Para este caso, el volteo de las pepas de cacao en baba se realizó dos veces al día, por aproximadamente 10 min. Para este estudio se utilizó el tambor construido de madera

El primer día de fermentación se separó los granos de las mazorcas y se pesó la cantidad de granos de cacao para fermentar. Posteriormente, se introdujeron los granos en la cámara de fermentación y comenzó el drenaje y la recolección del mucílago. Se insertaron los termopares para medir las temperaturas en diferentes puntos de la masa y la temperatura ambiental.

El segundo día de fermentación se realizó el primer volteo de la masa por un tiempo de 10 minutos, la remoción se realizaba dos veces por día para mejorar la aireación del producto. Se registraron valores de 27,3 °C en el centro de la masa, 23,8 en el fondo de la masa y 24,3 en la superficie de la masa. El cacao seguía escurriendo mucílago, por lo que en este día no se pudo medir la cantidad recolectada. Se abrió la cámara de fermentación para verificar el estado del producto y se corroboró que el proceso se estaba llevando de manera idónea.

El tercer día de fermentación se realizó nuevamente la remoción de la masa dos veces y se abrió la compuerta de la cámara para verificar el estado de los granos, se observó que la masa se encontraba en perfectas condiciones y se procedió a realizar el registro de las temperaturas, obteniendo valores de

28,8 °C en el centro de la masa y 28,7 °C tanto en el fondo como en la superficie de la masa. En este día la masa dejó de escurrir mucílago, por lo que se midió la cantidad recolectada obteniendo 1125 ml de exudado.

El cuarto día de fermentación no presentó ninguna novedad, por lo que se repitió el mismo proceso que se venía siguiendo los días anteriores: se registró la temperatura de los granos obteniendo valores de 34,4 °C en el centro, 33,6 °C en el fondo y 32,8 °C en la superficie de la masa y por último se verificó que el producto se encuentre en buen estado.

El quinto día de fermentación se observó uno de los picos más altos de temperatura, llegando a tener valores de 42,4 °C en el centro, 34,8 °C en el fondo y 39,2 °C en la superficie de la masa, por lo que se concluyó que el cacao aún seguía en el proceso químico que se lleva a cabo durante la fermentación, por lo que no fue posible retirarlo del interior de la cámara; por este motivo se realizó nuevamente el proceso de remoción tal y como se venía haciendo los días anteriores y se verificó que la masa se encontraba en buen estado.

El sexto día de fermentación (último día) se registró un descenso considerable en la temperatura del cacao, alcanzando valores de 33,1 °C en el centro, 31 °C en el fondo y 30,7 °C en la superficie de la masa; por lo consiguiente, se procedió a abrir la cámara de fermentación para verificar el estado del producto, encontrando que el cacao, tenía el color marrón característico de los granos fermentados. Después se retiró el cacao del interior de la cámara dando un peso de la muestra de 4.2 kg.

Finalmente se analizó el porcentaje de humedad de la pepa de cacao, se procedió al secado de la muestra y prueba de tonalidad. Para el análisis de esta última prueba se aplica la normativa INEN 176, la cual indica que, de cada 100 granos analizados, deben existir mínimo 65 granos correctamente fermentados para que el proceso sea reconocido como exitoso

En la figura 9, se muestran los datos de temperatura alcanzada en la prueba.

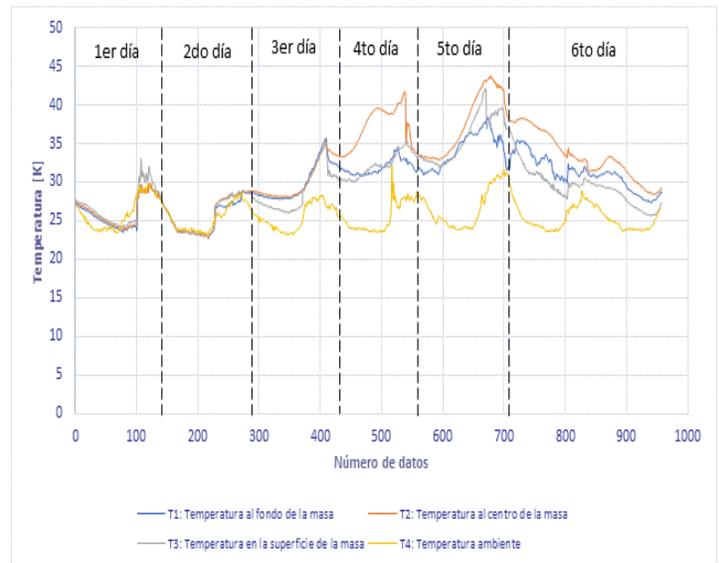


Fig. 9 Comportamiento de la temperatura durante los días de fermentación

2) **Segunda muestra:** Se realiza la prueba de fermentación con 7 kg de cacao CCN51, utilizando en este caso un tambor/cámara construida con acero inoxidable.

El primer día de fermentación se realizó el desgranado de la mazorca, pesando la cantidad de granos con baba obtenidos. Se colocaron los granos dentro de la cámara de fermentación para comenzar el escurrimiento y recolección del exudado de mucilago. Se midió las temperaturas del fermentado de la pepa, para ello se utilizó termopares tipo K, conectado a una data logger de 4 canales, con la finalidad de medir la temperatura de la parte inferior, en la mitad y superior de la masa de cacao; además, se midió la temperatura ambiental.

El segundo día de fermentación se realizó el primer volteo durante 10 minutos y se registró la temperatura de la masa ese día. Alcanzando temperaturas de 27,4°C en el centro de la masa, 27,2 °C en el fondo de la cámara de fermentación y 27,6 °C en la superficie; además, se observa el escurrimiento del mucilago de la cámara al recolector del exudado.

El tercer día de fermentación se realizó el segundo volteo de la masa de cacao, registrando nuevamente las temperaturas durante ese día, obteniendo los valores de 28.3 °C en el fondo de la cámara, 50,1 °C en el centro de la masa y 29,7 °C en la superficie de la masa. Además, se terminó de escurrir el mucilago de la masa de las pepas de cacao, registrando una cantidad recolectada de 600 ml aproximadamente.

El cuarto día de fermentación se registró un descenso repentino en la temperatura de la masa fermentada, por lo que se decidió abrir la cámara para revisar el estado de los granos de cacao. La temperatura del centro de la cámara fue de 35°C, y las temperaturas de la parte superficial de la masa y fondo alcanzaron la temperatura de la pared (condición ambiental), se evidencio influencia de la temperatura que alcanzo las paredes de acero inoxidable en la muestra.

En el quinto y sexto día la temperatura de la muestra asciende aproximadamente 10°C más, en relación con la temperatura ambiental. Lo cual podemos indicar con esta experimentación, que la temperatura ambiental influye en un fermentador de paredes de acero inoxidable, por lo que debe ser aislada para evitar perdidas de calor de las pepas de cacao en fase de fermentación.

La Fig. 10 se muestra las temperaturas obtenidas durante el proceso de fermentación.

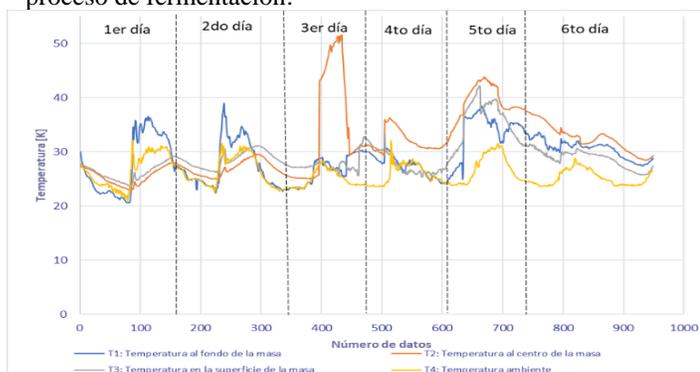


Fig. 10 Comportamiento de la temperatura durante los días de fermentación

D. Costo del proyecto

A continuación, se detallan los costos de construcción del prototipo fermentador de cacao; los cuales se distribuyen en materiales e insumos, maquinado de componentes y mano de obra, ver Tabla XV.

TABLA XV
COSTOS DE LA CONSTRUCCIÓN DEL FERMENTADOR

Cantidad	Descripción	Unidad	Precio
Estructura			
1	Tubo cuadrado 40mm por 1.2 mm de espesor	Unidad	\$14,86
1	Platina de 25mm x 3mm de espesor	Unidad	\$7,25
1	Angulo L de 35 x 3mm	Unidad	\$8,40
4	Placas 50 x 50 mm	Unidad	\$4,00
4	Garruchas de 2"	Unidad	\$12,80
16	Pernos cabeza de botón M6 x 13 con anillo plano y presión	Unidad	\$3,10
4	Tuercas remachables M8	Unidad	\$1,60
1	Angulo de 100mm x 100mm x 3mm	Unidad	\$2,00
1	Angulo de 40 mm x 700mm x 3 mm	Unidad	\$1,00
1	Platina de 25mm x 6 mm	Unidad	\$1,50
2	Pernos cabeza de botón M8 x 16mm	Unidad	\$0,50
4	Pernos M8 x 30mm	Unidad	\$0,60
1	Pintura anticorrosiva	Litro	\$6,95
Tambor			
	Tambor de madera		\$30,00
	Bandeja de madera		\$15,00
	Tambor de acero inoxidable		\$ 55,00
1	Perilla con esparrago M8	Unidad	\$2,50
1	Platina 100 x 100 x 6 mm	Unidad	\$2,00
2	Bisagras de 8 mm	Unidad	\$3,40
2	Bisagras de madera	Unidad	\$3,80
1	picaporte de madera	Unidad	\$2,10
	Transporte		\$5,00
Eje			
1	Eje de acero inoxidable AISI 304 de 1"	Metro	\$20,00
Guarda			
1	Plancha perforada de 3 mm	Unidad	\$8,50
1/2	Pintura anticorrosiva amarilla	Litro	\$2,50
Materiales			
1	Banda A59	Unidad	\$13,00
1	Polea 2"	Unidad	\$2,00
1	Polea 5"	Unidad	\$4,00
2	Chumacera de piso	Unidad	\$13,50
2	Chumacera de pared	Unidad	\$18,50
1	Caja eléctrica	Unidad	\$6,50
1	Templador	Unidad	\$7,00
1	Bocín	Unidad	\$2,00
1	Enchufe timmer para programación de ciclos de encendido	Unidad	\$18,52
3	Cable triple	Metros	\$2,12
2	cable doble x 14	Metros	\$1,40
1	Enchufe de tres terminales hembra	Unidad	\$2,10
1	Enchufe de tres terminales macho	Unidad	\$4,10
1	Bornera para cable 16	Unidad	\$1,00
10	Terminales para cable 16	Unidad	\$0,90
1	Motor	Unidad	\$120,00

Mano de obra			
	Corte de perfiles		\$10.00
	Soldadura de estructura		\$20.00
	Pulido de estructura		\$10.00
	Pintada de estructura		\$15.00
	Mecanizado de Eje		\$20.00
TOTAL			\$493.86

Cabe indicar que los precios indicados son para utilización de nuevos materiales, a partir de ello, en el proyecto se aplica el concepto de economía circular, lo cual la reutilización de estructuras de metálicas reduciría el costo a 377.35 dólares americano.

IV. CONCLUSIONES

Se ha diseñado e implementado un prototipo para fermentación de cacao que permita aprovechar la baba fermentada y conseguir un cacao fermentado de óptimas condiciones con un proceso más limpio, evitando el contacto del cacao fermentado con animales e insectos de la zona. Además, se ha logrado recolectar el exudado de mucílago, siendo un desperdicio actual de la fermentación, con la finalidad de dar un valor agregado como materia prima para el proceso productivo de pesticidas, la remediación del suelo, licores o bebidas, generando impactos positivos tanto en términos ambientales como económicos, al reducir la carga de desechos y aumentar el rendimiento del proceso.

El prototipo ha permitido realizar una fermentación de manera controlada y uniforme del cacao en baba, logrando una buena fermentación de más del 75% de los granos de cacao y recolectando aproximadamente 1125 ml de mucílago a partir de 14 kg cacao en baba en ambas pruebas, con relación a ello el tiempo de fermentado del producto no se reduce, lo que se logra es mantener una temperatura de muestra superior entre los 40°C hasta los 45 °C, permitiendo obtener un cacao con buena calidad organoléptica (olor y sabor). Además, el diseño propuesto permitió optimizar las remociones de manera automatizada y eficiente, garantizando el volteo de la totalidad de la masa y la distribución uniforme de la temperatura dentro de la cámara de fermentación hacia los granos de cacao. El uso de materiales tales como; madera, acero inoxidable o plásticos para la construcción de la cámara o tambor del fermentador debe de considerarse que el uso de madera a corto plazo genera hongo lo cual el agricultor debe de llevar un plan de limpieza de esta. Utilizando acero inoxidable sube el costo del equipo, cuya cámara debe estar aislada para evitar pérdidas de calor por el propio material de acero con la temperatura ambiental.

En conclusión, el diseño y prototipo implementado, muestra un proceso sostenible para la fermentación de cacao, al generar impactos positivos en beneficio de la industria y el sector agrícola. Sin embargo, es importante reconocer que la implementación de este prototipo conlleva desafíos propios, tales como: financiamiento, capacitación y adaptación de las comunidades agrícolas a los nuevos procesos; por lo que es fundamental garantizar que el diseño y la implementación del fermentador sean accesibles y relevantes para los pequeños

productores. Finalmente, la reutilización de materiales estructurales permite disminuir los costos de fabricación, siendo rentable para las comunidades cacaoteras.

V. RECOMENDACIONES

Para mejorar el diseño del prototipo actual se recomienda la implementación de distribuidores en forma de aletas en la superficie interna del tambor rotatorio, hechas de acero inoxidable. Esto ayudará a que los granos se separen al golpear la masa con los distribuidores, haciendo aún más homogéneo el proceso.

VI. REFERENCIAS

- [1] G. Enríquez, *Cacao Orgánico. Guía para Productores Ecuatorianos*, Segunda., vol. 54. Quito. Ecuador: INIAP, 2010.
- [2] V. Barrera *et al.*, "LA CADENA DE VALOR DEL CACAO Y EL BIENESTAR DE LOS PRODUCTORES EN LA PROVINCIA DE MANABI-ECUADOR INIAP-ESTACIÓN EXPERIMENTAL SANTA CATALINA Unidad de Economía Agrícola," Quito, Ecuador, 2019. [Online]. Available: www.iniap.gob.ec
- [3] E. Cros, "Factores condicionantes de la calidad del cacao," in *Memorias del Primer Congreso Venezolano del Cacao y su Industria*, FUNDACITE Aragua, 2000, pp. 16–32.
- [4] R. D. Rivera Fernández *et al.*, "EFECTO DEL TIPO Y TIEMPO DE FERMENTACIÓN EN LA CALIDAD FÍSICA Y QUÍMICA DEL CACAO (*Theobroma cacao* L.) TIPO NACIONAL," *Ciencia y Tecnología*, vol. 5, no. 1, pp. 7–12, Jul. 2012, doi: 10.18779/cyt.v5i1.120.
- [5] S. Villagómez García and F. Argüello Moreta, "OPTIMIZACIÓN Y APROVECHAMIENTO DEL RESIDUO (EXUDADO DEL MUCÍLAGO) DE LA ALMENDRA FRESCA DEL CACAO (*THEOBROMA CACAO* L.) CCN51 EN LA ELABORACIÓN DE VINAGRE," *Tsafiqui - Revista Científica en Ciencias Sociales*, no. 4, pp. 7–19, Dec. 2013, doi: 10.29019/tsafiqui.v0i4.256.
- [6] D. Mitchell, N. Krieger, and M. Berovic, *Solid-State Fermentation Bioreactors: Fundamentals of Design and Operation*. New York, 2006. doi: 10.1007/3540312854.
- [7] J. Castillo-Ramos, "DISEÑO DE UN FERMENTADOR ORIENTADO A MEJORAR EL PROCESO DE FERMENTACIÓN DEL CACAO CRIOLLO BLANCO DE PIURA," Universidad de Piura, Piura, 2019.
- [8] INEN, "REGISTRO OFICIAL. AGENCIA ECUATORIANA DE ASEGURAMIENTO DE LA CALIDAD DEL AGRO-AGROCALIDAD," Quito, Jul. 2011
- [9] Doris, E. O. (2011). Fermentación de Cacao (*Theobroma cacao* L.) Tipo Criollo en Diferentes tipos de fermentadores en Sector la Unión Río Negro . Universidad Nacional del Centro de Perú, Satipo. Obtenido de <https://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12894/1899/Espinoza%20Osorio.pdf?sequence=1>
- [10] Dosert, N., Roque , J., Cano , A., La Torre , M. I., Weigend , M., & Luebert , F. (2012). Hoja botánica: Cacao. *Theobroma cacao* L. Obtenido de Respositorio Digital del Ministerio del Ambiente: <https://repositoriodigital.minam.gob.pe/handle/123456789/185>
- [11] Ministerio de Agricultura y Ganadería. (04 de Septiembre de 2019). Cacao Híbrido CCN-51 cuenta con certificación de calidad. Obtenido de Ministerio de Agricultura y Ganadería: <https://www.agricultura.gob.ec/cacao-hibrido-ccn-51-cuenta-con-certificacion-de-calidad/>