



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL



FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE FERMENTACIÓN DE CACAO NACIONAL PARA LA ASOCIACIÓN DE AGRICULTORES WIÑAK

TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO MECÁNICO

PASTRANO QUIÑA WILLIAM ALDAIR
william.pastrano@epn.edu.ec

SOTOMAYOR VEGA VINICIO LENIN
vinicio.sotomayor@epn.edu.ec

DIRECTOR:
ING. OSCAR IVAN ZAMBRANO OREJUELA, MSc.
ivan.zambrano@epn.edu.ec

Quito, enero 2020

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por los señores **WILLIAM ALDAIR PASTRANO QUIÑA** y **VINICIO LENIN SOTOMAYOR VEGA**, bajo mi supervisión.

Ing. Oscar Iván Zambrano Orejuela, MSc.

DIRECTOR DE PROYECTO

DECLARACIÓN

Nosotros, **William Aldair Pastrano Quiña y Vinicio Lenin Sotomayor Vega**, declaramos bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedemos nuestros derechos de propiedad intelectual correspondiente a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.

William Aldair Pastrano Quiña

Vinicio Lenin Sotomayor Vega

DEDICATORIA

Wuillen Pastrano y Ana Quiña

El presente trabajo de titulación lo dedico con mucho cariño y afecto a mis padres, quienes han sido mi apoyo para lograr esta meta tan anhelada; el sendero hacia el triunfo se ve repleto de obstáculos, pero ustedes amados padres han contribuido a que todo sea posible, sin su ayuda no hubiese logrado llegar a donde estoy, el momento de concluir una etapa en mi vida ha llegado, pero comienza otra, espero seguir teniendo el mismo apoyo y conquistando nuevos logros que serán dedicados con mucho amor hacia ustedes.

Aldair Pastrano

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por permitirme estar con vida, llenarme de esperanza, fe y amor. Agradezco al Ingeniero Iván Zambrano por depositar su confianza en el desarrollo de este proyecto y de igual manera quiero agradecer a la Ingeniera Daysi Baño por su colaboración brindada.

Gracias a mi mamá Anita por ayudarme en el transcurso de la carrera, sus palabras de aliento y nunca rendirse quedarán plasmadas en mi memoria, agradecerle sus consejos y sus comentarios que me hicieron crecer cada día como persona.

Gracias a mi papá William, su ejemplo de profesionalismo ha sido la inspiración para conseguir varias metas en mí vida, un buen padre que siempre ha estado pendiente en aspectos económicos, académicos, salud y emocionales, agradezco el apoyo brindado en todos mis proyectos universitarios, ya que, con su ayuda he obtenido buenos resultados.

Gracias a mi hermana Aracely por ayudarme en la organización de mis tareas y proyectos, por estar siempre a mi lado acompañándome, brindándome su aliento y compartiéndome sus experiencias.

Gracias a mis abuelitos y tíos paternos y maternos que han contribuido para lograr esta meta, sobre todo agradezco a mi abuelita Alejandrina y a mi abuelito Guillermo quienes han estado pendientes en cada semestre de mi carrera apoyándome de manera incondicional.

Gracias a mi enamorada Karina por todo el amor, paciencia y comprensión, además, por estar siempre pendiente y ayudarme a lo largo de mi carrera universitaria.

Gracias a mi amigo Teófilo por todos los consejos brindados, por los momentos compartidos, por ser amable, carismático y por apoyarme en cualquier situación.

Gracias a mi amigo Vinicio por la ayuda y colaboración prestada en estos años de la carrera, así como también en el desarrollo de este proyecto de titulación.

Gracias a mi grupo de amigos “Los Mijines”; Kevin, Joselyn, Jessy, Josué, Lizeth, David, Xavier, Henry, Danny, Miguel, por su colaboración y ayuda brindada.

Aldair Pastrano

DEDICATORIA

El trabajo realizado en el presente proyecto de titulación está especialmente dedicado a mi madre Mercedes, mi padre Mario y mi hermano Raúl, quienes con esfuerzo, dedicación y paciencia supieron brindarme su apoyo incondicional para conseguir este paso tan importante en mi vida. Su ejemplo como grandes seres humanos, lo llevo conmigo y su amor como familia ha forjado el camino del "perfecto imperfecto".

Con mucho amor para mi familia...

Vinicio L. Sotomayor

AGRADECIMIENTO

Mi sincera gratitud a mi familia. Desde mis primeros pasos, los valores inculcados por mis padres, a mi hermano y a mí, han hecho que nuestras vidas se vean fortalecidas en base a la unión y al amor. Las enseñanzas de mi madre y su completo apoyo es lo que no dejan que sucumba ante las adversidades. Mi padre, con sus ideales firmes y su bondad es un ejemplo a seguir. Mi hermano que ha sido esa persona que me motiva a ser mejor, que me enseñó cómo es la vida y que al superar sus dificultades ha demostrado ser el mejor hermano que podría tener.

A Karen, mi mejor amiga de la vida, sus consejos y apoyo marcaron una amistad tan sincera al punto de convertirse en mi hermana de otra madre, parte de los pocos triunfos son gracias a ella. A Luis y Diego, que a pesar de los años continuamos siendo esos locos del Amazonas.

Los amigos fueron una parte fundamental en mi vida universitaria, como olvidar los primeros de la carrera Fernando y Ariel, las primeras personas en la poli que confiaron en mí. Mi grupo de amigos de este último año, los RCBA, nunca pensé encontrar gente tan honesta al nivel que lo son ellos. A mi amigo y compañero de tesis; cuantos trabajos, cuantas pruebas y cuantas situaciones que hemos superado para llegar a este momento. A Jessy y Kari, que han colaborado en este trabajo como si fuese suyo, demostrando su amistad en cada consejo y corrección, y por su apoyo en mi pseudo carrera musical. Por último, un agradecimiento a aquellas personas que por efímeros momentos fueron parte de mi vida, una llamada a la madrugada a veces salva una vida aparentemente derrotada.

Vinicio L. Sotomayor

ÍNDICE

CERTIFICACIÓN.....	i
DECLARACIÓN.....	ii
DEDICATORIA.....	iii
AGRADECIMIENTO.....	iv
DEDICATORIA.....	v
AGRADECIMIENTO.....	vi
ÍNDICE DE TABLAS.....	xi
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xiii
RESUMEN.....	xvi
ABSTRACT.....	xvii
INTRODUCCIÓN.....	1
Objetivo general.....	2
Objetivos específicos.....	2
1. MARCO TEÓRICO.....	3
1.1. Estado del arte de la industria del cacao.....	3
1.1.1. Breve historia de cacao en el Ecuador.....	3
1.1.2. Variedades de cacao de la producción Nacional.....	3
1.1.2.1. Cacao de variedad CCN51.....	4
1.1.2.2. Cacao Nacional Fino de Aroma.....	4
1.1.3. Producción de cacao en el Ecuador.....	5
1.1.4. Productos derivados del cacao.....	6
1.1.4.1. Productos semielaborados.....	6
1.1.4.2. Productos elaborados.....	7
1.1.5. Asociación Wiñak.....	7
1.2. Proceso de fermentación.....	9
1.2.1. Preparación de los granos de cacao para la fermentación.....	9
1.2.1.1. Cosecha.....	9

1.2.1.2.	Almacenamiento de las vainas	10
1.2.1.3.	Corte de las vainas y remoción de los granos	11
1.2.2.	Fermentación química y bioquímica	11
1.2.3.	Etapas durante la fermentación	12
1.3.	Métodos de fermentación de los granos de cacao	14
1.3.1.	Fermentación por montones	14
1.3.2.	Fermentación en canastas.....	15
1.3.3.	Fermentación en cajas de madera.....	15
1.3.4.	Fermentación en bandejas	16
1.3.5.	Fermentación en plataformas de secado	17
1.3.6.	Otros métodos de fermentación.....	17
2.	METODOLOGÍA	20
2.1.	Determinación de las especificaciones de la máquina.....	20
2.1.1.	Consideraciones iniciales	20
2.1.2.	La casa de la calidad	20
2.1.2.1.	Voz del usuario	20
2.1.2.2.	Voz del ingeniero	21
2.1.3.	Resultado de la casa de la calidad	21
2.1.4.	Conclusiones del análisis.....	22
2.2.	Evaluación y selección de alternativas	23
2.2.1.	Análisis Funcional.....	23
2.2.2.	Análisis de las alternativas.....	25
2.2.2.1.	Recepción y almacenamiento	25
2.2.2.2.	Mezclado de cacao	25
2.2.2.3.	Soporte de carga.....	26
2.2.3.	Estudio y selección de alternativas	27
2.2.3.1.	Selección del componente de recepción y almacenamiento.....	27
2.2.3.2.	Selección del componente de mezclado	29
2.2.3.3.	Selección del componente de soporte de carga	30

2.2.4.	Modelos seleccionados	32
2.3.	Cálculo de componentes y selección de materiales	33
2.3.1.	Selección del material para las paredes del fermentador.....	33
2.3.2.	Capacidad del fermentador.....	34
2.3.3.	Espesor de aislamiento térmico.....	36
2.3.4.	Diseño de miembros de madera.....	41
2.3.4.1.	Miembros de madera sometidos a Flexión.....	43
2.3.4.2.	Diseño de las paredes del tambor.....	46
2.3.4.3.	Diseño de la bandeja.....	47
2.3.4.4.	Diseño de las guías de la Bandeja.....	49
2.3.4.5.	Diseño del Eje de Madera.....	50
2.3.4.6.	Diseño de las Paletas del eje.....	51
2.3.4.7.	Diseño del caballete (miembro a Flexión).....	53
2.3.4.8.	Miembros de madera sometidos a compresión.....	54
2.3.4.9.	Diseño del caballete (miembros a compresión).....	55
2.3.5.	Diseño y selección de uniones atornilladas.....	57
2.3.5.1.	Selección de tornillos para ensamble del tambor.....	60
2.3.5.2.	Selección de Tornillos para las guías de la bandeja.....	61
2.3.5.3.	Selección de tornillos del timón.....	62
2.3.5.4.	Selección de tornillos y pernos para otros componentes.....	63
2.3.6.	Diseño del mecanismo de cierre.....	63
2.3.7.	Selección de Chumaceras.....	65
2.4.	Construcción y Montaje.....	66
2.4.1.	Construcción de la estructura de madera.....	67
2.4.2.	Construcción de la bandeja.....	68
2.4.3.	Construcción del eje.....	69
2.4.4.	Construcción de las paletas.....	69
2.4.5.	Construcción del tambor hexagonal.....	70
2.4.6.	Ensamble de la estructura.....	71

2.4.7.	Ensamble de la bandeja	71
2.4.8.	Montaje del tambor	72
3.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	73
3.1.	Pruebas ingenieriles.....	73
3.1.1.	Prueba de carga	73
3.1.2.	Prueba de aislamiento térmico.....	74
3.1.3.	Prueba de Drenado del mucílago	77
3.2.	Reforzamiento.....	79
3.3.	Resultados de la Fermentación.....	83
3.3.1.	Apreciación del color	83
3.3.2.	Cantidad de Almendras Fermentadas.....	84
3.4.	Análisis económico	86
3.4.1.	Costos de materia prima.....	86
3.4.2.	Costo de elementos normalizados.....	87
3.4.3.	Costos de mano de obra.....	88
3.4.4.	Costos varios.....	88
3.4.5.	Costo total	88
3.5.	Discusión	89
4.	CONCLUSIONES.....	91
4.1.	Conclusiones y Recomendaciones.....	91
4.2.	Recomendaciones	92
	Referencias Bibliográficas	93

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Especificaciones técnicas.	22
Tabla 2.2. Alternativas para recepción y almacenamiento.	25
Tabla 2.3. Alternativas para mezclado de cacao.	26
Tabla 2.4. Alternativas para soporte de carga.	27
Tabla 2.5. Peso específico de los criterios del componente 1.	28
Tabla 2.6. Peso específico del criterio Aislamiento térmico.	28
Tabla 2.7. Peso específico del criterio Construcción.	28
Tabla 2.8. Peso específico del criterio Ergonomía.	28
Tabla 2.9. Peso específico del criterio Costo.	28
Tabla 2.10. Prioridad de cada solución del componente 1.	29
Tabla 2.11. Peso específico de los criterios del componente 2.	29
Tabla 2.12. Peso específico del criterio Construcción.	29
Tabla 2.13. Peso específico del criterio Mezclado.	29
Tabla 2.14. Peso específico del criterio costo.	30
Tabla 2.15. Prioridad de cada solución del componente 2.	30
Tabla 2.16. Peso específico de los criterios del componente 3.	30
Tabla 2.17. Peso específico del criterio construcción.	30
Tabla 2.18. Peso específico del criterio resistencia.	31
Tabla 2.19. Peso específico del criterio costo.	31
Tabla 2.20. Peso específico del criterio peso.	31
Tabla 2.21. Prioridad de cada solución del componente 3.	31
Tabla 2.22. Matriz morfológica.	32
Tabla 2.23. Comparación del acero inoxidable y la madera.	34
Tabla 2.24. Capacidad de llenado del Fermentador.	35
Tabla 2.25. Datos del Problema.	39
Tabla 2.26. Resolución de ecuaciones.	39
Tabla 2.27. Factores de Diseño en miembros de madera Aserrada.	41
Tabla 2.28. Fórmulas para cálculo de esfuerzos en miembros de madera.	42
Tabla 2.29. Fórmulas para calcular los factores de Diseño.	42
Tabla 2.30. Procedimiento, formulas y criterios para el análisis de vigas y viguetas. ...	44
Tabla 2.31. Procedimiento, formulas y criterios para el análisis de tablas y tablones. ..	45
Tabla 2.32. Dimensiones de los elementos para paredes del fermentador.	47
Tabla 2.33. Cálculos que garantizan la resistencia de las paredes del fermentador.	47
Tabla 2.34. Dimensiones de las tablas para la bandeja.	48
Tabla 2.35. Cálculos que garantizan la resistencia de las tablas de la bandeja.	48

Tabla 2.36. Dimensiones de las guías.	49
Tabla 2.37. Cálculos que garantizan la resistencia de las guías de la bandeja.	50
Tabla 2.38. Dimensiones y distancias del eje de madera.	51
Tabla 2.39. Cálculos que garantizan la resistencia del eje.	51
Tabla 2.40. Dimensiones de las paletas de madera.	52
Tabla 2.41. Cálculos que garantizan la resistencia de las paletas.	52
Tabla 2.42. Dimensiones del elemento sometido a flexión.	53
Tabla 2.43. Cálculos que garantizan la resistencia del elemento a flexión.	54
Tabla 2.44. Procedimiento para el análisis de miembros a compresión.	55
Tabla 2.45. Dimensiones del elemento sometido a compresión.	56
Tabla 2.46. Cálculos que garantizan la resistencia del miembro a compresión.	56
Tabla 2.47. Análisis de conectores sometidos a cargas paralelas a su longitud.	57
Tabla 2.48. Ecuaciones de Z para cada modo de Falla.	59
Tabla 2.49. Factores k_1 , k_2 , k_3 , R_t , R_D , R_e , $K\theta$ y esfuerzos F_{em} , F_{es}	59
Tabla 2.50. Cálculo de los Valores de Z.	61
Tabla 2.51. Cálculo de los Valores de Z.	62
Tabla 2.52. Tornillos y pernos de varios elementos.	63
Tabla 2.53. Cálculos de la resistencia de la varilla y soldadura.	64
Tabla 2.54. Cálculo de la resistencia de la placa y pernos.	65
Tabla 2.55. Variables de cálculo de rodamientos.	66
Tabla 2.56. Ecuaciones de selección de rodamientos.	66
Tabla 2.57. Materia prima y elementos para la construcción.	67
Tabla 3.1. Prueba de carga en el tambor.	74
Tabla 3.2. Prueba de carga en el eje.	74
Tabla 3.3. Datos de la Temperatura.	75
Tabla 3.4. Cantidad de mucílago de cacao.	78
Tabla 3.5. Cálculo de esfuerzo de flexión y deflexión en el perfil ángulo.	81
Tabla 3.6. Cálculo de esfuerzo de flexión y deflexión en el perfil especial 120°.	82
Tabla 3.7. Resistencia del perno de la estructura de acero.	83
Tabla 3.8. Granos fermentados Método de Cajas.	85
Tabla 3.9. Granos fermentados Método Hexagonal Rotatorio.	86
Tabla 3.10. Costos de la materia prima.	87
Tabla 3.11. Costos de elementos normalizados.	87
Tabla 3.12. Costos de mano de obra.	88
Tabla 3.13. Costos varios.	88
Tabla 3.14. Costo total del proyecto.	88

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Cacao de variedad CCN51	4
Figura 1.2. Cacao Fino de Aroma	5
Figura 1.3. Cadena de valor del cacao	6
Figura 1.4. Productos semielaborados.....	7
Figura 1.5. Chocolate asociación Wiñak.....	7
Figura 1.6. Fermentación de cacao Asociación Wiñak.....	8
Figura 1.7. Secado de cacao Asociación Wiñak	9
Figura 1.8. Proceso de recolección y cosecha de las vainas	10
Figura 1.9. Lugar de Almacenamiento de las vainas.....	10
Figura 1.10. Corte de las vainas y remoción de los granos de cacao.....	11
Figura 1.11. Cambios en la pigmentación de las almendras de cacao fermentadas ...	12
Figura 1.12. Resumen del proceso de fermentación	13
Figura 1.13. Fermentación por montones	14
Figura 1.14. Fermentación en canastas.....	15
Figura 1.15. Fermentación en cajas a nivel del piso y sistema tipo gradas	16
Figura 1.16. Fermentación en Bandejas	16
Figura 1.17. Método de fermentación en plataformas de secado.....	17
Figura 1.18. Fermentador rotatorio tipo vaso	18
Figura 1.19. Fermentador rotatorio tipo barril.....	18
Figura 1.20. Fermentador rotatorio tipo Hexagonal.....	19
Figura 1.21. Fermentador rotatorio en acero inoxidable.....	19
Figura 2.1. Desarrollo del Nivel 0.....	23
Figura 2.2. Desarrollo del Nivel 1	24
Figura 2.3. Tambor hexagonal	25
Figura 2.4. Tambor cilíndrico	25
Figura 2.5. Eje de paletas con chumaceras	26
Figura 2.6. Eje de paletas con engranajes	26
Figura 2.7. Tambor rotatorio	26
Figura 2.8. Estructura de madera.....	27
Figura 2.9. Estructura de acero.....	27
Figura 2.10. Modelo hexagonal con paletas.....	32
Figura 2.11. Modelo hexagonal simple	33

Figura 2.12. Capacidad del Fermentador.....	36
Figura 2.13. Esquema de modelo hexagonal y simplificación a modelo cilíndrico.....	37
Figura 2.14. Esquema de resistencias térmicas para fermentador rotatorio.....	40
Figura 2.15. Diagrama de cuerpo libre de una tabla en la pared inferior.....	46
Figura 2.16. Diagrama de cuerpo libre de una tabla de la bandeja.....	48
Figura 2.17. Diagrama de cuerpo libre de una guía de la Bandeja.....	49
Figura 2.18. Diagrama de cuerpo libre del eje de madera.....	50
Figura 2.19. Diagrama de cuerpo libre de las paletas.....	52
Figura 2.20. Diagrama de cuerpo libre del miembro B-C.....	53
Figura 2.21. Diagrama de cuerpo libre de los miembros a compresión.....	56
Figura 2.22. Elementos de conexión en piezas de madera.....	57
Figura 2.23. Modos de Falla en Conectores de madera.....	58
Figura 2.24. Longitud total y penetración del tornillo.....	60
Figura 2.25. Picaporte para cerrar la puerta.....	63
Figura 2.26. Placa seguro y pernos de acero inoxidable.....	64
Figura 2.27. Caballetes.....	68
Figura 2.28. Soporte para la bandeja.....	68
Figura 2.29. Tablón.....	68
Figura 2.30. Travesaño.....	68
Figura 2.31. Construcción de la bandeja.....	68
Figura 2.32. Construcción de los ejes.....	69
Figura 2.33. Construcción y colocación de las paletas.....	69
Figura 2.34. Construcción de las paredes hexagonales.....	70
Figura 2.35. Construcción del tambor modelo simple.....	70
Figura 2.36. Construcción del tambor modelo de paletas.....	70
Figura 2.37. Realización de agujeros para el drenaje.....	70
Figura 2.38. Ensamble del travesaño.....	71
Figura 2.39. Ajuste del travesaño.....	71
Figura 2.40. Ensamble del tablón.....	71
Figura 2.41. Ensamblaje de la bandeja.....	72
Figura 2.42. Ensamblaje del tambor.....	72
Figura 3.1. Carga del tambor para la prueba.....	73
Figura 3.2. Colocación de la carga de cacao.....	75
Figura 3.3. Medición de la Temperatura.....	75
Figura 3.4. Gráfica Temperatura en función del tiempo modelo con Paletas.....	76
Figura 3.5. Gráfica Temperatura en función del tiempo modelo Simple.....	76
Figura 3.6. Proceso de drenado.....	77

Figura 3.7. Recolección del mucílago.	77
Figura 3.8. Gráfica Temperatura en función del tiempo modelo Simple.	78
Figura 3.9. Desplazamiento de las tablas de la pared inferior.	79
Figura 3.10. Reforzamiento provisional.	79
Figura 3.11. Estructura metálica.	80
Figura 3.12. Diagrama del perfil ángulo.	81
Figura 3.13. Diagrama del perfil especial 120°.	82
Figura 3.14. Cargas de corte en los pernos de la estructura.	83
Figura 3.15. Corte de los Granos al Inicio de la fermentación.	83
Figura 3.16. Granos fermentados de los Modelos Simples.	84
Figura 3.17. Granos fermentados de los Modelos con paletas.	84
Figura 3.18. Granos de Cacao Fermentados con los Fermentadores Hexagonales. ...	85
Figura 3.19. Cantidad de Granos Fermentados y No Fermentados.	86

RESUMEN

El presente documento trata acerca del diseño y construcción de un sistema de fermentación de cacao para la asociación de agricultores Wiñak ubicada en Archidona. Este sistema consiste en dos fermentadores simples y dos fermentadores con paletas (para el sistema de mezclado), cada uno puede almacenar una cantidad de hasta 150 kg de cacao. En primera instancia, se realiza una introducción acerca del mercado de cacao en el Ecuador, centrándose en la cadena de procesamiento primario desde la cosecha hasta el secado. Se recopila toda la información necesaria acerca del proceso de fermentación, incluyendo los problemas relacionados a esta actividad, con lo cual se elabora un diseño acorde a los requerimientos planteados por los usuarios. Se escoge la materia prima que conforma el fermentador, se realiza el cálculo de componentes y selección de elementos normalizados necesarios para la construcción del sistema. Además, se realiza un detalle económico de los costos de la materia prima, mano de obra, montaje y transporte de los fermentadores. Finalmente, se efectúa un protocolo de pruebas con el fin de evaluar la resistencia de las paredes del fermentador, el espesor de aislamiento térmico y el sistema de drenado del mucílago, estas pruebas permiten garantizar la funcionalidad de las máquinas fermentadoras.

Palabras clave: Fermentador de cacao, sistema de mezclado, proceso de fermentación, protocolo de pruebas.

ABSTRACT

The present work consists on the design and construction of a cocoa fermentation system to the Wiñak farmers association located in Archidona (Ecuador). This system consists of two simple fermenters and two fermenters with internal paddles, each one can contain an amount of 150 kilograms of cocoa beans. At the beginning, an introduction about the cocoa market in Ecuador is made, focusing on the primary processing chain from harvest to the drying of the cocoa beans. All the necessary information about the problem of fermentation is collected and elaborate a design according to the requirements posed by the users. In order to build the fermenter, it is necessary selected the raw material, calculate components and select of standardized elements. In addition, economical detail is explained about the costs of the raw material, human power, assembly and transportation of the fermenters. Finally, a test protocol is carried out in order to evaluate the resistance of the fermenter walls, the thermal insulation of the wall thickness and the drainage system of the mucilage, these tests allow to guarantee the functionality of the fermenting machines.

Keywords: Cocoa fermenter, mixing system, fermentation process, test protocol.

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE FERMENTACIÓN DE CACAO NACIONAL PARA LA ASOCIACIÓN DE AGRICULTORES WIÑAK

INTRODUCCIÓN

La asociación Wiñak, grupo de agricultores encargados de la producción y distribución de cacao, chocolate y guayusa a nivel nacional e internacional, enfrenta problemas de calidad en el cacao que comercializa debido a la falta de homogeneidad en el grado de fermentación. Al no contar con estándares que rijan este proceso, el agricultor debe recurrir a métodos tradicionales. La fermentación del cacao es una etapa muy importante para la obtención del chocolate, ya que en este proceso se llevan a cabo cambios físicos, químicos y biológicos que son responsables del aroma, color y sabor de las almendras. Varios factores influyen sobre este proceso, entre ellos están: el tipo de cacao, las condiciones ambientales, el tiempo, el sistema de fermentación empleado, la cantidad de almendras y la mezcla de estas (Teneda, 2016).

Los agricultores de esta asociación no cuentan con una planta de tratamiento adecuada para la fermentación de cacao, este proceso se lo realiza de forma artesanal en cajones, canastas o en montones. El problema de estos sistemas es que los granos de cacao disminuyen su calidad e higiene, y la cantidad de almendras fermentadas está comprendida entre el 75 y 85%, un porcentaje relativamente bajo en comparación con sistemas elaborados, por lo tanto, estas almendras disminuyen su competitividad en el mercado (Tagro, 2010).

Una vez que los granos de cacao han sido separados de la cáscara son almacenados en contenedores de plástico y transportados al área de fermentación. Esta área presenta varios inconvenientes debido a que el sistema de fermentación empleado es de tipo gradas, lo cual dificulta la colocación de los granos de cacao al primer cajón ubicado en la parte superior, esta actividad demanda una cantidad innecesaria de tiempo al contar con una sola persona para descargar los recipientes. Una vez transcurridas 48 horas después de colocar las almendras de cacao en las cajas se debe remover la masa para que la fermentación adquiera homogeneidad, es por eso que los agricultores hacen el uso de palas para remover los granos de cacao y bajan las almendras de un cajón hacia otro, lo cual es una complicación por el acceso a las cajas.

Otra de las dificultades presentes radica en la ubicación de las cajas de fermentación, debido a que están expuestas a factores como el viento y la lluvia los cuales son desfavorables e impiden tener un ambiente anaeróbico esencial para la fermentación. Los agricultores han decidido forrar las cajas con plástico para que se pueda almacenar el calor, esto resulta poco práctico en vista de que el cacao debe permanecer en contacto únicamente con la madera de laurel para evitar la transferencia de aromas extraños en el proceso de fermentación.

Adicionalmente, no se aprovecha el mucílago (baba del cacao) porque la base de los cajones de fermentación está en contacto con la losa de cemento impidiendo recolectar este producto. Con el mucílago se pretende endulzar el chocolate procesado.

Objetivo general

Diseñar y construir un sistema de fermentación de cacao nacional para la asociación de agricultores Wiñak.

Objetivos específicos

- Establecer los requerimientos de la máquina aplicando el despliegue de la función de calidad.
- Determinar elementos y materiales para la construcción del sistema.
- Obtener el análisis económico del proyecto.
- Ensamblar los componentes de la máquina con base en el plano de conjunto.
- Realizar las pruebas correspondientes.

1. MARCO TEÓRICO

1.1. Estado del arte de la industria del cacao

El Ecuador es un país que ha dependido de las exportaciones desde mediados del siglo XIV, si bien hoy en día el producto más exportado es el petróleo, los productos agrícolas se posicionan en los primeros lugares. El cacao es el cuarto producto de mayor exportación del país debido a su calidad y reconocimiento. El cacao ecuatoriano es considerado como un producto de excelente calidad para la elaboración del chocolate. (Anecacao, 2015)

1.1.1. Breve historia de cacao en el Ecuador

El cacao es una fruta tropical típica del continente americano, que ha sido domesticada, cultivada y consumida desde hace 2 000 años por culturas norteamericanas como la Tolteca, Maya y Azteca. Aunque su presencia en el continente data de hace 5 000 años en la Amazonía. En la conquista de América, el grano de cacao se usaba como moneda y con fines alimenticios, es en esta época que la fruta es llevada a Europa y se desarrollan recetas para su comercialización. A finales del siglo XIX los suizos desarrollan el primer chocolate, dando base a una industria que se ha extendido a nivel mundial. (Guerrero, 2015)

En el Ecuador, empresarios guayaquileños inician con el proceso de obtención del cacao y en el siglo XVII ya se implementaron los primeros cultivos a las orillas de los afluentes del río Guayas. Para el año 1615 varios factores afectaron la venta de cacao, principalmente por la caída de su precio y la prohibición de exportar el grano. Por su aroma y calidad, el cacao ecuatoriano adquiere fama en la región, por lo que se dio un gran paso para su comercialización. En 1789 se consigue exportar la fruta directamente desde Guayaquil, este periodo es conocido como el segundo ciclo del cacao.

Luego de la crisis del cacao en los años 20, se introduce al Ecuador una variedad trinitaria de cacao que se mezcla con el cacao Nacional logrando una variedad resistente a las enfermedades de la época, pero manteniendo su aroma característico. El Ecuador es un país privilegiado por sus condiciones climáticas para la producción de cacao, es por esta razón que el cacao ecuatoriano aún tiene presencia mundial. (Guerrero, 2015)

1.1.2. Variedades de cacao de la producción Nacional

En el país, se produce dos variedades de cacao: el cacao Nacional (fino de aroma) y la variedad CCN51. El cacao Nacional es el más cultivado, debido a su calidad y aroma que son distintivos y presentan mejores características cuando son procesados. A nivel

de América Latina, el Ecuador es el país más competitivo en cuestión de exportación de cacao de calidad, por sus características envidiables en el campo climático y geográfico, de allí se derivan las propiedades presentes en el cacao de variedad Nacional. A continuación, se describe a detalle las características de ambas variedades de cacao. (Anecacao, 2015)

1.1.2.1. Cacao de variedad CCN51

Es una variedad caracterizada por su alta productividad, siendo cuatro veces mayor en comparación con la variedad Nacional, y por ser resistente a enfermedades típicas del cacao. Este producto se distingue por su coloración rojiza y por la presencia de grandes cantidades de grasa, como se aprecia en la Figura 1.1.



Figura 1.1. Cacao de variedad CCN51.
(Fuente: (Huiracocha, Pichincha Universal, 2019))

1.1.2.2. Cacao Nacional Fino de Aroma

El cacao Fino de Aroma se muestra en la Figura 1.2, este producto tiene una mayor repercusión en el país debido a sus características únicas de sabor y aroma. Los detalles antes descritos se presentan gracias a la genética del grano y también a las condiciones geográficas del Ecuador. Esta variedad de cacao ha evolucionado desde el estado natural hasta su mezcla con variedades extranjeras que les brindaron una mayor resistencia a enfermedades. Hoy en día sigue siendo la variedad de cacao más cultivada en el país.



Figura 1.2. Cacao Fino de Aroma.

(Fuente: (Huiracocha, Pichincha Universal, 2019))

1.1.3. Producción de cacao en el Ecuador

La producción y exportación de cacao se ha reducido significativamente en comparación al inicio del siglo pasado, pero se mantiene como el cultivo con mayor extensión superficial para su producción, ocupando alrededor de un 31% de la superficie territorial dedicada a cultivos permanentes (CEPAL, 2014). Como se explicó en el apartado anterior, el cacao producido en Ecuador se divide en dos, siendo la variedad Nacional la de mayor calidad con respecto a la variedad CCN51.

Las provincias de la Costa son lugares donde predomina el cultivo de cacao, siendo Guayas y Los Ríos las de mayor producción del país, Manabí es la provincia con mayores plantaciones de esta fruta en asociación con otros cultivos. Además, se destaca la producción de Esmeraldas, Santo Domingo de los Tsáchilas y El Oro, que entre las tres aportan con el 20% de la producción nacional, estos datos fueron proporcionados por el MAGAP en el año 2014. (Acebo, 2016)

En el Ecuador, la calidad del cacao ha logrado que el país se posicione como uno de los mayores exportadores a nivel mundial, siendo el más competitivo en Latinoamérica. En la Figura 1.3 se muestra el proceso que atraviesa el cacao desde la concepción inicial hasta su comercialización en mercados nacionales e internacionales.

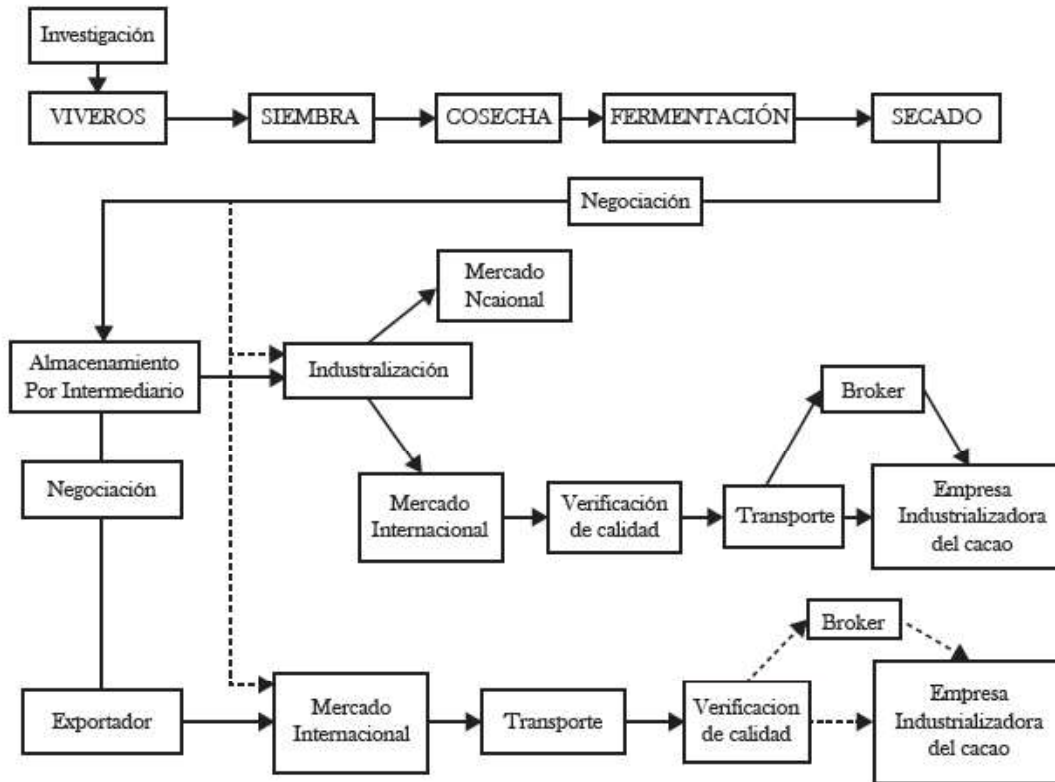


Figura 1.3. Cadena de valor del cacao.
(Fuente: (Acebo, 2016))

1.1.4. Productos derivados del cacao

Para la concepción de productos derivados del cacao, se los ha dividido en dos grupos: productos semielaborados y elaborados. Las empresas que se dedican a estas actividades difieren en su magnitud. Según el MAGAP, el mercado de productos semielaborados es dominado por empresas grandes que tienen capital externo, mientras que el mercado de los productos elaborados es dominado, en gran medida, por empresas pequeñas con capital nacional.

1.1.4.1. Productos semielaborados

Los productos semielaborados (Figura 1.4) son empleados en distintas actividades como: pastelería, chocolatería, bebidas y cosméticos. Entre los principales semielaborados se tiene: manteca, polvo y el licor de cacao.

El licor de cacao es una especie de pasta producida al moler la fruta fermentada siendo un ingrediente importante para la elaboración del chocolate y ciertas bebidas alcohólicas. El polvo de cacao es utilizado para dar un sabor particular a ciertos alimentos procesados como: pasteles, helados, bebidas y galletas. La manteca de cacao es la grasa natural comestible utilizada en la concepción del chocolate blanco (Crespo, 2017).



Figura 1.4. Productos semielaborados.
(Fuente: (Crespo, 2017))

1.1.4.2. Productos elaborados

De los productos elaborados del cacao, el más importante y con más repercusión a nivel mundial es el chocolate (Figura 1.5). El chocolate es procesado hasta obtener bloques o tabletas para su comercialización. La elaboración de las tabletas de chocolate es relativamente lenta. En el proceso se combina la pasta y manteca de cacao, leche y azúcar para obtener las tabletas. La pureza del chocolate se mide mediante el contenido de cacao que posee, a mayor porcentaje de pureza el chocolate suele ser más amargo. (Crespo, 2017).



Figura 1.5. Chocolate asociación Wiñak.
(Fuente: Propia)

1.1.5. Asociación Wiñak

La asociación Wiñak nace en la década de los 80, como parte del fortalecimiento de las organizaciones de los pueblos Kichwas en la provincia de Napo y de los proyectos de producción agropecuaria con fuertes bases en la cosmovisión indígena amazónica. La finalidad de Wiñak es el mejoramiento de las condiciones de vida de los agricultores de

la zona y el desarrollo de las técnicas de cultivo del cacao mediante capacitación, asistencia técnica y microcrédito productivo. Sus principales actividades se enfocan en la elaboración de productos elaborados y semielaborados del cacao y el procesamiento de guayusa para la comercialización en mercados nacionales e internacionales. El cacao, para ser procesado, debe ser fermentado y secado, como se muestra en la Figura 1.6 y Figura 1.7 respectivamente.

Wiñak ha implementado políticas que promueven la producción sostenible de cacao mediante prácticas amigables con el ambiente, sin afectar la biodiversidad de la región y conservando las tradiciones de los pueblos amazónicos. Por otro lado, intenta velar por el bienestar del productor y su familia, garantizando el acceso a la salud, educación y servicios básicos. Por último, promueve la igualdad de género mediante la participación de la mujer en la asociación, apelando a la autonomía social y económica en el núcleo familiar. (Asociación Wiñak, 2017)



Figura 1.6. Fermentación de cacao Asociación Wiñak.
(Fuente: Propia)



Figura 1.7. Secado de cacao Asociación Wiñak.
(Fuente: Propia)

1.2. Proceso de fermentación

En un inicio, los granos de cacao eran agrupados con el objetivo de eliminar el mucílago que se encuentra envolviendo a la almendra y de esta manera facilitar el proceso de secado (Schwan & Fleet, 2015). Este proceso dio lugar a un producto en mejores condiciones y con un valor comercial agregado. Hoy en día, la fermentación tiene como objetivo principal matar el embrión de la semilla y desarrollar las características necesarias para un buen sabor y aroma del chocolate.

1.2.1. Preparación de los granos de cacao para la fermentación

1.2.1.1. Cosecha

El desarrollo de las vainas de cacao va desde la fertilización hasta la cosecha y tiene un periodo aproximado de cinco a seis meses. Solo las vainas maduras y libres de plagas son cosechadas para obtener productos de alta calidad en el mercado. El aspecto externo de la vaina es utilizado como un indicador de madurez, dependiendo del tipo de espécimen se puede tener colores de maduración violetas, marrones, verdes claros y amarillas. La recolección de las vainas de cacao se lo realiza mediante herramientas como: machetes, ramas o simplemente con la mano. Las vainas de cacao se cosechan cada dos o cuatro semanas en vista de que la maduración no se produce al mismo tiempo. En la Figura 1.8 se muestra el proceso de recolección y cosecha.



Figura 1.8. Proceso de recolección y cosecha de las vainas.
(Fuente: (Anecacao, 2015))

1.2.1.2. Almacenamiento de las vainas

El almacenamiento consiste en dejar las vainas cosechadas por una o dos semanas antes de que sean abiertas para la fermentación. Las vainas deben permanecer en un lugar aislado de la humedad y lluvia para evitar su putrefacción. En la Figura 1.9 se muestra el lugar de almacenamiento de las vainas. Un indicador que permite conocer si las vainas están aptas para ser fermentadas consiste en agitar la vaina y escuchar los granos, con esto se garantiza que ha perdido suficiente humedad permitiendo que el aire penetre en los granos y esté lista para la fermentación. Estudios demuestran que con el proceso de almacenamiento se consigue mejores resultados en la fermentación, ya que se disminuye la acidez, se reduce el tiempo de fermentación y por consiguiente se tiene un sabor y aroma de mejor calidad en la elaboración del chocolate. (Schwan & Fleet, 2015)



Figura 1.9. Lugar de Almacenamiento de las vainas.
(Fuente: Propia)

1.2.1.3. Corte de las vainas y remoción de los granos

En Wiñak, la técnica consiste en dar un primer corte sobre la sección media de la vaina con cierto ángulo de inclinación. El segundo golpe se da al lado opuesto, con ayuda del machete se remueve la vaina y las almendras son removidas como se muestra en la Figura 1.10. Diversos estudios demuestran que, al tener control sobre procesos de cosecha, almacenamiento y corte, se consigue buenos resultados en la calidad de los granos de cacao. (Schwan & Fleet, 2015)



Figura 1.10. Corte de las vainas y remoción de los granos de cacao.

(Fuente: Propia)

1.2.2. Fermentación química y bioquímica

La fermentación comienza inmediatamente después que los granos de cacao han sido extraídos de la vaina. Se producen dos sucesos de suma importancia; el primero genera una reacción microbiana en la pulpa, debido a la interacción de levaduras, bacterias de ácido láctico, bacterias de ácido acético, hongos y bacilos, todos ellos contribuyen a la generación de alcohol, ácido y calor que favorece al proceso de fermentación (Ardhana, 1990). El segundo suceso es consecuencia de la generación de alcohol, ácidos e incremento de la temperatura, lo cual provoca la muerte del cotiledón, causando una ruptura en las células de almacenamiento y un aumento de la permeabilidad celular (Ardhana, 1990). Durante la fermentación el color de los granos cambia de blanco a beige en un tiempo aproximado de 60 horas, después se torna de color marrón claro en aproximadamente 72 horas, pasadas las 144 horas desde el inicio de la fermentación el grano adquiere un color marrón oscuro y continua tornándose más oscuro conforme aumenta el tiempo (Schwan & Fleet, 2015), ver Figura 1.11.

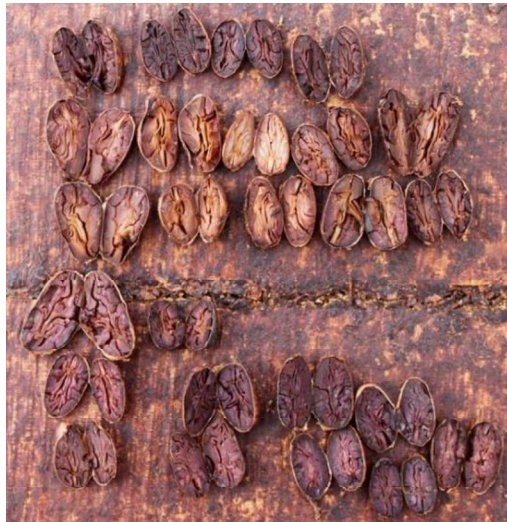


Figura 1.11. Cambios en la pigmentación de las almendras de cacao fermentadas.

(Fuente: (Anecacao, 2015))

1.2.3. Etapas durante la fermentación

Una de las etapas iniciales de la fermentación es la fase hidrolítica anaeróbica, tanto la condición del mucílago como la proliferación de levaduras son de carácter anaeróbico (Afoakwa, 2014). Las levaduras producen una fermentación alcohólica y los azúcares del mucílago transforman el alcohol en CO_2 , estas levaduras se metabolizan gracias al ácido cítrico presente en la pulpa. Las levaduras predominan de 24 a 36 horas desde el inicio de la fermentación. Existe un incremento del pH debido a la proliferación de las levaduras, adicionalmente las enzimas liberadas atacan a los componentes de pectina en la pulpa (Afoakwa, 2014). En consecuencia, aparece un proceso conocido como sudoración, que consiste en la descomposición y licuefacción de la pulpa generando un líquido denominado tradicionalmente aguas miel o mucílago, como resultado de este proceso se producen unos poros en las células de la pulpa y estos aumentan de tamaño permitiendo el paso del aire. La combinación de condiciones anaeróbicas, el aumento del pH, el consumo del ácido cítrico, la pérdida de fluido a través de la sudoración y el aumento del contenido de alcohol, dirigen hacia el final de la actividad de la levadura y con ello se marca el término de la fase anaeróbica (Afoakwa, 2014).

La segunda etapa es conocida como fase de condensación oxidativa, se presenta bajo condiciones aeróbicas y en un inicio está sujeta por bacterias de ácido láctico, el metabolismo de las levaduras promueve el desarrollo de las bacterias de ácido láctico (Afoakwa, 2014). Un proceso inversamente proporcional se lleva a cabo entre las bacterias de ácido láctico y las levaduras, pues a medida que las levaduras disminuyen las bacterias de ácido láctico aumentan, esto se debe a que la pulpa y la sudoración se han drenado en mayor medida.

La temperatura incrementa a medida que la actividad bacteriana sigue en aumento, se consigue temperaturas aproximadas de 45° C, con ello se tiene un ambiente idóneo para el desarrollo de bacterias formadoras de ácido acético que vienen a reemplazar a las bacterias de ácido láctico (Afoakwa, 2014). Estas bacterias contribuyen a la oxidación del alcohol y lo convierten en ácido acético, además la oxidación de este ácido produce CO₂ y H₂O. El metabolismo de estas bacterias colabora en el incremento de la temperatura y la acidez de los granos, lo que eventualmente conlleva a la muerte del cotiledón, es por eso que estas bacterias son de suma importancia en el desarrollo del sabor del chocolate (Afoakwa, 2014).

La etapa final de la fermentación comienza con el crecimiento de bacterias aeróbicas denominadas bacilos, estas son termo tolerantes y se adaptan a cambios de temperatura altos. Los bacilos son formadores de esporas las cuales producen una variedad de compuestos químicos durante el proceso de fermentación. Estos compuestos penetran sobre los cotiledones y estimulan las reacciones enzimáticas que promueven la acidez y desarrollo de algunos sabores extraños presentes en el chocolate (Afoakwa, 2014). A continuación, en la Figura 1.12 se muestra un resumen del proceso de fermentación, el cual permite comprender el funcionamiento de este proceso.

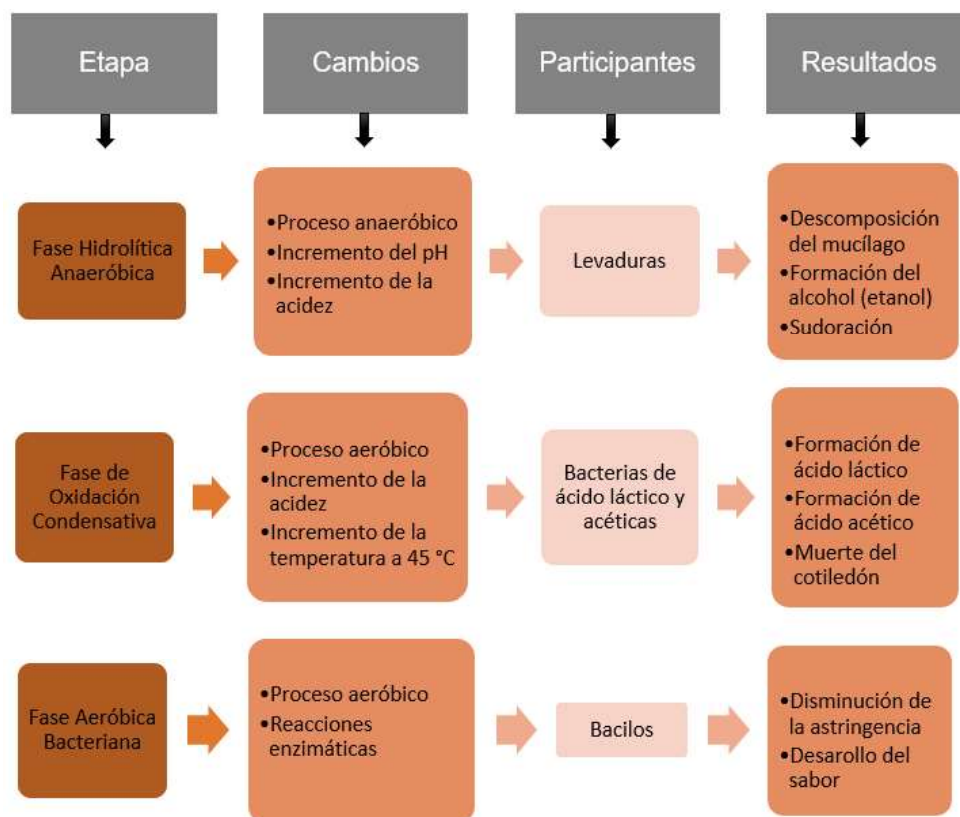


Figura 1.12. Resumen del proceso de fermentación.
(Fuente: Propia)

1.3. Métodos de fermentación de los granos de cacao

Existen varios métodos de fermentación para el cacao, los cuales han dado forma al proceso. Los más comunes son el método por montones y por cajas, estos son considerados métodos tradicionales. También se tienen métodos en canastas y métodos que apuestan por la tecnología para obtener mejores resultados. El tipo de método a utilizar depende de factores ambientales, económicos y de la cantidad de granos a fermentar. En proporciones medianas de fermentación (entre 100 y 250 kg de granos de cacao), los métodos con desarrollo tecnológico han demostrado ser más eficientes que los tradicionales, esto gracias a que se consigue un control sobre la temperatura y a la vez se facilita el proceso de aireación y mezclado.

1.3.1. Fermentación por montones

La fermentación por montones es el método tradicional por excelencia, pues este no necesita de infraestructura permanente. Su aplicación es simple ya que solo se necesita colocar los granos de cacao en hojas de plátano, véase en la Figura 1.13. Este método genera buenos resultados si se utiliza de manera correcta y es una buena alternativa para producciones menores a los 80 kg. El procedimiento de fermentación por montones es sencillo, en primer lugar, se debe adecuar una superficie para colocar los granos. La superficie puede construirse con troncos de madera delgada para que se pueda drenar los residuos líquidos que se generan en la fermentación de las almendras. Luego se cubre el cacao con hojas de plátano (en ocasiones con plástico o sacos de yute) para concentrar el calor y alcanzar la temperatura de fermentación (45°C). Es necesario que el montón esté protegido de la lluvia. Al final de la fermentación se recoge los granos de la superficie.



Figura 1.13. Fermentación por montones.
(Fuente: (Cana cacao, 2015))

1.3.2. Fermentación en canastas

Las canastas son utilizadas en países africanos y son tejidas empleando materiales vegetales como la caña o la corteza del árbol de palma, véase la Figura 1.14. Una canasta puede contener entre 30 y 40 kg de granos de cacao, inclusive existen canastas que fermentan hasta 90 kg. Al no ser contenedores herméticos deben ser forradas con hojas de plátano o plástico para alcanzar la temperatura de fermentación. El proceso de fermentación con este método se cumple en aproximadamente seis días, por lo que la remoción de los granos para la homogenización y aireación de la masa se debe llevar a cabo a partir del cuarto día, colocando los granos de una canasta a otra.



Figura 1.14. Fermentación en canastas.

(Fuente: (Cana cacao, 2015))

1.3.3. Fermentación en cajas de madera

La fermentación en cajas de madera es el método más extendido en América Latina y el continente asiático. Las cajas existentes pueden contener de 25 a 300 kg cada una. Este método de fermentación presenta dos tipos de técnicas, la primera con cajas individuales colocadas a nivel del piso (Figura 1.15 (a)) y la segunda mediante un sistema escalonado (Figura 1.15 (b)). El principal problema que presenta este método es que no se consigue una fermentación homogénea, debido a la cantidad de granos que se desean fermentar y a la complicada remoción.



Figura 1.15. (a) Fermentación en cajas a nivel del piso. (b) Sistema tipo gradas.
(Fuente: (Cana cacao, 2015))

1.3.4. Fermentación en bandejas

La fermentación por bandejas fue concebida en Ghana para corregir los errores de falta de homogeneidad en la masa, problema presente en los métodos por cajas y montones. Esta técnica se logra a partir de la reducción de la cantidad de almendras que van a ser fermentadas. Las bandejas son una especie de caja de fermentación, véase en la Figura 1.16, pero su altura es reducida (entre 10 y 15 cm) y el llenado se hace únicamente hasta la mitad. Se apilan varias bandejas para obtener la temperatura de fermentación, de esta manera las almendras no necesitan ser mezcladas entre las etapas. Las ventajas de este método son su fácil aplicación, la reducción de mano de obra, el bajo costo comparado con el método de cajas y una reducción del tiempo de fermentado. Las limitaciones del proceso se centran en el número de bandejas apiladas, pues un número elevado de bandejas hace que los granos presentes en las bandejas centrales no se fermenten uniformemente.



Figura 1.16. Fermentación en Bandejas.
(Fuente: (Cana cacao, 2015))

1.3.5. Fermentación en plataformas de secado

Las plataformas de fermentación son estructuras de madera que se levantan a una cierta altura del piso (entre 20 y 40 cm), generalmente son utilizadas para el secado artesanal del cacao, véase en la Figura 1.17. Este método consta de dos etapas que se repiten cada 24 horas durante el periodo de fermentación. La primera es extender el cacao a lo largo de la superficie de la plataforma en el día y la segunda es recoger los granos en un montón durante la noche para que se conserve la temperatura. Este método no es muy utilizado, pues las plataformas suelen acumular gran cantidad de moho en comparación con los otros métodos, lo que genera un grano amargo y sin el aroma característico de un cacao bien fermentado.



Figura 1.17. Método de fermentación en plataformas de secado.
(Fuente: (Crespo, 2017))

1.3.6. Otros métodos de fermentación

El primer modelo es denominado vaso de Toya, esta técnica se remonta hacia la época de los aztecas. Consiste en la fabricación de vasijas de barro o de madera, colocadas sobre unos apoyos de forma vertical para facilitar el proceso de drenado y descarga de los granos. Esta técnica fue desapareciendo con el pasar de los años, en vista de que la fabricación del fermentador resultaba complicada y además se dificultaba la forma de introducir los granos en el interior de este vaso. Años más tarde en Australia acogieron esta idea y modificaron el diseño original, tal es así que aparece un fermentador tipo barril rotatorio con disposición vertical como se puede apreciar en la Figura 1.18, este barril está fabricado de polipropileno montado sobre un marco de acero para permitir la rotación y de esta manera conseguir la remoción de la masa, sin embargo la capacidad de este barril se reducía a 75 kg.



Figura 1.18. Fermentador rotatorio tipo vaso.
(Fuente: (Schwan & Fleet, 2015))

Con el pasar del tiempo en Colombia surge la necesidad de implementar un sistema capaz de fermentar una masa total de aproximadamente 150 kg. Los agricultores de la zona desarrollan un prototipo asemejado a los barriles de fermentación del vino y dispuesto de forma horizontal, véase en la Figura 1.19. Este fermentador es colocado sobre una estructura de madera la cual facilita la rotación, incluye unas paletas en el interior del barril para tener control sobre el volteo de las almendras y sobre la temperatura de la masa, además presenta una bandeja en la parte inferior empleada para la recolección de aguas miel y la descarga de los granos una vez finalizado el proceso de fermentación.



Figura 1.19. Fermentador rotatorio tipo barril.
(Fuente: (Espinoza, 1998))

En la actualidad, Perú cuenta con sistemas de fermentación de cacao modernos, basándose en el diseño del barril rotatorio colombiano, logran incorporar un sistema tipo hexágono como se muestra en la Figura 1.20, que satisface de igual manera las condiciones de mezcla y recolección del mucílago de cacao y granos fermentados. La fabricación de este tipo de fermentador resulta ser más sencilla comparada con el tambor rotatorio colombiano, sin embargo, el costo de fabricación sube. Este sistema

permite fermentar grandes cantidades de cacao y su capacidad va desde 250 kg hasta 1000 kg, de esta manera se soluciona el problema de la limitada capacidad que tenían los fermentadores colombianos. El sistema cuenta con elementos adicionales para facilitar el proceso de fermentación, tales como: un sensor de temperatura para monitorear en todo momento dicha variable y un motor en el caso de girar cargas que sobrepasan los 500 kg.



Figura 1.20. Fermentador rotatorio tipo Hexagonal.
(Fuente: (S Coral, 2019))

En la última década, los investigadores desean enfocar sus estudios en el proceso de fermentación del cacao, al tener una serie de reacciones bioquímicas y físicas llama la atención de ingenieros de alimentos, biólogos y microbiólogos, los cuales invierten sus conocimientos en la obtención de granos de cacao fermentados de excelente calidad. Se han implementado fermentadores rotatorios elaborados en acero inoxidable como se puede apreciar en la Figura 1.21, estos fermentadores son auto controlables es decir que realizan las operaciones de remoción, control de temperatura, aireación y control de pH por su propia cuenta.

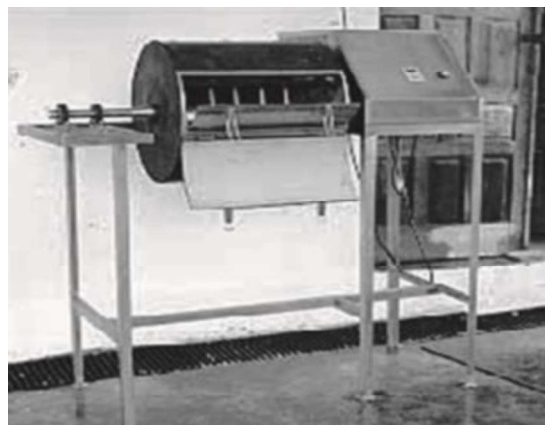


Figura 1.21. Fermentador rotatorio en acero inoxidable.
(Fuente: (Schwan & Fleet, 2015))

2. METODOLOGÍA

2.1. Determinación de las especificaciones de la máquina

2.1.1. Consideraciones iniciales

Para determinar las especificaciones técnicas necesarias de la máquina, es importante recopilar información acerca de modelos existentes en el mercado, además, buscar detalles y opiniones de personas que se han visto involucradas en actividades de trabajo con máquinas o procesos similares. Por último, el diseño debe considerar la voz del ingeniero y de las personas para las cuales está destinado este tipo de producto o modelo.

Adentrándose en el caso específico de un fermentador de cacao, es necesario mantener contacto con personas que estén familiarizadas con el procesamiento de cacao, ya que, en el mercado ecuatoriano no se ha desarrollado un modelo de fermentador específico, del cual se pueda obtener información relevante que ayude a obtener especificaciones. En el capítulo 1 se encuentra la documentación necesaria para entender el proceso de fermentación de cacao, lo cual es importante para idear bases que permitan elaborar una concepción inicial.

2.1.2. La casa de la calidad

La casa de la calidad es una herramienta del despliegue de la función de calidad, fue desarrollada por Yoji Akao. El principal objetivo de esta matriz es traducir los requerimientos del usuario de un producto en especificaciones técnicas, esto genera facilidad al diseñador en la selección de las principales características que debe presentar su diseño (Riba, 2002).

2.1.2.1. Voz del usuario

El fermentador de cacao propuesto está orientado a suplir las necesidades de los agricultores de la asociación Wiñak, ubicada en Archidona provincia de Napo, por lo que se ha recolectado información relevante de las personas que intervienen en el proceso de fermentación, obteniendo la siguiente información:

Fácil utilización.

Mantener la temperatura del proceso (entre 20 y 45°C).

Fermentar un amplio rango de cargas de cacao (entre 150 y 600 kg).

Descarga fácil y rápida.

Sin necesidad de utilizar energía eléctrica.

Ligero y transportable.

Barato.

Fácil ensamblado para mantenimiento.

Llevar recubrimiento de pintura.

Permitir la entrada de aire a los granos.

2.1.2.2. Voz del ingeniero

La Voz del ingeniero se refiere a criterios técnicos que relacionan las ideas propuestas por el usuario. A continuación, se transporta las ideas del personal entrevistado en la comunidad Wiñak y se traduce a especificaciones técnicas:

Ergonomía.

Aislamiento térmico.

Volumen.

Tiempo de descarga.

Mecanismos manuales.

Peso.

Precio.

Complejidad.

Estética.

Ventilación.

2.1.3. Resultado de la casa de la calidad

Para obtener los resultados de la matriz se ha aplicado la metodología propuesta por Riba en el libro de Diseño Concurrente. Por la reducida información sobre fermentadores en el país se ha optado por calificar la columna de competencia con un valor referencial para todos los parámetros de evaluación como se muestra en el Anexo 1. Las especificaciones técnicas que se han considerado importantes se describen a continuación:

La ergonomía estará orientada al manejo de la carga en el paso de mezclado para la fermentación. Se debe evitar el contacto con materiales que contaminen y perjudiquen al proceso.

Se utilizará materiales aislantes de calor y se diseñará las paredes del contenedor con el espesor adecuado.

Se dará prioridad a los mecanismos sin accionamiento eléctrico.

La complejidad de la máquina será la más baja posible para un montaje/desmontaje sencillo, que permita dar mantenimiento al producto.

La capacidad se fijará en un máximo de 150 kg.

2.1.4. Conclusiones del análisis

La casa de la calidad ayuda a la selección de las especificaciones técnicas más importantes, las cuales van a ser consideradas en el diseño. Estas especificaciones tienen relación con las ideas iniciales planteadas conjuntamente con los usuarios de la asociación. A continuación, la Tabla 2.1 muestra las especificaciones técnicas en el formato referente a Ingeniería Concurrente de Riba.

Tabla 2.1. Especificaciones técnicas.

Empresa Cliente: Asociación Wiñak		Producto: Máquina fermentadora de cacao		Fecha inicial: Última revisión:
Diseñadores: William Pastrano Vinicio L. Sotomayor				Página 1
Especificaciones				
Concepto	Fecha	Propone	R/D	Descripción
Función	3 abril 2019	C	R	Máquina para fermentar cacao con facilidades en el manejo de la carga.
Transferencia de calor	3 abril 2019	D	R	El módulo en contacto con la carga debe poseer el espesor adecuado para mantener las temperaturas requeridas entre 20 y 45°C.
Electricidad	3 abril 2019	C	D	Sin necesidad de energía eléctrica.
Mantenimiento	3 abril 2019	D	D	Baja complejidad en la máquina para fácil montaje y desmontaje.
Volumen	3 abril 2019	C	R	Capacidad de almacenamiento de 150 kg.
Propone: M=Marketing, D=Diseño, P=Producción, F=Fabricación, C=Cliente. R/D: R=Requerimiento, D=Deseo, MR=Modificación de Requerimiento.				

(Fuente: Propia)

2.2. Evaluación y selección de alternativas

Para el presente apartado se estudiarán los modelos que se han propuesto por los diseñadores luego de haber recopilado información sobre modelos existentes en el mercado. Se ve la necesidad de proponer ideas que se aferren a los requerimientos que se obtuvieron con la casa de la calidad para mantener la concordancia y, sobre todo, garantizar la calidad del producto.

2.2.1. Análisis Funcional

El análisis funcional está orientado a encontrar diferentes soluciones a un mismo problema con el fin de obtener productos de buena calidad a un menor costo. Esta herramienta establece con claridad las funciones del producto (primarias y secundarias). Las funciones primarias son las características que permiten definir el propósito del producto, mientras que, las secundarias permiten ejecutar las funciones primarias. Para el caso concreto de la máquina fermentadora de cacao, el propósito principal o función primaria es fermentar el cacao. Las funciones secundarias se deben analizar de tal manera que se elaboren módulos para establecer soluciones. El análisis de las funciones y de los módulos debe adaptarse a la premisa de una baja complejidad, orientado a un fermentador tipo rotatorio que satisfaga las necesidades del usuario, para lo cual se desarrolló los niveles 0 y 1 que permiten establecer estas funciones, tal como se muestra en la figura 2.1 y en la figura 2.2 respectivamente.

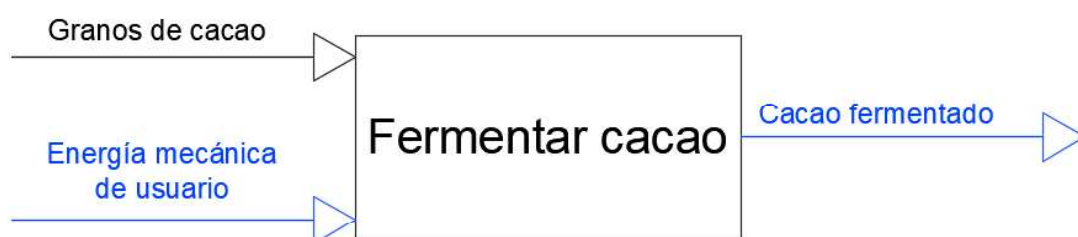


Figura 2.1. Desarrollo del Nivel 0.
(Fuente: Propia)

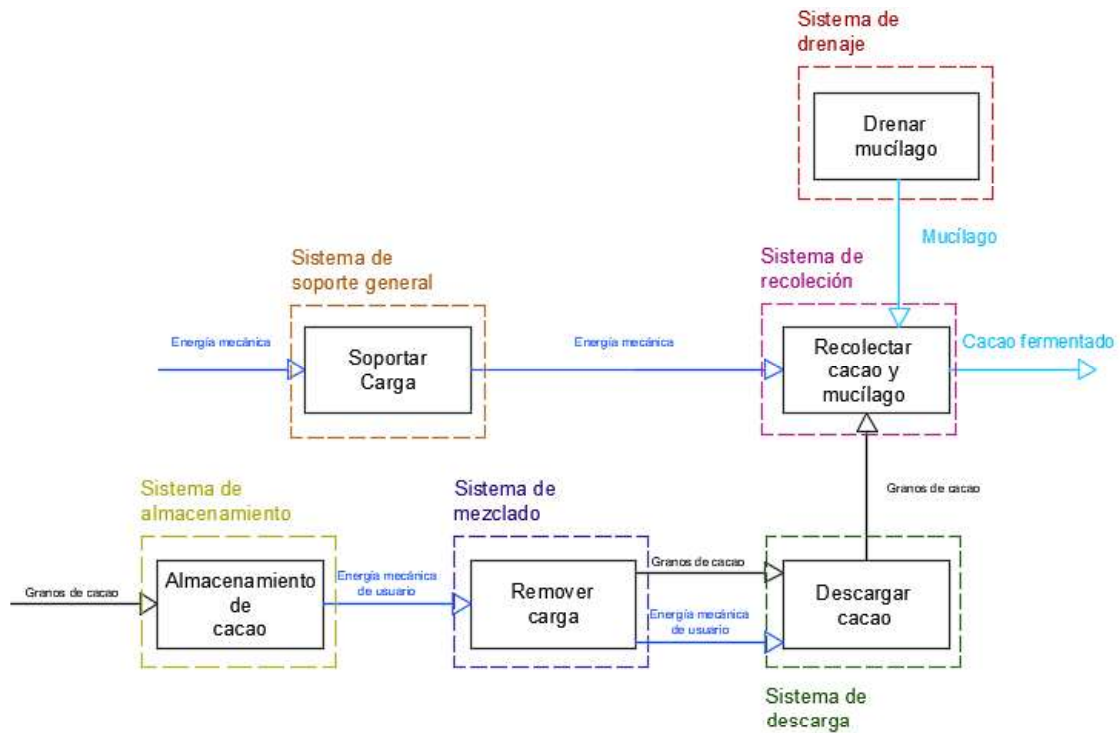


Figura 2.2. Desarrollo del Nivel 1.
(Fuente: Propia)

A continuación, se enlista los módulos funcionales obtenidos en el análisis previo.

Módulo 1: Recepción y almacenamiento.

Función: Receptar y almacenar el cacao.

Módulo 2: Mezclado.

Función: Mezclar y remover el cacao.

Módulo 3: Drenaje.

Función: Drenar el mucílago.

Módulo 4: Soporte de carga.

Función: Soportar carga del cacao y partes de la máquina.

Módulo 5: Descarga de cacao.

Función: Descargar cacao.

Módulo 6: Recolección.

Función: Recolectar el mucílago y los granos de cacao.


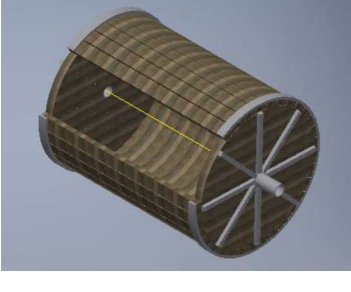
2.2.2. Análisis de las alternativas

Se han identificado tres funciones consideradas importantes, donde se evidencia que más de un componente puede cumplir con los requerimientos. A continuación, se detalla las funciones mencionadas y se describe las ventajas y desventajas de cada uno de los componentes.

2.2.2.1. Recepción y almacenamiento

Los granos de cacao que van a ser fermentados deben permanecer un tiempo comprendido entre 4 y 6 días, el componente debe poseer características de resistencia mecánica y conservación térmica. A continuación, se presenta dos alternativas detalladas en la Tabla 2.2:

Tabla 2.2. Alternativas para recepción y almacenamiento.

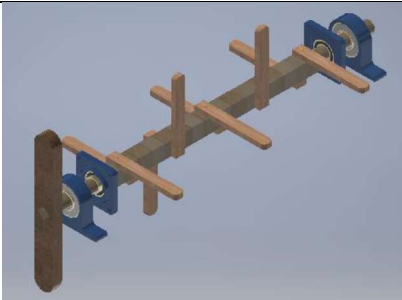
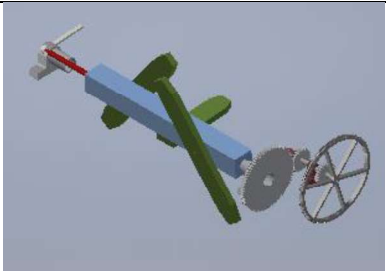

Solución 1: Tambor Hexagonal (Figura 2.3.)		
	Ventajas	Desventajas
 <p>Figura 2.3. Tambor hexagonal. (Fuente: Propia)</p>	<p>Construcción de baja complejidad.</p> <p>Costo bajo en comparación a la solución 2.</p> <p>Buen aislamiento térmico.</p>	<p>Se debe realizar agujeros para el drenaje.</p> <p>Descarga relativamente complicada.</p>
	Solución 2: Tambor Cilíndrico (Figura 2.4.)	
	Ventajas	Desventajas
 <p>Figura 2.4. Tambor cilíndrico. (Fuente: Propia)</p>	<p>Buen drenado.</p> <p>Resistente.</p> <p>Fácil carga y descarga.</p>	<p>Aislamiento térmico deficiente.</p> <p>Construcción compleja.</p>

(Fuente: Propia)

2.2.2.2. Mezclado de cacao

La mezcla de los granos de cacao debe realizarse de manera uniforme para que consigan una oxigenación adecuada en el proceso, el mezclado también evita que los granos se pudran por la acumulación. En la Tabla 2.3 se presenta tres alternativas para el proceso de mezclado.

Tabla 2.3. Alternativas para mezclado de cacao.



Solución 1: Eje de paletas con chumaceras. (Figura 2.5.)		
 <p>Figura 2.5. Eje de paletas con chumaceras. (Fuente: Propia)</p>	Ventajas	Desventajas
	<p>Construcción de baja complejidad.</p> <p>Buen mezclado.</p> <p>Costo moderado.</p> <p>Giros independientes.</p>	<p>Carga de cacao complicada.</p>
Solución 2: Eje de paletas con engranajes (Figura 2.6.)		
 <p>Figura 2.6. Eje de paletas con engranajes. (Fuente: Propia)</p>	Ventajas	Desventajas
	<p>Buen mezclado.</p> <p>Giros independientes.</p>	<p>Carga de cacao complicada.</p> <p>Construcción compleja.</p> <p>Costo elevado.</p>
Solución 3: Tambor Giratorio (Figura 2.7.)		
 <p>Figura 2.7. Tambor rotatorio. (Fuente: Propia)</p>	Ventajas	Desventajas
	<p>Bajo costo.</p> <p>Construcción poco compleja.</p>	<p>Mezclado regular.</p>

(Fuente: Propia)

2.2.2.3. Soporte de carga

Para el soporte de carga se optará por dos opciones detalladas en la Tabla 2.4:

Tabla 2.4. Alternativas para soporte de carga.

Solución 1: Estructura de madera (Figura 2.8.)		
	Ventajas	Desventajas
 <p>Figura 2.8. Estructura de madera. (Fuente: Propia)</p>	<p>Construcción simple. Bajo costo de construcción.</p>	<p>Alto peso. Degradable.</p>
Solución 2: Estructura de acero (Figura 2.9.)		
	Ventajas	Desventajas
 <p>Figura 2.9. Estructura de acero. (Fuente: Propia)</p>	<p>Tiempo de vida mayor en comparación a la solución 1.</p>	<p>Costo elevado de construcción. Construcción compleja.</p>

(Fuente: Propia)

2.2.3. Estudio y selección de alternativas

Para la selección de la alternativa más apegada a los requerimientos del usuario, se elaborará matrices de criterios ponderados. Esta metodología permite obtener prioridades frente a las características que deben poseer los componentes. Se elaborará esta evaluación para tres de los componentes principales (Almacenamiento y carga del cacao, mezclado y soporte de carga).

2.2.3.1. Selección del componente de recepción y almacenamiento

La Tabla 2.5 muestra el peso específico de los criterios, mientras que las Tablas 2.6, 2.7, 2.8, 2.9 muestran el peso específico de cada criterio en base a cada solución y la tabla 2.10 contiene las prioridades.

Tabla 2.5. Peso específico de los criterios del componente 1.

Ais. Térmico = Construcción > Ergonomía = Costo						
Criterio	Ais. Térmico	Construcción	Ergonomía	Costo	$\Sigma+1$	Ponderado
Ais. Térmico		0,5	1	1	3,5	0,35
Construcción	0,5		1	1	3,5	0,35
Ergonomía	0	0		0,5	1,5	0,15
Costo	0	0	0,5		1,5	0,15
Suma					10	1

(Fuente: Propia)

Tabla 2.6. Peso específico del criterio Aislamiento térmico.

Solución 1 > Solución 2				
Ais. Térmico	Solución 1	Solución 2	$\Sigma+1$	Ponderado
Solución 1		1	2	0,67
Solución 2	0		1	0,33
Suma			3	1

(Fuente: Propia)

Tabla 2.7. Peso específico del criterio Construcción.

Solución 1 > Solución 2				
Construcción	Solución 1	Solución 2	$\Sigma+1$	Ponderado
Solución 1		1	2	0,67
Solución 2	0		1	0,33
Suma			3	1

(Fuente: Propia)

Tabla 2.8. Peso específico del criterio Ergonomía.

Solución 1 = Solución 2				
Ergonomía	Solución 1	Solución 2	$\Sigma+1$	Ponderado
Solución 1		0,5	1,5	0,5
Solución 2	0,5		1,5	0,5
Suma			3	1

(Fuente: Propia)

Tabla 2.9. Peso específico del criterio Costo.

Solución 1 > Solución 2				
Costo	Solución 1	Solución 2	$\Sigma+1$	Ponderado
Solución 1		1	2	0,67
Solución 2	0		1	0,33
Suma			3	1

(Fuente: Propia)

Tabla 2.10. Prioridad de cada solución del componente 1.

Conclusión	Ais. Térmico	Construcción	Ergonomía	Costo	Σ	Prioridad
Solución 1	0,23	0,23	0,075	0,1	0,6	1
Solución 2	0,12	0,12	0,075	0,05	0,4	2

(Fuente: Propia)

2.2.3.2. Selección del componente de mezclado

La Tabla 2.11 muestra el peso específico de los criterios. En tanto las Tablas 2.12, 2.13 y 2.14 muestran el peso específico de cada criterio en base a cada solución y la Tabla 2.15 contiene las prioridades.

Tabla 2.11. Peso específico de los criterios del componente 2.

Construcción = Mezclado > Costo					
Criterio	Construcción	Mezclado	Costo	$\Sigma+1$	Ponderado
Construcción		0,5	1	2,5	0,42
Mezclado	0,5		1	2,5	0,42
Costo	0	0		1	0,17
Suma				6	1

(Fuente: Propia)

Tabla 2.12. Peso específico del criterio Construcción.

Solución 3 = Solución 1 > Solución 2					
Construcción	Solución 1	Solución 2	Solución 3	$\Sigma+1$	Ponderado
Solución 1		1	0,5	2,5	0,42
Solución 2	0		0	1	0,17
Solución 3	0,5	1		2,5	0,42
Suma				6	1

(Fuente: Propia)

Tabla 2.13. Peso específico del criterio Mezclado.

Solución 1 > Solución 2 > Solución 3					
Mezclado	Solución 1	Solución 2	Solución 3	$\Sigma+1$	Ponderado
Solución 1		1	1	3	0,5
Solución 2	0		1	2	0,33
Solución 3	0	0		1	0,17
Suma				6	1

(Fuente: Propia)

Tabla 2.14. Peso específico del criterio costo.

Solución 3 > Solución 1 > Solución 2					
Costo	Solución 1	Solución 2	Solución 3	Σ+1	Ponderado
Solución 1		0	1	2	0,33
Solución 2	0		0	1	0,17
Solución 3	1	1		3	0,50
Suma				6	1

(Fuente: Propia)

Tabla 2.15. Prioridad de cada solución del componente 2.

Conclusión	Construcción	Mezclado	Costo	Σ	Prioridad
Solución 1	0,1736	0,2083	0,0556	0,4375	1
Solución 2	0,0694	0,1389	0,0278	0,2361	3
Solución 3	0,1736	0,0694	0,0833	0,3264	2

(Fuente: Propia)

2.2.3.3. Selección del componente de soporte de carga

La Tabla 2.16 muestra el peso específico de los criterios. En tanto las Tablas 2.17, 2.18, 2.19 y 2.20 muestran el peso específico de cada criterio en base a cada solución y la Tabla 2.21 contiene las prioridades.

Tabla 2.16. Peso específico de los criterios del componente 3.

Construcción = Resistencia > Costo > Peso						
Criterio	Construcción	Resistencia	Costo	Peso	Σ+1	Ponderado
Construcción		0,5	1	1	3,5	0,35
Resistencia	0,5		1	1	3,5	0,35
Costo	0	0		1	2	0,20
Peso	0	0	0		1	0,10
Suma					10	1

(Fuente: Propia)

Tabla 2.17. Peso específico del criterio construcción.

Solución 1 > Solución 2				
Construcción	Solución 1	Solución 2	Σ+1	Ponderado
Solución 1		1	2	0,67
Solución 2	0		1	0,33
Suma			3	1

(Fuente: Propia)

Tabla 2.18. Peso específico del criterio resistencia.

Solución 1 = Solución 2				
Resistencia	Solución 1	Solución 2	$\Sigma+1$	Ponderado
Solución 1		0,5	1,5	0,5
Solución 2	0,5		1,5	0,5
Suma			3	1

(Fuente: Propia)

Tabla 2.19. Peso específico del criterio costo.

Solución 1 > Solución 2				
Costo	Solución 1	Solución 2	$\Sigma+1$	Ponderado
Solución 1		1	2	0,67
Solución 2	0		1	0,33
Suma			3	1

(Fuente: Propia)

Tabla 2.20. Peso específico del criterio peso.

Solución 2 > Solución 1				
Peso	Solución 1	Solución 2	$\Sigma+1$	Ponderado
Solución 1		0	1	0,33
Solución 2	1		2	0,67
Suma			3	1

(Fuente: Propia)

Tabla 2.21. Prioridad de cada solución del componente 3.

Conclusión	Construcción	Resistencia	Costo	Peso	Σ	Prioridad
Solución 1	0,2	0,175	0,13	0,033	0,6	1
Solución 2	0,1	0,175	0,067	0,067	0,4	2

(Fuente: Propia)

La matriz morfológica reúne las alternativas evaluadas y mejor puntuadas de modo que se obtenga un diseño adecuado. En la Tabla 2.22 se muestra la matriz morfológica

Tabla 2.22. Matriz morfológica.

Función	Alternativas
Receptar y almacenar cacao	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="border: 1px solid black; background-color: #4a7ebb; color: white; padding: 5px; text-align: center;">Tambor hexagonal</div> <div style="border: 1px solid black; background-color: #4a7ebb; color: white; padding: 5px; text-align: center;">Tambor cilíndrico</div> </div>
Mezclar cacao	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="border: 1px solid black; background-color: #70ad47; color: white; padding: 5px; text-align: center;">Eje con chumacera</div> <div style="border: 1px solid black; background-color: #70ad47; color: white; padding: 5px; text-align: center;">Eje con engranaje</div> <div style="border: 1px solid black; background-color: #70ad47; color: white; padding: 5px; text-align: center;">Tambor giratorio</div> </div>
Drenar mucílago	<div style="border: 1px solid black; background-color: #f4a460; color: white; padding: 5px; text-align: center; margin: 0 auto; width: 80%;">Drenaje en tambor</div>
Soportar carga	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="border: 1px solid black; background-color: #a6a6a6; color: black; padding: 5px; text-align: center;">Estructura de madera</div> <div style="border: 1px solid black; background-color: #a6a6a6; color: black; padding: 5px; text-align: center;">Estructura de acero</div> </div>
Descargar cacao	<div style="border: 1px solid black; background-color: #f4c03f; color: white; padding: 5px; text-align: center; margin: 0 auto; width: 80%;">Tambor giratorio</div>
Recolectar cacao y mucílago	<div style="border: 1px solid black; background-color: #4a7ebb; color: white; padding: 5px; text-align: center; margin: 0 auto; width: 80%;">Bandeja</div>

(Fuente: Propia)

2.2.4. Modelos seleccionados

El fermentador hexagonal resulta ser el adecuado tras la selección de las alternativas planteadas. Por pedido de los usuarios de la máquina, se decidió realizar dos modelos hexagonales (uno con paletas mostrado en la Figura 2.10 y otro sin paletas mostrado en la Figura 2.11) con el fin de evaluar el proceso de fermentación en cada uno de ellos. Los modelos se los muestra a mayor detalle en el Anexo 6.



Figura 2.10. Modelo hexagonal con paletas.

(Fuente: Propia)



Figura 2.11. Modelo hexagonal simple.

(Fuente: Propia)

2.3. Cálculo de componentes y selección de materiales

En esta sección se desarrolla los cálculos empleados para el diseño de los diferentes componentes que constituyen el fermentador de cacao, así como la selección de materiales y elementos normalizados utilizados en el ensamble de la máquina.

2.3.1. Selección del material para las paredes del fermentador

El primer paso para el diseño del fermentador consiste en seleccionar el material que se empleará en la construcción del tambor hexagonal. Se evalúan dos alternativas, la utilización de madera y de acero inoxidable, el modelo puede ser construido con base en estos dos materiales, sin embargo los costos difieren en cada material. El uso del acero inoxidable puede ser una alternativa cuando se requiera construir un modelo de uso experimental. Además, se requiere el uso de un aislante para evitar pérdidas por transferencia de calor durante el proceso de fermentación del cacao. Debido a que el fermentador debe satisfacer la producción semanal correspondiente a un valor promedio de 600 kg de cacao, se tiene que diseñar un sistema de fermentación para dividir la carga en cuatro. Se selecciona la madera por sus propiedades mecánicas, térmicas y por el bajo costo que representa su adquisición. Se procede a realizar una comparación entre los dos materiales en la tabla 2.23.

Tabla 2.23. Comparación del acero inoxidable y la madera.

Características	Madera	Acero inoxidable
Costo	Precio de compra bajo comparado con el acero inoxidable	Precio de compra relativamente alto.
Transferencia de Calor	Almacena el calor y no se requiere un aislante adicional	Necesita un recubrimiento aislante para almacenar el calor, por ejemplo: lana de vidrio
Fermentación	Existen numerosas publicaciones acerca del uso de los fermentadores de madera	Presenta pocos estudios sobre el comportamiento de la fermentación
Vida Útil	Presenta una vida útil limitada, en base a las condiciones de uso y de humedad presente en el ambiente	Se diseña con el propósito de vida infinita, a la larga puede ser un problema de contaminación
Problemas a largo plazo	Problemas con la absorción de humedad en las tablas, a largo plazo contaminación con bacterias y microorganismos	No presentan problemas con humedad y su limpieza es fácil
Capacidad	Pueden ser diseñados para satisfacer cargas de hasta 500 Kg	Se ven limitados por el costo del material por ende se diseñan para cargas menores a 100 Kg

(Fuente: Propia)

Según la experiencia de varios agricultores y autores de libros como: (Afoakwa, 2014) y (Schwan & Fleet, 2015) sugieren la madera de laurel, esta no transfiere olores ni sabores extraños. Las maderas como: roble, pino, ciprés, eucalipto, colorado, nogal, entre otras pueden afectar al aroma durante el proceso de fermentación y de esta manera disminuir su calidad.

2.3.2. Capacidad del fermentador

El modelo elegido con base en la selección de alternativas, resultó ser el fermentador rotatorio hexagonal. Para determinar las dimensiones en base a los requerimientos del cliente se procede a calcular la capacidad de cacao que puede ser introducido en el tambor hexagonal; para ello se utiliza la densidad aparente del cacao proporcionado por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 2019), la cual tiene un valor correspondiente de 900 kg/m³.

Se designa valores del lado del hexágono comprendidos entre 35-40 cm y valores de la altura del prisma comprendidos entre 80-120 cm.

Cálculo de la capacidad del fermentador para una carga de 150 kg.

$$Volumen\ teorico = \frac{masa}{Densidad\ aparente} = \frac{150\ kg}{900\ kg/m^3} = 0.166\ m^3 \quad (Ec. 2.1)$$

$$Volumen\ Prisma\ Hexagonal = 3 * Lado^2 * Cos(30^\circ) * Altura \quad (Ec. 2.2)$$

$$\%Capacidad\ de\ llenado = \frac{Vteorico}{VPrisma\ Hexagonal} * 100\% \quad (Ec. 2.3)$$

$$\%Espacio\ vacio = 100\% - \%Capacidad\ de\ llenado \quad (Ec. 2.4)$$

Se puede realizar el análisis para cualquier dimensión de lado del hexágono y altura del prisma, a modo de simplificar el análisis se toma un valor de 38 centímetros y se varía la altura del prisma desde 80 cm a 120 cm. En la Tabla 2.24 se calcula la capacidad de llenado y el espacio vacío generado.

Tabla 2.24. Capacidad de llenado del Fermentador.

Lado (m)	Altura (m)	Volumen Prisma Hexagonal (m ³)	Capacidad de llenado %	Espacio Vacío %
0,38	0,8	0,300	55,532	44,468
	0,88	0,330	50,483	49,517
	0,9	0,338	49,361	50,639
	1,2	0,450	37,021	62,979

(Fuente: Propia)

Con base en los valores calculados se escoge la opción resaltada en amarillo. Como recomendación, la capacidad de llenado no debe superar el 60% debido a que la masa de cacao tiene que mezclarse de manera uniforme, si tomamos porcentajes de llenado elevados no se obtendrá una buena mezcla ni tampoco se favorecerá a la aireación. Por otro lado, si tomamos porcentajes de llenado bajos, la masa de cacao no alcanzará la temperatura de fermentación, siendo un valor comprendido entre 45 a 50 °C. En la Figura 2.12 se muestra la capacidad de llenado en base a las dimensiones del lado del hexágono y la altura del prisma.

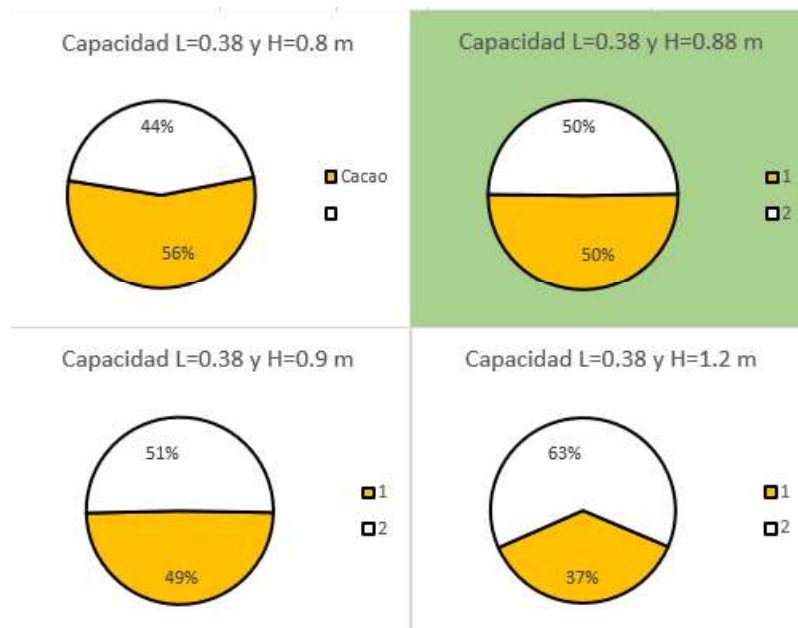


Figura 2.12. Capacidad del Fermentador.

(Fuente: Propia)

El grafico resaltado de color verde indica la proporción adecuada entre el espacio vacío y la capacidad de llenado, se eligen las dimensiones de 38 cm para el lado del hexágono y de 88 cm para la altura del prisma, estos valores evitan el desperdicio de materia prima y a su vez satisfacen la carga de 150 kg que debe ser introducida en el fermentador.

2.3.3. Espesor de aislamiento térmico

Una vez determinadas las dimensiones del lado y la altura, se calcula el espesor de aislamiento mediante un análisis térmico para disminuir las pérdidas por transferencia de calor. Gracias a que la madera presenta buenas propiedades de aislamiento térmico, se puede optar por espesores pequeños, lo cual favorece al momento de comprar la madera debido a que su precio se reduce.

En la Figura 2.13 se puede observar una simplificación del modelo de prisma hexagonal a uno cilíndrico. La geometría del prisma hexagonal es evaluada como un cilindro, en vista de que no se han desarrollado ecuaciones que permitan analizar el comportamiento de un prisma hexagonal. Las ecuaciones de transferencia calor para cilindros son empleadas para determinar el coeficiente de transferencia de calor, pérdidas de energía y determinación del espesor de aislamiento.

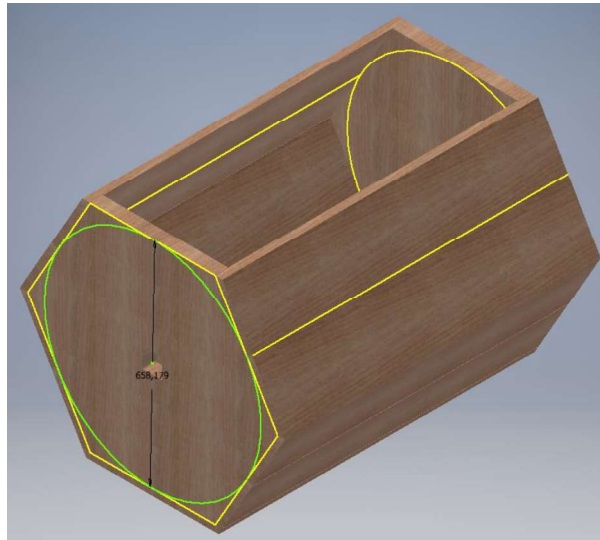


Figura 2.13. Esquema de modelo hexagonal y simplificación a modelo cilíndrico.

(Fuente: Propia)

Existen algunas consideraciones que se deben plantear para realizar el análisis:

Durante el proceso de fermentación el volumen permanece constante y solo varía la densidad de los granos de cacao.

La capacidad total de aire seco en la cámara vacía es constante.

El flujo de aire de entrada (O_2) es el mismo que el flujo de aire de salida (CO_2).

Se Asume la transferencia de calor constante para facilitar el cálculo.

Transferencia de calor unidimensional y no hay variación en la dirección axial.

La resistencia térmica en la interfaz es despreciable.

La temperatura superficial permanece constante.

El coeficiente combinado de transferencia de calor en la superficie exterior permanece constante.

El coeficiente de transferencia de calor exterior se calcula mediante las ecuaciones de convección natural y tomando en consideración las suposiciones planteadas anteriormente. Se supone que la temperatura máxima que alcanzará la superficie del modelo será de $35\text{ }^\circ\text{C}$ y la temperatura ambiente promedio proporcionada por un termómetro digital es de $27\text{ }^\circ\text{C}$. La temperatura de la película es el promedio de la temperatura ambiente y la superficial, y corresponde a un valor de $31\text{ }^\circ\text{C}$.

En base a las propiedades del aire de la temperatura de la película a 1 atmósfera de presión se calcula el número de Rayleigh, estas propiedades se las encuentra en el libro de transferencia de calor y masa de Yunus Cengel Apéndice 1, Tabla A-15. El número

de Rayleigh es el producto de los números de Grashof y de Prandtl, para elementos cilíndricos horizontales se calcula con la siguiente ecuación:

$$Ra_D = \frac{gB(T_s - T_\infty)D^3}{\nu^2} Pr \quad (\text{Ec. 2.5})$$

El coeficiente de Expansión volumétrica está dado por:

$$B = \frac{1}{T_p + 273} \quad (\text{Ec. 2.6})$$

El número de Nusselt para cilindros horizontales cuando $Ra_D \leq 10^{12}$ esta dado por:

$$Nu = \left\{ 0.6 + \frac{\left(0.387 * Ra_D^{\frac{1}{6}} \right)}{\left[1 + \left(\frac{0.559}{Pr} \right)^{\frac{9}{16}} \right]^{\frac{8}{27}}} \right\}^2 \quad (\text{Ec. 2.7})$$

El coeficiente de transferencia de calor por convección natural es:

$$h = \frac{k}{D} * Nu \quad (\text{Ec. 2.8})$$

La pérdida de calor por convección es calculada mediante la siguiente expresión:

$$Q = hA(T_s - T_{air}) \quad (\text{Ec. 2.9})$$

El área de transferencia de calor está dada por:

$$A = \pi * D * L \quad (\text{Ec. 2.10})$$

Donde:

Q : pérdida de calor por convección, [W]	g : aceleración de la gravedad, 9,81 [m/s ²]
T_s : Temperatura Superficial, [°C]	B : coeficiente de expansión volumétrica,
$T_{air} = T_\infty$: Temperatura ambiente, [°C]	[1/K]
L : Altura del cilindro, [m]	ν : Viscosidad cinemática del fluido, [m ² /s]
D : Diámetro del cilindro, [m]	Pr : Número de Prandtl
A : Área de transferencia de calor, [m ²]	k : Conductividad térmica del aire, [W/m*K]

Los datos para resolver las ecuaciones se muestran en la tabla 2.25 y la solución de las ecuaciones se presenta en la Tabla 2.26.

Tabla 2.25. Datos del Problema.

Propiedades del Aire de la Tp a 1 atm	Dimensiones	Temperaturas
$k = 0,02595 \left[\frac{W}{mK} \right]$	$L = 0,88 [m]$	$T_s = 35 [^{\circ}C]$
$\nu = 1,61 \times 10^{-5} \left[\frac{m^2}{s} \right]$	$D = 0,66 [m]$	$T_{\infty} = 27 [^{\circ}C]$
$Pr = 0,7279 \left[\frac{W}{m * K} \right]$		

(Fuente: Propia)

Tabla 2.26. Resolución de ecuaciones.

Variable	Resolución	Respuesta	
Coefficiente de expansión volumétrica (B).	$\frac{1}{31 + 273}$	B	$0,0032895 \left[\frac{1}{K} \right]$
Numero de Rayleigh (Ra_D).	$\frac{9,81 * 0,0032895 * (35 - 27) * 0,66^3}{(1,61 \times 10^{-5})^2} * 0,7279$	Ra_D	$2,08 \times 10^8$
Número de Nusselt (Nu).	$\left\{ 0,6 + \frac{\left(0,387 * (2,08 \times 10^8)^{\frac{1}{6}} \right)^2}{\left[1 + \left(\frac{0,559}{0,7279} \right)^{\frac{9}{16}} \right]^{\frac{8}{27}}} \right\}$	Nu	71,156
Coefficiente de transferencia de calor por convección natural (h).	$\frac{0,02595}{0,66} * 71,165$	h	$2,8 \sim 3 \left[\frac{W}{m^2 * K} \right]$
Perdida de calor por convección Q.	$3 * 3,1416 * 0,66 * 0,88 * (35 - 27)$	Q	43,791 [W]

(Fuente: Propia)

El método para calcular el espesor de aislamiento consiste en disminuir la pérdida de calor por convección (Cengel & Ghajar, 2011), para ello se va a calcular un porcentaje de los 43,8 [W]. Se pueden probar varios porcentajes comprendidos entre 50-70 % del valor total, si se emplean valores menores a 50% se obtendrá espesores de aislamiento grandes lo cual es un problema en vista de que el precio y el peso del material aumenta. Si se prueba porcentajes mayores a 70% se conseguirá espesores de aislamiento pequeños lo cual resulta un problema al momento de cortar las tablas. El porcentaje a considerar es de 68% del valor de la pérdida de calor calculada, por lo tanto, el nuevo valor a ser considerado en el análisis es de 29,784 [W].

La transferencia de calor presente en el aislamiento se determina en base al análisis de resistencias térmicas de convección y conducción, esta se iguala al nuevo valor calculado, es decir que se iguala a los 29,784 [W]. En la Figura 2.14 se puede apreciar un esquema de las resistencias térmicas.

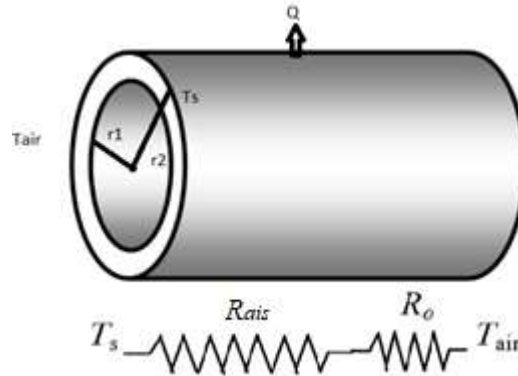


Figura 2.14. Esquema de resistencias térmicas para fermentador rotatorio.

(Fuente: (Cengel & Ghajar, 2011))

$$Q_{ais} = \frac{T_s - T_{air}}{R_o + R_{ais}} = \frac{T_s - T_{air}}{\frac{1}{h * A} + \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi k_{ais} L}} \quad (\text{Ec. 2.11})$$

Resolviendo la ecuación 2.11 se tiene que:

$$29,784 = \frac{35 - 27}{\frac{1}{3 * \pi * 2 * r_2 * 0,88} + \frac{\ln\left(\frac{r_2}{0,33}\right)}{2 * \pi * 0,12 * 0,88}}$$

$$r_2 = 0,352 [m]$$

Donde:

$Q_{ais}=Q_{nuevo}$: Transferencia de calor del aislamiento, [W]

T_s : Temperatura Superficial, [°C]

$T_{air}=T_{\infty}$: Temperatura ambiente, [°C]

R_o : Resistencia térmica por convección, [K/W]

R_{ais} : resistencia térmica del cilindro de aislamiento, [K/W]

h : coeficiente de transferencia de calor por convección, [W/m²*K]

A : Área de la superficie de transferencia de calor, $A = \pi * 2 * r_2 * L$ [m²]

k_{ais} : Conductividad térmica de la madera, [W/m*K]

r_1 : Radio interno del aislamiento, $D/2 = 0,33$ [m]

r_2 : Radio externo del aislamiento, [m]

El espesor de aislamiento resulta de la diferencia del radio calculado r_2 (0,352 m) y del radio interno r_1 (0,33 m), que corresponde a un valor de 0,022 m, se toma el valor de 2 cm, ya que esta es la dimensión comercial de las tablas de laurel.

A partir del valor de 2 cm se selecciona el espesor de aislamiento en las paredes hexagonales el cual corresponde a 4 cm, este valor es seleccionado ya que los tablonces de laurel generalmente presentan espesores comprendidos entre 4 a 6 cm. Se elige el valor de 4 cm ya que representa menor costo y peso, además la pared hexagonal debe servir de soporte estructural para armar el tambor.

2.3.4. Diseño de miembros de madera

Para el análisis de miembros de madera se hace uso del código de Diseño de Especificaciones Nacionales (NDS), el cual provee ecuaciones necesarias para el cálculo de tablas, tablonces, vigas, alfajías, pisos, techos y conectores de madera.

El método empleado para el análisis es el ASD o resistencia de diseño admisible, este método se basa en comparar el esfuerzo calculado debido a la aplicación de cargas de tracción, compresión y flexión con el esfuerzo admisible de diseño, este último varía dependiendo de factores como: la duración de carga, humedad, tamaño, temperatura, repetición de miembros, estabilidad en vigas y columnas, factor de curvatura y factor de área del apoyo, en la Tabla 2.27 se encuentra la notación empleada para nombrar a cada uno de estos factores y en la Tabla 2.28 se encuentran las fórmulas necesarias para determinar los esfuerzos de tracción, compresión, corte y flexión modificados por la acción de estos factores en miembros de madera aserrada.

Tabla 2.27. Factores de Diseño en miembros de madera Aserrada.

Factor	Descripción
C_D	Factor de duración de carga.
C_M	Factor de Humedad.
C_F	Factor de tamaño.
C_{fu}	Factor de uso plano.
C_t	Factor de temperatura
C_r	Factor de miembro repetitivo.
C_i	Factor de Incidencia.
C_p	Factor de estabilidad de columna.
C_L	Factor de estabilidad de viga.
C_v	Factor de volumen.
C_b	Factor de área de apoyo.
C_c	Factor de curvatura.

(Fuente: (Aghayere & Vigil, 2007))

Tabla 2.28. Fórmulas para cálculo de esfuerzos en miembros de madera.

Esfuerzo	Multiplicar	Multiplicar									
Flexión	$F_b' = F_b$	X	C_D	C_M	C_t	C_L	C_F	C_{fu}	C_i	C_r	
Tracción	$F_t' = F_t$	X	C_D	C_M	C_t	C_F	C_i				
Corte	$F_v' = F_v$	X	C_D	C_M	C_t	C_i					
Compresión Perpendicular	$F_{c\perp}' = F_{c\perp}$	X	C_M	C_t	C_i	C_b					
Compresión Paralela	$F_c' = F_c$	X	C_D	C_M	C_t	C_F	C_i	C_p			
Módulo de Rigidez	$E' = E$	X	C_M	C_t	C_i	C_T					
Módulo de Rigidez mínimo	$E_{min}' = E_{min}$	X	C_M	C_t	C_i	C_T					

(Fuente: (Aghayere & Vigil, 2007))

Para la obtención de los factores de diseño se hace uso del código NDS 2018 y del suplemento del código (NDS-S, 2015). Algunos de estos factores requieren de fórmulas para ser calculados, estas se las encuentra en la Tabla 2.29, así como la ubicación de los factores tabulados en el código.

Tabla 2.29. Fórmulas para calcular los factores de Diseño.

Vigas y Viguetas				Tablas y Tablones			
C_D	Código NDS 2018		Tabla 2.3.2	C_D	Código NDS		Apéndice A, Figura B1
C_M	NDS-S 2015	Espesores 2"-4"	Tabla 4A-4C	C_M	NDS-S 2015	Espesores menores a 2.5"	Tabla 4E
		Espesores Mayores a 5"	Tabla 4D				
C_F	NDS-S 2015	Espesores 2"-4"	Tabla 4A-4C	C_F	NDS-S 2015	Espesores menores a 2.5"	Tabla 4E
		Espesores Mayores a 5"	Tabla 4D				
C_{fu}	NDS-S 2015	Espesores 2"-4"	Tabla 4A-4C	C_{fu}	NDS-S 2015	$C_{fu}=1$	
		Espesores Mayores a 5"	Tabla 4D				
C_t	Código NDS 2018		Tabla 2.3.3	C_t	Código NDS 2018		Tabla 2.3.3
C_r	NDS-S 2015	Espesores 2"-4"	Tabla 4A-4C	C_r	NDS-S 2015	$C_r=1.15$	
C_i	(Aghayere & Vigil, 2007)		Tabla 3.8	C_i	(Aghayere & Vigil, 2007)		Tabla 3.8
C_p	$C_p = \frac{1 + \alpha}{2c} - \sqrt{\left(\frac{1 + \alpha}{2c}\right)^2 - \frac{\alpha}{c}}$		(Ec. 2.12)	$E'_{min} = E_{min} C_M C_t C_i$		(Ec. 2.15)	
	$\alpha = \frac{FcE}{Fc^*}$		(Ec. 2.13)	$F_c^* = F_c C_D C_M C_t C_F C_i$		(Ec. 2.16)	
	$FcE = \frac{0.822 E'_{min}}{\left(\frac{K_e l}{d_{x-y}}\right)^2}$		(Ec. 2.14)	c=0.8 Madera Aserrada c=0.9 Madera Pegada c=0.85 Postes redondos de madera			
C_L	$C_L = \frac{1 + \beta}{1.9} - \sqrt{\left(\frac{1 + \beta}{1.9}\right)^2 - \frac{\beta}{0.95}}$		(Ec. 2.17)	$E'_{min} = E_{min} C_M C_t C_i C_T$		(Ec. 2.21)	
	$\beta = \frac{FbE}{Fb^*}$		(Ec. 2.18)	$C_T = 1 + \left(\frac{K_m K_e l}{K_T E_{min}}\right)$		(Ec. 2.22)	
			(Ec. 2.19)	$K_m = 2300$		Contenido de humedad <19 %	

	$F_{bE} = \frac{1.20 * E'_{min}}{R_b^2}$		$K_m = 1200$	Contenido de humedad > 19%
	$R_b = \sqrt{\frac{l_e * d}{b^2}} \leq 50$	(Ec. 2.20)	$F_b^* = F_b C_D C_M C_t C_F C_i C_r$	(Ec. 2.23)
C_v	Solo aplica en miembros de sección compuesta que están unidos mediante goma.			
C_b	$Si l_b \leq 6[in]$		$C_b = \frac{l_b + 0.375}{l_b}$	(Ec. 2.24)
	$Si l_b > 6[in]$		$C_b = 1$	(Ec. 2.25)
C_c	Solo aplica en miembros de sección compuesta que están unidos mediante goma.			

(Fuente: Propia)

Donde:

F_{CE} : Esfuerzo de pandeo crítico de Euler para miembros a compresión, [psi].

E_{min} : Módulo de elasticidad mínimo, [psi], tablas (Ministerio del Ambiente, 2014).

K_e : Coeficiente de longitud de pandeo, (Anexo 2, Tabla 1).

l : longitud de columna sin refuerzo sobre eje de pandeo, [pulg].

d_x o d_y : Dimensión de la sección de la columna perpendicular al eje de pandeo, [pulg].

F_c^* : Resistencia al aplastamiento de la columna a una relación de esbeltez cero, [psi].

c : Factores de Interacción.

F_{bE} : Esfuerzo de pandeo crítico de Euler para miembros a flexión, [psi].

F_b^* : Resistencia a la flexión. (No multiplicar por los factores C_{fu} , C_v y C_L) [psi].

R_B : Limite del tamaño del haz y refuerzo lateral.

l_e : longitud efectiva, [pulg], (Anexo 2, Tabla 2).

l_u : La distancia entre los puntos de soporte lateral, [pulg].

d : lado mayor de la sección transversal del elemento, [pulg].

b : lado menor de la sección transversal del elemento, [pulg].

C_T : Factor de rigidez de pandeo.

K_m : Factor que depende del contenido de humedad.

K_T : 0,59 para madera aserrada, 0,75 para maquinada y 0,82 para madera pegada.

E : Módulo de elasticidad del miembro de madera, [psi].

l_b : Dimensión del lado del miembro perpendicular a la viga o al tablón, [pulg].

2.3.4.1. Miembros de madera sometidos a Flexión

Elementos como tablas, tablones, vigas, viguetas y alfajías se emplean tradicionalmente en la elaboración de pisos, paredes, techos, armaduras y estructuras para casas. Todos estos elementos se diseñan en base al código NDS. Varios elementos sometidos a flexión forman parte del fermentador, por lo que se emplea este código para realizar el análisis de las paredes del fermentador, piso de la bandeja, miembros del caballete y el

eje. En las Tablas 2.30 y 2.31 se describe el procedimiento, fórmulas y criterios empleados en el análisis de elementos de madera sometidos a cargas de flexión.

Tabla 2.30. Procedimiento, fórmulas y criterios para el análisis de vigas y viguetas.

Análisis y Diseño de Vigas y viguetas		
1. Selección de un miembro de madera (dimensiones de largo, ancho y espesor), obtener las de propiedades de la sección (A, I, S), tabular los módulos de elasticidad, esfuerzo de corte, flexión y compresión perpendicular.	$A = bxd$	(Ec. 26)
	$I = \frac{1}{12}db^3$	(Ec. 27)
	$S = \frac{2I}{b}$	(Ec. 28)
2. Cálculo de Reacciones, Momento y Cortante, incluir cargas vivas y muertas, incluir propio peso de la viga, Según Criterio de código NDS 2018.		
3. Tabular todos los factores especificados en la tabla 2.29.		
4. Cálculo del esfuerzo de flexión.	$fb = \frac{M_{max}}{S}$	(Ec. 29)
5. Esfuerzo de flexión admisible modificado (F_b').	Tabla 2.28	
6. Comparación de esfuerzo de flexión calculado y el admisible modificado.	$fb \leq F_b'$	El elemento no falla por fuerzas de flexión
	$fb > F_b'$	Probar con otra sección transversal
7. Cálculo del esfuerzo de corte.	$fv = \frac{1.5V_{max}}{A}$	(Ec. 30)
8. Esfuerzo de corte admisible modificado (F_v').	Tabla 2.28	
9. Comparación de esfuerzo de corte calculado y el admisible modificado.	$fv \leq F_v'$	El elemento no falla por fuerzas de corte
	$fv > F_v'$	Probar con otra sección transversal
10. Cálculo del esfuerzo de compresión perpendicular al grano.	$fc \perp = \frac{R1}{A_b}$	(Ec. 31)
11. Esfuerzo de compresión perpendicular al grano modificado ($F_c' \perp$).	Tabla 2.28	
12. Comparación de esfuerzo de compresión perpendicular al grano calculado y el admisible modificado.	$fc \perp \leq F_c' \perp$	El elemento no se agrieta por fuerzas de compresión perpendicular al grano.
	$fc \perp > F_c' \perp$	Probar con otra sección transversal.
13. Cálculo de la Deflexión ($\Delta Total$) Las deflexiones producidas por cargas y momentos se encuentran en la Tabla 1 Anexo 3.		
14. El elemento debe cumplir con los criterios de esfuerzos admisibles y calculados, el código NDS propone límites para poder comparar la deflexión total calculada, esta no debe ser mayor a $\frac{L}{240}$, es decir: $\Delta Total = \Delta LL + \Delta DL$ $\Delta Total \leq \frac{L}{240}$	$\Delta LL \leq \frac{L}{360}$	Deflexión producida por cargas dinámicas.
	$\Delta DL \leq \frac{L}{240}$	Deflexión producida por cargas estáticas.

(Fuente: Propia)

Donde:

b : lado menor de la sección rectangular, [pulg].

d : lado mayor de la sección rectangular, [pulg].

L : Longitud de la tabla, [pulg].

A : Área de la sección transversal, [pulg²].

I : Inercia de área, [pulg⁴].

S : Modulo de la Sección, [pulg³].

f_b : Esfuerzo de flexión calculado, [psi].

F_B' : Esfuerzo de flexión admisible modificado por factores, [psi].

M_{max} : Momento máximo, [lbf- pulg].

V_{max} : Fuerza de Corte, [lbf].

F_v' : Esfuerzo de corte Admisible modificado por factores, [psi].

f_v : Esfuerzo de corte calculado, [psi].

RI : Fuerza que ejerce el miembro perpendicular a la viga o tablón, [lbf].

A_b : Área de la sección del miembro perpendicular a la viga o tablón, [pulg²].

$f_{c \perp}$: Esfuerzo de compresión perpendicular al grano calculado, [psi].

$F_{c' \perp}$: Esfuerzo de compresión perpendicular al grano modificado por factores, [psi].

Tabla 2.31. Procedimiento, fórmulas y criterios para el análisis de tablas y tablonés.

Análisis y Diseño de Tablas y Tablonés		
1. Selección de un miembro de madera (dimensiones de largo, ancho y espesor), obtener las de propiedades de la sección (A, I, S), tabular los módulos de elasticidad, y esfuerzo de flexión.		
2. Cálculo del área, módulo de la sección e inercia por pie de ancho de la tabla.	$Af = A * \frac{12}{d}$	(Ec. 32)
	$If = I * \frac{12}{d}$	(Ec. 33)
	$Sf = S * \frac{12}{d}$	(Ec. 34)
3. Cálculo de la carga muerta total distribuida sobre la superficie del elemento en libras sobre pie cuadrado (Psf).	$W_1 = \frac{W_c}{A_L} = \frac{W_c}{d * L}$	(Ec. 35)
	$W_2 = \frac{W_T}{A_L} * \frac{b}{12} = \frac{W_T}{d * L} * \frac{b}{12}$	(Ec. 36)
	$W_T = b * d * L * \rho$	(Ec. 37)
	$W_{Total} = \frac{W_1 + W_2}{n}$	(Ec. 38)
4. Cálculo del momento máximo dependiendo de la configuración de los apoyos y la carga, Tabla 1 Anexo 3.		
5. Tabular todos los factores especificados en la tabla 2.29.		
6. Cálculo del esfuerzo de flexión.	$fb = \frac{M_{max}}{Sf}$	(Ec. 39)
7. Esfuerzo de flexión admisible modificado (F_b').	Tabla 2.28	
8. Comparación de esfuerzo de flexión calculado y el admisible modificado.	$fb \leq Fb'$	El elemento no falla por fuerzas de flexión.
	$fb > Fb'$	Probar con otra sección transversal.
9. Cálculo de la carga muerta total por pie de ancho de la tabla.	$W_F = \frac{W_{Total}}{12}$	(Ec. 40)
10. Cálculo de la Deflexión (Δ_{Total}) Las fórmulas de las deflexiones para tablas y tablonés se encuentran en el Anexo 3, Tabla 1. Esta deflexión depende del tipo de apoyo y ubicación de las cargas, los valores a ser reemplazados son: Inercia (If), Carga muerta total (W_F), longitud de la tabla (L) y el módulo de elasticidad modificado ($E' = EC_M C_t C_i$).		
11. El elemento debe cumplir con el criterio de esfuerzo de flexión admisible y calculado, el código NDS propone límites para poder comparar la deflexión total calculada, esta no debe ser mayor a $\frac{L}{240}$, es decir: $\Delta_{Total} = \Delta_{LL} + \Delta_{DL}$ $\Delta_{Total} \leq \frac{L}{240}$	$\Delta_{LL} \leq \frac{L}{360}$	Deflexión producida por cargas vivas.
	$\Delta_{DL} \leq \frac{L}{240}$	Deflexión producida por cargas muertas.

(Fuente: Propia)

Donde:

A_f : Área, [pulg²] por pie de ancho de la tabla.

I_f : Inercia, [pulg⁴] por pie de ancho de la tabla.

S_f : Modulo de la sección, [pulg³] por pie de ancho de la tabla.

$W1$: Carga muerta (Carga de cacao), [psf].

$W2$: Peso de la tabla, [psf].

n : Numero de tablas que soportan la carga.

WT : Peso de la Tabla, [lbf].

W_{Total} : Carga muerta total (carga de cacao + peso de la tabla), [psf].

WF : Carga muerta total, [lbf/pulg]

L : Longitud del miembro [pulg] o [pie]

2.3.4.2. Diseño de las paredes del tambor

Para el diseño de estos elementos se emplea el procedimiento descrito en la Tabla 2.31. Las dimensiones de estos elementos se encuentran en la Tabla 2.32 y los cálculos se muestran en la Tabla 2.33. El número de tablas que están en contacto con la carga de cacao es igual a nueve. La carga de cacao es de 330 lbf (150 kgf), este valor se distribuye de manera uniforme sobre la superficie de las tablas para las paredes inferiores del fermentador. En la Figura 2.15 se puede apreciar el diagrama de cuerpo libre y la distribución de la carga de cacao para la pared inferior.

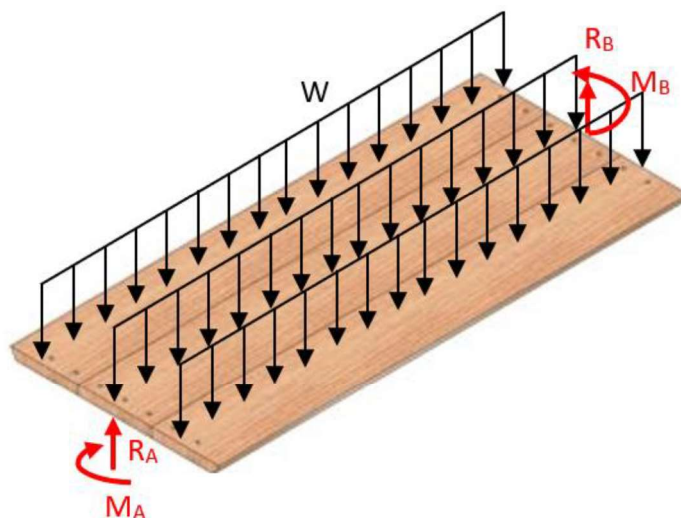


Figura 2.15. Diagrama de cuerpo libre de una tabla en la pared inferior.

(Fuente: Propia)

Tabla 2.32. Dimensiones de los elementos para paredes del fermentador.

Dimensiones de la Sección						
Espesor (B)	20	[mm]	0,787	[pulg]	0,0656	[pie]
Ancho (D)	150	[mm]	5,906	[pulg]	0,492	[pie]
Largo (L)	960	[mm]	37,795	[pulg]	3,150	[pie]

(Fuente: Propia)

Tabla 2.33. Cálculos que garantizan la resistencia de las paredes del fermentador.

Paso	Resolución	Resultado
1	Los valores de las propiedades mecánicas del laurel se detallan en la tabla 1 del anexo 4.	
2	$Af = 0.787 * 5.906 * \frac{12}{5.906}$	Af 9.449 [pulg ²]
	$If = \frac{1}{12} * 5.906 * 0.787^3 * \frac{12}{5.906}$	If 0.488 [pulg ⁴]
	$Sf = 2 * \frac{0.240}{0.787} * \frac{12}{5.906}$	Sf 1.24 [pulg ³]
3	$W_1 = \frac{330}{0.492 * 3.15}$	W_1 212.903 [psf]
	$W_T = 0.787 * 5.906 * 37.795 * 0.03432$	W_T 6.083 [lbf]
	$W_2 = \frac{6.083}{0.492 * 3.15} * \frac{0.787}{12}$	W_2 0.257 [psf]
	$W_{Total} = \frac{212.903 + 0.257}{9}$	W_{Total} 23.684 [psf]
4	$M_{Max} = \frac{W_{Total} * L^2}{24} = \frac{1}{24} * 23.684 * 3.150^2$	M_{Max} 9.79 [lbf-pie] 117.475 [lbf-pie]
5	Los factores que modifican el esfuerzo admisible se encuentran en la tabla 3 del anexo 4	
6	$fb = \frac{234.95}{1.24}$	fb 94.738 [Psi]
7	$Fb' = 4309.66 * 0.9 * 0.85 * 0.7 * 0.324 * 1.172 * 1 * 0.8 * 1.15$	Fb' 807 [Psi]
8	$fb \leq Fb'$	OK
9	$W_F = \frac{23.684}{12}$	W_F 1.974 [Lb/in] por ancho de pie del piso
10	$\Delta_{Total} = \frac{W_F * L^4}{384EI} = \frac{(1.974 * 37.795^4)}{384 * 1223203.8 * 0.85 * 0.7 * 0.8 * 0.488}$	Δ_{Tot} 0.04 [in]
11	$\Delta_{Total} \leq \frac{37.795}{240} = 0.157 [in]$	OK

(Fuente: Propia)

2.3.4.3. Diseño de la bandeja

La descarga de granos sobre la bandeja se debe realizar de manera controlada, es decir que no se descargan las 330 lbf de forma instantánea. Para el diseño de la bandeja se considera una carga de 220 lbf (100 kg) distribuidos a lo largo de la superficie de las tablas, el número de elementos presentes es igual a cinco. En la Figura 2.16 se muestra el diagrama de cuerpo libre para la bandeja. Las dimensiones de cada elemento se encuentran en la Tabla 2.34 y los cálculos se muestran en la Tabla 2.35.

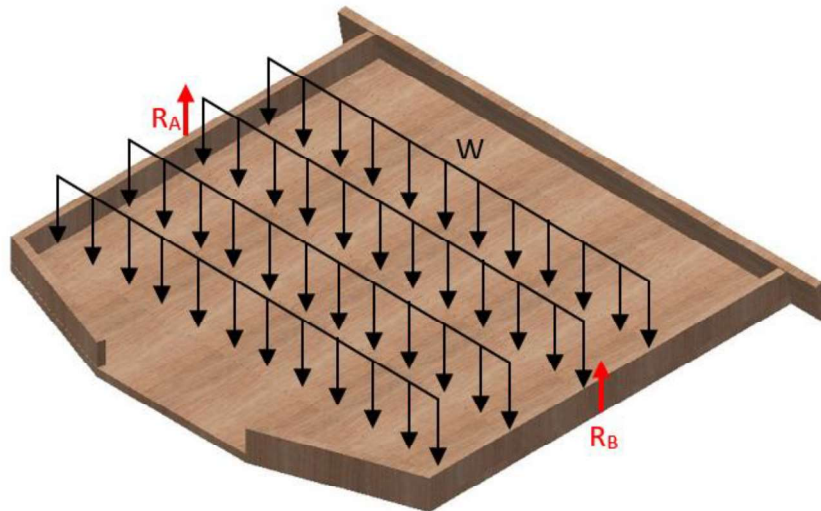


Figura 2.16. Diagrama de cuerpo libre de una tabla de la bandeja.

(Fuente: Propia)

Tabla 2.34. Dimensiones de las tablas para la bandeja.

Dimensiones de la Sección						
Espesor (B)	20	[mm]	0,787	[pulg]	0,0656	[pie]
Ancho (D)	200	[mm]	7,874	[pulg]	0,656	[pie]
Largo (L)	1120	[mm]	44,094	[pulg]	3,675	[pie]

(Fuente: Propia)

Tabla 2.35. Cálculos que garantizan la resistencia de las tablas de la bandeja.

Paso	Resolución	Resultado	
1	Los valores de las propiedades mecánicas del laurel se detallan en la tabla 1 del anexo 4.		
2	$A_f = 0.787 * 7.874 * \frac{12}{7.874}$	A_f	9.449 [pulg ²]
	$I_f = \frac{1}{12} * 7.874 * 0.787^3 * \frac{12}{7.874}$	I_f	0.488 [pulg ⁴]
	$S_f = 2 * \frac{0.32}{0.787} * \frac{12}{7.874}$	S_f	1.24 [pulg ³]
3	$W_1 = \frac{220}{0.656 * 3.675}$	W_1	91.244 [psf]
	$W_T = 0.787 * 7.874 * 44.094 * 0.03432$	W_T	9.462 [lbf]
	$W_2 = \frac{9.462}{0.656 * 3.675} * \frac{0.787}{12}$	W_2	0.257 [psf]
	$W_{Total} = \frac{72,995 + 0,257}{5}$	W_{Total}	18.3 [psf]
4	$M_{Max} = \frac{W_{Total} * L^2}{8} = \frac{1}{8} * 18,3 * 3,675^2$	M_{Max}	30.887 [lbf-pie] 370.643 [lbf-pulg]
5	Los factores que modifican el esfuerzo admisible se encuentran en la tabla 3 del anexo 4.		
6	$fb = \frac{370.643}{1.24}$	fb	298.905 [psi]
7	$Fb' = 4309,66 * 0,9 * 0,85 * 0,7 * 0,213 * 1,172 * 1 * 0,8 * 1,15$	Fb'	530 [psi]
8	$fb \leq Fb'$	OK	

9	$W_F = \frac{14.651}{12}$	W_F	1.221 [lbf/pulg]
10	$\Delta_{Total} = \frac{5 * W_F * L^4}{384EI} = \frac{5 * (1.525 * 44.094^4)}{384 * 1223203.8 * 0.85 * 0.7 * 0.8 * 0.488}$	Δ_{Tot}	0.15
11	$\Delta_{Total} \leq \frac{44.094}{240} = 0,184$	OK	

(Fuente: Propia)

2.3.4.4. Diseño de las guías de la Bandeja

Las guías sirven de soporte para la bandeja, para su análisis se diseña como si se tratase de una viga empotrada. Cada guía soporta la mitad del peso del cacao sobre la bandeja (93,5 lbf) más la mitad del peso de la bandeja (16,5 lbf), la carga distribuida a lo largo de la guía es de 4 [lbf/pulg], este valor se obtiene al dividir 110 libras (guía + cacao) para la longitud de la guía (27,559 pulg). En la Figura 2.17 se muestra el diagrama de cuerpo libre de este elemento. Las dimensiones se encuentran en la Tabla 2.36 y los cálculos se encuentran en la Tabla 2.37.

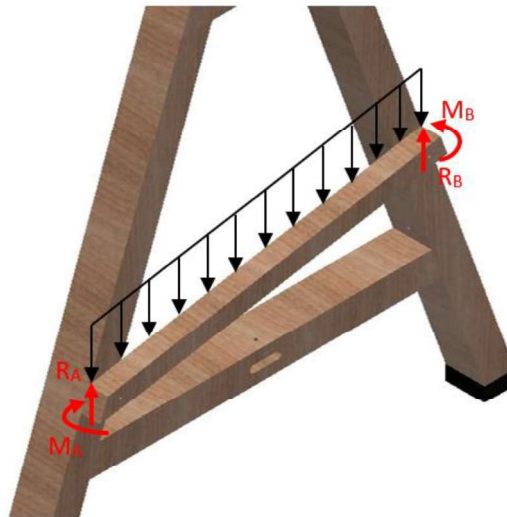


Figura 2.17. Diagrama de cuerpo libre de una guía de la Bandeja.

(Fuente: Propia)

Tabla 2.36. Dimensiones de las guías.

Dimensiones				
Espesor (B)	40	[mm]	1,575	[pulg]
Ancho (D)	40	[mm]	1,575	[pulg]
Largo (L)	700	[mm]	27,559	[pulg]

(Fuente: Propia)

Tabla 2.37. Cálculos que garantizan la resistencia de las guías de la bandeja.

Paso	Resolución	Resultado	
1	Los valores de las propiedades mecánicas del colorado se encuentran en la Tabla 2 Anexo 4	$A = 1.575 * 1.575$ $I = \frac{1}{12} * 1.575 * 1.575^3$ $S = 2 * \frac{0.513}{1.575}$	A 2.48 [pulg ²] I 0.513 [pulg ⁴] S 0.651 [pulg ³]
	$RA = RB = \frac{WL}{2} = \frac{4 * 27.559}{2}$	$RA = RB$	55 [lbf]
	$V_{Max} = RA$	V_{Max}	55 [lbf]
2	$M_{Max} = \frac{WL^2}{24} = \frac{4 * 27.559^2}{24}$	M_{Max}	126.312 [lbf-pulg]
	Los factores que modifican el esfuerzo admisible se encuentran en la tabla 3 del anexo 4		
3			
4	$fb = \frac{126.312}{0.651}$	fb	194 [psi]
5	$Fb' = 9373.155 * 0.9 * 0.7 * 0.8 * 0.98 * 1 * 1 * 0.8 * 1.15$	Fb'	4260 [psi]
6	$fb \leq Fb'$	OK	
7	$fv = \frac{1.5 * 55}{2.48}$	fv	33.266 [psi]
8	$Fv' = 1891.669 * 0.9 * 0.8 * 0.7$	Fv'	953.416 [psi]
9	$fv \leq Fv'$	OK	
10	$fc \perp = \frac{55}{2.48}$	$fc \perp$	22.177 [psi]
11	$Fc' \perp = 1095.194 * 0.7 * 0.8 * 1.238$	$Fc' \perp$	759 [psi]
12	$fc \perp \leq Fc' \perp$	OK	
13	$\Delta_{Total} = \frac{WL^4}{384E'I} = \frac{4 * 27.559^4}{384 * 2062378.5 * 0.7 * 0.8 * 0.8 * 0.513}$	Δ_{Tot}	0.01266 [pulg]
14	$\Delta_{Total} \leq \frac{27.559}{240} = 0.1148 [in]$	OK	

(Fuente: Propia)

2.3.4.5. Diseño del Eje de Madera

El eje de madera es el componente estructural más importante de todo el fermentador, este elemento debe soportar el peso del tambor hexagonal (154 lbf) y la carga de cacao (330 lbf), al permanecer la mayor parte el tiempo en equilibrio estático su análisis se lo realiza como si se tratase de una viga apoyada con dos cargas concentradas en el inicio del cambio de sección como se muestra en la Figura 2.18. Las dimensiones se encuentran en la Tabla 2.38 y los cálculos se encuentran en la Tabla 2.39.

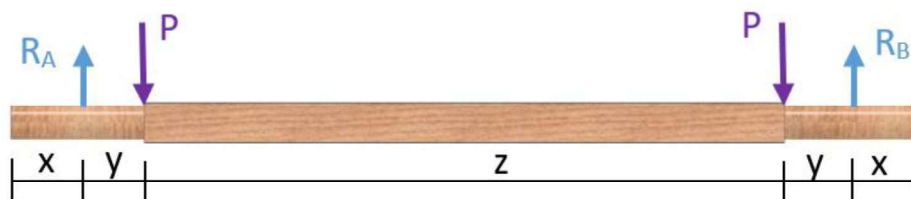


Figura 2.18. Diagrama de cuerpo libre del eje de madera.
(Fuente: Propia)

Tabla 2.38. Dimensiones y distancias del eje de madera.

Dimensiones de la sección				
Ancho (B=D)	60	[mm]	2,362	[pulg]
Largo (L)	1360	[mm]	53,543	[pulg]
X=Y	100	[mm]	3,937	[pulg]
Z	960	[mm]	37,795	[pulg]

(Fuente: Propia)

Tabla 2.39. Cálculos que garantizan la resistencia del eje.

Paso	Resolución	Resultado
1	Los valores de las propiedades mecánicas del colorado se encuentran en la Tabla 2 Anexo 4	
	$A = 2.362 * 2.362$	A 5.58 [pulg ²]
	$I = \frac{1}{12} * 2.362 * 2.362^3$	I 2.595 [pulg ⁴]
	$S = 2 * \frac{2.595}{2.362}$	S 2.197 [pulg ³]
2	$RA = RB = \frac{\text{Peso del cacao} + \text{Peso Tambor}}{2} = \frac{330 + 154}{2}$	RA = RB 242 [lbf]
	$V_{Max} = RA$	V _{Max} 242 [lbf]
	$M_{Max} = Pa = 242 * 3.937$	M _{Max} 952.756 [lbf-pulg]
3	Los factores que modifican el esfuerzo admisible se encuentran en la tabla 3 del anexo 4.	
4	$fb = \frac{952.756}{2.197}$	fb 434 [psi]
5	$Fb' = 9373.155 * 0.9 * 0.7 * 0.8 * 0.974 * 1 * 1 * 0.8 * 1.15$	Fb' 4233 [psi]
6	$fb \leq Fb'$	OK
7	$fv = \frac{1.5 * 242}{5.58}$	fv 65 [psi]
8	$Fv' = 1891.669 * 0.9 * 0.8 * 0.7$	Fv' 953.4 [psi]
9	$fv \leq Fv'$	OK
10	$fc \perp = \frac{242}{5.58}$	fc ⊥ 43.369 [psi]
11	$Fc' \perp = 1095.194 * 0.7 * 0.8 * 1.159$	Fc' ⊥ 711 [psi]
12	$fc \perp \leq Fc' \perp$	OK
13	$\Delta_{Total} = \frac{Pa(3L^2 - 4a^2)}{24E'I} = \frac{242 * 3.937(3 * 45.669^2 - 4 * 3.937^2)}{24 * 2062378.5 * 0.7 * 0.8 * 0.8 * 2.595}$	Δ _{Tot} 0.1026 [pulg]
14	$\Delta_{Total} \leq \frac{53.543}{240} = 0.2231 [in]$	OK

(Fuente: Propia)

2.3.4.6. Diseño de las Paletas del eje

Cada paleta mueve una carga de 25 lb aproximadamente. Para comprobar la resistencia de este elemento, su análisis se lo realiza como si se tratase de una viga en voladizo con una carga distribuida a lo largo de su superficie longitudinal como se muestra en la Figura 2.19. Las dimensiones de cada paleta se encuentran en la Tabla 2.40 y los cálculos se encuentran en la Tabla 2.41

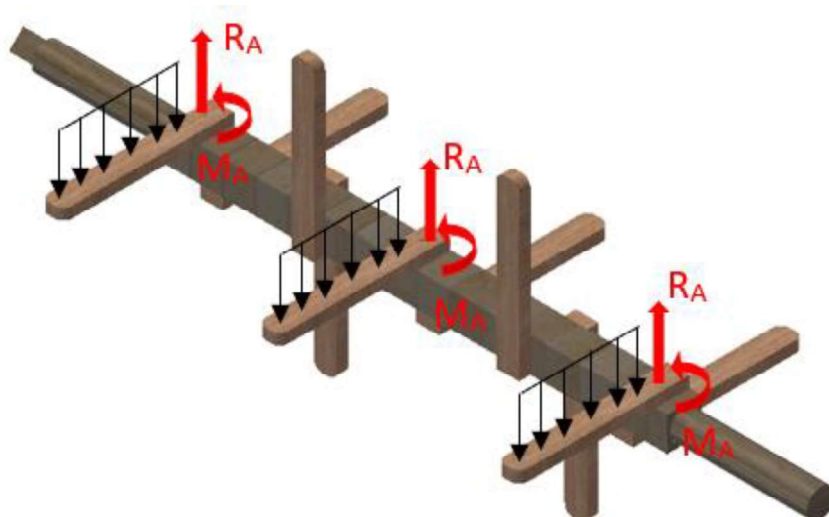


Figura 2.19. Diagrama de cuerpo libre de las paletas.

(Fuente: Propia)

Tabla 2.40. Dimensiones de las paletas de madera.

Propiedades de la sección				
Esesor (B)	30	[mm]	1,181	[pulg]
Ancho (D)	40	[mm]	1,575	[pulg]
Largo (L)	300	[mm]	11,811	[pulg]

(Fuente: Propia)

Tabla 2.41. Cálculos que garantizan la resistencia de las paletas.

Paso	Resolución	Resultado	
1	Los valores de las propiedades mecánicas del laurel se detallan en la tabla 1 del anexo 4	$A = 1.181 * 1.575$	A 1.86 [pulg ²]
		$I = \frac{1}{12} * 1.575 * 1.181^3$	I 0.216 [pulg ⁴]
		$S = 2 * \frac{0.216}{1.181}$	S 0.366 [pulg ³]
2	$RA = wL = 2.117 * 11.811$	$RA = RB$	25 [lbf]
	$V_{Max} = RA$	V_{Max}	25 [lbf]
	$M_{Max} = \frac{wL^2}{2} = \frac{2.117 * 11.811^2}{2}$	M_{Max}	147.638 [lbf-pulg]
3	Los factores que modifican el esfuerzo admisible se encuentran en la tabla 3 del anexo 4		
4	$fb = \frac{194.882}{0.366}$	fb	403 [psi]
5	$Fb' = 4309.66 * 0.9 * 0.7 * 0.8 * 0.996 * 1 * 1 * 0.8 * 1.15$	Fb'	1990 [psi]
6	$fb \leq Fb'$	OK	
7	$fv = \frac{1.5 * 25}{1.86}$	fv	20.161 [psi]
8	$Fv' = 1450.77 * 0.9 * 0.8 * 0.7$	Fv'	731.191 [psi]
9	$fv \leq Fv'$	OK	
10	$fc \perp = \frac{25}{1.86}$	$fc \perp$	13.441 [psi]

11	$Fc' \perp = 654.272 * 0.7 * 0.8 * 1.318$	$Fc' \perp$	483 [psi]
12	$fc \perp \leq Fc' \perp$		OK
13	$\Delta Total = \frac{wL^4}{8E'I} = \frac{2.117 * 11.811^4}{8 * 1223203.8 * 0.7 * 0.8 * 0.8 * 0.216}$	ΔTot	0.04345 [pulg]
14	$\Delta Total \leq \frac{53.543}{240} = 0.0492 [in]$		OK

(Fuente: Propia)

2.3.4.7. Diseño del caballete (miembro a Flexión)

El caballete presenta un miembro sometido a flexión y dos miembros sometidos a compresión paralela al grano. El análisis del elemento a flexión se muestra en la Figura 2.20 y el análisis de elementos sometidos a compresión se muestra en la siguiente sección. La carga que soporta este miembro es igual 242 libras, este valor se obtiene al sumar la mitad del peso del tambor hexagonal y la carga de cacao. Las dimensiones del miembro se encuentran en la Tabla 2.42 y los cálculos se encuentran en la Tabla 2.43

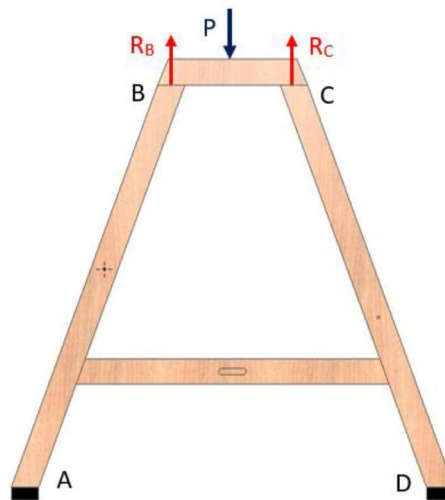


Figura 2.20. Diagrama de cuerpo libre del miembro B-C.

(Fuente: Propia)

Tabla 2.42. Dimensiones del elemento sometido a flexión.

Dimensiones del Elemento				
Espesor (B)	60	[mm]	2,362	[pulg]
Ancho (D)	80	[mm]	3,150	[pulg]
Largo (L)	300	[mm]	11,811	[pulg]

(Fuente: Propia)

Tabla 2.43. Cálculos que garantizan la resistencia del elemento a flexión.

Paso	Resolución	Resultado		
1	Los valores de las propiedades mecánicas del colorado se encuentran en la Tabla 2 Anexo 4	$A = 2.362 * 3.15$	A	7.44 [pulg ²]
		$I = \frac{1}{12} * 3.15 * 2.362^3$	I	3.46 [pulg ⁴]
		$S = 2 * \frac{3.46}{2.362}$	S	2.929 [pulg ³]
2		$RB = RC = \frac{\text{Peso del cacao} + \text{Peso Tambor}}{2} = \frac{(330 + 154)/2}{2}$	RB = RC	121 [lbf]
		$V_{Max} = RB$	V_{Max}	121 [lbf]
		$M_{Max} = \frac{PL}{4} = \frac{242 * 11.811}{4}$	M_{Max}	714.567 [lbf-pulg]
3	Los factores que modifican el esfuerzo admisible se encuentran en la tabla 3 del anexo 4.			
4	$fb = \frac{714.567}{2.929}$	fb	243.951 [psi]	
5	$Fb' = 9373.155 * 0.9 * 0.7 * 0.8 * 0.993 * 1 * 1 * 0.8 * 1.15$	Fb'	4315 [psi]	
6	$fb \leq Fb'$		OK	
7	$fv = \frac{1.5 * 242}{7.44}$	fv	24.395 [psi]	
8	$Fv' = 1891.669 * 0.9 * 0.8 * 0.7 * 0.8$	Fv'	762.733 [psi]	
9	$fv \leq Fv'$		OK	
10	$fc \perp = \frac{121}{7.44}$	fc ⊥	16.263 [psi]	
11	$Fc' \perp = 1095.194 * 0.7 * 0.8 * 1 * 1.16$	Fc' ⊥	711 [psi]	
12	$fc \perp \leq Fc' \perp$		OK	
13	$\Delta Total = \frac{PL^3}{48E'I} = \frac{242 * 11.811^3}{48 * 2062378.5 * 0.9 * 0.7 * 0.8 * 0.8 * 3.46}$	ΔTot	0.002887 [pulg]	
14	$\Delta Total \leq \frac{11.811}{240} = 0.0492 [in]$		OK	

(Fuente: Propia)

2.3.4.8. Miembros de madera sometidos a compresión

Para el caso del fermentador, el caballete presenta miembros sometidos a este tipo de cargas y al igual que los miembros a flexión estos elementos se diseñan en base al código NDS. En la Tabla 2.44 se describe el procedimiento, fórmulas y criterios empleados en el análisis de elementos de madera sometidos a cargas de compresión paralela al grano

Tabla 2.44. Procedimiento para el análisis de miembros a compresión.

Diseño de columnas (vigas y viguetas)		
1. Selección de un miembro de madera (dimensiones de largo, ancho y espesor), obtener el área la sección transversal, tabular los módulos de elasticidad y esfuerzo de compresión paralelo al grano.		
2. Cálculo de Reacciones y fuerzas internas de los miembros a compresión		
3. Tabular todos los factores de diseño especificados en la tabla 2.29.		
4. Cálculo del factor de estabilidad de la columna C_p (procedimiento descrito en la tabla 2.29).		
4. Comprobación de las relaciones de esbeltez de la columna.	$\frac{Ke * l}{d} < 50$	(Ec.41)
	$\frac{Ke * l}{b} < 50$	(Ec.42)
6. Cálculo del esfuerzo de compresión paralelo al grano.	$f_c = \frac{F_{miembro}}{A_t}$	(Ec.43)
7. Esfuerzo de compresión admisible modificado (F_c').	Tabla 2.28	
8. Comparación de esfuerzo de flexión calculado y el admisible modificado.	$f_c \leq F_c'$ El elemento no falla por fuerzas de compresión.	
	$f_c > F_c'$ Probar con otra sección transversal.	

(Fuente: Propia)

Donde:

F_c' : Esfuerzo admisible de compresión paralelo al grano modificado, [psi].

f_c : Esfuerzo de compresión paralelo al grano calculado, [psi].

$F_{miembro}$: Fuerza interna del miembro sometido a una carga de compresión, [lbf].

A_t : Área de la sección transversal, [pulg²].

Ke : Coeficiente de pandeo, (Anexo 2 Tabla1).

l : Longitud del miembro.

d : ancho de la sección del miembro, [pulg].

b : espesor de la sección del miembro, [pulg].

2.3.4.9. Diseño del caballete (miembros a compresión)

Para determinar la resistencia de los miembros a compresión, es necesario realizar un análisis estático, partiendo por el diagrama de cuerpo libre mostrado en la Figura 2.21. Las dimensiones de cada columna se encuentran en la Tabla 2.45 y los cálculos se encuentran en la Tabla 2.46

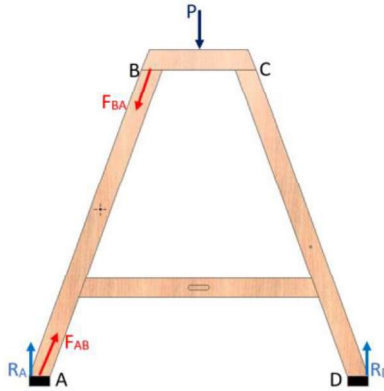


Figura 2.21. Diagrama de cuerpo libre de los miembros a compresión.

(Fuente: Propia)

Tabla 2.45. Dimensiones del elemento sometido a compresión.

Miembro a Compresión				
Largo (L)	1000	[mm]	39,37	[pulg]
Espesor (B)	60	[mm]	2,36	[pulg]
Ancho (D)	80	[mm]	3,15	[pulg]
Área (A=B*D)	4800	[mm ²]	7,440	[pulg ²]

(Fuente: Propia)

Tabla 2.46. Cálculos que garantizan la resistencia del miembro a compresión.

Paso	Resolución	Resultado
1	Las propiedades mecánicas del colorado se encuentran en la Anexo 4 Tabla 2.	
2	$RA = RD = \frac{W_{cacao} + W_{Tambor}}{2} = \frac{(330 + 154)/2}{2}$	$RB = RC$ 121 [lbf]
	$F_{AB} = \frac{RA}{\sin(70)} = \frac{121}{\sin(70)}$	F_{AB} 128.766 [lbf]
3	Los factores que modifican el esfuerzo admisible se encuentran en la tabla 3 del anexo 45.	
4	$F_c E = \frac{0.822 * 749955.82 * 0.7 * 0.8 * 0.8}{\left(\frac{1 * 39.37}{3.15}\right)^2}$	$F_c E$ 1767.525 [psi]
	$F_c^* = 8804.223 * 0.9 * 0.7 * 0.8 * 1 * 0.8$	F_c^* 3549.863
	$\alpha = \frac{1767.525}{3549.863}$	α 0.498
	$C_p = \frac{1 + 0.498}{2 * 0.8} - \sqrt{\left(\frac{1 + 0.498}{2 * 0.8}\right)^2 - \frac{0.498}{0.8}}$	C_p 0.432 [psi]
5	Comprobación del criterio de estabilidad $\frac{Ke * l}{d_{x-y}} \leq 50$	$\frac{(1) * 39.37}{3.15} = 12.5$ 12.5 ≤ 50 OK
		$\frac{(1) * 39.37}{2.36} = 16.667$ 16.667 ≤ 50 OK
6	$f_c = \frac{128.766}{7.44}$	f_c 17.307 [psi]
7	$F_c' = 8804.223 * 0.9 * 0.7 * 0.8 * 1 * 0.8 * 0.432$	F_c' 1534.043 [psi]
8	$f_c \leq F_c'$	OK

(Fuente: Propia)

2.3.5. Diseño y selección de uniones atornilladas

Existen varios tipos de elementos metálicos que permiten unir dos o más piezas de madera, cada uno es utilizado dependiendo de la función y disposición de los tablones y vigas de madera, en la Figura 2.22 se puede observar los elementos de conexión más utilizados para conexiones en madera.



Figura 2.22. Elementos de conexión en piezas de madera.

(Fuente: (Aghayere & Vigil, 2007))

Para el diseño de conexiones en madera se hace uso del código de Diseño de especificaciones Nacionales (NSD), el cual provee ecuaciones necesarias para el cálculo de conexiones empernadas y atornilladas considerando varios factores de diseño como: temperatura, humedad, geometría, duración, cargas, arreglo de pernos o tornillos y disposición del grano de la madera. El diseño y selección de estos conectores depende de cómo actúa la carga sobre dicho elemento, se puede tener cargas que actúen de forma paralela o perpendicular al conector.

Los conectores que están sometidos a cargas paralelas a su longitud, tienden a extraerlos del elemento principal, para su análisis se debe encontrar el valor de diseño de extracción por pulgada de penetración (W), y además se tiene que encontrar la carga máxima que puede soportar el conector, con este valor se puede estimar cuantos tornillos son necesarios para evitar que la carga del cacao los desprenda de las tablas. El procedimiento para el análisis de estos conectores se detalla en la Tabla 2.47.

Tabla 2.47. Análisis de conectores sometidos a cargas paralelas a su longitud.

Ecuaciones empleadas en conectores de madera		
1. Cálculo del valor de diseño de extracción por pulgada de penetración	$W = 2850 * G^2 * D$	(Ec. 44)
2. Cálculo de la carga máxima que puede soportar cada tornillo	$P_{max} = W * L * C_D * C_M * C_t * C_{eg} * C_{tn}$	(Ec. 45)

(Fuente: Propia)

Donde:

W : Valor de Diseño de Extracción [lbf/pulg].

G : 0,37, gravedad específica de la madera de laurel (Código NDS, Tabla 12.3.3A).

D : Diámetro del sujetador N14 (Código NDS, Tabla L3).

W : Valor de Diseño de Extracción Calculado [lbf/pulg].

L : Longitud de penetración del tornillo.

C_D : 0,9, factor de duración de carga (≤ 1.6 , Código NDS, Tabla 2.3.2).

C_M : 0,7, factor de Humedad (Código NDS, Tabla 11.3.3).

C_t : 0,8, factor Temperatura (Código NDS, Tabla 11.3.4).

C_{eg} : 0,75, factor de Fin de Grano (Código NDS, Sección 12.5.2).

C_m : 0,67, factor de configuración geométrica (Código NDS, Sección 12.5.4).

Para el diseño y selección de conectores que estén sometidos a cargas que son perpendiculares a su longitud se calcula el valor de Z , el cual representa el valor nominal de diseño lateral cuando el elemento está sometido a este tipo de cargas y bajo las condiciones anteriormente mencionadas. El valor de Z depende de cuatro modos de falla, cada uno conduce a cierta ecuación que permite calcular la capacidad de carga de cada tornillo, tirafondo, clavo o perno, el valor más pequeño de Z encontrado en estos cuatro modos de falla es el valor para considerar en el diseño, ya que con este valor se puede anticipar cual será el modo de falla y la carga máxima permitida para este conector. En la figura 2.23 se puede apreciar los diferentes modos de falla considerando el miembro principal y el lateral.

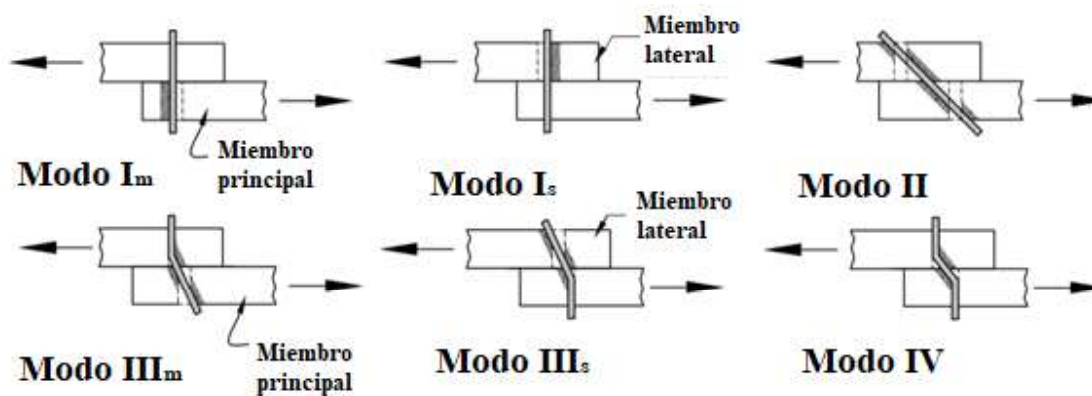


Figura 2.23. Modos de Falla en Conectores de madera.

(Fuente: (Aghayere & Vigil, 2007))

Las ecuaciones empleadas en el cálculo de Z de cada uno de los modos de falla se describen en la Tabla 2.48 y las ecuaciones para el cálculo de Factores k_1 , k_2 , k_3 , R_t , R_D , K_θ y los esfuerzos F_{em} , F_{es} , se describe en la Tabla 2.49

Tabla 2.48. Ecuaciones de Z para cada modo de Falla.

Modo de Falla	Ecuación de Fuerza de Corte	Número de Ecuación
I _m	$z = \frac{Dl_m F_{em}}{R_D}$	(Ec. 2.46)
I _s	$z = \frac{Dl_s F_{em}}{R_D}$	(Ec. 2.47)
II	$z = \frac{k1l_s F_{es}}{R_D}$	(Ec. 2.48)
III _m	$z = \frac{k2Dl_m F_{em}}{(1 + 2R_e)R_D}$	(Ec. 2.49)
III _s	$z = \frac{k3Dl_s F_{es}}{(2 + R_e)R_D}$	(Ec. 2.50)
IV	$z = \frac{D^2}{R_D} \sqrt{\frac{2F_{em}F_{yb}}{3(1 + R_e)}}$	(Ec. 2.51)

(Fuente: (Aghayere & Vigil, 2007))

Tabla 2.49. Factores k1, k2, k3, R_t, R_D, R_e, K_θ y esfuerzos F_{em}, F_{es}.

Variable	Ecuación	Número de Ecuación
k1	$k1 = \frac{\sqrt{R_e + 2 * R_e^2(1 + R_t + R_t^2) + R_t^2 R_e^3} - R_e(1 + R_t)}{1 + R_e}$	(Ec. 2.52)
k2	$k2 = -1 + \sqrt{2(1 + R_e) + \frac{2F_{yb}(1 + 2R_e)D^2}{3F_{em}l_m^2}}$	(Ec. 2.53)
k3	$k3 = -1 + \sqrt{\frac{2(1 + R_e)}{R_e} + \frac{2F_{yb}(2 + R_e)D^2}{3F_{em}l_s^2}}$	(Ec. 2.54)
R _t	$R_t = \frac{l_m}{l_s}$	(Ec. 2.55)
R _D	$R_D = 4K_\theta$	(Ec. 2.56)
R _e	$R_e = \frac{F_{em}}{F_{es}}$	(Ec. 2.57)
K _θ	$K_\theta = \left(1 + 0.25 * \left(\frac{\theta}{90}\right)\right)$	(Ec. 2.58)
F _{em} = F _{es}	$F_{em} = F_{es} = \frac{6100 * G^{1.45}}{\sqrt{D}}$	(Ec. 2.59)

(Fuente: (Aghayere & Vigil, 2007))

Donde:

D : 0,242 [pulg], Diámetro del conector N14 (Código NDS, Tabla L3).

G : Gravedad específica madera colorado, 0.67 (Código NDS, Tabla 12.3.3A).

θ : 90°, Angulo de conector respecto al grano de la madera.

l_m : 1,9252 [pulg], Longitud del Pasador en el miembro Principal [in].

l_s : 1,5748 [pulg], Longitud del pasador en el miembro lateral [in].

F_{em} : Resistencia del miembro principal [psi].

F_{es} : Resistencia del miembro lateral [psi].

F_{yb} : 70000 [psi], Resistencia a flexión de los conectores (Código NDS, Tabla I1).

R_D : Factor de Reducción.

R_e : Factor de Relación de esfuerzos.

R_i : Factor de relación de longitudes.

2.3.5.1. Selección de tornillos para ensamble del tambor

Se selecciona un tornillo cuya longitud total sea mayor o igual a 2 pulgadas, se elige este valor ya que la penetración debe ser lo suficiente para evitar que este se salga de la tabla. En la Figura 2.24 se puede apreciar la longitud de penetración y el ancho de la tabla (2 cm o 0,7874 pulg). El diámetro del tornillo seleccionado es de 0,242 pulgadas

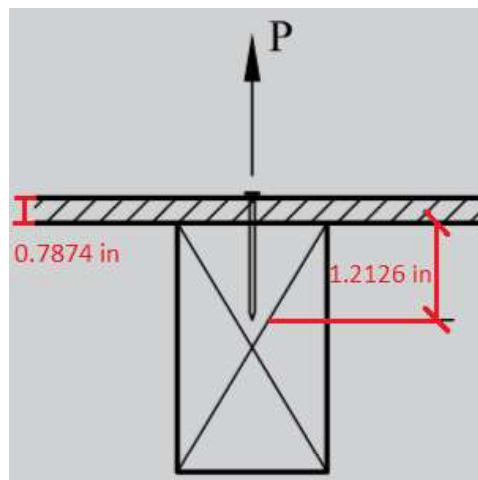


Figura 2.24. Longitud total y penetración del tornillo.

(Fuente: Propia)

El valor de diseño de extracción por pulgada de penetración es:

$$W = 2850 * (0,37)^2 * 0,242 = 94,42 \sim 95 \left[\frac{lb_f}{pulg} \right]$$

La carga máxima que soporta cada tornillo es:

$$P_{max} = 95 * 1,2126 * 0,9 * 0,7 * 0,8 * 0,75 * 0,67 = 29,17 \sim 30 [lb_f]$$

Para determinar el número apropiado de tornillos se debe relacionar la carga total (150 kg cacao + 5 kg tabla) y la carga máxima de cada tornillo ($P_{max}=30$ lbf o 13,64 kg). El valor calculado da como resultado un número mínimo de 12 tornillos, con fin de tener una distribución simétrica se estima una cantidad de 6 tornillos N14 x 2 in colocados a lo largo de cada pared hexagonal y 4 tornillos N14 x 2 in colocados a lo largo de cada pared lateral

2.3.5.2. Selección de Tornillos para las guías de la bandeja

Para comprobar la resistencia del conector se elige un tornillo N14 x 3.5 pulg, este elemento deberá satisfacer las condiciones de carga, de no ser así, se tiene que seguir probando conectores de mayor diámetro. En la Tabla 2.50 se muestra las soluciones de todas las ecuaciones para determinar el valor de Z en cada uno de los modos de falla.

Tabla 2.50. Cálculo de los Valores de Z.

Variable	Reemplazo de Datos	Respuesta
$F_{em} = F_{es}$	$\frac{6100 * 0.67^{1.45}}{\sqrt{0.242}}$	6938 [psi]
R_e	$\frac{6938}{6938}$	1
R_t	$\frac{3.5 - 1.5748}{1.5748}$	1.2225
R_D	$4 \left(1 + 0.25 * \left(\frac{90}{90} \right) \right)$	5
k_1	$\frac{\sqrt{1 + 2 * (1)[1 + 1.2225 + 1.2225^2] + (1.2225)^2(1) - (1)(1 + 1.2225)}}{1 + 1}$	0.4642
k_2	$-1 + \sqrt{2(1 + 1) + \frac{2 * 70000(1 + 2 * 1)0.242^2}{3 * 6938 * 1.9252^2}}$	1.078
k_3	$-1 + \sqrt{\frac{2(1 + 1)}{1} + \frac{2 * 70000(2 + 1)0.242^2}{3 * 6938 * 1.5748^2}}$	1.12
Modo Im	$z = \frac{0.242 * 1.9252 * 6938}{5}$	646.48 [lbf]
Modo Is	$z = \frac{0.242 * 1.5748 * 6938}{5}$	528.82 [lbf]
Modo II	$z = \frac{0.4642 * 1.5748 * 6938}{5}$	1014.37 [lbf]
Modo IIIIm	$z = \frac{1.078 * 0.242 * 1.9252 * 6938}{(1 + 2 * 1) * 5}$	232.302 [lbf]
Modo IIIIs	$z = \frac{1.12 * 0.242 * 1.5748 * 6938}{(2 + 1) * 5}$	197.425 [lbf]
Modo IV	$z = \frac{0.242^2}{5} \sqrt{\frac{2 * 6938 * 70000}{3(1 + 1)}}$	149.027 [lbf]

(Fuente: Propia)

Cada guía de la bandeja soporta la mitad de la carga total, el peso de la bandeja más el cacao corresponde a 160 kgf, por ende, cada guía resiste una carga de 80 kgf o 176 lbf. El número adecuado de tornillos se lo obtiene relacionando la carga de 176 lbf y de 149 lbf, por lo tanto, son necesarios por lo menos 2 tornillos N 14 x 3.5 in.

2.3.5.3. Selección de tornillos del timón

La fuerza ejercida sobre cada brazo del timón no debe ser mayor a 30 kgf. El diseño y la selección de estos componetes esta dado por las ecuaciones presentadas en la seccion anterior, se procede a comprobar la resistencia del conector, se elige un tornillo N16 x 2.5 pulg, este elemento deberá satisfacer las condiciones de carga, de no ser así, se tiene que seguir probando conectores de mayor diámetro. En la Tabla 2.51 se muestra los cálculos para determinar el valor de Z.

Tabla 2.51. Cálculo de los Valores de Z.

Variable	Reemplazo de Datos	Respuesta
$F_{em} = F_{es}$	$\frac{6100 * 0,67^{1,45}}{\sqrt{0,268}}$	6593 [psi]
R_e	$\frac{6593}{6593}$	1
R_t	$\frac{2,5 - 1,5748}{1,5748}$	0,5875
R_D	$4 \left(1 + 0,25 * \left(\frac{90}{90} \right) \right)$	5
k_1	$\frac{\sqrt{1 + 2 * (1)[1 + 0,5875 + 0,5875^2] + (0,5875)^2(1) - (1)(1 + 0,5875)}}{1 + 1}$	0,3476
k_2	$-1 + \sqrt{2(1 + 1) + \frac{2 * 70000(1 + 2 * 1)0,268^2}{3 * 6593 * 0,9252^2}}$	1,405
k_3	$-1 + \sqrt{\frac{2(1 + 1)}{1} + \frac{2 * 70000(2 + 1)0,268^2}{3 * 6593 * 1,5748^2}}$	1,148
Modo Im	$z = \frac{0,268 * 0,9252 * 6593}{5}$	326,952 [lbf]
Modo Is	$z = \frac{0,268 * 1,5748 * 6593}{5}$	556,51 [lbf]
Modo II	$z = \frac{0,3476 * 1,5748 * 6593}{5}$	721,8 [lbf]
Modo III _m	$z = \frac{1,405 * 0,268 * 0,9252 * 6593}{(1 + 2 * 1) * 5}$	153,122 [lbf]
Modo III _s	$z = \frac{1,148 * 0,268 * 1,5748 * 6593}{(2 + 1) * 5}$	212,96 [lbf]
Modo IV	$z = \frac{0,268^2}{5} \sqrt{\frac{2 * 6593 * 70000}{3(1 + 1)}}$	178,17 [lbf]

(Fuente: Propia)

El número de tornillos se calcula mediante la relación de la carga máxima permitida correspondiente 66 lbf y la carga z calculada correspondiente a 153,122 lbf, es decir que por lo menos se necesita 1 tornillo N16 x 2.5 pulg. En vista de que el largo de cada brazo del timón es de 15 cm, se coloca 2 tornillos N16 x 2.5 pulg de manera equidistante.

2.3.5.4. Selección de tornillos y pernos para otros componentes

En la Tabla 2.52 se detalla la selección de tornillos y pernos empleados en la bandeja, soportes de caucho y en el caballete.

Tabla 2.52. Tornillos y pernos de varios elementos.

Componente	Función	Tornillo/Perno
Bandeja	Recolección de los granos de cacao.	Tornillo N8 x 2 pulg (Galvanizado).
Cuadrado de madera	Evitar el desplazamiento del eje de madera.	Tornillo N8 x 2 pulg (Galvanizado).
Soportes de Caucho	Evitar contacto de la humedad del piso con la madera.	Tornillos N8 x 2½ pulg (Galvanizado).
Ensamble Caballete	Soporte del Tambor.	Perno 5/16 x 3 pulg (Galvanizado).
Ensamble tablón	Mantener el caballete en equilibrio.	Perno 5/16 x 4½ pulg (Galvanizado).
Tornillos para las paletas	Remoción de la Masa.	Tornillo N10 x 2 pulg (Acero Inox.).

(Fuente: Propia)

2.3.6. Diseño del mecanismo de cierre

La puerta se cierra mediante la utilización de picaportes y placas. El picaporte consta de una placa de acero, una varilla, dos porciones de tubo soldados a la placa y cuatro pernos de acero inoxidable. En la Figura 2.25 se puede observar un esquema del elemento, así como también un diagrama de cuerpo libre.

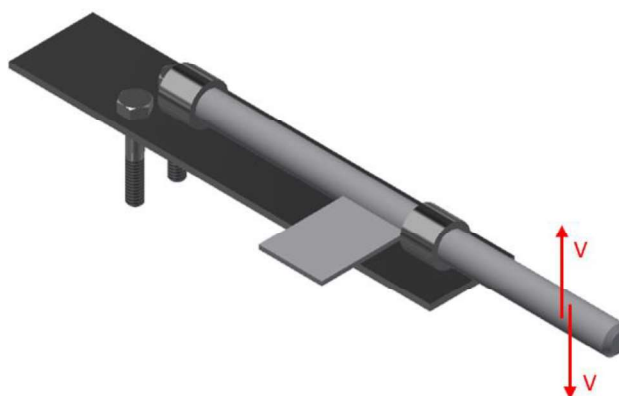


Figura 2.25. Picaporte para cerrar la puerta.

(Fuente: Propia)

A continuación, en la Tabla 2.53 se presenta los cálculos que permiten comparar la resistencia de la varilla y de las uniones soldadas con la resistencia admisible del material, es decir se emplea el método ASD. Para evaluar la resistencia de las soldaduras se utiliza fórmulas del libro Diseño de Estructuras de Acero (McCORMAC & CSERNAK, 2012), las propiedades de la varilla del catálogo del fabricante (Adelca, 2015).

Tabla 2.53. Cálculos de la resistencia de la varilla y soldadura.

Resistencia de la varilla		
Datos	Reemplazo de Datos	Respuesta
Diámetro: 0,5 in Carga total: 341 Lb Carga parcial: 85,25 Lb	$\tau = \frac{V}{A} = \frac{85,25}{\frac{\pi * 0,5^2}{4}}$	434,17 [psi]
$\tau_{adm} = 21000$ [psi]	$\tau \ll \tau_{adm}$	OK
Resistencia de uniones soldadas		
Datos	Reemplazo de Datos	Respuesta
L: Longitud = 0,5 in t: garganta efectiva = 1/8 in FeXX: Resistencia del electrodo Ω : Factor de seguridad = 2	$R_n = 1,5 * 0,6 * FeXX * 0,707 * L * t$	(Ec. 2.60)
Rn: Resistencia nominal Carga parcial V: 85,25 Lb	$R_n = 1,5 * 0,6 * 60 * 0,707 * 0,5 * \frac{1}{8}$	$\frac{R_n}{\Omega} = 1193$ [lbf]
	$V \ll \frac{R_n}{\Omega}$	OK

(Fuente: Propia)

La placa de acero inoxidable sirve de apoyo y permite encajar la varilla para cerrar la puerta, este elemento presenta 4 pernos de acero inoxidable, en la Figura 2.26 se puede apreciar un esquema del elemento, así como también un diagrama de cuerpo libre.

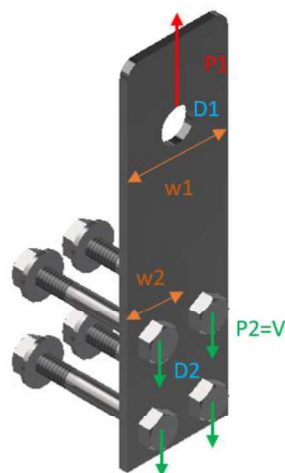


Figura 2.26. Placa seguro y pernos de acero inoxidable.

(Fuente: Propia)

A continuación, se presenta los cálculos que permiten comparar la resistencia de la Placa y los pernos con la resistencia admisible del material, para su análisis se emplea el método ASD. Para calcular el esfuerzo normal debido a la presencia de agujeros en la placa se emplea fórmulas presentadas en la Tabla 2.54 (Budynas & Nisbett, 2012) y las propiedades de la placa del catálogo del fabricante (Dipac, 2017).

Tabla 2.54. Cálculo de la resistencia de la placa y pernos.

Resistencia de la placa		
Datos	Remplazo de Datos	Respuesta
Diámetro agujero 1: 0,5 in. Diámetro agujero 2: 0,25 in. Espesor (t): 0,118 in. Ancho 1 (w1): 1,575 in. Ancho 2 (w2): 0,787 in. Carga agujero 1: 85,25 Lb. Carga agujero 2: 21,3125 Lb. Factor de concentración de esfuerzo (K) = 2,5. σ : Esfuerzo normal [psi]. $\sigma_{adm} = 63000$ [psi].	$\sigma_1 = K \frac{P_1}{(w_1 - D_1)t}$ (Ec. 2.61) $\sigma_1 = 2,5 \frac{85,25}{(1,575 - 0,5) * 0,118}$	1680,134 [psi]
	$\sigma_2 = K \frac{P_2}{(w_2 - D_2)t}$ $= 2,5 \frac{21,3125}{(0,787 - 0,25) * 0,118}$	840,75 [psi]
	σ_1 y $\sigma_2 \ll \sigma_{adm}$	OK
Resistencia de los pernos		
Datos	Remplazo de Datos	Respuesta
Diámetro: 0,25 in. Carga total: 85,25 Lb. Carga parcial: 21,3125 Lb. τ : Esfuerzo cortante. $\tau_{adm} = 22000$ [psi].	$\tau = \frac{V}{A} = \frac{21,3125}{\frac{\pi * 0,25^2}{4}}$	434,17 [psi]
	$\tau \ll \tau_{adm}$	OK

(Fuente: Propia)

2.3.7. Selección de Chumaceras

Para la selección de las chumaceras, se debe elegir rodamientos en base a ciertos factores que permitan determinar el diámetro mínimo que cumpla con los requerimientos establecidos. Según las características de funcionamiento de los fermentadores (soportar carga axial y giros de baja velocidad) se debe seleccionar rodamientos de bolas (Budynas & Nisbett, 2012). Las variables necesarias para la selección del rodamiento de la chumacera se muestran en la Tabla 2.55.

Tabla 2.55. Variables de cálculo de rodamientos.

Variable	Símbolo	Valor
Carga radial	F	1076 N
Velocidad de giro	W	10 RPM
Factor de aplicación	Fa	1
Confiabilidad	R	0,9
Tiempo de vida	T	30000 h

(Fuente: Propia)

Se necesita calcular tres variables importantes para poder seleccionar el diámetro del rodamiento adecuado para la carga asignada. En la Tabla 2.56 se presenta las ecuaciones necesarias para la selección de rodamientos.

Tabla 2.56. Ecuaciones de selección de rodamientos.

Variable	Ecuación	Valor
Vida de diseño adimensional.	$X_D = \frac{60tw}{10^6}$	(Ec. 2.62) $X_D = 18$
Carga radial de diseño.	$F_D = Ff_a$	(Ec. 2.63) $F_D = 1076 N$
Relación carga-vida-confiabilidad.	$C_{10} = F_D \left[\frac{X_D}{X_0 + (\theta - X_0)(1 - R_D)^{1/b}} \right]^{1/a}$	(Ec. 2.64) $C_{10} = 4678,90 N$
$X_0 = 0,02; \theta = 4,419; R_D = 0,99; b = 1,483; a = 3$		

(Fuente: Propia)

Al comparar el valor calculado de C_{10} con la Tabla 1 del Anexo 5 se concluye que el diámetro mínimo del rodamiento que cumple con los requerimientos es de 10 mm. En el diseño del eje se planteó que los extremos maquinados serán de dos pulgadas, por lo que, una chumacera de este diámetro cumplirá con el soporte de la carga y los giros.

2.4. Construcción y Montaje

La construcción de los fermentadores se efectuó con ayuda de un profesional en un taller de carpintería ubicado en Sangolquí, con la finalidad de obtener excelentes resultados en concordancia con los planos de taller. El Montaje se lo realizó en la asociación de agricultores Wiñak (Archidona) con base en el plano de conjunto, los dos modelos tienen acoplado el eje directamente al tambor, se realizó de esta manera para facilitar el transporte, con esta premisa los dos prototipos se ensamblan de la misma manera con la única diferencia que el modelo de paletas presenta un volante el cual

permite el movimiento de estas. En la Tabla 2.57 se especifica el tipo de materia prima necesaria para la construcción de cada elemento constituyente de los fermentadores.

Tabla 2.57. Materia prima y elementos para la construcción.

No.	Material	Elementos	Empleo
1	Madera	Tablas de Laurel 20X2X240 cm	Paredes Laterales Tambor.
		Tablones de Laurel 22x4x250 cm	Paredes Hexagonales.
		Tablones de Laurel 22x4x250 cm	Parte trasera de la Bandeja.
		Vigas de colorado 6X6x250 cm	Eje de la máquina.
		Vigas de colorado 6X7x250 cm	Uniones transversales caballetes.
		Vigas de colorado 6X7x250 cm	Caballetes.
		Tablón de colorado 22x4x250 cm	Guías para la bandeja.
		Tablón de colorado 22x4x250 cm	Soporte de la Estructura.
2	Tornillos y Pegamento	Tornillo Galvanizado 8X2 mm	Uniones de Paredes Hexagonales y Laterales.
		Cola Blanca	
3	Torneado Eje	Eje de Colorado 6x6x140 cm	Eje de la máquina.
4	Chumaceras	Chumacera de Piso	Movimiento Tambor.
		Chumacera de Pared	Movimiento Tambor y eje.
5	Pernos Chumaceras	Pernos de acero al Carbono 3/4 X 4 in	Acople chumaceras y estructura.
		Tuercas de acero al Carbono 3/4 in	
		Pernos de acero Inoxidable 5/8 x 3in	
		Tuercas de acero inoxidable 5/8 in	
6	Seguros de la Puerta	Picaportes	Cerrar la Puerta.
		Placas	
7	Pernos Seguros Puerta	Pernos de acero inoxidable 1/4 X 2 in	Ajuste de seguros de la puerta.
		Pernos de acero inoxidable 1/4 X 2 1/2 in	
		Pernos de acero inoxidable 1/4 X 1 1/2 in	
		Tuercas acero inoxidable 1/4 in	
		Rodela acero inoxidable 1/4 in	
8	Tornillos para Ensamblar	Tornillo de madera 14 X 3 1/2 in	Ensamble de Guías de la Bandeja.
		Tornillo de madera 16 X 2 1/2 in	Ensamble del Timón.
		Tornillo de madera cola de pato 8 X 2 1/2 in	Ensamble de cauchos y estructura
9	Cauchos	Caucho de llanta	Apoyo de la estructura
10	Pernos para unión de los caballetes	Pernos galvanizados 5/16 X 3 in	Unión de caballetes y travesaño. Unión de caballetes y tablón de color.
		Pernos galvanizados 5/16 X 4 1/2 in	
		Tuerca y Rodela plana galvanizada 5/16 in	
		Mosquetón 3/16	

(Fuente: Propia)

2.4.1. Construcción de la estructura de madera

La estructura de madera se divide en 6 partes, indicadas en los planos de taller, las cuales son: 2 caballetes (Figura 2.27), 2 soportes (Figura 2.28), un tablón en la parte trasera (Figura 2.29) y un travesaño (Figura 2.30). Los caballetes son los extremos de

la estructura que estarán unidas con el travesaño y el tablón, los cuales, brindarán estabilidad. Por último, los soportes albergarán a la bandeja, todas las uniones para la estructura se realizaron con tornillos según lo especificado en los planos (Anexo 6).



Figura 2.27. Caballetes.
(Fuente: Propia)



Figura 2.28. Soporte para la bandeja.
(Fuente: Propia)



Figura 2.29. Tablón.
(Fuente: Propia)



Figura 2.30. Travesaño.
(Fuente: Propia)

2.4.2. Construcción de la bandeja

La bandeja está constituida de varias tablas las cuales están unidas mediante tarugos, con una estructura de madera para el acople con la estructura de madera principal, esto unido con pernos como se muestra en la Figura 2.31.



Figura 2.31. Construcción de la bandeja.
(Fuente: Propia)

2.4.3. Construcción del eje

El eje se construyó con una viga de madera de colorado para brindarle soporte, la particularidad de construcción del eje es que solo se han torneado los extremos para lograr los giros necesarios como se muestra en la Figura 2.32, de esta manera la parte interna del eje se utiliza como superficie de sujeción para las paletas en los dos modelos correspondientes.



Figura 2.32. Construcción de los ejes.

(Fuente: Propia)

2.4.4. Construcción de las paletas

Las paletas se construyeron con madera de laurel para no comprometer el proceso de fermentación. Se unieron con pernos de acero inoxidable directamente en el eje como se indica en la Figura 2.33.



Figura 2.33. Construcción y colocación de las paletas.

(Fuente: Propia)

2.4.5. Construcción del tambor hexagonal

La construcción del tambor hexagonal se realizó uniendo tablas con un corte especial en los extremos (corte a 60°), uniendo cada pared mediante tarugos y reforzado con pegamento para madera. Para la construcción de las paredes hexagonales se unieron tablas, con tarugos y pegamento, para formar un cuadrado del cual se trazó la figura con un compás de carpintería y cortar como se muestra en la figura 2.34. Luego se procede a unir todas las paredes, haciendo referencia a las paredes hexagonales, mediante pernos como se indica en la Figura 2.35. Para ambos modelos, se necesita ensamblar el eje con la construcción del tambor, en el caso del modelo de paletas es necesario acoplar las chumaceras también como se muestra en la Figura 2.36. Posterior a la construcción del tambor se debe realizar los agujeros para el drenaje del mucílago en la pared inferior (Figura 2.37).



Figura 2.34. Construcción de las paredes hexagonales.
(Fuente: Propia)



Figura 2.35. Construcción del tambor modelo simple.
(Fuente: Propia)

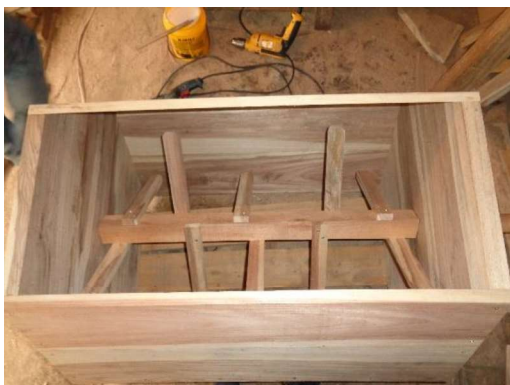


Figura 2.36. Construcción del tambor modelo de paletas.
(Fuente: Propia)



Figura 2.37. Realización de agujeros para el drenaje.
(Fuente: Propia)

2.4.6. Ensamble de la estructura

Los caballetes de la estructura principal de madera poseen una guía donde se coloca el travesaño, el cual se asegura con un tornillo en cada extremo (Figura 2.38 y Figura 2.39). Para mantener la estabilidad de la estructura, se colocó un tablón en la parte trasera de la misma uniéndolo mediante pernos como se indica en la Figura 2.40.



Figura 2.38. Ensamble del travesaño.
(Fuente: Propia)



Figura 2.39. Ajuste del travesaño.
(Fuente: Propia)



Figura 2.40. Ensamble del tablón.
(Fuente: Propia)

2.4.7. Ensamble de la bandeja

La bandeja está pensada para ser un elemento desplazable para la limpieza de esta, por este motivo en su ensamblaje solo se debe deslizar la bandeja hasta llegar a los topes marcados en la parte trasera de la estructura como se muestra en la Figura 2.41.



Figura 2.41. Ensamblaje de la bandeja.

(Fuente: Propia)

2.4.8. Montaje del tambor

El primer paso para montar el tambor es colocar las chumaceras de piso en el eje, luego se alinean las chumaceras en la estructura y se ajusta el prisionero existente para el ajuste del eje. Las chumaceras se fijan a la estructura mediante los pernos que vienen de fábrica (Figura 2.42). Como último paso, en el caso del modelo con paletas, se incorpora el volante que está pensado como un elemento que no estará fijo en los fermentadores.



Figura 2.42. Ensamblaje del tambor.

(Fuente: Propia)

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Pruebas ingenieriles

Las pruebas ingenieriles se enfocaron en tres puntos principales que permitieron evaluar aspectos como: el soporte de la carga, aislamiento térmico y la recolección del mucílago mediante el sistema de drenaje.

3.1.1. Prueba de carga

Esta prueba se realizó con el fin de asegurar la resistencia de la estructura y del tambor hexagonal. Durante un periodo de tres días el fermentador soportó una combinación de productos alimenticios, facilitados por el laboratorio de ciencia de alimentos y biotecnología, con lo que se completó una carga de 200 kg. Las pruebas de carga tienen los siguientes objetivos:

Comprobar el soporte de carga en la estructura de madera.

Comprobar la deflexión en las tablas del tambor.

Analizar la facilidad de giro del tambor en el mezclado.

Se elaboró un procedimiento sencillo para la prueba de carga, iniciando la colocación de fundas de distintos productos alimenticios con un peso entre 10 y 15 kg, hasta alcanzar los 200 kg como se muestra en la Figura 3.1. Se deja reposar durante un día y se procede a girar el tambor.



Figura 3.1. Carga del tambor para la prueba.

(Fuente: Propia)

Los elementos críticos que soportan la carga son: el eje y las paredes del tambor, siendo el eje de vital importancia, ya que, a más de soportar la carga permite el giro del tambor.

Mediante un calibrador se tomó las medidas de la deflexión producida por cargas de 100 kg, 150 kg y 200 kg, estas deflexiones se las comparó con la deflexión permitida según el código NDS para diseño de miembros de madera, este valor se lo puede calcular empleando las ecuaciones especificadas en el capítulo anterior. A continuación, en la Tabla 3.1 se muestra las deflexiones para las paredes del tambor hexagonal y en la Tabla 3.2 se tiene las deflexiones para el eje del fermentador.

Tabla 3.1. Prueba de carga en el tambor.

Número de prueba	Carga (kg)	Deflexión permitida (mm)	Deflexión medida (mm)
1	100	3,99	Menor a 1
2	150	3,99	1,52
3	200	3,99	4,60

(Fuente: Propia)

Tabla 3.2. Prueba de carga en el eje.

Número de prueba	Carga (kg)	Deflexión permitida (mm)	Deflexión medida (mm)
1	100	5,67	Menor a 1
2	150	5,67	2,36
3	200	5,67	3,72

(Fuente: Propia)

3.1.2. Prueba de aislamiento térmico

Esta prueba se realizó con la ayuda del laboratorio de Ciencia de Alimentos y biotecnología de la Escuela Politécnica Nacional, con cacao de la primera cosecha del mes de junio del 2019. Se colocó la carga de cacao en los fermentadores ver Figura 3.2 y se tomó mediciones de la temperatura en un lugar central ver Figura 3.3.



Figura 3.2. Colocación de la carga de cacao.
(Fuente: Propia)



Figura 3.3. Medición de la Temperatura.
(Fuente: Propia)

La recolección de datos se realizó cada seis horas desde el momento en que los granos han sido extraídos de la vaina, hasta un tiempo aproximado de 96 horas. Cada 24 horas es necesario remover la masa de cacao para que esta adquiera homogeneidad, se tomó valores de temperatura después de girar el tambor dos vueltas.

A continuación, se presenta la información obtenida en la Tabla 3.3. En las figuras 3.4 y 3.5 se muestra las gráficas de temperatura vs tiempo para el modelo simple y de paletas.

Tabla 3.3. Datos de la Temperatura.

Tiempo [h]	Muestra	Temperatura [°C] Fermentador con paletas	Temperatura [°C] Fermentador Simple
0	Inicial	28,1	27,8
6	Sin Remoción	28,8	28,3
12		29,7	28,5
18		29,9	29,1
24		31,1	30,2
24	Remoción	29,8	29,1
30	Sin Remoción	31,7	32,6
36		32,3	33,8
42		33,4	34,1
48		33,9	34,6
48	Remoción	31,3	32,9
54	Sin Remoción	32,4	34,6
60		35,4	35,8
66		37,8	38,1
72		40,2	42,6
72	Remoción	37,6	41,2
78	Sin Remoción	43,2	42,8
84		44,2	42,5
90		43,5	42,1
96	Final	42,3	40,7

(Fuente: Propia)

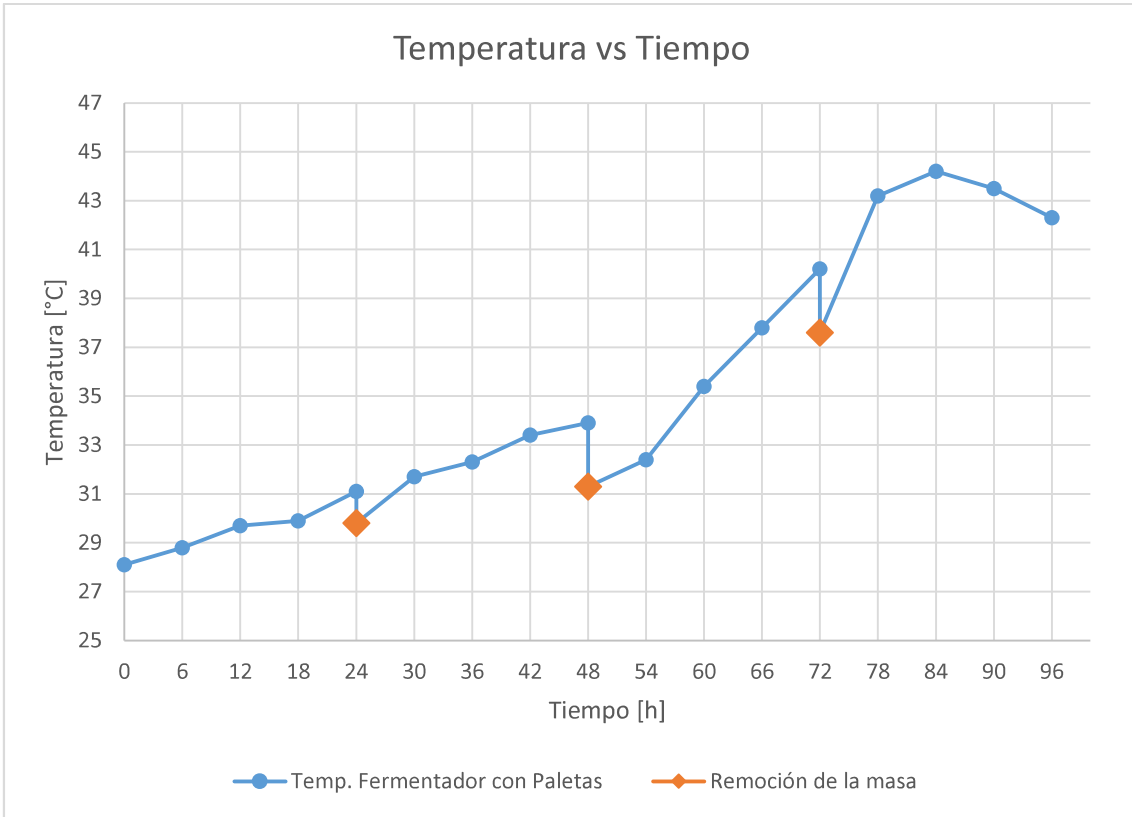


Figura 3.4. Gráfica Temperatura en función del tiempo modelo con Paletas.
(Fuente: Propia)

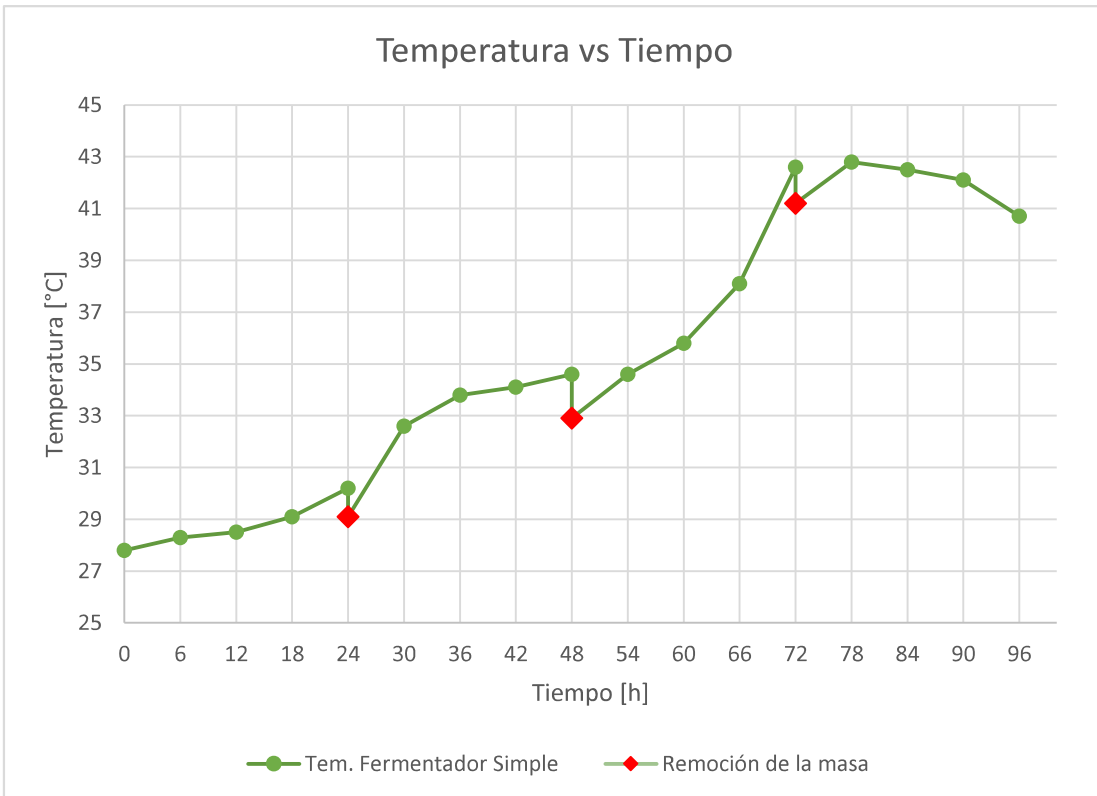


Figura 3.5. Gráfica Temperatura en función del tiempo modelo Simple.
(Fuente: Propia)

3.1.3. Prueba de Drenado del mucílago

Esta prueba permitió comprobar la eficiencia de los agujeros de drenado en los fermentadores. Una vez colocado los granos de cacao en el interior de los fermentadores, estos comienzan a segregar un líquido viscoso, el cual será aprovechado para endulzar el chocolate procesado. Este fluido puede ser recolectado únicamente en los dos primeros días de la fermentación, por lo tanto, se requiere un sistema de drenado eficiente que garantice la recolección de este líquido.

A modo de experimentación se realizó 24 agujeros en la base inferior de los fermentadores en dos modelos (uno simple y uno con paletas). En los dos modelos restantes (uno simple y uno de paletas) se realizó 8 agujeros adicionales en cada pared lateral, se realizó este procedimiento para conocer el número de agujeros apropiados y necesarios que permitan conseguir un buen proceso de drenado durante las 48 horas propuestas. En las Figuras 3.6 y 3.7 se muestra el proceso de drenado y la recolección del mucílago en fundas de plástico.



Figura 3.6. Proceso de drenado.

(Fuente: Propia)



Figura 3.7. Recolección del mucílago.

(Fuente: Propia)

Una vez realizados los agujeros, se procedió a tomar datos de la cantidad de líquido segregado en intervalos de 6 horas para cada uno de los modelos, se colocó la misma cantidad de cacao en cada uno de los fermentadores. Para la medición del volumen se coloca el líquido en recipientes marcados que permitan dar lectura de la medida. En la Tabla 3.4 se muestra los datos de la cantidad de fluido y del tiempo empleado. En la Figura 3.8 se muestra una gráfica de volumen vs tiempo, la cual permite comparar el sistema de drenado en cada uno de los fermentadores.

Tabla 3.4. Cantidad de mucílago de cacao

Modelo Núm. Agujeros	Tiempo [h]	Volumen [L]	Modelo Núm. Agujeros	Tiempo [h]	Volumen [L]
Modelo Simple 1 24 agujeros	6	1,5	Modelo Simple 2 40 agujeros	6	2,5
	12	2		12	4
	18	3,5		18	6
	24	4,5		24	8
	30	6		30	10,5
	36	7,5		36	11
	42	9		42	12,5
	48	11		44	13
	54	13,5			
	58	14			
Modelo de Paletas 1 24 agujeros	6	2,5	Modelo de Paletas 2 40 agujeros	6	3
	12	4,5		12	4
	18	5		18	6,5
	24	6,5		24	8,5
	30	8		30	10,5
	36	10,5		36	12,5
	42	11		40	13,5
	48	12			
	54	13			
	55	14,5			

(Fuente: Propia)

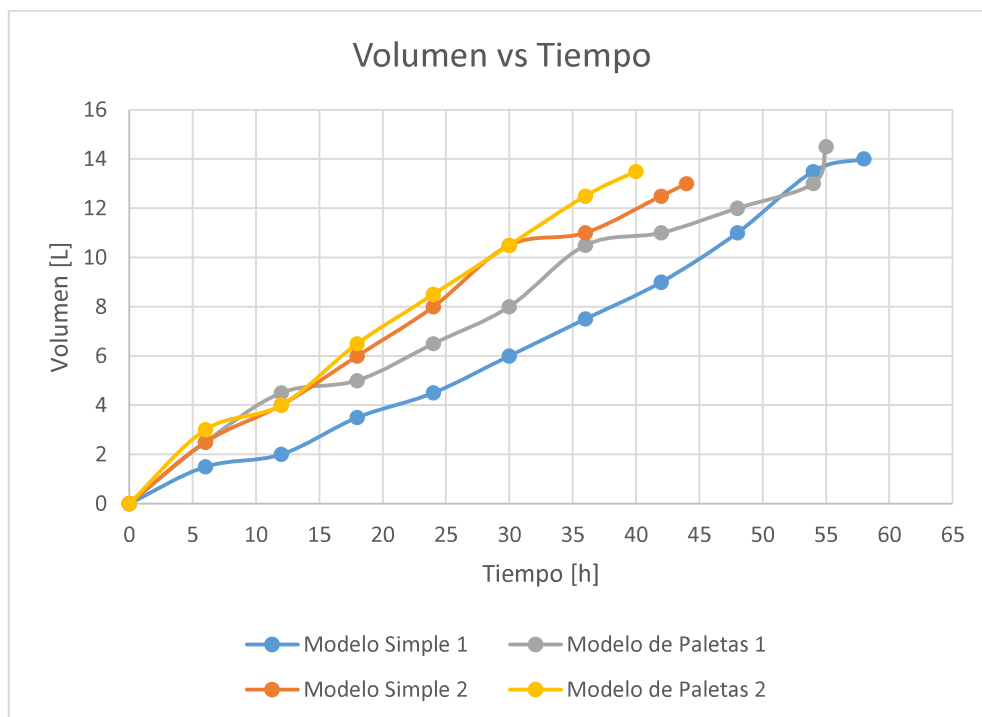


Figura 3.8. Gráfica Volumen en función del tiempo modelo Simple.

(Fuente: Propia)

3.2. Reforzamiento

Una vez realizadas las pruebas ingenieriles se pudo observar que pocas de las tablas que constituyen la parte inferior de las paredes del fermentador tendían a desplazarse, ver Figura 3.9, estas sufren una pequeña expansión debió a que la madera absorbe humedad del ambiente y también está expuesta al mucílago de los granos de cacao. Como resultado de estas interacciones los tornillos tienden a desplazarse y salirse de las tablas. Las paredes laterales no se presenta este inconveniente, únicamente sucede en la pared inferior ya que esta lleva la mayor parte de la carga de cacao.



Figura 3.9. Desplazamiento de las tablas de la pared inferior.

(Fuente: Propia)

Este problema se presentó a pocas horas de finalizar el proceso de fermentación del primer lote y se optó por una solución parcial, la cual consistía en el uso de correas o tensores que permitieron ajustar las tablas y evitar su desplazamiento, ver figura 3.10.



Figura 3.10. Reforzamiento provisional.

(Fuente: Propia)

Para solucionar este problema se cambió la dimensión de los tornillos del tambor, con lo que los fermentadores ya no presentaron este problema. Otra solución es restringir

las uniones entre las paredes por lo que en este apartado se diseña una estructura metálica, la cual resuelve el problema de desplazamiento de las tablas.

La estructura metálica debe ser desmontable de tal manera que permita sustituir cualquier tabla o elemento de ser necesario. Se elabora un diseño de estructura metálica desmontable mediante la utilización de perfiles en ángulo, perfiles especiales de 120° y pletinas de acero estructural, las uniones de estos elementos se los realiza mediante placas y pernos soldados sobre los perfiles en los extremos de la estructura como se muestra en la Figura 3.11 y se detalla en el anexo 6, para el ajuste se emplea el uso de tuercas y arandelas.



Figura 3.11. Estructura metálica.

(Fuente: Propia)

El perfil en ángulo de 90° está sometido a cargas de flexión distribuidas uniformemente a lo largo del perfil, además se encuentra empotrado en ambos extremos, para el análisis de este elemento se hace uso del libro Diseño de Estructuras de Acero de Mc Cormac y del manual AISC, los cuales proveen ecuaciones necesarias para estimar la resistencia de estos elementos. En la figura 3.12 se puede apreciar la distribución de cargas y reacciones presentes en este perfil.

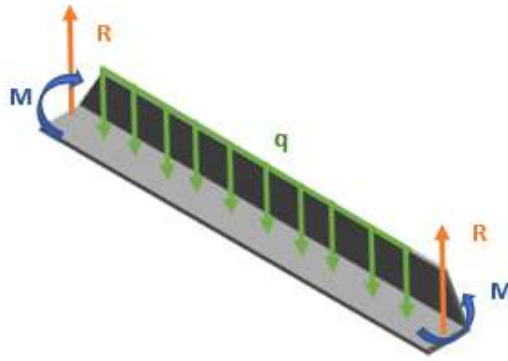


Figura 3.12. Diagrama del perfil ángulo.

(Fuente: Propia)

En la tabla 3.5 se encuentran los datos y cálculos necesarios para el diseño de vigas correspondientes para el perfil ángulo. Los valores de las propiedades de los perfiles son tomados del catálogo del fabricante (Dipac, 2017).

Tabla 3.5. Cálculo de esfuerzo de flexión y deflexión en el perfil ángulo.

Datos	Formulas	Respuesta
$\sigma_{b_{adm}}$: esfuerzo de flexión admisible para vigas de acero	$\sigma_{b_{adm}} = 0,66 * S_y$	23760 [psi]
$\sigma_{b_{cat}}$: esfuerzo de flexión calculado q: Carga distribuida=10.45 lbf/pulg	$M = \frac{qL^2}{24}$	108,01 [lbf pulg]
L: longitud= 15.75 pulg M: Momento	$\sigma_{b_{cat}} = \frac{M}{S_{xx}}$	837,29 [psi]
Sy: esfuerzo elástico = 36 Ksi E: módulo de elasticidad: 29x10 ⁶ psi I: Inercia de la sección= 0.189 pulg ⁴	$v_{max} = \frac{qL^4}{384EI}$	3,055x10 ⁻⁴ pulg
Sxx: módulo de sección= 0.129 pulg ³ v_{max} : Deflexión máxima de la viga	$\sigma_{b_{cat}} \ll \sigma_{b_{adm}}$	OK

(Fuente: Propia)

El perfil especial 120° está sometido a cargas de flexión distribuidas uniformemente, y también se encuentra empotrado en ambos extremos. En la Figura 3.13 se puede apreciar la distribución de cargas y reacciones presentes en este perfil, una de las alas del perfil no soporta carga a flexión, únicamente evita el desplazamiento de las tablas.

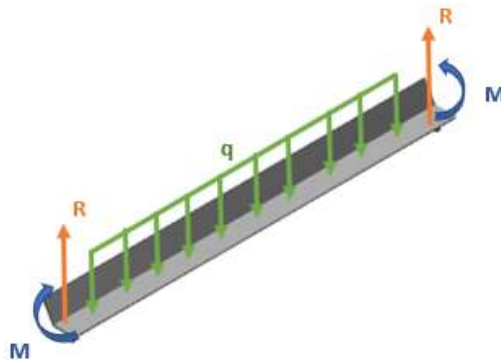


Figura 3.13. Diagrama del perfil especial 120°.
(Fuente: Propia)

En la Tabla 3.6 se encuentran los datos y cálculos necesarios para el diseño de vigas correspondientes al perfil especial 120°. Los valores de las propiedades de los perfiles son calculados según el procedimiento descrito en el libro de Mecánica de Materiales de Beer and Johnston.

Tabla 3.6. Cálculo de esfuerzo de flexión y deflexión en el perfil especial 120°.

Datos	Formulas	Respuesta
$\sigma_{b_{adm}}$: Esfuerzo de flexión admisible para vigas de acero.	$\sigma_{b_{adm}} = 0,66 * S_y$	23760 [psi]
$\sigma_{b_{cal}}$: Esfuerzo de flexión calculado. q: Carga distribuida=4,76 lbf/pulg.	$M = \frac{qL^2}{24}$	238,123 [lbf pulg]
L: longitud= 34,65 ipulg. M: Momento.	$\sigma_{b_{cal}} = \frac{M}{S}$	1860,34 [psi]
Sy: esfuerzo elástico = 36 Ksi. E: módulo de elasticidad: 29×10^6 psi. I: Inercia de la sección= 0.151 pulg ⁴	$v_{max} = \frac{qL^4}{384EI}$	$4,081 \times 10^{-3}$ pulg
S: módulo de sección= 0.128 pulg ³ v_{max} : Deflexión máxima de la viga.	$\sigma_{b_{cal}} \ll \sigma_{b_{adm}}$	OK

(Fuente: Propia)

Los pernos están soldados a la superficie del perfil o pletina según corresponda, todos trabajan a corte para lo cual se realiza el análisis considerando este tipo de carga, en la figura 3.14 se puede apreciar un esquema de los pernos, así como las cargas que actúan sobre los mismos. En la tabla 3.7 se puede apreciar los cálculos que garantizan la resistencia de los pernos sometidos a cargas de corte.

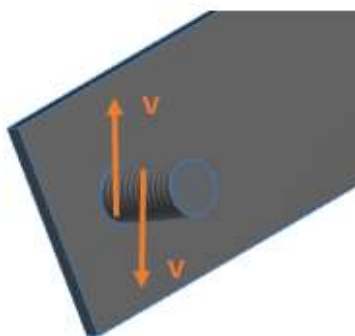


Figura 3.14. Cargas de corte en los pernos de la estructura.

(Fuente: Propia)

Tabla 3.7. Resistencia del perno de la estructura de acero.

Resistencia de los pernos		
Datos	Remplazo de Datos	Respuesta
Diámetro: 0,5 pulg Carga Total: 330 lbf Carga Parcial: 82,5 lbf τ : esfuerzo cortante $\tau_{adm} = 21000 [psi]$	$\tau = \frac{V}{A} = \frac{82,5}{\frac{\pi * 0,5^2}{4}}$	420,17 [psi]
	$\tau \ll \tau_{adm}$	OK

(Fuente: Propia)

3.3. Resultados de la Fermentación

3.3.1. Apreciación del color

La fermentación de los granos de cacao produce cambios en su pigmentación, para poder evidenciar que el proceso ha sido exitoso se realizó un corte a las almendras y de esta manera se garantiza la fermentación. En la Figura 3.15 se muestran cotiledones de cacao cortados en el inicio de la fermentación es decir a tiempo 0.



Figura 3.15. Corte de los Granos al Inicio de la fermentación.

(Fuente: Departamento de ciencia de alimentos y biotecnología EPN)

Una vez concluido el proceso de fermentación a las 96 horas aproximadamente, se tomaron granos al azar de ambos fermentadores, simple y de paletas. Se Procedió a realizar un corte para evidenciar el cambio de color en el cotiledón. En las Figuras 3.16 y 3.17 se puede observar el corte de las almendras de cacao, fermentadas en el modelo simple y el modelo con paletas respectivamente, para un tiempo de 96 horas.



Figura 3.16. Granos fermentados de los Modelos Simples.
(Fuente: Departamento de ciencia de alimentos y biotecnología EPN)



Figura 3.17. Granos fermentados de los Modelos con paletas.
(Fuente: Departamento de ciencia de alimentos y biotecnología EPN)

3.3.2. Cantidad de Almendras Fermentadas

Se determinó el porcentaje de almendras fermentadas comparando el método de gradas empleado en asociación Wiñak y el método de fermentación hexagonal rotatorio, en la Figura 3.18 se pudo apreciar los granos de cacao fermentados con el modelo hexagonal. Dos meses antes de la experimentación con los modelos hexagonales, se viajó a Archidona donde se pudo recopilar información de la producción y la cantidad de almendras fermentadas y desechas. Con estos valores se procede a obtener un porcentaje de rendimiento en cuanto a la cantidad de almendras fermentadas.



Figura 3.18. Granos de Cacao Fermentados con los Fermentadores Hexagonales.

(Fuente: Propia)

La producción de cacao llega a la asociación de Wiñak cada fin de semana para ser fermentados, este proceso tiene una duración de 144 horas es decir de 6 días. Se recopiló la información de los días 22, 23, 29 y 30 de marzo del 2019. Personal de la asociación lleva un registro de los kilogramos de granos desechados en el proceso de fermentación, así como también en el proceso de secado. En la Tabla 3.8 se puede apreciar el número de granos fermentados mediante el método de gradas en cajas de fermentación

Tabla 3.8. Granos fermentados Método de Cajas.

Producto	Fecha	Producción [Kg]	Granos Fermentados [Kg]	Granos Fermentados [%]
Cacao Convencional y Cacao Orgánico	2019/03/22	379.55	352.15	92.78
	2019/03/23	688.86	603.72	87.64
	2019/03/29	558.18	499.74	89.53
	2019/03/30	541.82	488.83	90.22
	Total	2168.41	1944.44	89.67

(Fuente: Propia)

Cada fermentador hexagonal tiene una capacidad de 150 kilogramos, para satisfacer la necesidad de la producción se dividió este valor para los 4 fermentadores, es decir, para el valor de 435 Kg cada fermentador estaba cargado con 109 Kg, de forma similar se realizó la distribución para cada fermentador en las producciones restantes. Al igual que el método de gradas con cajas de fermentación, se llevó a cabo un registro que permitió distinguir la cantidad de granos desechados durante el proceso de fermentación. En la Tabla 3.9 se muestra la cantidad de granos fermentados mediante el método hexagonal.

Tabla 3.9. Granos fermentados Método Hexagonal Rotatorio.

Producto	Fecha	Producción [Kg]	Granos Fermentados [Kg]	Granos Fermentados [%]
Cacao	2019/06/04	435,57	430,47	98,83
Convencional y Cacao	2019/06/05	600,08	591,56	98,58
	2019/06/11	640,78	629,50	98,24
Orgánico	2019/06/12	490,36	483,94	98,69
	Total	2166,79	2135,47	98,55

(Fuente: Propia)

En la Figura 3.19 se tiene una gráfica que permite comparar la cantidad de almendras fermentadas y desechadas al finalizar el proceso de fermentación en los métodos de gradas con cajas de fermentación y el método hexagonal rotatorio.

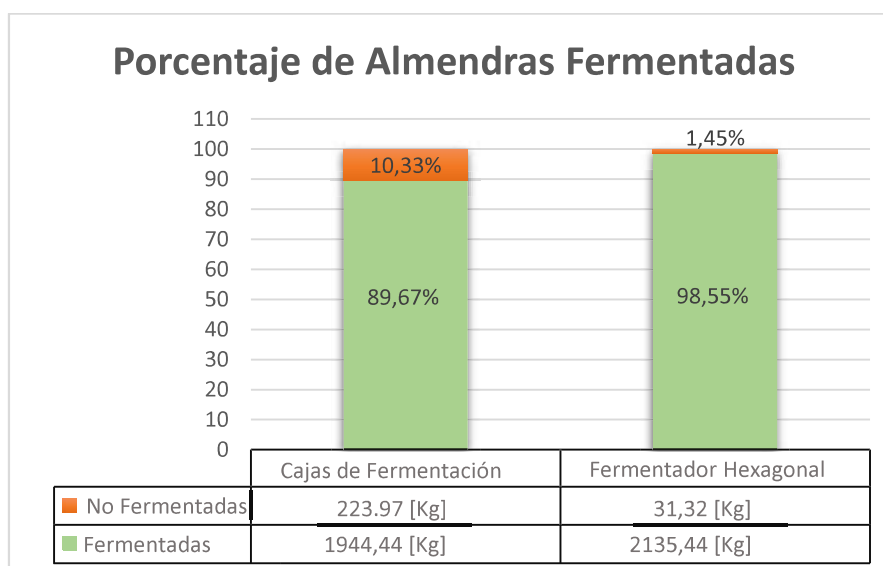


Figura 3.19. Cantidad de Granos Fermentados y No Fermentados.

(Fuente: Propia)

3.4. Análisis económico

A continuación, se detalla los costos de los elementos, materia prima, entre otros, para la constitución de las máquinas.

3.4.1. Costos de materia prima

Para la materia prima se considera la madera utilizada para la construcción de la máquina, así se obtiene la Tabla 3.10.

Tabla 3.10. Costos de la materia prima.

Material	Elementos	Empleo	Cant.	Precio Unitario	Precio Total
Madera	Tablas de Laurel 20X2X240 cm	Paredes Laterales Tambor	44	7,10	310,50
	Tablones de Laurel 22x4x250 cm	Paredes Hexagonales	8	11,50	92,30
	Tablones de Laurel 22x4x250 cm	Parte trasera de la Bandeja	2	11,50	23,10
	Vigas de colorado 6X6x250 cm	Eje de la maquina	4	8,30	33,20
	Vigas de colorado 6X7x250 cm	Uniones transversales	6	7,80	46,80
	Vigas de colorado 6X7x250 cm	Caballetes	8	8,30	66,30
	Tablón de colorado 22x4x250 cm	Guías para la bandeja	1	16,20	16,20
	Tablón de colorado 22x4x250 cm	Soporte de la Estructura	4	16,20	64,80
Total					653,10

(Fuente: Propia)

3.4.2. Costo de elementos normalizados

La Tabla 3.11 muestra los costos de los elementos normalizados para la construcción de los cuatro fermentadores.

Tabla 3.11. Costos de elementos normalizados.

Material	Elementos	Cant.	Unitario	Total
Tornillos y Pega	Tornillo Galvanizado 8X2 mm.	500	0,033	16,50
	Blan cola P/Carpintería.	1	8,72	8,70
Chumaceras	Chumacera de Piso.	8	22	176
	Chumacera de Pared.	4	22	88
Pernos Chumaceras	Pernos de acero al Carbono 3/4 X 4 in.	16	2,35	37,60
	Tuercas de acero al Carbono 3/4 in.	16	0,33	5,28
	Pernos de acero Inoxidable 5/8 x 3 in.	16	2,09	33,44
	Tuercas de acero inoxidable 5/8 in.	16	0,45	7,20
Pernos Seguros Puerta	Pernos de acero inoxidable 1/4 X 2 in.	60	0,2476	14,85
	Pernos de acero inoxidable 1/4 X 2 1/2 in.	30	0,1747	5,24
	Pernos de acero inoxidable 1/4 X 1 1/2 in.	30	0,125	3,75
	Tuercas acero inoxidable 1/4 in.	120	0,0805	9,66
	Rodela acero inoxidable 1/4 in.	120	0,065	7,80
Tornillos para Ensamble	Tornillo de madera N14 X 3 1/2 in.	16	0,21	3,36
	Tornillo de madera N16 X 2 1/2 in.	32	0,17	5,44
	Tornillo de madera N8 X 2 1/2 in.	32	0,05	1,60
Pernos para unión de los caballetes	Pernos galvanizados 5/16 X 3 in.	8	0,15	1,20
	Pernos galvanizados 5/16 X 4 1/2 in.	16	0,21	3,36
	Tuerca y Rodela plana galvanizada 5/16 in.	24	0,06	1,44
	Mosquetón 3/16.	2	0,97	1,94
Total				432,36

(Fuente: Propia)

3.4.3. Costos de mano de obra

Los costos de manos de obra se dividieron en dos como se indica en la Tabla 3.12, ya que se tuvo que torneear el eje en un aserradero especializado.

Tabla 3.12. Costos de mano de obra.

Actividad	Lugar de la actividad	Cant.	Precio Unitario	Precio Total
Torneado Ejes	Aserradero	4	6,5	26
Construcción	Carpintería	-	-	800
Total				826

(Fuente: Propia)

3.4.4. Costos varios

En los costos varios se detalla ciertos elementos que no se contemplaron inicialmente y el costo de transporte para trasladar las máquinas hasta la asociación. A continuación, la Tabla 3.13 detalla estos costos.

Tabla 3.13. Costos varios.

Rubro	Elementos	Cant.	Precio Unitario	Precio Total
Seguros de la Puerta	Picaportes	16	3	48
	Placas	16	2	32
Soporte inferior	Cauchos	16	2,50	40
Transporte		2	100	200
Total				320

(Fuente: Propia)

3.4.5. Costo total

La Tabla 3.14 se resume los costos de cada rubro y presenta el costo total del proyecto.

Tabla 3.14. Costo total del proyecto.

Tipo de Costo	Precio	Precio Total
Costo de materia prima	653,10	2231,50
Costo de elementos normalizados	432,36	
Costo de mano de obra	826	
Costos varios	320	

(Fuente: Propia)

3.5. Discusión

En las pruebas de carga, el caballete no presenta ninguna complicación, puesto que la carga que soporta es pequeña y además se distribuye en ambos lados. No se presentó ningún inconveniente en las paredes del tambor para las cargas de 100 y 150 kg, donde la deflexión medida se encuentra dentro de los límites propuestos por el código NDS, cuando se tuvo una carga de 200 kg el valor de la deflexión superó la permitida, por lo que no se recomienda cargar al tambor hexagonal con más de 150 kg. Para el caso del eje no se presentó ningún problema con las cargas de 100, 150 y 200 kg. Adicionalmente, el sistema de giro fue realizado con facilidad y se recomienda efectuarlo de manera controlada para evitar que el tambor gire bruscamente.

En la prueba de Temperatura interna, se analiza el comportamiento de la temperatura en ambos modelos. Para el modelo con paletas (Figura 3.4), durante las primeras 48 horas no existe un cambio significativo en la temperatura, a partir de las 60 horas la temperatura comienza a incrementar hasta llegar a un punto máximo de 44 °C a las 84 horas y finaliza en 42 °C a las 96 horas. Para el modelo simple (Figura 3.5), en las primeras 24 horas no existe un cambio significativo en la temperatura, a partir de las 48 horas comienza a incrementar llegando a un valor máximo de 43 °C a las 72 horas y finaliza en 40 °C a las 96 horas. Las caídas de temperatura se deben a la remoción de las almendras. El modelo con paletas presenta una mayor caída de la temperatura aproximadamente de 2,5 °C, esto se debe a que, a más de la rotación del tambor, también se giró las paletas dos veces, en el modelo simple se tiene caídas de temperatura de 1,2 °C aproximadamente.

Los resultados de la prueba de drenado se analizan en la Figura 3.8, donde se tiene que el mejor sistema se da con la realización de 40 agujeros en total para ambos modelos simple y con paletas, los dos presentaron los siguientes tiempos de drenado del mucílago: el modelo simple en 44 horas y el modelo con paletas en 40 horas aproximadamente. Los otros modelos, a los cuales se les realizó 24 agujeros, siguieron drenando, pero esta ya no podía ser recolectada puesto que según la recomendación de los expertos del laboratorio de ciencia de alimentos, este fluido se lo recolecta únicamente en las primeras 48 horas de inicio de la fermentación.

Los resultados correspondientes a la apreciación del color de los cotiledones se los puede observar en la figura 3.10 y 3.11, en los cuales se evidencia claramente que han sufrido un cambio de coloración del embrión tornándose de un violeta claro (Figura 3.9) a un marrón oscuro, con esto se asegura la muerte del cotiledón. Además, se puede apreciar que para el modelo simple algunas de las almendras no se han fermentado completamente, mientras que para el modelo con paletas casi todas las almendras han

sufrido la transformación, con esto queda asegurado del modelo de paletas presenta mejores resultados de la fermentación.

Para el análisis de la cantidad de almendras fermentadas se hace uso de la Figura 3.13. Se evaluó considerando cantidades de producción similares, es decir en los días 22, 23, 29 y 30 de marzo se alcanzó una producción de 2168 kg, y en los días 4, 5, 11 y 12 se alcanzó una producción de 2166 kg. Empleando el método de gradas se tiene un desperdicio del 10% de la producción y corresponde a 224 kg, a diferencia del método hexagonal rotatorio donde se presenta un desperdicio del 1,5% correspondiente 32 kg de cacao.

Con el fin de prolongar la vida útil de los fermentadores, se realizó el diseño de una estructura metálica. Esta modificación fue propuesta por las personas de la asociación Wiñak, la estructura debe ser completamente desmontable facilitando el cambio de las tablas o tablonos que puedan resultar dañados por algún agente externo durante el proceso de fermentación. El proceso de montaje se debe realizar en base a la estructura, por lo que, esta idea se propuso para futuros modelos.

4. CONCLUSIONES

4.1. Conclusiones y Recomendaciones

Las máquinas fermentadoras de cacao diseñadas y construidas cumplieron con los requerimientos del usuario planteados al inicio del proyecto, siendo el factor principal el mezclado, por su facilidad y eficiencia en comparación con el fermentador tipo cajas escalonadas propiedad de la asociación.

El espesor de las paredes de madera de los tambores hexagonales resultó ser adecuado para que el calor generado por el cacao pueda ser almacenado. Con el modelo de paletas se tiene un mejor control sobre la temperatura, ya que puede homogenizar de manera eficiente la masa de cacao.

Se pudo evidenciar el cambio de coloración del embrión, tornándose de un color violeta a un color marrón al realizar un corte longitudinal en las almendras fermentadas a las 96 horas desde el inicio de la fermentación, este análisis resultó ser de suma importancia pues con ello se garantizó una buena fermentación de los granos de cacao

Se obtuvo una mayor cantidad de almendras fermentadas con el método hexagonal rotativo en comparación con el método de cajas escalonadas, además, se redujo el tiempo de fermentación de seis días a cuatro días.

El sistema de recolección de cacao mostró ser eficiente en comparación al método que se tenía en la asociación Wiñak, esto representó una mejora en el proceso de producción de chocolate al reducir el número de personas necesarias para recolectar el cacao luego de la fermentación, de tres personas a una.

El sistema de drenaje ha mejorado la asepsia del proceso de fermentado de cacao, lo que ha influido en la calidad. Así mismo, la recolección del mucílago ha facilitado la limpieza de los fermentadores en comparación con las cajas escalonadas utilizadas en la asociación.

La madera de laurel, escogida para la fabricación del tambor, no transfirió sabores y olores extraños al cacao fermentado. La madera de colorado, usada para fines estructurales, resistió las cargas aplicadas en conformidad a lo establecido en los cálculos.

Al desarrollar la recopilación de información para los requerimientos, se buscó los materiales más eficientes al menor costo. El modelo de paletas tiene una diferencia de 82 dólares en el costo en comparación al simple.

La construcción y el ensamblaje de las máquinas se realizaron con base en los planos de conjunto y taller, obtenidos en la fase de diseño de materialización. La fabricación hecha por el carpintero y el ensamblaje realizado por los diseñadores, no representó complicaciones.

4.2. Recomendaciones

El uso de la estructura metálica es recomendado para alargar la vida útil de las máquinas y que el mantenimiento correctivo del tambor sea sencillo al reemplazar las tablas que pierdan su funcionalidad.

Al tener el problema de desplazamiento en la pared inferior del tambor, se vio la necesidad de cambiar el diámetro de los tornillos y el ángulo de penetración en las tablas, para que exista un mayor agarre de las superficies.

Se recomienda colocar un material (caucho) que evite el contacto de la estructura de madera con la superficie donde se ubica la máquina, esto para que la humedad no deteriore la base y se garantice un mayor tiempo de vida.

Referencias Bibliográficas

- Acebo, M. (2016). *Estudios Industriales, Orientación Estratégica para la toma de Decisiones en la Industria del Cacao*. Guayaquil: ESPOL.
- Afoakwa, E. (2014). *Cocoa Production and Processing Technology*. Boca Raton, Florida, United States: CRC Press. Obtenido de <http://www.taylorandfrancis.com>
- Aghayere, A., & Vigil, J. (2007). *Structural Wood Design: A Practice-Oriented Approach Using the ASD Method*. New Jersey: Jhon Wiley & Sons, Inc.
- American National Standards Institute (ANSI). (2018). *National Design Specification for Wood Construction*. Leesburg, Virginia, United States: American Wood Council.
- Anecacao. (20 de Julio de 2015). *Asociación Nacional de Exportadores de Cacao*. Obtenido de <http://www.anecacao.com/es/quienes-somos/cacao-nacional.html>
- Ardhana, M. (1990). *Microbial ecology and biochemistry of cocoa bean*. Sydney-Australia: University of New South Wales.
- Asociación Wiñak. (Marzo de 2017). *winak.org*. Obtenido de winak.org: www.winak.org
- Beer, F., & Johnston, R. (2012). *Mechanics of Materials*. New York: McGraw-Hill.
- Biehl, B. M. (1990). Bean spreading: A method for pulp preconditioning to impair strong nib acidification during cocoa fermentation in Malaysia. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 35-45.
- Bucheli, P. R. (2001). *Developmental variations of sugars, carboxylic acids, purine alkaloids, fatty acids, and endoproteinase activity during maturation of Theobroma cacao*. United States: Journal of the Science of Food and Agriculture.
- Budynas, R., & Nisbett, K. (2012). *Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley* (Novena Edición ed.). México: McGraw-Hill.
- Camara de Cacao Fino de Costa Rica. (5 de Febrero de 2019). *Cana Cacao*. Obtenido de Procesamiento de Cacao: <https://canacacao.org/multimedia-imagenes/>
- Cengel, Y., & Ghajar, A. (2011). *Transferencia de Calor y Masa* (cuarta edición ed.). Mexico: McGraw-Hill S.A.
- CEPAL. (2014). Diagnóstico de la Cadena Productiva del Cacao en el Ecuador. *CEPAL*.
- Crespo, J. (junio de 2017). *vivaelcacao.com*. Obtenido de vivaelcacao.com: <https://vivaelcacao.com/es/derivados-del-cacao/>
- Departamento de ciencia de alimentos y biotecnología EPN. (2019). *Fermentacion de granos de cacao*. Quito: Facultad de Ingeniería Química y Agroindustria.
- Espinosa, A., & otros. (1 de Junio de 1998). *Fermente bien su cacao*. Obtenido de Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria: <http://bibliotecadigital.agronet.gov.co/bitstream/11348/4767/1/Fermentacion%20de%20cacao%20a%20través%20de%20un%20tambor%20rotatorio.pdf>

- FAO. (22 de Mayo de 2019). *Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura*. Obtenido de FAO Corporation: <http://www.fao.org/docrep/x5041s/x5041s09.htm>.
- Gomez, A. (21 de Diciembre de 2015). *MI PYME*. Obtenido de mipymeenomina.blogspot.com
- Guerrero, G. (2015). El cacao ecuatoriano: Su historia empezó antes del siglo XV. *Revista Líderes*, 3.
- Huiracocha, M. (9 de Enero de 2019). *Pichincha Universal*. Obtenido de www.pichinchauniversal.com.ec
- Luth World Relief. (12 de Abril de 2013). *Caja de Herramientas para cacao*. Obtenido de Luth World Relief: <http://cacaomovil.com/guia/8/>
- McCORMAC, J., & CSERNAK, S. (2012). *Diseño de Estructuras de Acero*. Mexico: Pearson Education.
- Ministerio del Ambiente. (2014). *Propiedades Anatómicas, Físicas y Mecánicas de 93 Especies Forestales*. Quito: Tallpa Imprenta.
- Mitchell, D., & Krieger, N. (2006). *Solid-State Fermentation Bioreactors Fundamentals of Design and Operation*. Berlin-Alemania: Springer.
- Riba, C. (2002). *Diseño Concurrente*. Barcelona: Edicions UPC.
- S Coral. (20 de Enero de 2019). *Cajones de Fermentación de Cacao*. Obtenido de Negoservis Coral: <https://nscoral.pe/cajon-fermentador-de-cacao/>
- Schwan, R., & Fleet, G. (2015). *Cocoa and Coffee Fermentations*. (M. N. Sarkar, Ed.) Boca Raton, Florida, United States: CRC Press. Obtenido de <http://www.taylorandfrancis.com>