



**UNIVERSIDAD INTERNACIONAL DEL
ECUADOR**

**FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y TECNOLOGÍAS
APLICADAS**

ESCUELA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA MÁQUINA PARA LA
EXTRACCIÓN DE LA PULPA DEL FRUTO DE CACAO**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO EN
MECATRÓNICA**

CÉSAR AUGUSTO MAYACELA GUERRA

DIRECTOR:

ING. LUIS XAVIER SÁNCHEZ SIGUENZA, MBA.

D.M. Quito,

2017

DECLARACIÓN

Yo, CÉSAR AUGUSTO MAYACELA GUERRA declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y que se ha investigado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Universidad Internacional del Ecuador, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por normativa institucional vigente.



CÉSAR AUGUSTO MAYACELA GUERRA

C.C.: 172207408-3

CERTIFICACIÓN

El docente de la Escuela de Ciencias Exactas y Tecnologías Aplicadas Ingeniero Luis Xavier Sánchez S. MBA.

CERTIFICA QUE:

El proyecto de investigación "Diseño y construcción de una máquina para la extracción de la pupa del fruto de cacao", fue desarrollado por el Sr. César Augusto Mayacela Guerra, ha sido debidamente revisado y está en condiciones de ser entregado para que siga lo dispuesto por la escuela de Ciencias Exactas y Tecnologías Aplicadas, correspondiente a la sustentación y defensa del mismo.



ING. LUIS XAVIER SÁNCHEZ SIGUENZA, MBA.

C.C.: 030126994-0

DIRECTOR DEL PROYECTO

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, agradezco a mis padres, César y Margoth, por su amor y apoyo incondicional, por haber sido los pilares que impulsan mi vida y quienes con gran esfuerzo apoyaron el desarrollo de este proyecto; por la confianza que depositaron en mí durante todas las etapas de mis estudios universitarios, que a pesar de todas las adversidades jamás dejaron de creer en mí.

A mi hermana Mishelle por todo el amor, ayuda y motivación incondicional que día a día me ayudan a crecer como persona; y por todo el ánimo brindado desde el comienzo de mi carrera.

A Grace Lara por ayudarme en todo momento a creer y tener plena confianza en mí mismo, por siempre brindarme una nueva perspectiva para solucionar problemas y por contribuir en la construcción de la máquina.

A mi director de proyecto de titulación; Ing. Luis Sánchez, quien con su experiencia y guía me ayudó a solventar todas las dudas y problemas que se presentaron durante el desarrollo de la máquina. A los ingenieros Verónica y Richard por sus consejos y sugerencias que contribuyeron y enriquecieron el desarrollo de este proyecto.

A mi gran amigo Pedro Román, por su amistad y apoyo en la Universidad, y por toda la ayuda brindada durante el desarrollo del proyecto de titulación.

ÍNDICE DE CONTENIDO

1. CAPÍTULO I	12
1.1 TEMA	12
1.2 OBJETIVOS	12
1.2.1 GENERAL	12
1.2.2 ESPECÍFICOS.....	12
1.3 HIPÓTESIS.....	13
1.4 ESTADO DEL ARTE DE LA EXTRACCIÓN DE CACAO	13
1.4.1 PREÁMBULO	13
1.4.1.1 Cultivo del cacao.....	14
1.4.1.2 Extracción manual de pulpa de cacao	15
1.4.1.3 Extracción automática de pulpa de cacao.....	16
1.4.2 INVESTIGACIÓN ACADÉMICA Y DESARROLLO TECNOLÓGICO	16
1.4.2.1 Máquina separadora de la semilla del cacao	17
1.4.2.2 Prototipo experimental desmucilagador de cacao.....	18
1.5 MARCO TEÓRICO	20
1.5.1 MAZORCA DE CACAO	20
1.5.2 PULPA DE CACAO	21
1.5.3 MÁQUINA DESPULPADORA ROTATORIA.....	22
1.5.4 MÁQUINA DESPULPADORA BASADA EN LA VIBRACIÓN	23
1.5.5 MADURACIÓN DE LAS MAZORCAS DE CACAO.....	24
2. CAPÍTULO II	26
2.1 REQUERIMIENTOS	26
2.1.1 EXPLICACIÓN GENERAL DEL PROCESO.....	26
2.1.2 CAPACIDAD DE PROCESAMIENTO DE LA MÁQUINA	26

2.1.3	FRAGMENTACIÓN DE MAZORCAS	27
2.1.4	SEPARACIÓN CORTEZA - PULPA	27
2.2	ESPECIFICACIONES TÉCNICAS	27
2.2.1	CASA DE LA CALIDAD	28
2.2.1.1	Voz del usuario	28
2.2.1.2	Voz del ingeniero	28
2.2.1.3	Análisis y conclusiones de la casa de la calidad	30
2.2.2	FORMULACIÓN DE ESPECIFICACIONES TÉCNICAS	31
2.3	DISEÑO CONCEPTUAL	32
2.3.1	ANÁLISIS FUNCIONAL	32
2.3.1.1	Nivel 0	33
2.3.1.2	Nivel 1	34
2.3.1.3	Opciones para los módulos	37
2.3.2	MATRIZ MORFOLÓGICA	42
2.4	MATRIZ DE RESIDUOS PONDERADOS	43
2.4.1	CRITERIOS DE PONDERACIÓN	44
2.4.2	PONDERACIÓN DE LOS CRITERIOS DE EVALUACIÓN	44
2.4.3	PONDERACIÓN DE LAS ALTERNATIVAS EN FUNCIÓN DE LA FIABILIDAD	45
2.4.4	PONDERACIÓN DE LAS ALTERNATIVAS EN FUNCIÓN DE LA CAPACIDAD	46
2.4.5	PONDERACIÓN DE LAS ALTERNATIVAS EN FUNCIÓN DE LA FACILIDAD DE LIMPIEZA	46
2.4.6	PONDERACIÓN DE LAS ALTERNATIVAS EN FUNCIÓN DE LA MANTENIBILIDAD	47
2.4.7	PONDERACIÓN DE LAS ALTERNATIVAS EN FUNCIÓN DEL COSTO	47

2.4.8	CONCLUSIÓN DEL MÉTODO DE RESIDUOS PONDERADOS	48
3.	CAPÍTULO III	49
3.1	DISEÑO MECÁNICO	50
3.1.1	ETAPA DE FRAGMENTACIÓN DE LAS MAZORCAS.....	50
3.1.1.1	Velocidad del eje de fragmentación	50
3.1.1.2	Ensayo de compresión.....	51
3.1.1.3	Diseño del motor de fragmentación	54
3.1.1.4	Eje de transmisión: diseño a fatiga	54
3.1.1.5	Eje de transmisión: diseño a rigidez.....	60
3.1.1.6	Chaveta del eje de fragmentación.....	64
3.1.1.7	Sistema de transmisión: Cadena	66
3.1.1.8	Cuchillas de fragmentación: Diseño a fatiga	68
3.1.1.9	Soldadura de las cuchillas: Diseño de la soldadura	72
3.1.1.10	Pernos de fijación del eje de fragmentación.....	76
3.1.1.11	Rodamiento del eje de fragmentación	81
3.1.2	ETAPA DE SEPARACIÓN DE CORTEZA Y PULPA	82
3.1.2.1	Datos preliminares	83
3.1.2.2	Diseño del motor de separación.....	84
3.1.2.3	Eje de separación: Diseño a fatiga.....	86
3.1.2.4	Eje de separación: Diseño a rigidez.....	88
3.1.2.5	Selección de la malla	94
3.1.2.6	Rodamientos del eje de separación	95
3.2	DISEÑO ELÉCTRICO.....	96
3.2.1	SELECCIÓN DEL VARIADOR DE VELOCIDAD.....	96
3.2.2	VOLTAJE DE TRABAJO DE LA MÁQUINA	97

3.2.3	POTENCIA ELÉCTRICA TOTAL REQUERIDA PARA EL FUNCIONAMIENTO DE LA MÁQUINA.....	99
3.2.4	DIMENSIONAMIENTO DEL CONDUCTOR.....	99
3.2.5	PROTECCIONES.....	102
3.2.5.1	Fusibles.....	102
3.2.5.2	Disyuntor.....	103
3.2.6	SISTEMA DE CONTROL.....	103
3.2.6.1	Conteo de mazorcas y estimación de producto procesado por valores estadísticos.....	104
3.2.6.2	Velocidad de fragmentación.....	104
3.2.6.3	Velocidad de separación.....	105
3.2.6.4	Vida útil de los sensores de velocidad.....	106
3.2.6.5	Condiciones de paro automático.....	107
3.3	DIAGRAMA DE FLUJO DEL FUNCIONAMIENTO.....	107
3.3.1	DIAGRAMA DE FUNCIONAMIENTO GENERAL.....	108
3.3.2	DIAGRAMA DE MODO DE SEPARACIÓN.....	109
3.3.3	DIAGRAMA DE MODO DE FRAGMENTACIÓN.....	110
3.3.4	FUNCIONAMIENTO DEL PLC.....	112
3.4	CIRCUITO DE POTENCIA.....	113
3.5	CIRCUITO DE CONTROL.....	115
4.	CAPÍTULO IV.....	118
4.1	CONSTRUCCIÓN DE LA MÁQUINA.....	118
4.1.1	CONSTRUCCIÓN DEL EJE DE FRAGMENTACIÓN.....	119
4.1.2	CONSTRUCCIÓN DEL SOPORTE DEL SISTEMA DE SEPARACIÓN...	122
4.1.3	CONSTRUCCIÓN DEL HEXÁGONO DE SEPARACIÓN.....	125
4.1.4	ALINEACIÓN DEL MOTOR Y HEXÁGONO DE SEPARACIÓN.....	129

4.1.5	INSTALACIÓN DE LA CADENA.....	132
4.1.6	INSTALACIÓN DE LA MALLA.....	133
4.1.7	PROTECCIONES DE ACERO INOXIDABLE	135
4.1.8	CUCHILLAS FIJAS.....	138
4.1.9	PINTURA.....	140
4.1.10	INSTALACIÓN ELÉCTRICA	144
4.2	PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO	147
4.2.1	MUESTRAS DE MAZORCAS PARA LAS PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO.....	148
4.2.2	PRIMERA PRUEBA.....	149
4.2.3	SEGUNDA PRUEBA	150
4.2.4	TERCERA PRUEBA.....	151
4.2.5	CUARTA PRUEBA	151
4.2.6	QUINTA PRUEBA	152
4.2.7	PRUEBA FINAL.....	152
4.2.8	PRODUCTO RECHAZADO.....	154
4.2.9	PRODUCTO DAÑADO.....	155
4.3	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	157
4.3.1	PRODUCTO RECHAZADO.....	157
4.3.2	SEMILLAS DAÑADAS.....	159
4.3.3	RENDIMIENTO DE LA MÁQUINA.....	161
4.3.4	CAPACIDAD DE LA BANDEJA DE ALMACENAMIENTO	163
4.3.5	VALORES PROMEDIO DE LOS DATOS OBTENIDOS	164
4.3.6	CÁLCULO DEL COSTO TOTAL DE LA MÁQUINA.....	165
	CONCLUSIONES.....	168

RECOMENDACIONES	171
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	174

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Mazorca de cacao abierta	14
Figura 1.2: Cosecha de mazorcas de cacao	14
Figura 1.3: Proceso de extracción manual de la pulpa de cacao	15
Figura 1.4: Fruto de cacao cortado a la mitad	16
Figura 1.5: Tipos de mazorcas. (a) Fino de aroma (b) CCN-51	20
Figura 1.6: Mazorcas. (a) Diámetro, 14 cm (b) Longitud, 30 cm	21
Figura 1.7: Pulpa de cacao	21
Figura 1.8: Semillas. (a) Diámetro, 20 mm. (b) Longitud, 30 mm.	22
Figura 1.9: Máquina despulpadora de cacao	23
Figura 1.10: Máquina despulpadora basada en la vibración	24
Figura 1.11: Mazorcas de cacao enfermo con moniliasis	25
Figura 2.1: Nivel 0, Máquina despulpadora de cacao	34
Figura 2.2: Nivel 1, Máquina despulpadora de cacao	34
Figura 2.3: Interruptor basculante	37
Figura 2.4: Interruptor termomagnético	37
Figura 2.5: Pulsadores	38
Figura 2.6: TFT - LCD táctil	38
Figura 2.7: Rodillos dentados	39
Figura 2.8: Cuchillas	39
Figura 2.9: Cilindro giratorio	40
Figura 2.10: Mesa vibratoria	40
Figura 2.11: Acero inoxidable	41
Figura 2.12: Aluminio corrugado	41
Figura 2.13: PL Duino	42
Figura 2.14: Siemens LOGO	42
Figura 3.1: Máquina para la extracción de semillas de cacao	49
Figura 3.2: Ensayo de compresión	52
Figura 3.3: Carga aplicadas al eje de fragmentación	55
Figura 3.4: Distribución de carga en el eje de fragmentación	60
Figura 3.5: Diagrama de fuerza cortante eje de fragmentación	61

Figura 3.6: Diagrama de momento flexionante en el eje de fragmentación	62
Figura 3.7: Simulación del eje de fragmentación.....	64
Figura 3.8: Geometría de la chaveta	65
Figura 3.9: Simulación de la chaveta	66
Figura 3.10: Fuerzas aplicadas en cada cuchilla.....	69
Figura 3.11: Simulación de soldadura de una cuchilla.	76
Figura 3.12: Distribución de fuerza en pernos.....	77
Figura 3.13: Distribución geométrica de pernos en el soporte	78
Figura 3.14: Dimensiones generales del hexágono de separación	84
Figura 3.15: Distribución de carga en el eje de separación.....	89
Figura 3.16: Diagrama de fuerza cortante eje de separación.....	89
Figura 3.17: Diagrama de momento flexionante en el eje de separación.....	90
Figura 3.18: Primera carga para calcular la deflexión	91
Figura 3.19: Segunda carga para calcular la deflexión	92
Figura 3.20: Simulación de deflexión del sistema de separación	93
Figura 3.21: Malla hexagonal de 5/8 de pulgada.....	95
Figura 3.22: Diagrama de funcionamiento general de la máquina	108
Figura 3.23: Diagrama de modo de separación	109
Figura 3.24: Diagrama de modo de extracción.....	111
Figura 3.25: Diagrama del circuito de potencia	114
Figura 3.26: Diagrama del circuito de control	116
Figura 4.1: Cuchilla móvil	119
Figura 4.2: Eje de fragmentación	120
Figura 4.3: Molde de construcción, eje de fragmentación.	121
Figura 4.4: Alineación y fijación de platinas de soporte del eje de fragmentación.....	121
Figura 4.5: Eje de fragmentación instalado	122
Figura 4.6: Estructura principal del sistema de separación	123
Figura 4.7: Ensamble de la estructura del sistema de separación	123
Figura 4.8: Inclinación del sistema de separación.....	124
Figura 4.9: Inclinación de la estructura. (a) Chumacera frontal (b) Chumacera posterior	124

Figura 4.10: Plano D03-005, lateral del hexágono de separación.....	125
Figura 4.11: Estructura del hexágono de separación.	126
Figura 4.12: Soporte interno (a) Plano (b) Ensamblaje	127
Figura 4.13: Soportes internos del hexágono sobre el eje	127
Figura 4.14: Hexágono separador (a) Parte interna (b) Ángulo de inclinación	128
Figura 4.15: Chumaceras del hexágono de separación (a) Frontal (b) Posterior	129
Figura 4.16: Caja reductora del sistema de separación instalada.	130
Figura 4.17: Chumacera frontal del sistema de separación instalada.	131
Figura 4.18: Inclinación del motorreductor	131
Figura 4.19: Ranuras de la base del reductor de fragmentación.....	132
Figura 4.20: Candado y seguro de la cadena del sistema de fragmentación.....	132
Figura 4.21: Cadena del sistema de fragmentación instalada.....	133
Figura 4.22: Ajuste de la malla en los pernos del hexágono	134
Figura 4.23: Punto de unión de las dos mallas del hexágono	134
Figura 4.24: Platina de seguridad.....	135
Figura 4.25: Protección de acero inoxidable, sistema de separación (a) Lateral (b) Inferior	135
Figura 4.26: Base del sistema de fragmentación	136
Figura 4.27: Doble lateral inferior del separador.....	137
Figura 4.28: Recubrimiento del sistema de fragmentación	137
Figura 4.29: Fijación de las cuchillas previo a ser maquinadas.....	138
Figura 4.30: Orificios de los pernos de sujeción de las cuchillas fijas	138
Figura 4.31: Partes para fijar cada cuchilla	139
Figura 4.32: Cuchillas fijas instaladas	140
Figura 4.33: Estructura del fragmentador	141
Figura 4.34: Estructura del separador	142
Figura 4.35: Cuchillas fijas y móviles del sistema de fragmentación.....	143
Figura 4.36: Distribución de componentes eléctricos	144
Figura 4.37: Distribución de componentes de control e indicadores	145
Figura 4.38: Conector Legrand tripolar con tierra.....	147
Figura 4.39: Mazorcas de cacao para pruebas.	148

Figura 4.40: Estado de la máquina durante funcionamiento	150
Figura 4.41: Cacao procesado en la prueba final.....	153
Figura 4.42: Producto rechazado, semillas con mucílago seco.....	154
Figura 4.43: Producto rechazado, mazorcas enfermas o podridas	155
Figura 4.44: Producto dañado, semillas afectadas parcial o totalmente	155
Figura 4.45: Semillas dañadas (a) Corte total (b) Corte parcial grave (c) y (d) Corte parcial leve.....	156
Figura 4.46: Semillas dañadas en el proceso de extracción manual.....	157
Figura 4.47: Gráfica de porcentajes de semillas rechazadas	159
Figura 4.48: Gráfica de porcentajes de semillas dañadas.....	161
Figura 4.49: Gráfica del rendimiento de la máquina.....	163

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1: Casa de la calidad	30
Tabla 2.2: Especificaciones técnicas propuestas para el diseño de la máquina	32
Tabla 2.3: Opciones para el encendido principal de la máquina	37
Tabla 2.4: Opciones para la interfaz de usuario	38
Tabla 2.5: Opciones para el sistema de fragmentación de mazorcas	39
Tabla 2.6: Opciones para el sistema de separación de pulpa y corteza	40
Tabla 2.7: Opciones para el depósito de la pulpa	41
Tabla 2.8: Opciones para el PLC	42
Tabla 2.9: Matriz morfológica	43
Tabla 2.10: Evaluación del peso específico de cada criterio	45
Tabla 2.11: Evaluación de alternativas en función de la fiabilidad	45
Tabla 2.12: Evaluación de alternativas en función de la capacidad	46
Tabla 2.13: Evaluación de alternativas en función de la facilidad de limpieza	46
Tabla 2.14: Evaluación de alternativas en función de la mantenibilidad	47
Tabla 2.15: Evaluación de alternativas en función del costo	48
Tabla 2.16: Conclusión de la selección de alternativas	48
Tabla 3.1: Fuerza de corte de mazorcas	53
Tabla 3.2: Peso de las mazorcas y pulpa	53
Tabla 3.3: Deflexión máxima permisible	62
Tabla 3.4: Dimensiones de las semillas	94
Tabla 3.5: Componentes eléctricos principales	98
Tabla 3.6: Tabla de calibre de cables AWG	100
Tabla 3.7: Valores promedio de las variables del proceso	104
Tabla 3.8: Componentes del circuito de fuerza	113
Tabla 3.9: Componentes del circuito de control	115
Tabla 3.10: Entradas y salidas del PLC	117
Tabla 4.1: Materiales necesarios para la construcción	118
Tabla 4.2: Identificación de conductores	145
Tabla 4.3: Primera prueba de funcionamiento	149
Tabla 4.4: Segunda prueba de funcionamiento	150

Tabla 4.5: Tercera prueba de funcionamiento.....	151
Tabla 4.6: Cuarta prueba de funcionamiento	152
Tabla 4.7: Quinta prueba de funcionamiento.....	152
Tabla 4.8: Prueba final de funcionamiento	153
Tabla 4.9: Porcentaje de producto rechazado.....	158
Tabla 4.10: Porcentaje de producto dañado	160
Tabla 4.11: Rendimiento de la máquina.....	162
Tabla 4.12: Capacidad de la bandeja de almacenamiento.....	164
Tabla 4.13: Valores promedio de los datos obtenidos.....	165
Tabla 4.14: Costos de materiales eléctricos.....	165
Tabla 4.15: Costos metalmecánicos	166
Tabla 4.16: Costos de mano de obra	166
Tabla 4.17: Costo de construcción total	167

ABREVIATURAS

A.- Amperios

CA. - Corriente Alterna

CC.- Corriente Continua

Etc.- Etcétera

F.- Fuerza

HP. - Caballos de fuerza

kg. - kilogramos

m.- Metro

mm.- Milímetros

MPa. - Mega pascales

N.- Newton

N.m.- Newton por metro

NA.- Normalmente Abierto

NC.- Normalmente Cerrado

Psi.- Libras por pulgada cuadrada

rpm. - Revoluciones por Minuto

V.- Voltios

W.- Vatios

RESUMEN

El proyecto se centra en el diseño y construcción de una máquina para la extracción de la pulpa de cacao. Para esto se presenta el cálculo estructural realizado como parte del diseño a fatiga para vida infinita; así como el modelado y simulación de las partes mecánicas de mayor relevancia; también se incluye el diseño eléctrico del sistema de control. Una vez finalizado servirá para facilitar el proceso de la extracción de la pulpa de cacao a los agricultores cacaoteros del Ecuador.

La principal motivación para la construcción de esta máquina es desarrollar tecnología que mejore y agilite el proceso de extracción de la pulpa del cacao en los cultivos ecuatorianos, reduciendo costos de producción. Adicionalmente, el proyecto servirá para producir máquinas con una mayor capacidad de procesamiento de cacao.

Se presentan los datos obtenidos de ensayos de compresión de mazorcas de cacao como base para el diseño y las consideraciones realizadas durante la construcción. Así como los resultados obtenidos en las pruebas de funcionamiento de la máquina, donde el valor promedio de rendimiento es de 81.7%, el daño de semillas de 2.1% y el rechazo de semillas durante la separación de 13.3%.

Este documento recoge de manera didáctica los conceptos, conocimientos, investigaciones, y sus aplicaciones, necesarios para el desarrollo del proyecto realizado. También se expone secuencialmente el respectivo proceso de diseño y construcción por etapas.

ABSTRACT

This project focuses on the design and construction of the prototype of a cocoa pulp extractor. For these structural calculations developed as part of the fatigue design for infinite life, as well as modeling and simulation of the mechanical parts of major importance. Also, the electrical design of the control system which once completed will serve to improve the process of extracting the pulp of cocoa to Ecuadorian farmers.

The main motivation for building this prototype is to develop technology that improves and allows faster cocoa pulp extraction in Ecuadorian crops, reducing production costs. Additionally, it will serve to produce machines with more processing capability of cocoa.

The data obtained from cocoa pod compression tests are presented as the basis for the design, the considerations made during the construction. As well as the results obtained in the tests of operation of the machine, with average values of performance of 81.7%, damage of seeds of 2.1% and a rejection of seeds during the separation of 13.3%.

This document provides didactically concepts, knowledge, research, and applications necessary for the development of the project, and exposes sequentially the respective design and construction in stages.

INTRODUCCIÓN

A medida que la tecnología avanza, se desarrollan equipos con el objetivo de mejorar la calidad de vida de los seres humanos se van implementando dispositivos o máquinas que se utilizan en el día a día, así como se automatizan los procesos de producción a nivel industrial.

Dentro de la industria cacaotera existen diferentes procesos que permiten la implementación de maquinaria para su automatización. Estos en la actualidad se realizan manualmente, siendo uno de ellos la extracción de la pulpa del fruto del cacao.

Los principales beneficios de implementar una máquina para el proceso de extracción de la pulpa implican aumentar la capacidad de procesamiento de mazorcas de cacao de un agricultor. Por ende, un incremento en la producción y la disminución de costos de mano de obra en el proceso de extracción de pulpa de cacao. La información recopilada y obtenida producto de las pruebas realizadas crean un precedente en el desarrollo de maquinaria para el sector cacaotero ecuatoriano.

En el Capítulo I se recopila toda la información referente a los métodos actuales de extracción de semillas de cacao. Así como las máquinas existentes y los proyectos que se han realizado previamente para dicho propósito.

En el Capítulo II se realiza el análisis y selección de alternativas en función de la información recopilada. También se utilizan los requerimientos obtenidos de visitas técnicas realizadas a haciendas productoras de cacao en el sector de La Troncal.

En el Capítulo III se presenta el diseño mecánico, electrónico y de control que requiere la máquina basado en la alternativa seleccionada previamente. En el Capítulo IV se encuentra documentada la información referente al proceso de construcción de la máquina y los parámetros usados y resultados obtenidos de las pruebas de funcionamiento.

CAPÍTULO I

PRECEDENTES

El presente capítulo introduce los precedentes sobre los cuales se desarrollará el diseño y construcción de la máquina.

1.1 TEMA

Diseño y construcción de una máquina para la extracción de la pulpa del fruto de cacao.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 GENERAL

- Diseñar y construir una máquina para la extracción de la pulpa del fruto de cacao.

1.2.2 ESPECÍFICOS

- Brindar una solución al problema de la extracción manual de la pulpa del fruto de cacao.
- Facilitar la utilización de la corteza del fruto del cacao como abono reduciendo el tamaño de los fragmentos de corteza residual.
- Diseñar una máquina que extraiga de manera eficaz la pulpa del fruto de cacao, aprovechando al máximo el contenido de cada fruto.
- Diseñar el sistema de control que requiere el proceso para un óptimo funcionamiento.
- Diseñar un interfaz que permita al operario controlar las funciones de la máquina de una manera sencilla y práctica.
- Elaborar un protocolo de pruebas de funcionamiento, para evaluar el funcionamiento de la máquina.

1.3 HIPÓTESIS

La máquina despulpadora de cacao diseñada y construida para extraer la pulpa de las mazorcas de cacao, admite frutos de hasta 20 cm de largo y 8 cm de diámetro. Extrae la pulpa con una capacidad de hasta 6 mazorcas por minuto y expulsa la corteza residual en fragmentos de menor tamaño en comparación a los residuos de los cultivos tradicionales.

1.4 ESTADO DEL ARTE DE LA EXTRACCIÓN DE CACAO

A continuación, se exponen las bases necesarias para comprender el proceso de extracción de la pulpa del cacao. Además de sintetizar y analizar investigaciones realizadas en temas similares.

1.4.1 PREÁMBULO

Actualmente algunos agricultores aún realizan el proceso de extracción de la pulpa del cacao de forma manual, utilizando por ejemplo un machete para cortar los extremos del fruto y extraer la pulpa. En algunos casos se implementan equipos automáticos que separan la pulpa y la corteza, expulsando la corteza sin ser triturada, es decir, en dos partes enterizas por cada mazorca.

En la Figura 1.1 se muestra una mazorca de cacao abierta. El proceso de extracción de la pulpa tiene como objetivo separar la corteza, parte externa de color amarillo, y la pulpa, semillas que se encuentran en la parte interna de color blanquecino.



Figura 1.1: Mazorca de cacao abierta
Fuente: Cacao Móvil [7]

1.4.1.1 Cultivo del cacao

Las mazorcas generalmente son cosechadas de los árboles de cacao dos veces por año, debido a los periodos de floración de los árboles y el tiempo que tardan en madurar los frutos. En la cosecha se utilizan herramientas de corte para no afectar al cacaotal mientras se desprende la mazorca como se muestra en la Figura 1.2.



Figura 1.2: Cosecha de mazorcas de cacao
Fuente: Cacao Móvil [7]

Después de haber cosechado las mazorcas maduras de los cacaotales se procede a realizar la extracción de la pulpa de cada una de las mazorcas.

1.4.1.2 Extracción manual de pulpa de cacao

El proceso manual implica una gran dificultad para el operario, adiciona tiempo muerto y limita la capacidad de producción por día de la empresa, ya que solo se puede procesar una mazorca a la vez.

En la Figura 1.3 se muestra el proceso de extracción manual de la pulpa del cacao, en el cual se utiliza un machete para dividir la mazorca generalmente en dos partes y extraer la pulpa, las semillas se extraen en conjunto con la vena central de la mazorca, la cual posteriormente se extrae y se desecha.



Figura 1.3: Proceso de extracción manual de la pulpa de cacao
Fuente: Cacao Móvil [7]

A continuación, en la Figura 1.4 se puede apreciar una mazorca de cacao cortada a la mitad durante el proceso de extracción manual de la pulpa.



Figura 1.4: Fruto de cacao cortado a la mitad
Fuente: Cacao Móvil [7]

1.4.1.3 Extracción automática de pulpa de cacao

En la actualidad existen empresas dedicadas únicamente a la fabricación de equipo para el sector cacaotero, entre los cuales existen despulpadoras o quebradoras de mazorcas de cacao, secadoras de cacao, separadoras densimétricas, pre-limpiadoras y clasificadoras [8].

En general existen dos tipos de máquinas despulpadoras o quebradoras de mazorcas de cacao, rotatorias y basadas en la vibración, ambas con la misma función, separar la corteza de la pulpa de cada mazorca de cacao, en la sección del marco teórico se describen los equipos mencionados.

En ambos procedimientos se requiere un proceso de selección posterior con el objetivo de realizar una separación más minuciosa de la pulpa y pequeños pedazos de corteza residual, paso final a la obtención de pulpa de cacao.

1.4.2 INVESTIGACIÓN ACADÉMICA Y DESARROLLO TECNOLÓGICO

Actualmente existen pocas investigaciones académicas realizadas en países productores de cacao que tengan como objetivo desarrollar equipos con propósito similar al de la

máquina propuesta, así mismo son pocas las empresas que ofrecen maquinaria para el proceso de extracción de pulpa de cacao o de forma general para el sector cacaotero.

A continuación, se mencionan aspectos relevantes de las investigaciones realizadas con temas similares.

1.4.2.1 Máquina separadora de la semilla del cacao

Este proyecto fue realizado en el 2008, en la ciudad de Quito, Ecuador; siendo un proyecto de titulación de la facultad de ingeniería mecánica de la Escuela Politécnica Nacional, con el título “Diseño de una máquina separadora de la semilla del cacao” [9].

1.4.2.1.1 Resumen

El proyecto expone el diseño de una máquina que realiza un proceso similar al del prototipo propuesto. Extraer la pulpa del fruto de cacao, la máquina descrita y diseñada realiza un proceso en el cual extrae la pulpa de cada mazorca cortándola individualmente, de manera transversal y en los extremos. Como parte de la documentación se presentan datos relevantes sobre valores promedios de dimensiones, peso y fuerza mínima requerida de corte de las mazorcas de cacao, recopilados por el autor por medio de mediciones y ensayos de laboratorio.

1.4.2.1.2 Análisis

La investigación realizada profundiza en la obtención de datos característicos de la producción del cacao en diferentes regiones del Ecuador, así como de las variedades de cacao que se producen y las mazorcas de cacao que se cultivan, información utilizada en la etapa de diseño.

Los datos presentados en el documento elaborado del proyecto de titulación mencionado sirven como datos referenciales sobre las características de las mazorcas de cacao. Además, la máquina diseñada presenta una alternativa adicional a las máquinas encontradas en el mercado.

Dado que el proyecto solo se enmarca en el diseño de la máquina mas no en la construcción de la misma, los resultados obtenidos de la investigación realizada no permiten analizar el desempeño real de la máquina con el objetivo de obtener referencias acerca de su implementación.

1.4.2.1.3 Conclusiones obtenidas

Las conclusiones obtenidas por los autores se enfocan únicamente en el análisis teórico del desarrollo del proyecto de titulación. Como por ejemplo el supuesto de que la máquina diseñada estará en capacidad de extraer correctamente la pulpa del cacao sin afectar a la semilla debido al mecanismo de corte de la mazorca, o que la implementación de la máquina logra reducir considerablemente el tiempo de extracción de la pulpa en relación con el método de extracción manual y solo requiere de un operario para ser utilizada.

El desarrollo de este proyecto no brinda una prueba tangible sobre el cumplimiento del objetivo de la máquina diseñada, debido a la falta de construcción e implementación de la misma.

1.4.2.2 Prototipo experimental desmucilagador de cacao

Este proyecto fue realizado en el 2006, en la ciudad de Bucaramanga, Colombia; siendo un proyecto de titulación de la Facultad de Físico Mecánicas de la Universidad Industrial de Santander, con el título de “Diseño y construcción de un prototipo experimental desmucilagador de cacao” [5].

1.4.2.2.1 Resumen

El proyecto expone el diseño y construcción de una máquina desmucilagador del fruto de cacao. Extrae el mucílago o baba de cacao contenida en las mazorcas del cacao con el objetivo de utilizarla posteriormente en la producción de subproductos de cacao como lo son jaleas, bebidas fermentadas, jugos, entre otros.

El proyecto se enfoca en el desarrollo de tecnología que permita aprovechar los denominados residuos que se generan en la producción de cacao en grano, en la producción de productos alimenticios, y brinda un análisis general de las posibles

aplicaciones del mucílago de cacao. El diseño de la máquina se lo realiza considerando todas las condiciones de funcionamiento, como por ejemplo los requerimientos de materiales para equipos utilizados en la industria alimenticia.

1.4.2.2.2 Análisis

La investigación realizada profundiza en las posibles aplicaciones para el mucílago de cacao, el tipo de materia prima que será procesada y el producto obtenido de la máquina.

La información recopilada del proyecto brinda una mejor visión del proceso de desarrollo de maquinaria industrial en el área de producción de los derivados del cacao, además de exponer los requerimientos higiénicos en maquinaria que trabaja con productos alimenticios.

La etapa de diseño expone además información relevante en lo referente a diseño de máquinas industriales.

1.4.2.2.3 Conclusiones obtenidas

El autor después de analizar los resultados obtenidos del desarrollo del proyecto concluye que el proyecto realizado representa un punto de inicio para la industrialización del sector cacaotero, además destaca la funcionalidad obtenida de la máquina y la importancia de la interacción de diversos campos de la ingeniería en la realización del proyecto.

Además, menciona la facilidad de adquisición de los materiales utilizados y la construcción de la máquina como una de las ventajas de la misma, dando apertura a la posibilidad de producción en serie de la máquina diseñada e inclusive señala la posibilidad de implementar mejoras al diseño realizado.

El desarrollo de este proyecto brinda una idea sobre la creación de nueva maquinaria para el sector cacaotero, mas no una base sobre la que se pueda plantear el diseño de una máquina extractora de la pulpa de cacao como la propuesta, debido a los diferentes objetivos que poseen ambas máquinas.

1.5 MARCO TEÓRICO

A continuación, se detallan diferentes conceptos necesarios dentro del desarrollo del presente proyecto.

1.5.1 MAZORCA DE CACAO

La mazorca del cacao o fruto de cacao está compuesta por una cáscara gruesa que envuelve a la pulpa, mucílago y semillas. El número de semillas oscila entre 20 y 40 semillas por mazorca.

La geometría y color de las mazorcas varía de una a otra, características que depende principalmente de la variedad de cacao cultivado, en el Ecuador principalmente se cultiva el cacao fino de aroma y el CCN-51. La longitud de las mazorcas oscila entre 10 y 30 cm, y el ancho o diámetro oscila entre 7 y 15 cm. El color de la mazorca además de estar en función de la variedad de cacao también depende de la madures de cada mazorca, el color varía entre verde, amarillo, anaranjado, y rojo violeta. En la Figura 1.5 se puede observar diferentes tipos de mazorcas aún sin ser cosechadas.

Aproximadamente solo el 25% del peso bruto de una mazorca corresponde a la pulpa.



Figura 1.5: Tipos de mazorcas. (a) Fino de aroma (b) CCN-51
Fuente: Cacao Móvil [7]

En la Figura 1.6 se observa como referencia las dimensiones de una mazorca.



(a) (b)
 Figura 1.6: Mazorcas. (a) Diámetro, 14 cm (b) Longitud, 30 cm

1.5.2 PULPA DE CACAO

La pulpa del cacao se encuentra dentro de las mazorcas de cacao, conformada de mucílago o baba y la semilla o grano las cuales se encuentran unidas a la vena central de la mazorca, observadas en la Figura 1.7.



Figura 1.7: Pulpa de cacao
 Fuente: Cacao Móvil [7]

El mucílago es de color blanquecino y posee un sabor dulce, las semillas son aproximadamente de 18 a 30 mm de largo, 9 a 20 mm de diámetro promedio, en la Figura 1.8 se observa como referencia las dimensiones de una semilla de cacao.

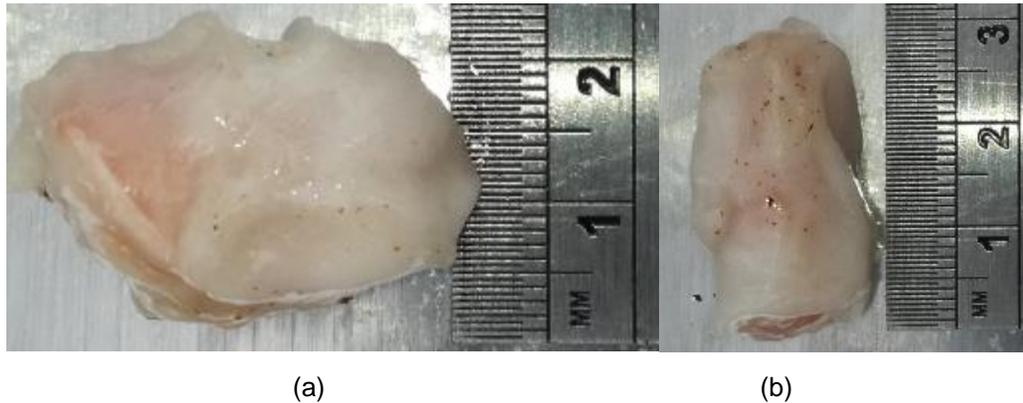


Figura 1.8: Semillas. (a) Diámetro, 20 mm. (b) Longitud, 30 mm.

1.5.3 MÁQUINA DESPULPADORA ROTATORIA

Las máquinas rotatorias existentes que realizan el proceso de extracción de pulpa de cacao emplean un cilindro hueco formado por una malla, el cual es impulsado por un motor. Donde por efecto del movimiento de rotación la pulpa es desprendida de la corteza de la mazorca, la cual ingresa por un extremo del cilindro hueco, y es expulsada fuera del cilindro por el otro extremo, mientras que la pulpa del cacao sale a través de los agujeros de la malla que forma el cilindro separador.

Expulsa la corteza por el extremo opuesto a donde ingresó, y la pulpa una vez que es expulsada del cilindro esta cae por acción de la gravedad hacia un recipiente para ser almacenada, en la Figura 1.9 se muestra un ejemplo de una máquina despulpadora rotatoria desarrollada en el Ecuador, con una capacidad según el fabricante de 600 mazorcas por hora [11].



Figura 1.9: Máquina despulpadora de cacao
Fuente: Nexo Local [11]

1.5.4 MÁQUINA DESPULPadora BASADA EN LA VIBRACIÓN

Las máquinas basadas en la vibración existente, se observa en la Figura 1.10 la máquina fabricada por la empresa Pinhalense [8], que realizan dicho proceso se basan en la acción del movimiento vibratorio de una malla hueca en la cual cae la mazorca fragmentada, pulpa y corteza, este efecto hace que la pulpa se desprenda y caiga por los agujeros en la malla, diseñada para admitir las semillas desprendidas, para ser transportada y luego procesada.

Las mazorcas son fragmentadas por un mecanismo triturador en la etapa de ingreso, lo cual permite desprender con facilidad la pulpa de la corteza, las que después de la etapa de separación, salen por lugares diferentes.

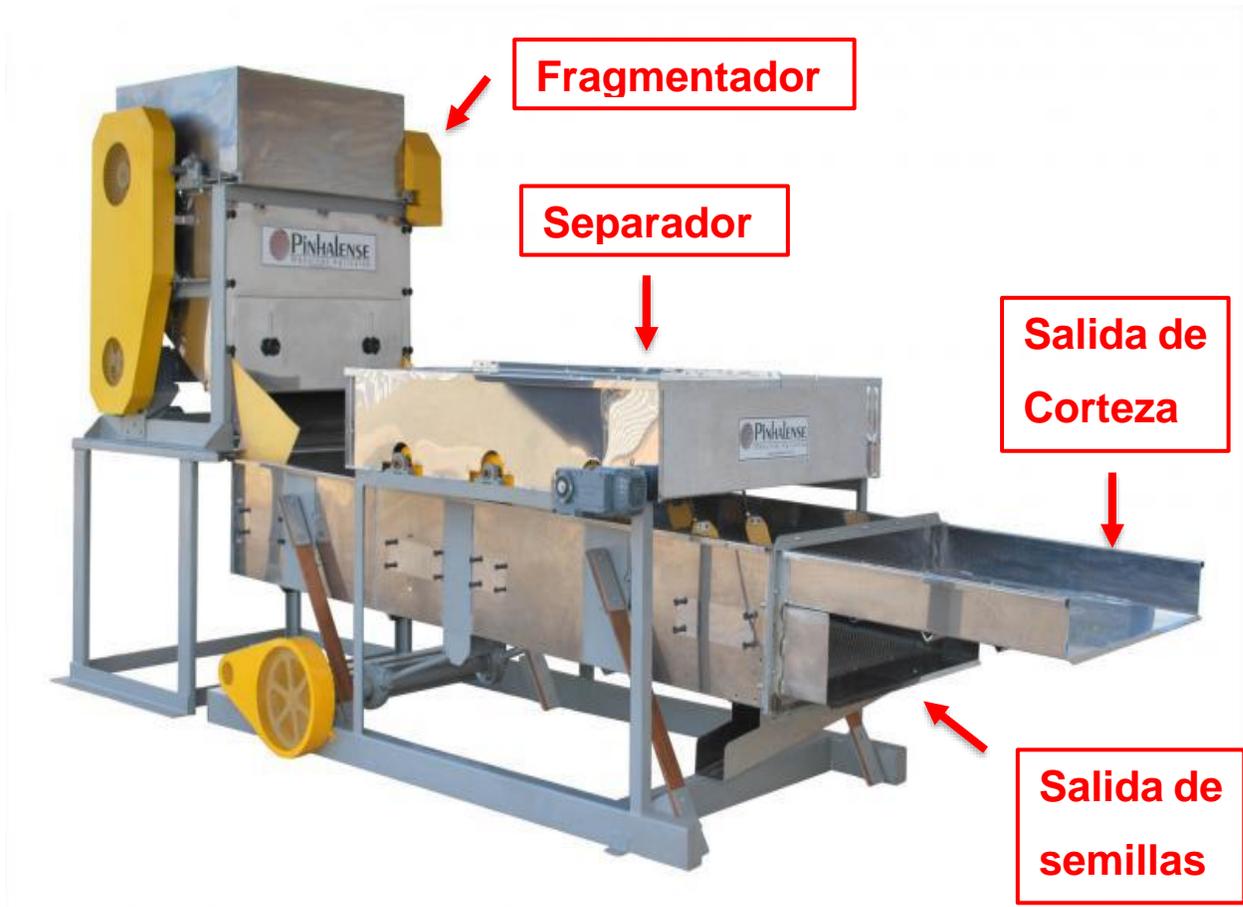


Figura 1.10: Máquina despulpadora basada en la vibración
Fuente: Pinhalense [8]

En el capítulo siguiente se resume el análisis realizado para la selección de alternativas, donde se considera la voz del usuario y la voz del ingeniero como base para la propuesta de las alternativas, y el método de residuo ponderados para la selección adecuada según los requerimientos de la máquina.

1.5.5 MADURACIÓN DE LAS MAZORCAS DE CACAO

Las mazorcas de cacao pueden madurar o fermentarse de manera prematura impidiendo que las semillas se puedan separar con facilidad de la corteza, dentro del proceso de extracción manual en la mayoría de los casos se desechan mazorcas completas cuando se encuentran las siguientes condiciones:

- Cacao Monilia [20]: la enfermedad de la moniliasis en el cacao causa que la mazorca se pudra o madure prematuramente, se distingue una mazorca enferma por el color verdoso de la corteza y en la mayoría de los casos por una capa blanquecina que aparece, ver Figura 1.11.



Figura 1.11: Mazorcas de cacao enfermo con moniliasis
Fuente: CropLife [20]

- Mazorcas Perforadas: animales silvestres dañan las mazorcas antes de que sean cosechadas, y permanecen en el árbol donde maduran de manera inusual, secando el mucílago.
- Mazorcas almacenadas: maduración posterior a la cosecha provoca que las semillas se pudran o fermenten antes de ser extraídas, reduciendo la cantidad de mucílago y la viscosidad del mismo.

Cuando la mazorca de cacao se encuentra de alguna forma afectada por la moniliasis o perforada por animales silvestres, se desecha para evitar contaminar al producto en buen estado. Por el contrario, en el caso de que las semillas empiecen a fermentarse dentro de la mazorca de manera natural no afectan al producto en buen estado.

CAPÍTULO II

ANÁLISIS Y SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS

En el presente capítulo se plantea las alternativas, además de realizar el correspondiente análisis y selección para elegir según los requerimientos planteados la mejor opción sobre la cual se basará el diseño y construcción de la máquina.

2.1 REQUERIMIENTOS

2.1.1 EXPLICACIÓN GENERAL DEL PROCESO

La máquina para la extracción de la pulpa de cacao consta de los siguientes procesos, fragmentación y separación de corteza y pulpa. Cada uno de estos posee requerimientos específicos descritos a continuación, así como de forma general se describe la capacidad de procesamiento esperada de la máquina.

2.1.2 CAPACIDAD DE PROCESAMIENTO DE LA MÁQUINA

Los requerimientos para la etapa de fragmentación de la máquina están dados en función de la capacidad solicitada de procesamiento de mazorcas de cacao, por tamaño y unidades procesadas por minuto.

Tamaño de mazorcas a procesar:

- Longitud: 20 cm.
- Diámetro: 8cm.

Capacidad máxima de procesamiento requerida:

- 6 mazorcas por minuto.

2.1.3 FRAGMENTACIÓN DE MAZORCAS

El proceso tiene como objetivo el fragmentar las mazorcas de cacao en pedazos que permitan posteriormente la separación de la pulpa y la corteza sin afectar la integridad de las semillas. Es decir, el sistema de fragmentación debe garantizar que los cortes realizados en cada mazorca no lastimen a las semillas total ni parcialmente, además garantizar que los fragmentos de corteza residual sean de menor tamaño que los fragmentos residuales dejados durante una cosecha manual.

Objetivos del proceso de fragmentación:

- Cuidar la integridad de las semillas de cacao en el proceso.
- Garantizar fragmentos residuales de corteza de menor tamaño que los residuos de una cosecha manual.

2.1.4 SEPARACIÓN CORTEZA - PULPA

Durante el proceso de separación corteza – pulpa, se busca extraer toda la pulpa contenida en cada mazorca evitando en lo posible la introducción de trozos de corteza, y extrayendo la totalidad de las semillas de cacao, además en el proceso se requiere la implementación de materiales adecuados para el contacto con la pulpa, cuidando la integridad del producto final.

Objetivos del proceso de separación:

- Extraer completamente la pulpa, mucílago y semillas contenidas en cada mazorca.
- Evitar en lo posible la introducción de residuos de corteza producto del proceso de fragmentación.

2.2 ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

Con base en los requerimientos de la máquina, previamente especificados, se procede a realizar el análisis en forma general de especificaciones técnicas de la máquina. Para lo cual se considerará las opiniones del usuario, según el Anexo A, tanto como las del

ingeniero, este análisis servirá como base para el posterior diseño de todos los componentes de la máquina.

2.2.1 CASA DE LA CALIDAD

A continuación, se explican cuáles son las demandas del usuario y las propuestas del ingeniero para dar solución al problema existente, sobre lo cual se basa el diseño de la máquina.

2.2.1.1 Voz del usuario

El usuario será la persona que utilizará la máquina, motivo por el cual resulta de gran relevancia para el diseño de la misma conocer sus requerimientos y necesidades. Para obtener la información presentada a continuación se realizaron visitas técnicas a 3 haciendas productoras de cacao en el sector de La Troncal, además de obtener información del centro de acopio de cacao de Nestlé de la zona, en el Anexo A se muestra la información recabada durante las visitas. Los requerimientos que se obtuvieron como resultado de dichas visitas se listan a continuación:

- Fácil mantenimiento.
- Tamaño compacto.
- Larga vida de la máquina.
- Precio accesible.
- Fácil alimentación de mazorcas.
- Accesibilidad para retirar la pulpa del cacao procesada.
- Corteza residual expulsada en fragmentos pequeños.

2.2.1.2 Voz del ingeniero

Una vez conocidos los requerimientos del cliente respecto a la máquina, es deber del ingeniero proponer soluciones para cumplir con las demandas indicadas, estableciendo parámetros técnicos que satisfagan al cliente para cumplir con los objetivos propuestos. A continuación, se listan las especificaciones técnicas propuestas por el ingeniero:

- Mantenibilidad.
- Dimensiones.
- Robustez.
- Materiales.
- Alimentación al sistema de fragmentación.
- Sistema de almacenamiento de pulpa.
- Sistema de fragmentación.

Con la voz del usuario junto con la voz del ingeniero se procede a realizar la casa de la calidad y analizar los resultados obtenidos de la misma.

2.2.1.3 Análisis y conclusiones de la casa de la calidad

A continuación, en la Tabla 2.1 se muestra la casa de la calidad desarrollada en base a la información recopilada.

Tabla 2.1: Casa de la calidad

Voz del usuario Necesidades y deseos del usuario		Voz del ingeniero							Competencia	
		Mantenibilidad	Dimensiones	Robustez	Materiales	Alimentación al sistema de fragmentación	Sistema de almacenamiento	Sistema de fragmentación	Pinhalense	Mecánica Quevedo
	Ponderación	2.58	2.50	1.00	1.92	2.25	2.25	1.67		
Fácil mantenimiento	+	+	○	○	●	●	●	●	●	○
Tamaño compacto	±	○	±	-	●	+	+	-	±	○
Larga vida	●	●	+	●	-	●	●	●	+	-
Precio accesible	●	-	●	○	○	○	○	○	-	○
Fácil alimentación de mazorcas	○	○	+	-	●	±	-	-	±	○
Accesibilidad para retirar la pulpa	●	○	+	-	●	-	±	-	●	-
Corteza residual en fragmentos pequeños	○	○	-	-	-	-	-	±	-	-
Ponderación Absoluta		1128	2830	600	567	1326	1488	906	Ponderación	
Ponderación Relativa		1.989	4.991	1.058	1	2.339	2.624	1.598	10	±
Prioridad		4	1	6	7	3	2	5	8	+
									6	●
									3	○
									1	-

Los resultados de la ponderación realizada indica que las dimensiones de la máquina es el aspecto más importante para tener en consideración, de mayor prioridad para el

diseño. A continuación, con gran importancia está el diseño del sistema de almacenamiento de la pulpa y la fácil alimentación de mazorcas al sistema de fragmentación.

Se debe considerar que, para obtener un producto competitivo en relación con la competencia existente, respecto a la empresa Pinhalense, que produce la máquina descrita en la Sección 1.5.4, se requiere diseñar una máquina económicamente más accesible. Y respecto a la mecánica Quevedo, que produce la máquina descrita en la Sección 1.5.3, se necesita mejorar la accesibilidad para retirar la pulpa, aumentar la vida útil y expulsar la corteza residual en fragmentos más pequeños.

Además, en las necesidades del usuario se observa que existe una correlación que se debe tomar en cuenta para el diseño de la máquina entre la vida útil y el precio; la accesibilidad para retirar la pulpa y la expulsión de la corteza en fragmentos pequeños tienen correlación en la obtención de una máquina que mejore las características de la competencia.

2.2.2 FORMULACIÓN DE ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

A continuación, la Tabla 2.2 se listan las especificaciones técnicas necesarias como base para el diseño de la máquina para extraer la pulpa del fruto del cacao.

Las abreviaturas utilizadas en la Tabla 2.2 se listan a continuación:

- C = Cliente.
- I = Ingeniero.
- R = Requerimiento o especificación necesaria.
- D = Deseo o especificación conveniente.

Tabla 2.2: Especificaciones técnicas propuestas para el diseño de la máquina

Empresa: PRODEMAQ		Producto: Máquina para extraer la pulpa del fruto del cacao		Fecha inicial: 10/02/16
Diseñador: César Augusto Mayacela Guerra				Fecha última revisión: 30/06/16
		Página 1		
Especificaciones				
Concepto	Fecha	Propone	R/D	Descripción
Función	30/04/2016	C + I	R	Fragmentar las mazorcas de cacao y expulsar la corteza en fragmentos pequeños
		C	R	Separar la corteza y la pulpa de cacao
Capacidad	30/04/2016	C	R	Procesar mazorcas de hasta 20 cm de largo y 8 cm de diámetro
		C + I	R	Procesar hasta 6 mazorcas por minuto
Material	30/04/2016	C + I	R	Resistencia a la acidez del mucílago de cacao
Automatización	30/04/2016	C	R	El ingreso de mazorcas, extracción de las semillas separadas, encendido y apagado de la máquina deben ser controlados por el operador
		C	R	Fragmentar las mazorcas de cacao y separar pulpa y corteza de forma automática.
Energía	30/04/2016	C	R	Utilizar energía eléctrica
Mantenimiento	30/04/2016	C	D	De fácil mantenimiento preventivo

2.3 DISEÑO CONCEPTUAL

A continuación, basado en las especificaciones y conclusiones de la casa de la calidad, se describen en varios módulos las diferentes etapas del proceso de extracción de la pulpa de cacao. Asimismo, se plantean diferentes soluciones en forma general para cada uno de los módulos descritos.

2.3.1 ANÁLISIS FUNCIONAL

Para entender de mejor manera el funcionamiento de la máquina diseñada se describen a continuación en dos niveles las generalidades, y a su vez se divide en módulos el nivel

1, los cuales se detallan con el objetivo de comprender el funcionamiento general de cada etapa de la máquina para extraer la pulpa del fruto del cacao.

2.3.1.1 Nivel 0

En el Nivel 0 se define de forma general el funcionamiento general de máquina a ser diseñada, a continuación, se listan las entradas y salidas que tendrá la máquina, así como se especifica cuál es el proceso que se llevará a cabo.

La materia prima que se procesa en la máquina son mazorcas de cacao, se utiliza energía de la red eléctrica como fuente principal para el funcionamiento de la máquina, y los modos de funcionamiento de la máquina se accionan por medio de señales de control.

Entradas:

- Mazorca de cacao.
- Energía eléctrica.
- Señales de control.

El proceso principal para el cual se diseñará la máquina es la extracción de la pulpa contenida dentro de las mazorcas de cacao.

Proceso:

- Máquina para extraer la pulpa del fruto del cacao

Las salidas de la máquina serán la pulpa, conformada por el mucílago y las semillas del cacao, y la corteza en fragmentos pequeños, residuo del proceso.

Salidas:

- Pulpa, mucílago y semillas.
- Corteza en fragmentos pequeños.

En la Figura 2.1 se muestra la representación del Nivel 0.

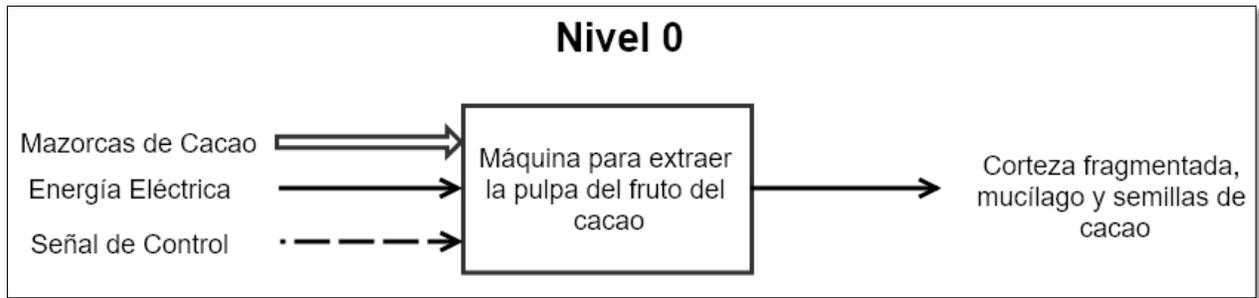


Figura 2.1: Nivel 0, Máquina despulpadora de cacao

2.3.1.2 Nivel 1

En el Nivel 1 se muestra con más detalle los procesos de la máquina en cada uno de sus módulos, se desglosa en 4 módulos el funcionamiento de la máquina, módulo de control, fragmentación, separación y por último el PLC y HMI. En la Figura 2.2 se puede observar la distribución de los módulos que forman el Nivel 1.

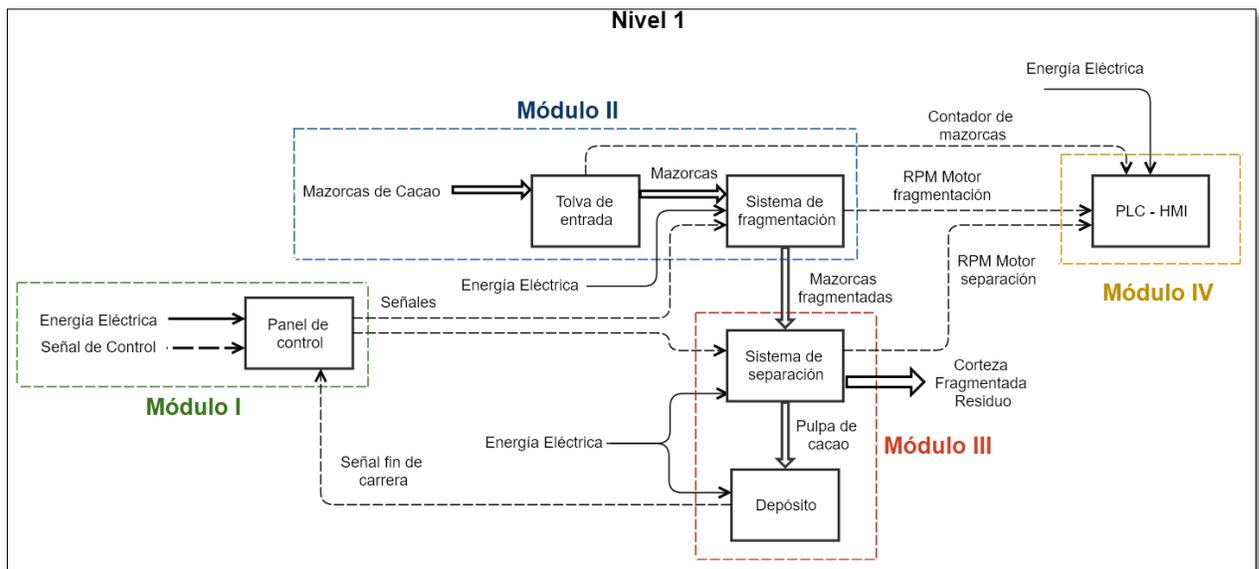


Figura 2.2: Nivel 1, Máquina despulpadora de cacao

A continuación, se describen cada uno de los módulos mostrados en la Figura 2.2.

2.3.1.2.1 Módulo I: Sistema de control

El primer módulo de la máquina corresponde al sistema de control que comanda a todos los demás, en el cual se procesan todas las señales y se muestra información referente

a la máquina. A continuación, se listan las entradas y salidas del módulo I, el cual tiene como componente principal el panel de control de la máquina.

Entradas:

- Energía eléctrica.
- Señales de control del operario.
- Señal del sensor del depósito.

Salidas:

- Señal de arranque o paro del sistema de fragmentación.
- Señal de arranque o paro del sistema de separación.
- Indicación de seguridad del sensor del depósito.

2.3.1.2.2 Módulo II: Sistema de fragmentación

El segundo módulo de la máquina corresponde al sistema de fragmentación, en esta etapa las mazorcas enteras ingresan para ser procesadas, se fragmentan y abren, con el objetivo de permitir separar la pulpa y la corteza posteriormente. A continuación, se listan las entradas y salidas del módulo II.

Entradas:

- Energía eléctrica.
- Mazorcas enteras.
- Señal de control.

Salida:

- Mazorcas fragmentadas en partes pequeñas.

2.3.1.2.3 Módulo III: Sistema de separación

El tercer módulo de la máquina corresponde al sistema de separación y depósito de la pulpa de cacao. En esta etapa las mazorcas fragmentadas ingresan para que se pueda separar la pulpa, mucílago y semillas de cacao de la corteza, y posteriormente se almacenada la pulpa en el depósito inferior. A continuación, se listan las entradas y

salidas del módulo III, el cual tiene como componente principal el sistema de separación y depósito.

Entradas:

- Energía eléctrica.
- Señal de control.
- Mazorcas fragmentadas.

Salidas:

- Pulpa, mucílago y semillas.
- Corteza fragmentada.
- Señal del sensor del depósito.

2.3.1.2.4 Módulo IV: PLC - HMI

El cuarto módulo de la máquina corresponde al PLC y HMI, en esta etapa se procesa la información recopilada de los sensores implementados para medir la velocidad de rotación en el sistema de fragmentación y separación. Se generan alertas visuales en caso de fallas y se contabiliza el número de mazorcas fragmentadas. A continuación, se listan las entradas y salidas del módulo IV.

Entradas:

- Energía eléctrica.
- Señal del sensor de conteo de mazorcas.
- Señal del sensor de velocidad del motor de fragmentación.
- Señal del sensor de velocidad del motor de separación.

Salidas:

- Alertas visuales del proceso.
- Información sobre producto procesado.
- Velocidad de cada sistema.

2.3.1.3 Opciones para los módulos

A continuación, se plantean diferentes opciones de manera general, que se consideran viables para cumplir los requerimientos del cliente y las propuestas por parte del ingeniero, para dar una solución a la implementación de cada uno de los módulos descritos en la Sección 2.3.1.2.

2.3.1.3.1 Opciones Módulo I: Sistema de control principal

A continuación, se listan las diferentes opciones para la construcción de cada parte que conforma el Módulo I, correspondiente al sistema de control de la máquina.

Encendido principal de la máquina:

En la Tabla 2.3 se muestran las opciones para el encendido principal de la máquina, parte del Módulo I que tiene como objetivo el permitir el paso de corriente eléctrica para energizar todos los sistemas de la máquina.

Tabla 2.3: Opciones para el encendido principal de la máquina

Descripción	Ventajas	Desventajas
<p data-bbox="266 1230 578 1262">Interruptor basculante</p>  <p data-bbox="293 1457 553 1514">Figura 2.3: Interruptor basculante</p>	<p data-bbox="678 1331 976 1419">Bajo costo y Fácil implementación</p>	<p data-bbox="1094 1331 1409 1419">No provee de ninguna protección</p>
<p data-bbox="305 1549 539 1633">Interruptor termomagnético</p>  <p data-bbox="293 1856 553 1913">Figura 2.4: Interruptor termomagnético</p>	<p data-bbox="646 1667 1008 1801">Provee de una protección a sobre corrientes para la máquina</p>	<p data-bbox="1062 1688 1446 1776">Alto costo con referencia al interruptor basculante</p>

Interfaz de usuario:

En la Tabla 2.4 se muestran las opciones para la interfaz del usuario de la máquina, parte del módulo I, que tiene como objetivo permitir al usuario interactuar con la máquina, enviando señales de control y modificando diferentes parámetros de la misma.

Tabla 2.4: Opciones para la interfaz de usuario

Descripción	Ventajas	Desventajas
<p>Pulsadores</p>  <p>Figura 2.5: Pulsadores</p>	<p>Bajo costo, Fácil implementación y no requieren de cuidados especiales para ser utilizados</p>	<p>Limitada interacción del usuario con la máquina</p>
<p>TFT – LCD táctil</p>  <p>Figura 2.6: TFT - LCD táctil</p>	<p>Mejor capacidad del usuario para interactuar con la máquina y permite visualizar información</p>	<p>Alto costo, Dificultad de implementación y requiere de mayor cuidado para ser utilizada por parte del usuario</p>

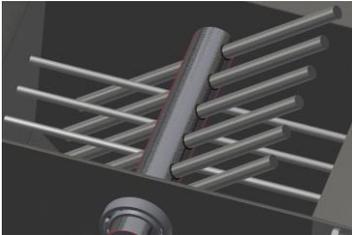
2.3.1.3.2 Opciones Módulo II: sistema de fragmentación

A continuación, se listan las diferentes opciones para la construcción de cada parte que conforma el módulo II, correspondiente al sistema de fragmentación de la máquina.

Fragmentación de mazorcas:

En la Tabla 2.5 se muestran las opciones para la etapa de fragmentación de mazorcas de la máquina, parte del módulo II, que sirve para fragmentar las mazorcas de cacao y posteriormente separar la corteza y la pulpa.

Tabla 2.5: Opciones para el sistema de fragmentación de mazorcas

Descripción	Ventajas	Desventajas
<p>Cuchillas con espaciamiento</p>  <p>Figura 2.7: Rodillos dentados</p>	<p>No requieren ser afilados, pero se puede añadir un filo cortante, fácil desmontaje y mantenimiento</p>	<p>Requieren de mayor fuerza para fragmentar las mazorcas</p>
<p>Cuchillas trituradoras</p>  <p>Figura 2.8: Cuchillas</p>	<p>Debido a que poseen un filo cortante, requieren menor fuerza para cortar mazorcas.</p>	<p>Requieren ser afiladas, y por la cercanía entre cuchillas afectarían la integridad de la pulpa</p>

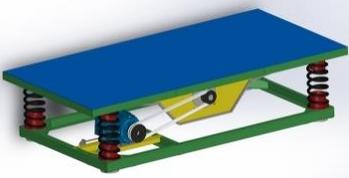
2.3.1.3.3 Opción Módulo III: Sistema de separación y depósito

A continuación, se listan las diferentes opciones para la construcción de cada parte que conforma el módulo III, correspondiente al sistema de separación y depósito de la máquina.

Sistema de separación:

En la Tabla 2.6 se muestran las opciones para la etapa de separación de pulpa y corteza de la máquina, parte del módulo III que sirve para separar la pulpa, mucílago y semillas, de la corteza de cacao, propósito para el cual se diseña la máquina.

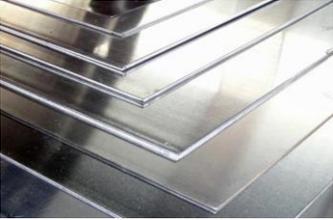
Tabla 2.6: Opciones para el sistema de separación de pulpa y corteza

Descripción	Ventajas	Desventajas
<p data-bbox="305 394 539 426">Cilindro giratorio</p>  <p data-bbox="256 716 589 747">Figura 2.9: Cilindro giratorio</p>	<p data-bbox="651 411 1003 716">Poco ruido, fácil mantenimiento, menor cantidad de elementos mecánicos móviles, poca vibración transmitida a la máquina.</p>	<p data-bbox="1065 464 1446 663">Difícil ingreso de mazorcas fragmentadas, la pulpa es expulsada por todo el perímetro del cilindro</p>
<p data-bbox="313 789 531 821">Mesa vibratoria</p>  <p data-bbox="256 1041 589 1073">Figura 2.10: Mesa vibratoria</p>	<p data-bbox="643 831 1019 1020">Fácil ingreso de mazorcas fragmentadas, la pulpa es expulsada por un solo lado de la mesa.</p>	<p data-bbox="1068 884 1438 968">Difícil mantenimiento, alto ruido</p>

Depósito:

En la Tabla 2.7 se muestran las opciones para el material del depósito de pulpa, parte del módulo III.

Tabla 2.7: Opciones para el depósito de la pulpa

Descripción	Ventajas	Desventajas
<p data-bbox="305 394 539 422">Acero Inoxidable</p>  <p data-bbox="250 684 596 711">Figura 2.11: Acero inoxidable</p>	<p data-bbox="643 478 1011 617">Resistencia a la acidez del mucílago de cacao, mejor presentación visual.</p>	<p data-bbox="1062 533 1446 560">Material pesado, alto costo</p>
<p data-bbox="282 762 565 789">Aluminio Corrugado</p>  <p data-bbox="297 1020 550 1077">Figura 2.12: Aluminio corrugado</p>	<p data-bbox="643 821 1011 1064">Resistencia a la acidez del mucílago de cacao, material liviano, de alta resistencia mecánica y bajo costo</p>	<p data-bbox="1062 900 1446 928">Visualmente poco atractivo</p>

2.3.1.3.4 Opción Módulo IV: PLC - HMI

A continuación, se listan las diferentes opciones para la construcción de cada parte que conforma el módulo IV, correspondiente al PLC y HMI.

PLC:

En la Tabla 2.8 se muestran dos opciones disponibles para el PLC y HMI, debido a que ambos equipos deben ser compatibles entre sí la comparación se realiza en conjunto, la función de este módulo es en el PLC procesar los datos de los sensores y calcular los valores requeridos, y en el HMI mostrar la información obtenida.

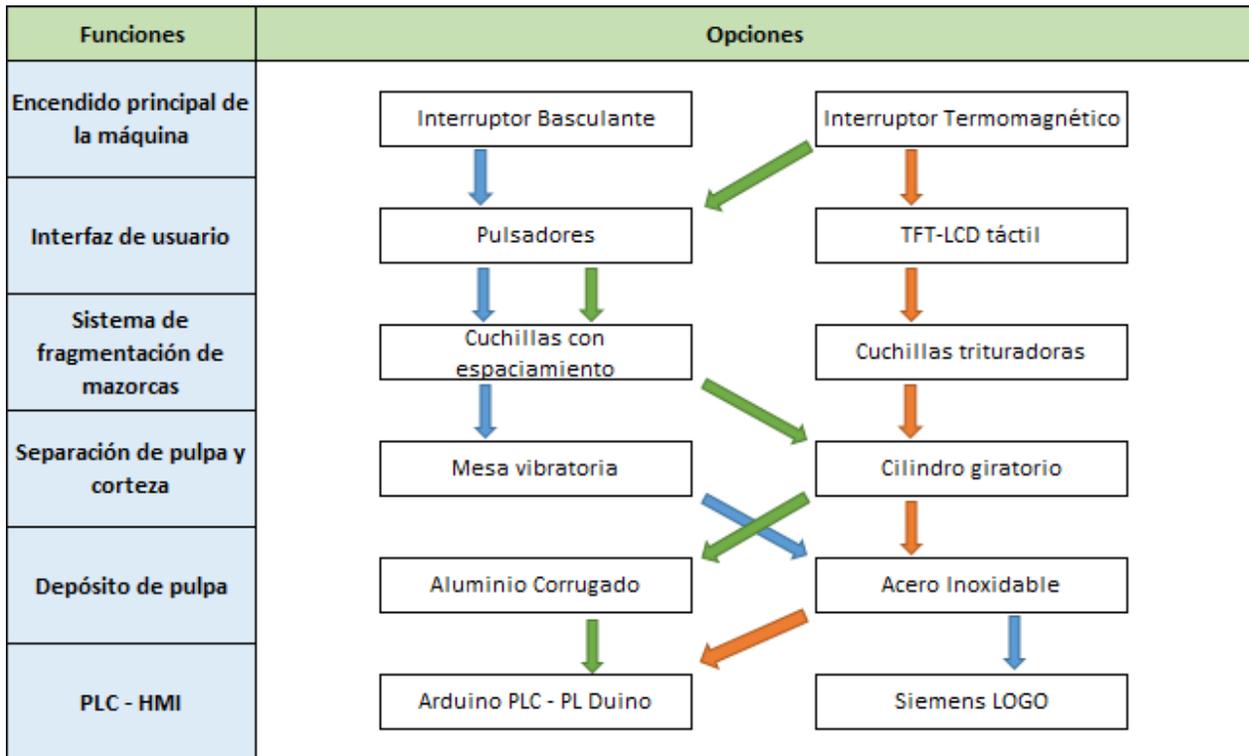
Tabla 2.8: Opciones para el PLC

Descripción	Ventajas	Desventajas
<p data-bbox="261 394 610 426">Arduino PLC – PL Duino</p>  <p data-bbox="310 680 565 711">Figura 2.13: PL Duino</p>	<p data-bbox="667 422 1031 674">Bajo costo, software libre, pantalla a color integrada de 2.4", 8 entradas digitales, 6 salidas tipo relé y 8 salidas digitales</p>	<p data-bbox="1078 501 1446 590">Falta de documentación y referencias.</p>
<p data-bbox="326 753 548 785">Siemens LOGO</p>  <p data-bbox="269 1108 604 1140">Figura 2.14: Siemens LOGO</p>	<p data-bbox="721 873 976 1010">Bajo costo, amplia documentación y referencias.</p>	<p data-bbox="1073 842 1451 1041">Software de programación costoso, 4 entradas, 4 salidas, Pantalla instalada LCD de 1",</p>

2.3.2 MATRIZ MORFOLÓGICA

A partir de las opciones planteadas para cada módulo se desarrolla la matriz morfológica, en la Tabla 2.9 se detallan de forma secuencial las posibles combinaciones que se plantean para el diseño y construcción de la máquina. Cada una de las tres opciones planteadas cumplen con el objetivo principal de la máquina.

Tabla 2.9: Matriz morfológica



Las combinaciones de la Tabla 2.9 se listan a continuación:

- **Alternativa I (Azul):** Interruptor basculante – Pulsadores – Cuchillas con espaciamento – Mesa Vibratoria – Acero inoxidable – Siemens LOGO.
- **Alternativa II (Tomate):** Interruptor termomagnético – TFT – LCD táctil – Cuchillas trituradoras – Cilindro giratorio – Acero inoxidable – Arduino PLC PL Duino.
- **Alternativa III (Verde):** Interruptor termomagnético – Pulsadores – Cuchillas con espaciamento – Cilindro giratorio – Aluminio corrugado – Arduino PLC PL Duino.

2.4 MATRIZ DE RESIDUOS PONDERADOS

Planteadas las soluciones de la matriz morfológica se procede a realizar el análisis por residuos ponderados para seleccionar la mejor alternativa sobre la cual se diseña la máquina para extraer la pulpa del fruto de cacao.

2.4.1 CRITERIOS DE PONDERACIÓN

Los criterios de evaluación utilizados para seleccionar la mejor alternativa se listan a continuación:

- **Fiabilidad:** Se necesita tener en consideración que la máquina cumpla en cada aspecto con los requerimientos indicados del proceso. Principalmente cuidar de la integridad de las semillas y asegurar una adecuada separación de la corteza y la pulpa.
- **Costo:** se busca un diseño que permita minimizar el costo de producción de la máquina, sin afectar su propósito.
- **Mantenibilidad:** Se debe considerar el fácil mantenimiento y fácil reemplazo de piezas y mecanismos, para aumentar los beneficios de la máquina y mejorar su competitividad.
- **Fácil limpieza:** Implica el considerar una máquina que facilite la limpieza de las partes en contacto con la pulpa o corteza, para asegurar la sanidad en el proceso de extracción de la pulpa de cacao durante la vida útil de la máquina.
- **Capacidad de procesamiento:** debe tener la capacidad de procesar hasta 6 mazorcas por minuto.

A continuación, se realiza la ponderación de criterios y de cada una de las alternativas en relación con los criterios utilizados para seleccionar la alternativa que brinde la mejor solución para el diseño de la máquina.

2.4.2 PONDERACIÓN DE LOS CRITERIOS DE EVALUACIÓN

Se definió la importancia de cada criterio evaluando su impacto en el diseño de la máquina para lo cual se consideró la fiabilidad y capacidad de procesamiento como de

mayor importancia, seguido de la facilidad de limpieza de la máquina y a continuación la mantenibilidad de la misma, por último, su costo, En la Tabla 2.10 se puede observar la evaluación del peso específico de cada criterio.

Tabla 2.10: Evaluación del peso específico de cada criterio

	Fiabilidad	Capacidad	Fácil Limpieza	Mantenibilidad	Costo	$\Sigma + 1$	Ponderación
Fiabilidad		0.5	1	1	1	4.5	30.0%
Capacidad	0.5		1	1	1	4.5	30.0%
Fácil Limpieza	0	0		1	1	3	20.0%
Mantenibilidad	0	0	0		1	2	13.3%
Costo	0	0	0	0		1	6.7%
Fiabilidad = Capacidad > Fácil limpieza > Mantenibilidad > Costo					Total	15	100%

Con esta ponderación se procede a evaluar cada una de las alternativas en función de cada criterio.

2.4.3 PONDERACIÓN DE LAS ALTERNATIVAS EN FUNCIÓN DE LA FIABILIDAD

En referencia a la fiabilidad para cumplir con los objetivos de la máquina se consideró que la alternativa III es la que, según sus características, ofrece la mejor fiabilidad, debido a que las cuchillas con espaciamiento aseguran que la corteza se expulse en fragmentos pequeños sin lastimar las semillas; el cilindro giratorio tiene un bajo ruido y permite un fácil mantenimiento. La alternativa I tiene la menor fiabilidad, debido a que la mesa vibratoria complica el mantenimiento y el acero inoxidable aumenta considerablemente el peso de la bandeja de almacenamiento respecto al aluminio. En la Tabla 2.11 se puede observar la evaluación de alternativas en función de la fiabilidad

Tabla 2.11: Evaluación de alternativas en función de la fiabilidad

Fiabilidad	Alternativa I	Alternativa II	Alternativa III	$\Sigma + 1$	Ponderación
Alternativa I		0	0	1	16.7%
Alternativa II	1		0	2	33.3%
Alternativa III	1	1		3	50.0%
Alternativa III > Alternativa II > Alternativa I			Total	6	100%

2.4.4 PONDERACIÓN DE LAS ALTERNATIVAS EN FUNCIÓN DE LA CAPACIDAD

En referencia a la capacidad de procesamiento se consideró que la alternativa II y III pueden ofrecer la misma capacidad de procesamiento, la cual es mayor a la capacidad que ofrece la alternativa I, debido a que el cilindro giratorio separa la pulpa de la corteza con mayor velocidad. Además, el tipo de PLC de las alternativas II y III tiene una mayor cantidad de entradas y salidas lo cual permite procesar más información. En la Tabla 2.12 se puede observar la evaluación de alternativas en función de la capacidad de procesamiento.

Tabla 2.12: Evaluación de alternativas en función de la capacidad

Capacidad	Alternativa I	Alternativa II	Alternativa III	$\Sigma + 1$	Ponderación
Alternativa I		0	0	1	16.7%
Alternativa II	1		0.5	2.5	41.7%
Alternativa III	1	0.5		2.5	41.7%
Alternativa II = Alternativa III > Alternativa I			Total	6	100%

2.4.5 PONDERACIÓN DE LAS ALTERNATIVAS EN FUNCIÓN DE LA FACILIDAD DE LIMPIEZA

En referencia a la facilidad de limpieza se consideró que la alternativa II es la que mayor facilidad de limpieza posee, por el espaciamiento de las cuchillas y el cilindro giratorio permite un lavado más sencillo. En segundo lugar, la alternativa III, la cual por las cuchillas trituradoras se complica relativamente el lavado y por último la que más difícil de limpiar resulta es la alternativa I, debido a la dificultad de mantenimiento de la mesa vibratoria. En la Tabla 2.13 se puede observar la evaluación de alternativas en función de la facilidad de limpieza.

Tabla 2.13: Evaluación de alternativas en función de la facilidad de limpieza

Fácil Limpieza	Alternativa I	Alternativa II	Alternativa III	$\Sigma + 1$	Ponderación
Alternativa I		0	0	1	16.7%
Alternativa II	1		1	3	50.0%
Alternativa III	1	0		2	33.3%
Alternativa II > Alternativa III > Alternativa I			Total	6	100%

2.4.6 PONDERACIÓN DE LAS ALTERNATIVAS EN FUNCIÓN DE LA MANTENIBILIDAD

En referencia a la mantenibilidad se consideró que la alternativa III es la que según sus características ofrece mejores características de mantenibilidad, por la facilidad para reemplazar las cuchillas y la malla del hexágono, seguida de la alternativa II, donde se complica el reemplazo de las cuchillas trituradoras, y por último la alternativa I, debido a la dificultad para reemplazar la malla de la mesa vibratoria. En la Tabla 2.14 se puede observar la evaluación de alternativas en función de la mantenibilidad.

Tabla 2.14: Evaluación de alternativas en función de la mantenibilidad

Mantenibilidad	Alternativa I	Alternativa II	Alternativa III	$\Sigma + 1$	Ponderación
Alternativa I		0	0	1	17%
Alternativa II	1		0	2	33%
Alternativa III	1	1		3	50%
Alternativa III > Alternativa II > Alternativa I			Total	6	100%

2.4.7 PONDERACIÓN DE LAS ALTERNATIVAS EN FUNCIÓN DEL COSTO

En referencia al costo estimado de la máquina se consideró que la alternativa I es la que posee el menor costo, debido a que no requiere de un sistema de transmisión de potencia para la mesa vibratoria y un motor desbalanceado es menos costoso que un motorreductor. La alternativa III tiene un costo intermedio debido a que el sistema de control es electromecánico, pero utiliza un cilindro giratorio que requiere de un motorreductor. Mientras que la alternativa II posee el mayor costo, por considerar un sistema de control con pantalla Táctil y además un cilindro giratorio. En la Tabla 2.15 se puede observar la evaluación de alternativas en función del costo estimado de la máquina.

Tabla 2.15: Evaluación de alternativas en función del costo

Costo	Alternativa I	Alternativa II	Alternativa III	$\Sigma + 1$	Ponderación
Alternativa I		1	1	3	50%
Alternativa II	0		0	1	17%
Alternativa III	0	1		2	33%
Alternativa I > Alternativa III > Alternativa II			Total	6	100%

2.4.8 CONCLUSIÓN DEL MÉTODO DE RESIDUOS PONDERADOS

Como se puede observar en la Tabla 2.16, según el análisis por residuos ponderados realizado se determina que la alternativa III, la cual se conforma de un interruptor termomagnético, pulsadores, cuchillas con espaciamento, cilindro giratorio y aluminio corrugado es la mejor opción para el diseño de la máquina para extraer la pulpa del cacao.

Tabla 2.16: Conclusión de la selección de alternativas

Conclusión	Fiabilidad	Costo	Fácil Limpieza	Mantenibilidad	Costo	Total
Alternativa I	0.050	0.050	0.033	0.022	0.033	0.189
Alternativa II	0.100	0.125	0.100	0.044	0.022	0.392
Alternativa III	0.150	0.125	0.067	0.067	0.011	0.419

En el siguiente capítulo se resumen los cálculos necesarios para el diseño de las partes y elementos de la máquina, donde se realizan las consideraciones necesarias que permitan cumplir con los requerimientos detallados en el Capítulo II.

CAPÍTULO III

DISEÑO MECATRÓNICO

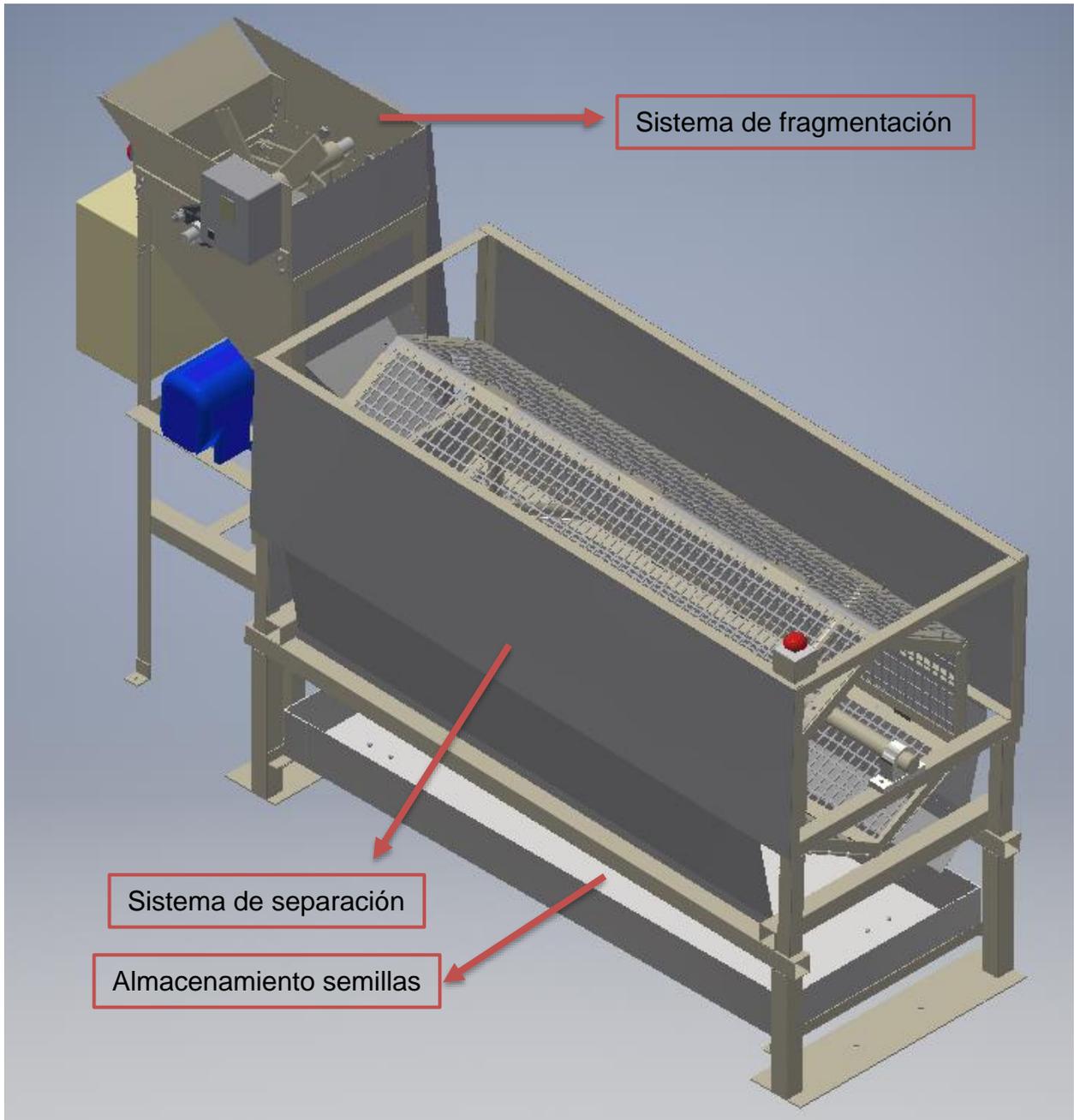


Figura 3.1: Máquina para la extracción de semillas de cacao

3.1 DISEÑO MECÁNICO

A continuación, se encuentra especificado lo referente al diseño mecánico de la estructura de la máquina de la Figura 3.1, cada una de sus etapas, empezando por la entrada de las mazorcas de cacao hasta el sistema de separación.

Principalmente, se considera la capacidad de procesamiento que el cliente requiere, la cual es:

Tamaño de mazorcas a procesar:

- Longitud: 20 cm.
- Diámetro: 8 cm.

Capacidad máxima de procesamiento requerida:

- 6 mazorcas por minuto.

3.1.1 ETAPA DE FRAGMENTACIÓN DE LAS MAZORCAS

A continuación, se diseñan los elementos que conforman la etapa de fragmentación de las mazorcas, proceso inicial de la máquina.

3.1.1.1 Velocidad del eje de fragmentación

El mecanismo seleccionado para el sistema de fragmentación de mazorcas es tipo cuchillas, con 5 cuchillas distribuidas cada 72° y separadas aproximadamente 6 cm. Partiendo de la capacidad máxima de procesamiento de mazorcas indicada por el cliente y de la característica física del sistema seleccionado, se procede a realizar el cálculo de la velocidad angular máxima del eje de fragmentación.

Debido a la distribución de las aspas se estima que, por cada revolución del eje de fragmentación, se procesará una mazorca, también se considera que puede existir una

mazorca que por el funcionamiento del sistema requiera pasar por una misma cuchilla dos veces, por lo que se tiene:

2 revoluciones fragmentan 1 mazorca

La capacidad máxima de 6 mazorcas por minuto y un factor de carga de 1.5, la velocidad angular máxima de trabajo de la etapa de fragmentación se calcula en función de la Ecuación 1:

12 revoluciones por minuto fragmentan 6 mazorcas por minuto

$$\text{Velocidad máxima} = 12 \text{ rpm} * 1.5 = 18 \text{ rpm}$$

Ec. 1

El cálculo de la capacidad máxima de procesamiento de mazorcas por día estima que la máquina trabajará un máximo de 3 horas de forma continua en dos jornadas diarias, es decir, 6 horas diarias en total. A continuación, en la Ecuación 2 se obtiene la capacidad máxima de mazorcas a procesar por día:

$$\text{Capacidad máxima} = 6 \frac{\text{mazorcas}}{\text{minuto}} \times 60 \text{ min} \times 6 \text{ horas} = 2,160 \frac{\text{mazorcas}}{\text{Día de trabajo}}$$

Ec. 2

La velocidad angular máxima se obtiene de la Ecuación 3:

$$\text{Velocidad máx de diseño } (\omega) = 18 \frac{\text{revoluciones}}{\text{minuto}} \times \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} \times \frac{2\pi \text{ rad}}{1 \text{ rev}} = 1.885 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

Ec. 3

Las consideraciones anteriores aseguran que se cumpla con la capacidad de procesamiento requerida por el cliente.

3.1.1.2 Ensayo de compresión

Para el diseño del sistema de fragmentación se realizaron ensayos de compresión con el objetivo de obtener la fuerza máxima necesaria para fragmentar la corteza de varias

mazorcas, en la Figura 3.2 se pueden observar las condiciones en las que se realizaron los ensayos.



Figura 3.2: Ensayo de compresión

Se ubicó cada mazorca sobre dos platinas de 3 mm de espesor separadas a 6 cm una de la otra, una cuchilla fija en la base móvil de la máquina ubicada a la mitad de las dos platinas corta cada mazorca y de esa manera se obtiene la fuerza máxima necesaria para la fragmentación. Los resultados obtenidos de 6 ensayos diferentes, que se pueden observar en la Tabla 3.1, mostraron que la fuerza máxima es de 546.22 N o 55.7 kgf, valor obtenido en la máquina para ensayos de compresión del laboratorio de materiales de la Universidad Politécnica del Ecuador.

Tabla 3.1: Fuerza de corte de mazorcas

Ensayo	Fuerza de corte - N	Fuerza de corte - kgf
1	521.74	53.2
2	489.58	49.92
3	546.22	55.7
4	495.61	50.54
5	510.35	52.04
6	530.44	54.1

Adicionalmente, otro factor que se debe considerar para el diseño del sistema es el peso de cada mazorca que puede ingresar al sistema. Se tomó como referencia la muestra realizada sobre el peso de diferentes mazorcas, en la Tabla 3.2 se encuentran los pesos de cada muestra, donde PM es el peso de cada mazorca y PB es el peso de la pulpa contenida en esa mazorca.

Tabla 3.2: Peso de las mazorcas y pulpa

Peso Cacao		
N° Muestra	Prom PM (gr)	Prom PB (gr)
1	1200	300
2	1175	325
3	1125	250
4	900	225
5	925	250
6	1125	275
7	1175	250
8	825	325
9	825	225
10	850	225
11	1200	275
12	1150	300
13	1050	250
14	1150	225
15	1050	275
Sumatorio	15725.0	3975.0

Fuente: Diseño de una máquina separadora de la semilla del cacao [9]

El peso máximo es 1.2 kg y obtenida la fuerza necesaria para fragmentar cada mazorca, se procede a dimensionar el elemento motriz, las cuchillas, el eje de transmisión y sus partes.

3.1.1.3 Diseño del motor de fragmentación

Para calcular el torque aplicado al eje, se estima un mínimo de 2.5 veces el diámetro de una mazorca como longitud máxima hasta el punto de contacto de cada cuchilla. Con base en la fuerza obtenida del ensayo de compresión, la velocidad estimada de giro del eje y un factor de carga de 3, se obtiene la potencia en función de la Ecuación 4.

$$P = F_c * F * L * v$$

Ec. 4

Donde:

P es la Potencia requerida, en W.

F_c es el Factor de carga igual 3.

F es la Fuerza máxima requerida para fragmentar una mazorca igual a 546.22 N.

L es la distancia desde el centro del eje hasta la aplicación de la fuerza de corte igual a 0.2 m.

v es la velocidad de giro igual a 18 rpm o $1.88 \frac{rad}{s}$

Se calcula la potencia requerida:

$$P = 617.8 W$$

Se requiere un motor de 617.8 W, debido a que comercialmente los motores se disponen en valores de potencia estándar [17], se selecciona un motor de 1HP o 745.7 W. Además, se considera necesario realizar pruebas de funcionamiento con el objetivo de determinar una velocidad óptima de fragmentación, razón por la que se debe utilizar un variador de frecuencia para este motor.

3.1.1.4 Eje de transmisión: diseño a fatiga

En función de materiales existentes en el mercado se seleccionó el acero AISI 4340 el cual posee las siguientes características mecánicas según [15]:

- Resistencia a la tensión = 883 MPa.
- Resistencia a la fluencia = 686.5 MPa.

Se estiman las cargas que soporta el eje, debido al torque generado por el contacto entre las cuchillas y las mazorcas de cacao, se toma en cuenta un factor de carga de 2 y la peor condición, en la cual el momento generado se da cuando la fuerza aplicada se encuentra al extremo de la cuchilla a 0.2 m del eje, se obtiene el torque en el eje en función de la Ecuación 5. En la Figura 3.3 se puede observar las cargas aplicadas al eje de fragmentación.

$$\text{Torque } (T) = 546.22 \text{ N} * 0.2 \text{ m} * 2 = 218.5 \text{ N.m}$$

Ec. 5

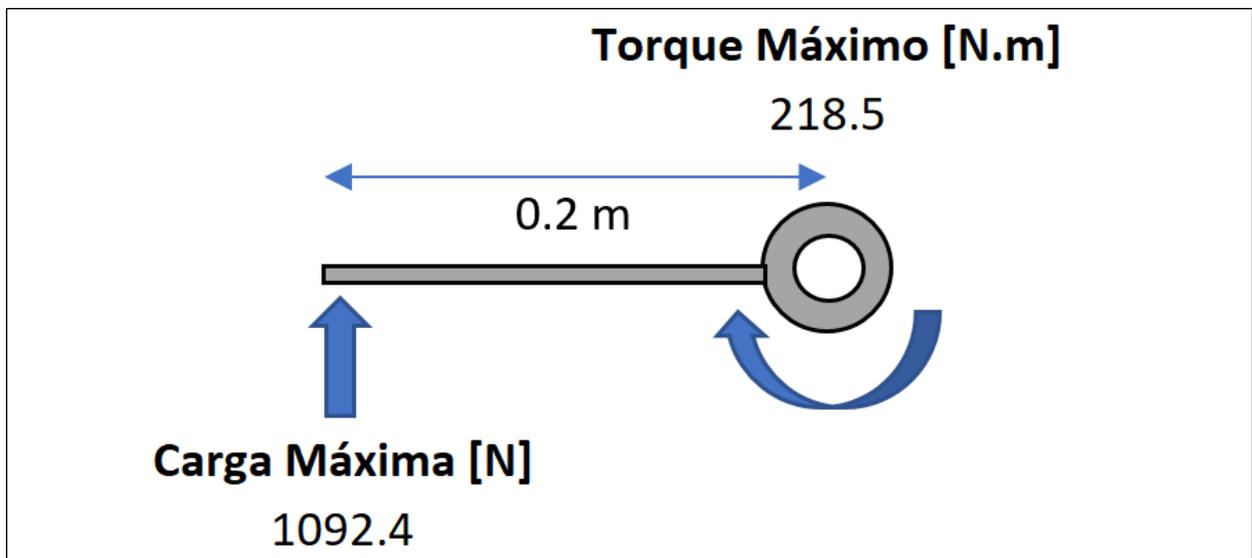


Figura 3.3: Carga aplicadas al eje de fragmentación

El peso aproximado que soporta el eje, considerando las 5 cuchillas, el cubo y el eje es de 13 kg o 131.74 N. Determinadas las cargas se procede a obtener el valor del momento flector mínimo y máximo, así como del momento torsor mínimo y máximo.

El momento flector mínimo se calcula en función de la Ecuación 6, en base al peso generado por la estructura, considerando que la peor condición implica que la carga se aplique en un punto medio en el eje.

$$M_{\min} = \frac{131.74 \text{ N}}{2} * 0.25\text{m} = 16.47 \text{ N.m}$$

Ec. 6

El momento flector máximo se calcula en función de la Ecuación 7, considerando el peso más la carga generada por la fuerza requerida para fragmentar cada mazorca, transmitida directamente al eje y distribuido en las dos chumaceras.

$$M_{\max} = 16.47\text{N.m} + \frac{1092.44\text{N}}{2} * \frac{0.5\text{m}}{2} = 153.02 \text{ N.m}$$

Ec. 7

El momento torsor mínimo se considera cero debido a que el sistema en estado de reposo o funcionamiento en vacío no genera torque sobre el eje. El momento torsor máximo sobre el eje sería en la peor condición el valor obtenido de la Ecuación 5.

Utilizando los datos obtenidos, se calcula el momento flector medio y alternante y el momento torsor medio y alternante:

$$\text{Momento Flector Medio} = 84.75 \text{ N.m}$$

$$\text{Momento Flector Alternante} = 68.28 \text{ N.m}$$

$$\text{Momento Torsor Medio} = 109.24 \text{ N.m}$$

$$\text{Momento Torsor Alternante} = 109.24 \text{ N.m}$$

Con base en los resultados, se utilizan las Ecuaciones 8 y 9 para calcular los esfuerzos flector y torsor, medio y alternante, respectivamente.

$$\sigma = \frac{32 M}{\pi * d^3}$$

Ec. 8

$$\tau = \frac{16 T}{\pi * d^3}$$

Ec. 9

Donde:

σ es el Esfuerzo debido al momento flector, medio o alternante, en MPa.

M es el momento flector, medio o alternante, en $N.m$.

d es el diámetro del eje, en m .

τ es el Esfuerzo debido al momento torsor, medio o alternante, en MPa .

T es el momento torsor, medio o alternante, en $N.m$.

Los resultados se listan a continuación:

$$\text{Esfuerzo Flector Medio} = 20.13 \text{ MPa}$$

$$\text{Esfuerzo Flector Alternante} = 16.22 \text{ MPa}$$

$$\text{Esfuerzo Torsor Medio} = 12.97 \text{ MPa}$$

$$\text{Esfuerzo Torsor Alternante} = 12.97 \text{ MPa}$$

Con los esfuerzos medios y alternantes se calcula el esfuerzo equivalente respectivo en función de la Ecuación 10.

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma_x^2 + 3\tau_{xy}^2}$$

Ec. 10

Donde:

σ_{eq} es el Esfuerzo equivalente, medio o alternante, en MPa .

σ_x es el Esfuerzo normal por momento flector, medio o alternante, en MPa .

τ_{xy} es el Esfuerzo cortante por momento torsor, medio o alternante, en MPa .

Los resultados se listan a continuación:

$$\text{Esfuerzo Alternante Equivalente} = 27.72 \text{ MPa}$$

$$\text{Esfuerzo Medio Equivalente} = 30.17 \text{ MPa}$$

Se calcula a partir del material y eje, el límite a la fatiga del material (Se) y los factores modificadores, el límite a la fatiga de la probeta (Se') se calcula en función de la Ecuación 11.

$$Se' = 0.506 * Sut = 446.8 \text{ MPa}$$

Ec. 11

Donde:

S_{ut} es el límite a la tracción del material, en MPa.

El límite a la fatiga del material se calcula en función de la Ecuación 12.

$$S_e = k_a * k_b * k_c * k_d * k_e * k_t * S_e'$$

Ec. 12

Donde:

k_a es el factor de acabado superficial.

k_b es el factor de tamaño.

k_c es el factor de carga.

k_d es el factor de temperatura.

k_e es el factor de confiabilidad.

k_f es el factor de efectos varios.

Se calculan los factores modificadores para reemplazar en la Ecuación 11, el factor de acabado superficial (k_a) se obtiene utilizando la Ecuación 13.

$$k_a = a * S_{ut}(Mpa)^b$$

Ec. 13

Para acero laminado en caliente se tiene:

$$a = 4.51$$

$$b = -0.265$$

Reemplazando los valores de a y b en la Ecuación 13 se tiene:

$$k_a = 4.51 * (883)^{-0.265} = 0.7473$$

El factor de tamaño (k_b) se obtiene de la Ecuación 14 y el diámetro del eje.

$$k_b = 0.879 * (d)^{-0.107} = 0.879 * \left(\frac{3.5cm * 1in}{2.54cm} \right)^{-0.107} = 0.8494$$

Ec. 14

El factor de carga (k_c) para torsión es 0.59, el factor de temperatura (k_d) considerando una temperatura de operación máxima de 50°C es de 1.01 y la confiabilidad de la

máquina se selecciona en 95% lo cual da como resultado un factor de confiabilidad (k_e) de 0.868.

El factor de efectos varios (k_t), se obtiene en función de la Ecuación 15, se ha seleccionado el mayor factor posible debido a la muesca, con el objetivo de asegurar la resistencia del eje, donde la sensibilidad a la muesca es de 0.2 y el valor del factor de concentración de esfuerzos (k_{ts}), es de 2.8.

$$k_t = \frac{1}{q * (k_{ts} - 1) + 1} = \frac{1}{0.2 * (2.8 - 1) + 1} = 0.735$$

Ec. 15

Se obtiene el límite a la fatiga en función de la Ecuación 12, cuyo resultado es:

$$S_e = 0.78 * 0.8494 * 0.59 * 1.01 * 0.868 * 0.735 * 883 \text{ MPa} = 106.75 \text{ MPa}$$

Para el cálculo del factor de seguridad del eje se utiliza la Ecuación 16, según el método de la recta modificada de Goodman, en diseño de elementos de máquina a vida infinita [1].

$$\frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{S_{ut}} = \frac{1}{n}$$

Ec. 16

Donde:

n es el factor de seguridad del eje.

σ_a es el esfuerzo alternante.

σ_m es el esfuerzo medio.

S_e límite a la fatiga del material.

S_{ut} es el límite a la tensión del material.

Reemplazando los valores obtenidos previamente, se calcula el factor de seguridad del eje en función de la Ecuación 16.

$$\frac{27.72 \text{ MPa}}{106.75 \text{ MPa}} + \frac{30.17 \text{ MPa}}{883 \text{ MPa}} = \frac{1}{n}$$

$$n = 3.4$$

El eje seleccionado posee un factor de seguridad de 3.4, asegurando una resistencia adecuada y un funcionamiento óptimo ante las cargas que actuarán sobre el mismo.

3.1.1.5 Eje de transmisión: diseño a rigidez

En el análisis por rigidez se considera que la máxima carga solo se ejerce en una cuchilla a la vez, debido a su distribución geométrica, por lo que la peor condición se considera a la carga en la cuchilla ubicada en un punto medio del eje. Manteniendo un factor de carga de 2, se puede observar en la Figura 3.4 la distribución de cargas en el eje, en el cual se obtiene el valor de las reacciones.

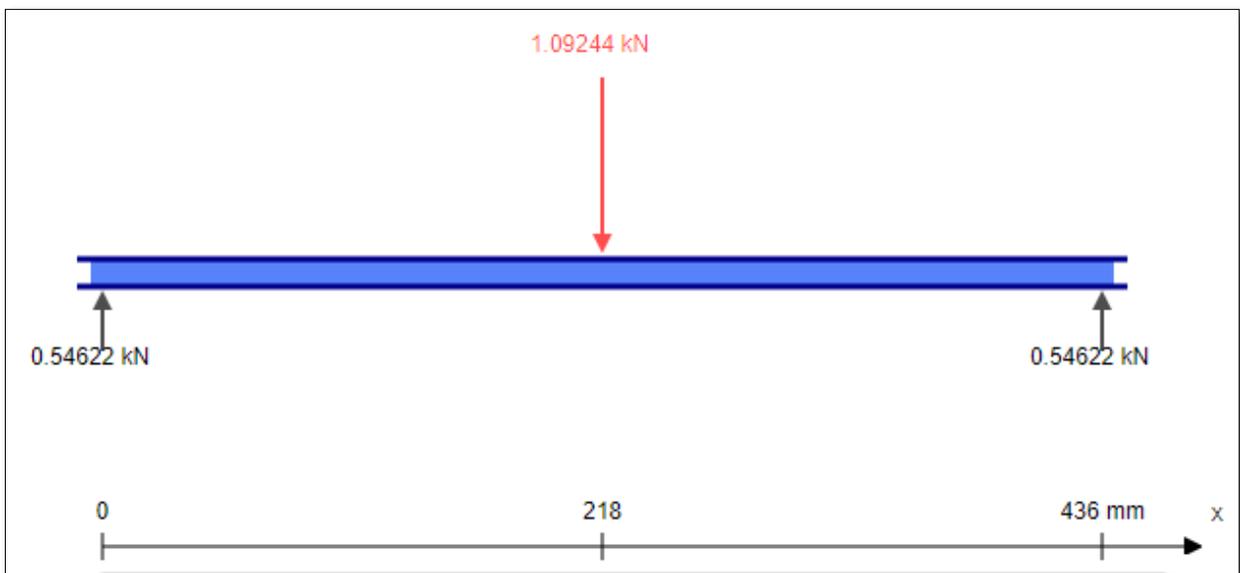


Figura 3.4: Distribución de carga en el eje de fragmentación

En la Figura 3.5 se puede observar los resultados obtenidos en el diagrama de fuerza cortante, donde el valor máximo es igual a las reacciones en cada uno de los apoyos, el cual es de 546.22 N.

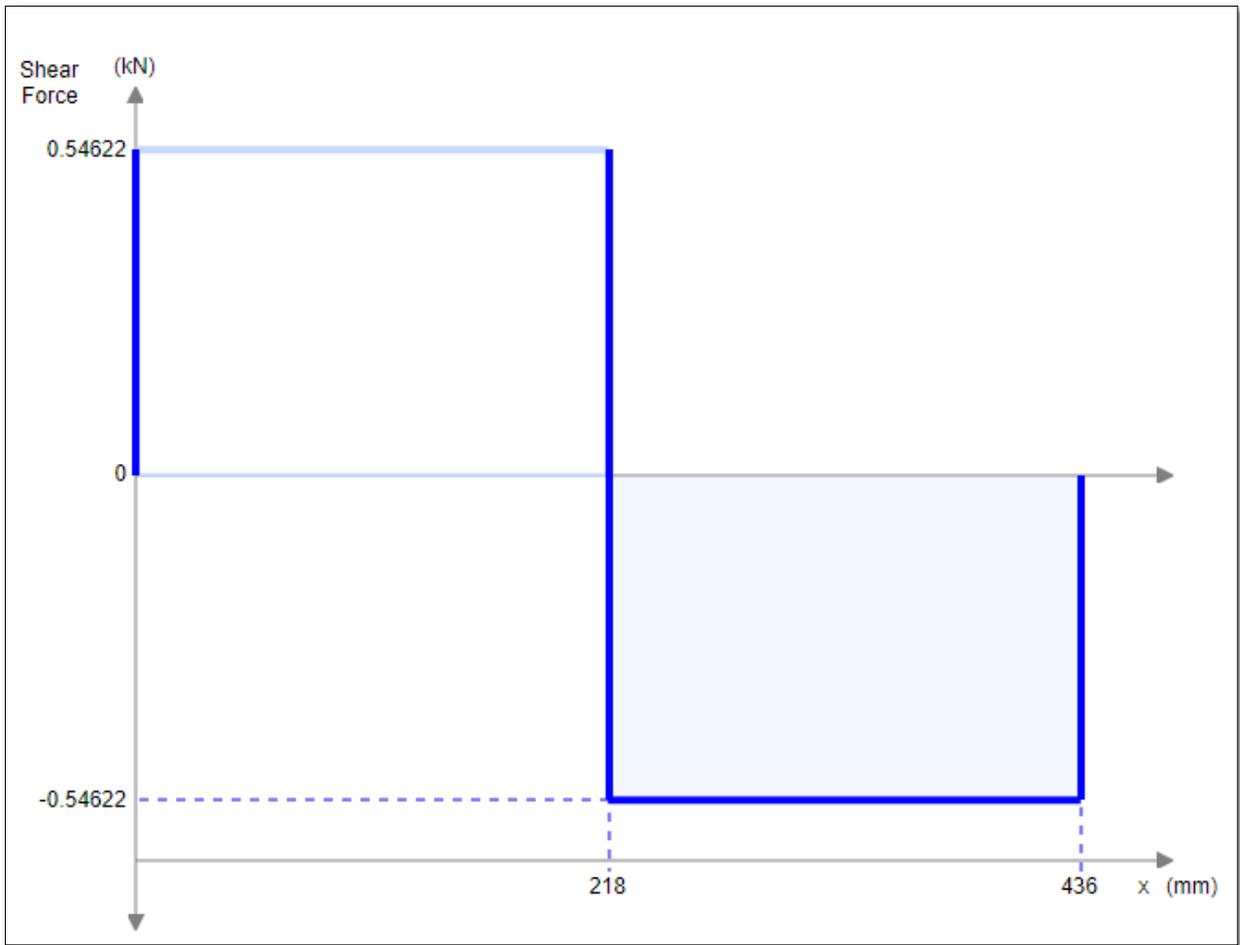


Figura 3.5: Diagrama de fuerza cortante eje de fragmentación

En la Figura 3.6 se puede observar los resultados obtenidos en el diagrama de momento flexionante, el máximo soportado por el eje es de 119.08 Nm en el punto medio.

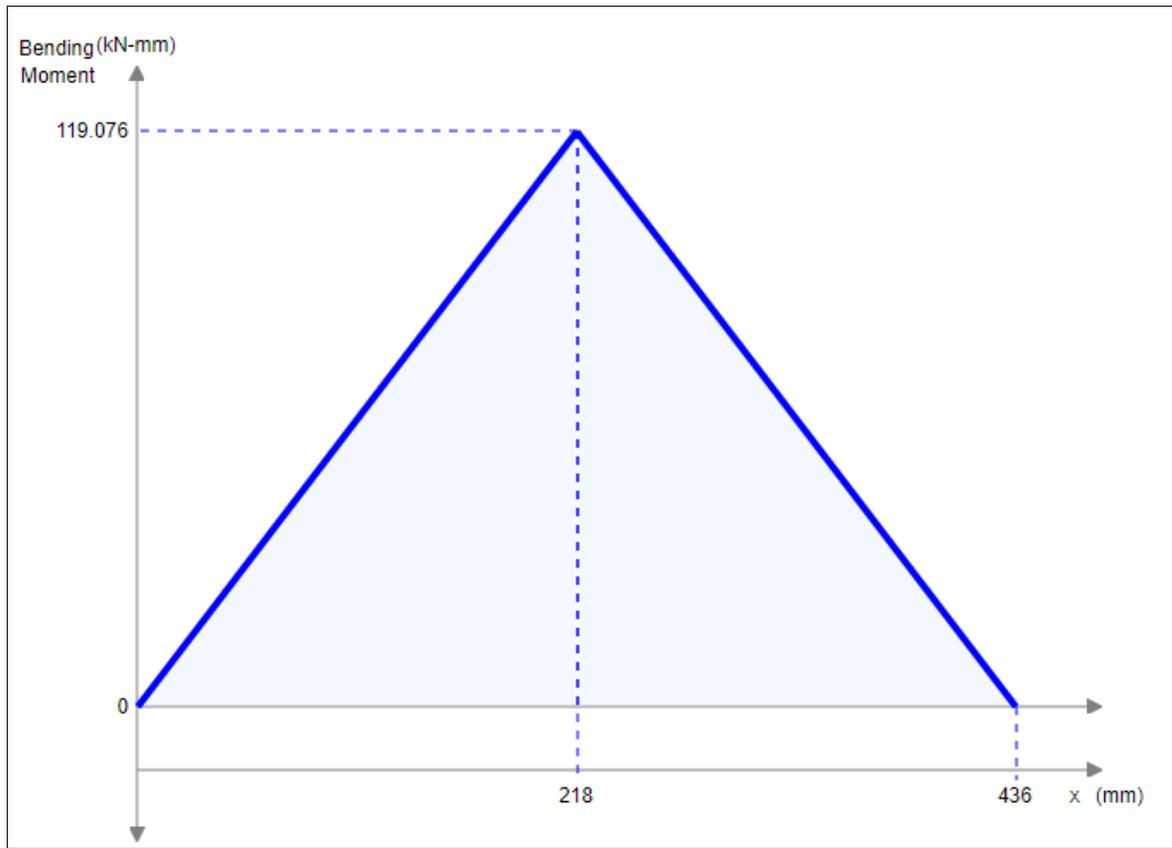


Figura 3.6: Diagrama de momento flexionante en el eje de fragmentación

En la Tabla 3.3 se encuentran los valores de la deflexión máxima permisible en función de que parte de la máquina se requiera calcular.

Tabla 3.3: Deflexión máxima permisible

Deflexión	0.003	<i>mm/mm L</i>	Parte General de la Máquina
	0.0005	<i>mm/mm L</i>	Parte de Precisión Moderada
	0.00001	<i>mm/mm L</i>	Parte de Alta Precisión

Fuente: Resistencia de materiales [10]

Se considera como parte de precisión moderada debido a que la velocidad máxima del eje de fragmentación es 18 rpm. La deflexión máxima permitida para el eje de fragmentación se calcula en función de la Ecuación 17.

$$Y_{\text{máx}} = \frac{0.0005 \text{ mm}}{\text{mm de longitud}} * 436 \text{ mm} = 0.218 \text{ mm}$$

La deflexión del eje de fragmentación se obtiene en función de la Ecuación 18, donde se puede observar que el valor de la misma es de 0.03093 mm.

$$Y = \frac{-P * L^3}{192 E * I} = 0.03093 \text{ mm}$$

Ec. 18

Comparando la deflexión máxima permitida con la deflexión teórica del eje, se obtiene el factor de seguridad en función de la Ecuación 19. Se debe tener en consideración que el cálculo realizado es para un eje estático, mientras que por el funcionamiento del eje existen cargas alternantes por lo cual se adiciona un factor de carga debido a la fatiga igual a 3.

$$n = \frac{Y_{m\acute{a}x}}{Y} = \frac{0.218}{3 * 0.03093} = 2.35$$

Ec. 19

El factor de seguridad obtenido del cálculo por rigidez, de 2.35, asegura que el eje no supera la deflexión máxima permitida. Además, para verificar los cálculos del diseño por rigidez se simuló el eje en el software Inventor Profesional 2016 de Autodesk, mediante elementos finitos, se pueden observar los resultados obtenidos de la simulación en la Figura 3.7.

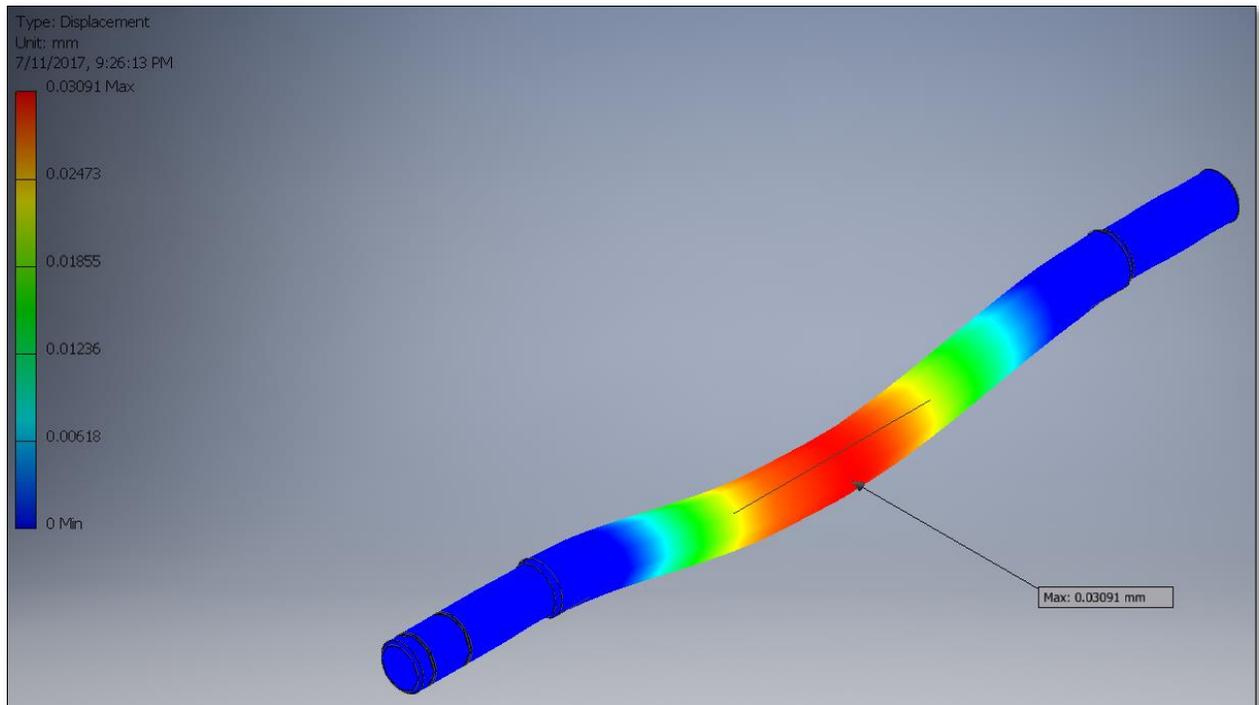


Figura 3.7: Simulación del eje de fragmentación

En la simulación se obtiene un valor de deflexión máxima igual a 0.02833 mm, lo cual verifica el valor obtenido por el cálculo teórico.

3.1.1.6 Chaveta del eje de fragmentación

Para el diseño de la chaveta se toma en cuenta que es el elemento con menor factor de seguridad, debido a que si existiese una sobre carga en el sistema la chaveta falle y no se vean afectados el motor, caja reductora o el eje de fragmentación.

En la Figura 3.8 se observa la geometría que se utilizó como referencia, para calcular el factor de seguridad se seleccionó una chaveta con dimensiones: $h = 8 \text{ mm}$, $w = 8 \text{ mm}$ y $l = 25 \text{ mm}$.

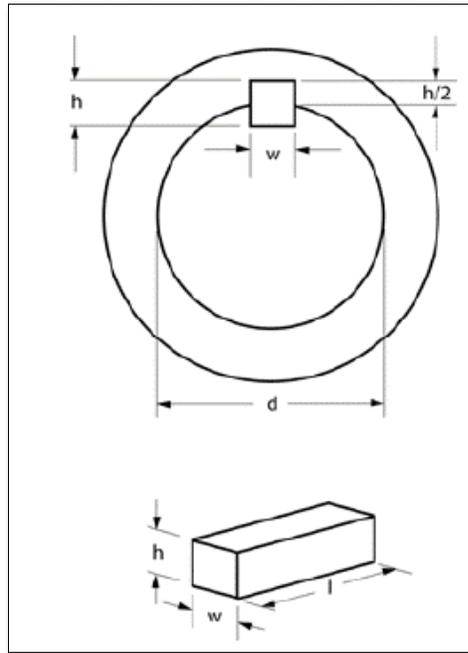


Figura 3.8: Geometría de la chaveta
Fuente: Elementos de Máquinas [12]

El esfuerzo cortante que debe resistir la chaveta se calcula en función de la Ecuación 20, donde el valor del torque se obtuvo en la Ecuación 5, además para considerar la fatiga se añade un factor de carga (f_s) de 1.5.

$$\tau_{Chaveta} = \frac{2T}{d * w * l} * f_s = \frac{2 * 218.49}{8 * 8 * 25} * 1.5 = 109.24 \text{ MPa}$$

Ec. 20

Como material de la chaveta se seleccionó AISI 1045, con un valor de resistencia a la fluencia de 314 MPa según [15], donde el esfuerzo cortante máximo permisible se calcula según la Ecuación 21.

$$\tau_{Permisible} = S_y * 0.4 = 125.6 \text{ MPa}$$

Ec. 21

El factor de seguridad en la chaveta para el eje de fragmentación considerando el esfuerzo cortante es de 1.15, valor obtenido en función de la Ecuación 22.

$$n = \frac{\tau_{Permissible}}{\tau_{Chaveta}} = 1.15$$

Ec. 22

Además, con el objetivo de verificar los cálculos del diseño por rigidez se simuló el eje en el software Inventor Profesional 2016 de Autodesk, mediante elementos finitos. Se pueden observar los resultados obtenidos de la simulación en la Figura 3.9, donde el factor de seguridad es igual a 1.28.

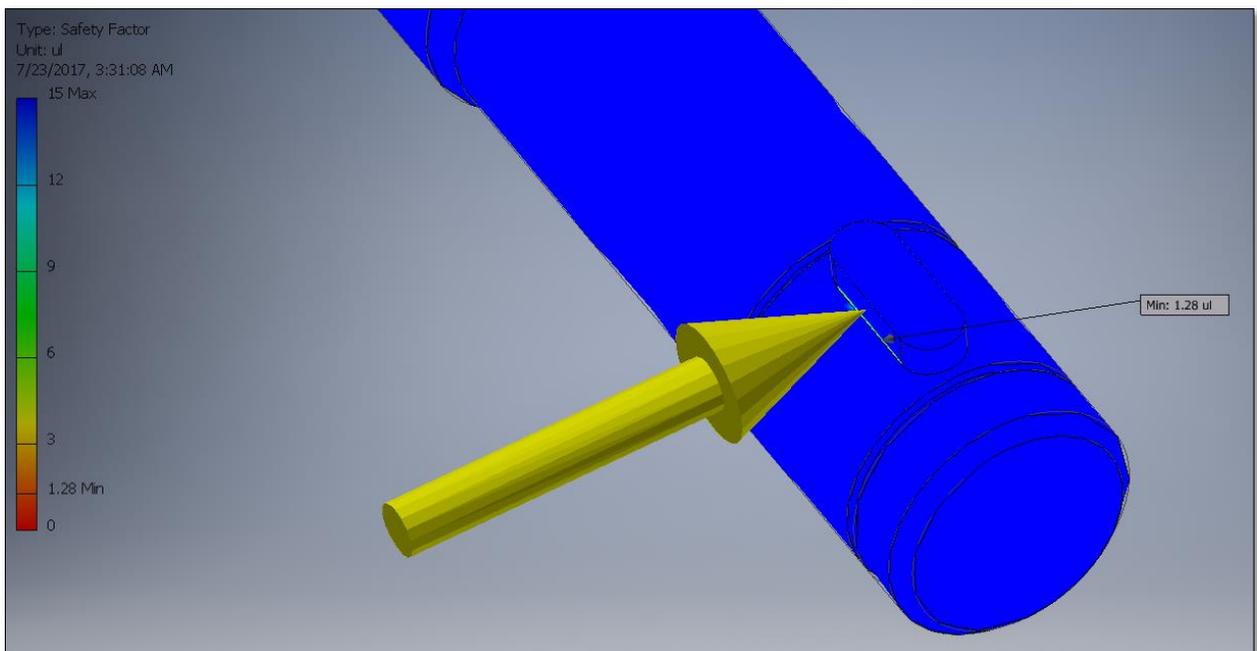


Figura 3.9: Simulación de la chaveta

3.1.1.7 Sistema de transmisión: Cadena

Para dimensionar la cadena se considera el cálculo realizado en la Sección 3.1.1.3 donde la potencia del motor se estimó en 1 HP, basado en los equipos disponibles en el mercado se seleccionó una caja reductora con $i = 80$, la cual junto con el motor tiene una salida de 21 r.p.m.

La vida útil requerida para la cadena es de 5000 horas asegurando un mínimo de 2 años de funcionamiento, la relación de transmisión se obtiene en función de la Ecuación 23, para en base a la velocidad de salida de la caja reductora y los piñones que existen

comercialmente obtener en el eje de fragmentación la velocidad requerida, obtenida en la Ecuación 3.

$$r = \frac{rpm_{motor}}{rpm_{eje}} = \frac{21}{18} = 1.17$$

Ec. 23

Con la relación de transmisión de 1.17 y seleccionando el número de dientes del piñón conductor, 13 dientes, se calcula el número de dientes del piñón conducido en función de la Ecuación 24, seleccionando un piñón conducido de 16 dientes, ambos existentes en el mercado nacional según el catálogo de [15].

$$Z_{conducido} = Z_{conductor} * r = 13 * 1.17 = 15.21$$

Ec. 24

Para el cálculo de la cadena se procede a encontrar el valor de la potencia corregida en base a la Ecuación 25.

$$P_{corregida} = k1 * k2 * k3 * k4 * k5 * P_{motor}$$

Ec. 25

Donde:

k1 es el Coeficiente de corrección debido al número de dientes igual a $\frac{19}{Z_{piñon\ menor}}$.

k2 es el Coeficiente de corrección debido al número de cadenas, estimado en 1.

k3 es el Coeficiente de corrección debido al número de eslabones de la cadena, estimado en 0.5.

k4 es el Coeficiente de corrección debido al factor de servicio de la máquina, estimado en 1.8.

k5 es el Coeficiente de corrección debido a la vida útil requerida, estimado en 1.

La potencia corregida obtenida de la Ecuación 26 considerando los coeficientes de corrección es de 1.32 HP. En función del valor de la velocidad requerida en base a catálogos comerciales se selecciona una cadena tipo 10A de paso 5/8 de pulgada.

Se verifica con la Ecuación 24 que la carga en la cadena es menor que la carga máxima de ruptura especificada en el catálogo de 3200 kp.

$$Carga = \frac{Velocidad\ lineal}{Potencia\ Corregida} = \frac{0.07 \frac{m}{s}}{980.88\ W} = 13579.8\ N = 1384\ kp$$

Ec. 26

El factor de seguridad de la cadena seleccionada, igual a 2.31, se obtiene en la Ecuación 27, con lo cual se comprueba que resistirá la carga requerida y funcionará de manera óptima.

$$n = \frac{Carga\ de\ ruptura}{Carga} = \frac{3200\ kp}{1384\ kp} = 2.31$$

Ec. 27

3.1.1.8 Cuchillas de fragmentación: Diseño a fatiga

Las cuchillas se dimensionan considerando cargas fluctuantes, que depende de la fuerza de fragmentación, cada cuchilla tiene una longitud de 200 mm.

Se ha seleccionado como material base acero DF2, de 57 mm x 6 mm, con las siguientes características según [15]:

- Resistencia a la tensión = 400 MPa.
- Resistencia a la fluencia = 250 MPa.

Se considera un factor de carga (fc) de 2 y la peor condición es en la cual el momento, calculado en función de la Ecuación 28, generado por fuerza de corte se aplica al extremo de la cuchilla, de longitud 200 mm.

$$Momento\ (M) = Fuerza\ de\ corte * fc * longitud = 218.5\ N.m$$

Ec. 28

En la Figura 3.10 se puede observar las fuerzas que actúan en cada cuchilla, utilizadas para calcular el factor de seguridad.

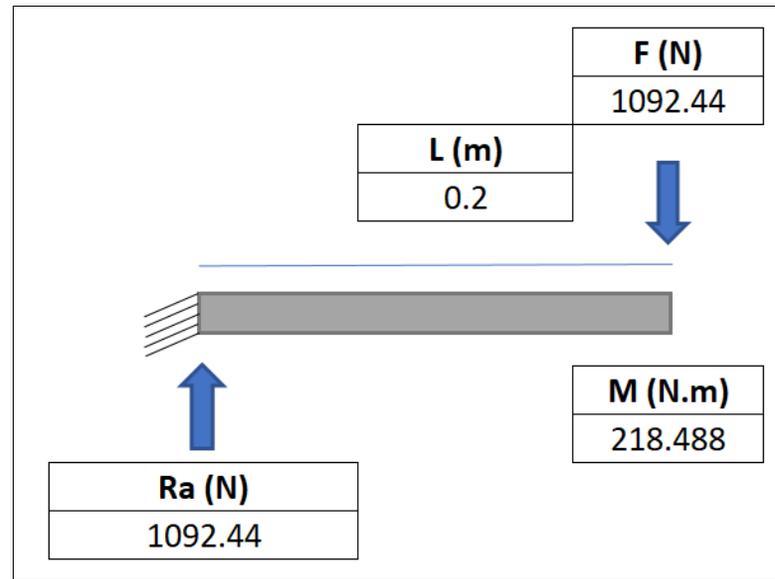


Figura 3.10: Fuerzas aplicadas en cada cuchilla

En función de la Ecuación 29 se obtiene el esfuerzo máximo, producto de la fuerza de corte aplicada en la cuchilla.

$$\sigma_{\text{máx}} = \frac{M * c}{I} = \frac{218.5 \text{ N.m} * 0.0285 \text{ m}}{9.25 \times 10^{-8} \text{ m}^4} = 67.25 \text{ MPa}$$

Ec. 29

Donde:

M es el momento obtenido en la Ecuación 28.

c es la distancia medida desde el punto de contacto de la fuerza hasta la mitad del área de esfuerzo.

I es la inercia de cada cuchilla igual a $\frac{b * h^3}{12}$.

En función de la Ecuación 30 se obtiene el esfuerzo cortante máximo por carga directa.

$$\tau_{\text{máx}} = \frac{F * Q}{B * I} = \frac{1092.44 \text{ N} * 9.75 \times 10^{-6} \text{ m}^3}{0.006 \text{ m} * 9.26 \times 10^{-8} \text{ m}^4} = 19.17 \text{ MPa}$$

Ec. 30

Donde:

F es la fuerza de corte requerida.

Q es el producto del área de esfuerzo por la menor sección dentro del área de esfuerzo.

B es el espesor de la cuchilla.

I es la inercia de cada cuchilla igual a $\frac{b \cdot h^3}{12}$.

En función de la Ecuación 31 se obtiene el esfuerzo equivalente en base a los resultados obtenidos de los esfuerzos máximos.

$$\sigma_{equivalente} = \sqrt{\sigma_{m\acute{a}x}^2 + 3 * \tau_{m\acute{a}x}^2} = 74.99 \text{ MPa}$$

Ec. 31

Donde:

σ_{eq} es el esfuerzo equivalente, en MPa.

$\sigma_{m\acute{a}x}$ es el esfuerzo normal máximo por momento flector, en MPa.

$\tau_{m\acute{a}x}$ es el esfuerzo cortante máximo por momento torsor, en MPa.

El esfuerzo mínimo es 0 MPa, en la Ecuación 32 y 33 se calculan los esfuerzos alternantes y medio respectivamente, en función de los datos obtenidos previamente.

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{m\acute{a}x} - \sigma_{m\acute{i}n}}{2} = 37.5 \text{ MPa}$$

Ec. 32

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{m\acute{a}x} + \sigma_{m\acute{i}n}}{2} = 37.5 \text{ MPa}$$

Ec. 33

El límite a la fatiga de la probeta se calcula en función de la Ecuación 11.

$$S_e' = 0.506 * 400 = 202.4 \text{ MPa}$$

El límite a la fatiga del material se calcula en función de la Ecuación 12, se consideran los valores para acero laminado en frío y se tiene:

$$a = 4.51$$

$$b = -0.265$$

El factor de acabado superficial se calcula en función de la Ecuación 13, y se tiene como resultado:

$$k_a = 4.51 * (400)^{-0.265} = 0.9218$$

El factor de tamaño (kb) se calcula en función de la Ecuación 14, y se tiene como resultado.

$$kb = 0.879 * (d)^{-0.107} = 0.842$$

El factor de carga (kc) para flexión es 1, el factor de temperatura (kd) considerando una temperatura de operación máxima de 50°C es de 1.01, considerando una confiabilidad de la máquina de 90% se tienen un factor de confiabilidad (ke) igual a 0.897.

Para el cálculo del factor de efectos varios (kt), en función de la Ecuación 15, se ha seleccionado el mayor factor posible debido a la muesca, con el objetivo de asegurar que no se presentaran problemas debido al filo cortante de las cuchillas, donde la sensibilidad a la muesca es de 0.6 y el valor del factor de concentración de esfuerzos es de 2.2, el resultado es el siguiente:

$$kt = \frac{1}{0.6 * (2.2 - 1) + 1} = 0.581$$

El límite a la fatiga del material se calcula reemplazando los valores obtenidos, en la Ecuación 12.

$$Se = 0.705 * 0.9235 * 1 * 1.01 * 0.897 * 0.581 * 202.4 \text{ MPa} = 90.06 \text{ MPa}$$

Para el cálculo del factor de seguridad de cada cuchilla se utiliza la Ecuación 16, según el método de la recta modificada de Goodman, en diseño de elementos de máquina a vida infinita, en la cual se reemplazan los valores calculados previamente.

$$\frac{37.5 \text{ MPa}}{90.06 \text{ MPa}} + \frac{37.5 \text{ MPa}}{400 \text{ MPa}} = \frac{1}{n}$$

$$n = 1.96$$

Se puede observar que factor de seguridad obtenido de 1.96 asegura que las cuchillas no fallen durante el funcionamiento de la máquina.

3.1.1.9 Soldadura de las cuchillas: Diseño de la soldadura

El diseño de la soldadura se realizó considerando la fuerza de corte máxima con un factor de carga igual a 2, considerando fatiga producida por las cargas fluctuantes, para encontrar el factor de seguridad se utilizan los siguientes parámetros:

- Fuerza de diseño = 1092.44 N, considerando el factor de carga.
- Ancho de la cuchilla = 6 mm.
- Longitud de la soldadura = 80 mm, considerando el perímetro de contacto de la cuchilla sobre el soporte.
- Electrodo tipo E7018, resistencia 70 kPsi.
- Cateto de la soldadura = 9.525 mm o 3/8 in.

El área de la garganta de la soldadura se calcula en función de la Ecuación 34.

$$A = 1.414 * h * d = 0.001058 \text{ m}^2$$

Ec. 34

Donde:

h es el cateto de la soldadura.

d es la longitud de la soldadura.

La inercia unitaria de la soldadura se obtiene en función de la Ecuación 35.

$$I_u = \frac{d^3}{12} = 8.099 \times 10^{-5} \text{ m}^3$$

Ec. 35

Donde:

d es la longitud de la soldadura.

La inercia de la soldadura se calcula en función de la Ecuación 36.

$$I = 0.707 * h * I_u = 5.454 \times 10^{-7} \text{ m}^4$$

Ec. 36

Donde:

h es el cateto de la soldadura.

I_u es la inercia unitaria de la soldadura.

El valor de cortante primario resultado de la aplicación de la fuerza se calcula en función de la Ecuación 37.

$$\tau' = \frac{F}{A} = 1.03 MPa$$

Ec. 37

Donde:

τ' es el cortante primario en la soldadura.

F es la fuerza aplicada a la soldadura.

A es el área de la soldadura.

El valor de cortante secundario se calcula en función de la Ecuación 38.

$$\tau'' = \frac{M * r}{I} = 15.04 MPa$$

Ec. 38

Donde:

τ'' es el cortante secundario en la soldadura.

M es el momento resultado obtenido en la Ecuación 28.

r es la distancia desde la aplicación de la fuerza hasta la mitad de la longitud de la soldadura.

I es la inercia de la soldadura.

Mediante el teorema de Pitágoras se obtiene, en función de la Ecuación 39, el valor del cortante máximo aplicado a la soldadura. Además, se considera el factor de carga por fatiga.

$$\tau = \left(\sqrt{\tau'^2 + \tau''^2} \right) * Fc = 40.7 MPa$$

Donde:

τ es el cortante máximo en la soldadura.

τ' es el cortante primario en la soldadura.

τ'' es el cortante secundario en la soldadura.

F_c es el factor de carga debido a la fatiga, igual a 2.7.

Considerando la carga fluctuante se debe tener en cuenta un factor adicional por fatiga, recomendado en [1] con un valor de 2.7 esto asegura que la soldadura resistirá adecuadamente.

En función de la Ecuación 12 se calcula el límite a la fatiga del material, considerando acero como salido de la forja [1], debido a la soldadura, se tiene:

$$a = 272$$

$$b = -0.995$$

El factor de acabado superficial se calcula en función de la Ecuación 13, y se tiene como resultado:

$$k_a = 272 * (427)^{-0.995} = 0.65586$$

El factor de tamaño (k_b) se estima en función de la soldadura, igual a 0.6. El factor de carga (k_c) para torsión es 0.59; el factor de temperatura (k_d) considerando una temperatura de operación máxima de 50°C es de 1.01; considerando una confiabilidad de la máquina de 90% se tienen un factor de confiabilidad (k_e) igual a 0.897; para el factor de efectos varios (k_t), se considera por soldadura igual a 1.

El límite a la fatiga del material se calcula reemplazando los valores obtenidos, en la Ecuación 12.

$$S_e = 0.65 * 0.6 * 0.59 * 1.01 * 0.897 * 1 * 482.63 \text{ MPa} = 101.52 \text{ MPa}$$

Para el cálculo del factor de seguridad de cada cuchilla se utiliza la Ecuación 40

$$n = \frac{\tau}{Se} = 2.49$$

Ec. 40

Donde:

n es el factor de seguridad de la soldadura.

τ' es el cortante máximo aplicado en la soldadura debido a la fuerza de corte.

Se es el límite a la fatiga del material.

Para verificar el resultado obtenido de los cálculos realizados, se simuló la soldadura de una cuchilla en función de los parámetros establecidos, en el software Inventor Profesional 2016 de Autodesk. En la Figura 3.11 se puede apreciar el valor del factor de seguridad de la simulación, que es igual a 2.36 con lo cual se comprueba que el factor teórico y el de simulación son aproximados.

El factor de seguridad teórico y simulado aseguran que las cuchillas soportaran adecuadamente la carga debido a la fuerza de corte.

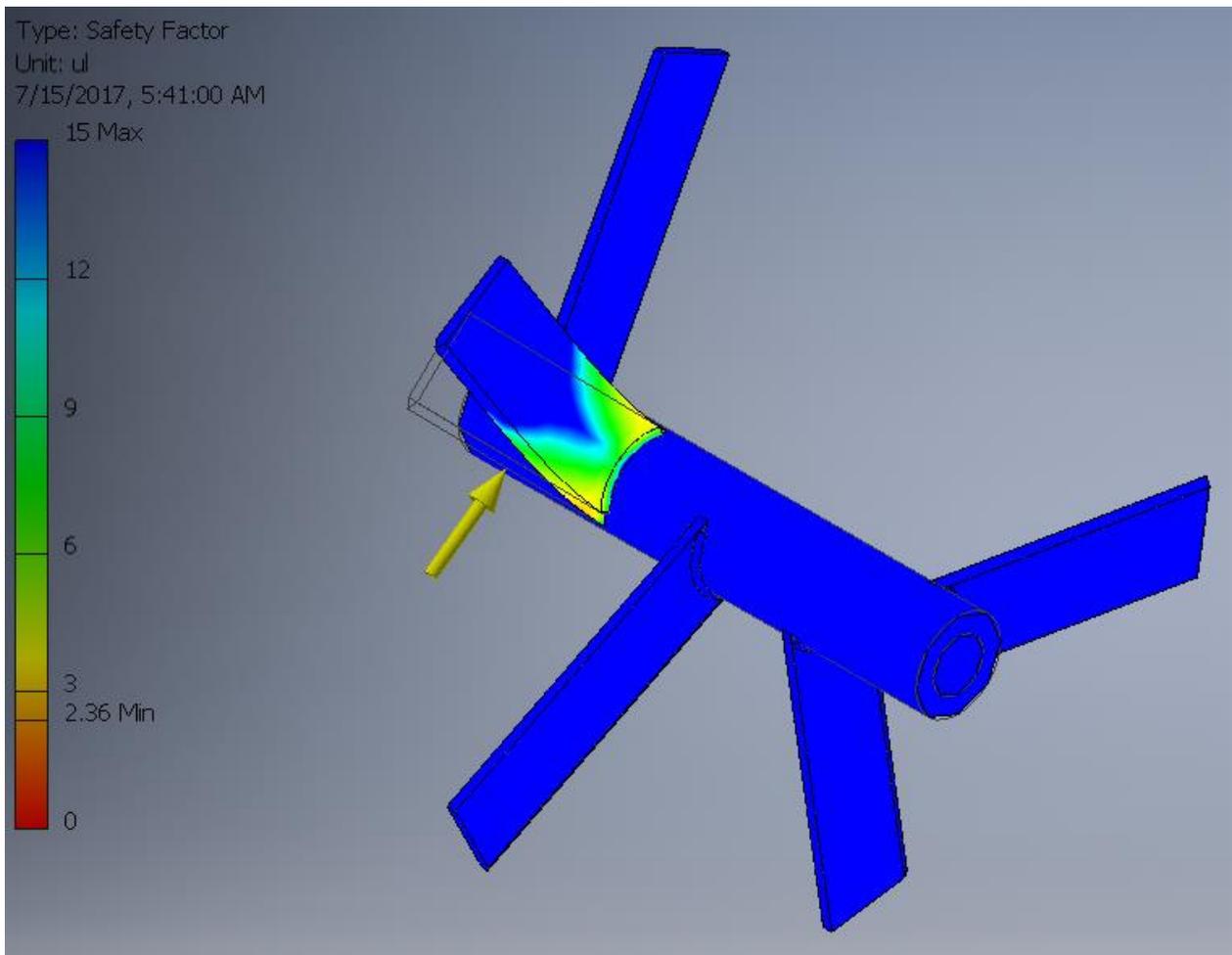


Figura 3.11: Simulación de soldadura de una cuchilla.

3.1.1.10 Pernos de fijación del eje de fragmentación

Se dimensionan los pernos de fijación en función de la mayor carga soportada, y se estandarizan las dimensiones de los pernos para todas las partes de la máquina que lo requieran.

Se considera que la peor condición es la aplicación de la carga de forma puntual sobre la viga que es igual a 1092.44 N. También se toma en cuenta que la carga se distribuye en dos pernos de fijación en cada empotramiento lateral, con la disposición geométrica indicada en la Figura 3.12.

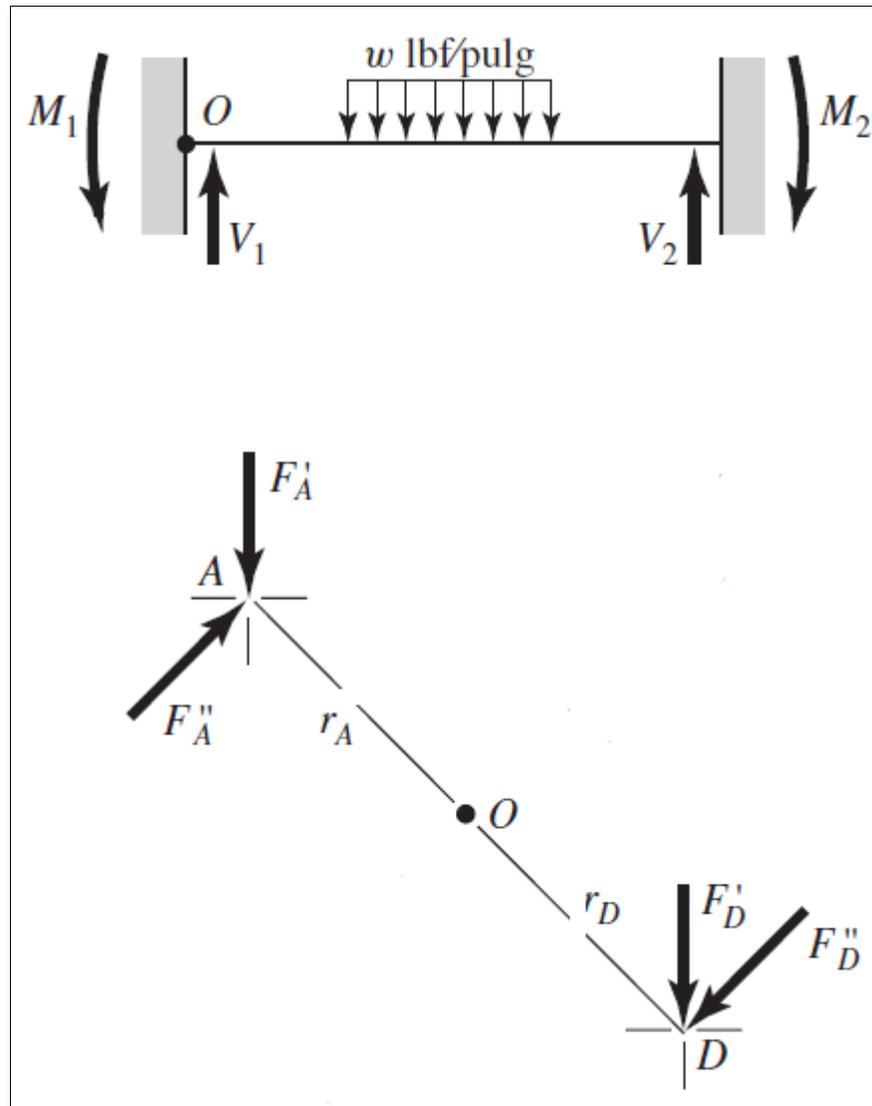


Figura 3.12: Distribución de fuerza en pernos

Fuente: Diseño en Ingeniería Mecánica [1]

En la Figura 3.13 se observa la distribución geométrica de los agujeros del soporte del eje de fragmentación, la cual se utiliza para encontrar la distancia existente desde cada perno hasta el centroide del grupo de pernos, considerando un diámetro de 8 mm, en función de la Ecuación 41.

$$r = \sqrt{D1^2 + D2^2} = 13.46 \text{ mm}$$

Ec. 41

Donde:

r es la distancia de cada perno hasta el centroide del grupo.

$D1$ es la distancia horizontal desde un perno hasta el centroide del grupo, igual a 5 mm.

$D2$ es la distancia vertical desde un perno hasta el centroide del grupo, igual a 12.5 mm.

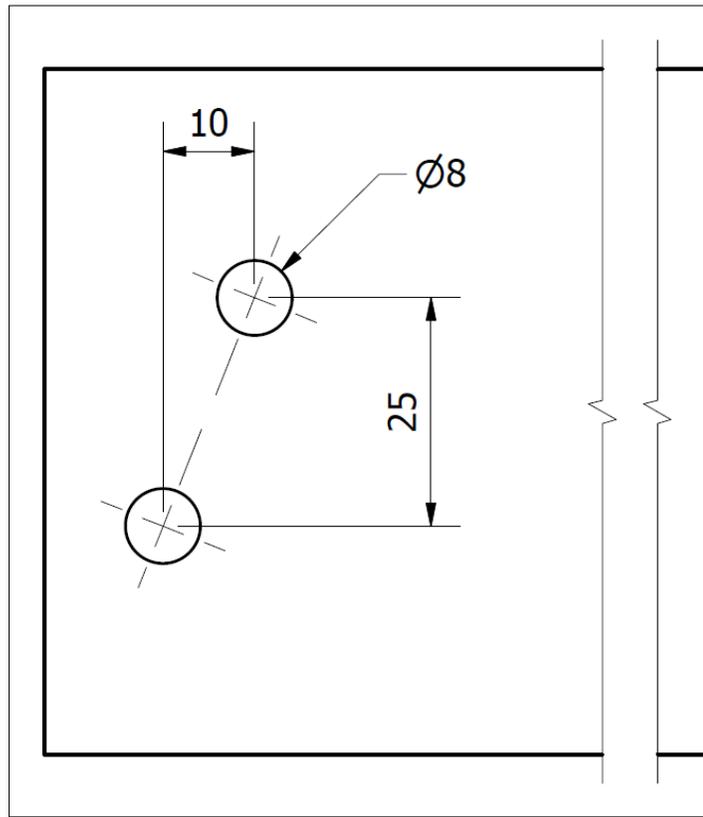


Figura 3.13: Distribución geométrica de pernos en el soporte

La reacción en el centroide es igual a la fuerza máxima, 1092.44 N dividido para los 4 apoyos de los dos soportes, se calcula el momento generado debido a la carga en función de la Ecuación 42.

$$M = V * D = 58.23 \text{ N.m}$$

Ec. 42

Donde:

M es el momento aplicado al centroide del grupo de pernos.

V es la carga aplicada dividida en los cuatro apoyos, dos por cada soporte, igual a 273.39 N.

D es la distancia desde la aplicación de la fuerza hasta el centroide del grupo de pernos.

La carga cortante primaria (F') en los pernos se obtiene en función de la Ecuación 43.

$$F' = \frac{V}{n} = 136.7 N$$

Ec. 43

Donde:

F' es la carga cortante primaria, donde $F'_A = F'_D$.

V es la carga aplicada.

n es el número de pernos en cada apoyo.

La carga cortante secundaria (F'') en los pernos se obtiene en función de la Ecuación 44

$$F'' = \frac{M}{4 * r} = 2162.67 N$$

Ec. 44

Donde:

F'' es la carga cortante secundaria, donde $F''_A = F''_D$.

M es el momento aplicado al centroide del grupo de pernos.

r es la distancia de cada perno hasta el centroide del grupo.

En base a los valores de cargas cortantes obtenidos previamente se determinan las cargas cortantes resultantes en cada uno de los pernos, en base a la regla del paralelogramo o por suma de vectores, los resultados son:

- $F_A = 2261.4 N$
- $F_D = 2068.3 N$

La carga cortante máxima es F_A , en la Tabla 8.1 página 398 de [1] se encuentran los valores de área de esfuerzo cortante para diferentes diámetros, donde para un perno de 8 mm se tiene un valor de $32.8 mm^2$, el esfuerzo cortante en los pernos se obtiene en función de la Ecuación 45.

$$\tau = \frac{F}{A_s} = 186.15 MPa$$

Ec. 45

Donde:

τ es el esfuerzo cortante secundaria en el perno.

F es la máxima carga cortante aplicada en el perno, igual a F_A .

A_s es el área de esfuerzo de cada perno.

Debido a las características de operación de la máquina, se requiere utilizar acero inoxidable o como mínimo protección galvanizada. Localmente se obtienen pernos inoxidables grado 5 o galvanizados grado 2, en [1] se listan las características mecánicas de los pernos.

Se calcula en función de la Ecuación 46 el factor de seguridad que se tiene para los pernos disponibles en el mercado.

$$n_s = \frac{\tau_{perno}}{\tau}$$

Ec. 46

Donde:

n_s es el factor de seguridad de cada perno.

τ_{perno} es el esfuerzo cortante máximo permisible en cada perno según su grado.

τ es el esfuerzo cortante de cada perno.

A continuación, se listan los valores obtenidos reemplazando los datos obtenidos en la Ecuación 61.

Acero Inoxidable Grado 5 – Factor de seguridad = 2.74

Acero Galvanizado Grado 2 – Factor de seguridad = 1.22

Para garantizar la resistencia mecánica de los pernos debido a los esfuerzos cortantes y además una protección superior ante la oxidación y corrosión, se seleccionan los pernos M8 de acero inoxidable grado 5. Se estandariza esta medida y material para las demás partes de la máquina que requiera fijación mediante pernos.

3.1.1.11 Rodamiento del eje de fragmentación

Para dimensionar los rodamientos del eje de fragmentación se utilizan las siguientes características:

- Vida útil requerida = 1'000.000 de revoluciones.
- Vida útil requerida mínima en horas (L_h) = 20000.
- Velocidad máxima de trabajo = 18 r.p.m.
- Carga radial = 1092 N.
- Carga Axial = 100 N.
- Factor de carga = 2.
- Diámetro del Eje = 1.25 pulgadas o 31.75 mm.

La carga equivalente requerida para la selección del rodamiento se calcula en función de la Ecuación 47.

$$C_{equivalente} = C_{radial} + 1.5 * C_{axial} = 2150 N$$

Ec. 47

El factor de esfuerzos dinámicos F_L , se calcula en función de la Ecuación 48.

$$F_L = \sqrt[p]{\frac{L_h}{500}} = 3.42$$

Ec. 48

Donde:

p es el exponente de vida, para rodamientos de bolas es igual a 3.

L_h es la vida útil requerida en horas.

El factor de velocidad F_n , se calcula en función de la Ecuación 49.

$$F_n = \sqrt[p]{\frac{33\frac{1}{3}}{n}} = 1.04$$

Ec. 49

Donde:

p es el exponente de vida, para rodamientos de bolas es igual a 3.

n es la velocidad nominal de trabajo.

En función de la Ecuación 50 se obtiene el valor de la carga dinámica requerida (C_{req}). Considerando un factor de concentración de esfuerzo adicional debido a la fatiga mecánica por cargas fluctuantes igual a 2.

$$C_{req} = \frac{C_{equivalente} * F_L}{F_n} * F_c = 11.98 \text{ kN}$$

Ec. 50

Partiendo de la carga requerida, se procede a seleccionar el rodamiento UCFL 207-20 con soporte P 207 según el catálogo de [15], que tiene una capacidad de carga dinámica especificada de 25.7 kN, se verifica la vida útil del rodamiento en función de la Ecuación 51.

$$L = \left(\frac{C}{C_{req}} \right)^p * 10^6 = 9'884.171 \text{ revoluciones}$$

Ec. 51

Donde:

L es la vida útil real del rodamiento seleccionado.

C es la capacidad de carga dinámica especificada.

C_{req} es la carga dinámica requerida.

Se comprueba que el rodamiento seleccionado supera significativamente el valor de la vida útil requerida.

3.1.2 ETAPA DE SEPARACIÓN DE CORTEZA Y PULPA

A continuación, se diseñan los elementos de la etapa de separación de la corteza y la pulpa, proceso principal de la máquina.

3.1.2.1 Datos preliminares

En La Tabla 3.2 se listan los pesos de las mazorcas (PM) y de la pulpa (PB), tomados como referencia de [9]. El peso máximo es 1.2 kg para cada mazorca entera, y de 325 g para la pulpa, mucílago y semillas, contenida en una mazorca.

El sistema de separación tipo cilíndrico elegido en el análisis de alternativas se modificó geoméricamente conservando el principio de funcionamiento. Se plantea con forma hexagonal con giro concéntrico sobre el eje, con lo cual las mazorcas dentro del sistema golpearían 6 veces contra una superficie plana en cada vuelta, a diferencia del sistema cilíndrico donde las mazorcas rodarían sobre el perímetro interno.

En la Figura 3.14 se observan las dimensiones del hexágono de separación, utilizadas para realizar el dimensionamiento del motor, rodamientos y el eje con sus respectivas partes.

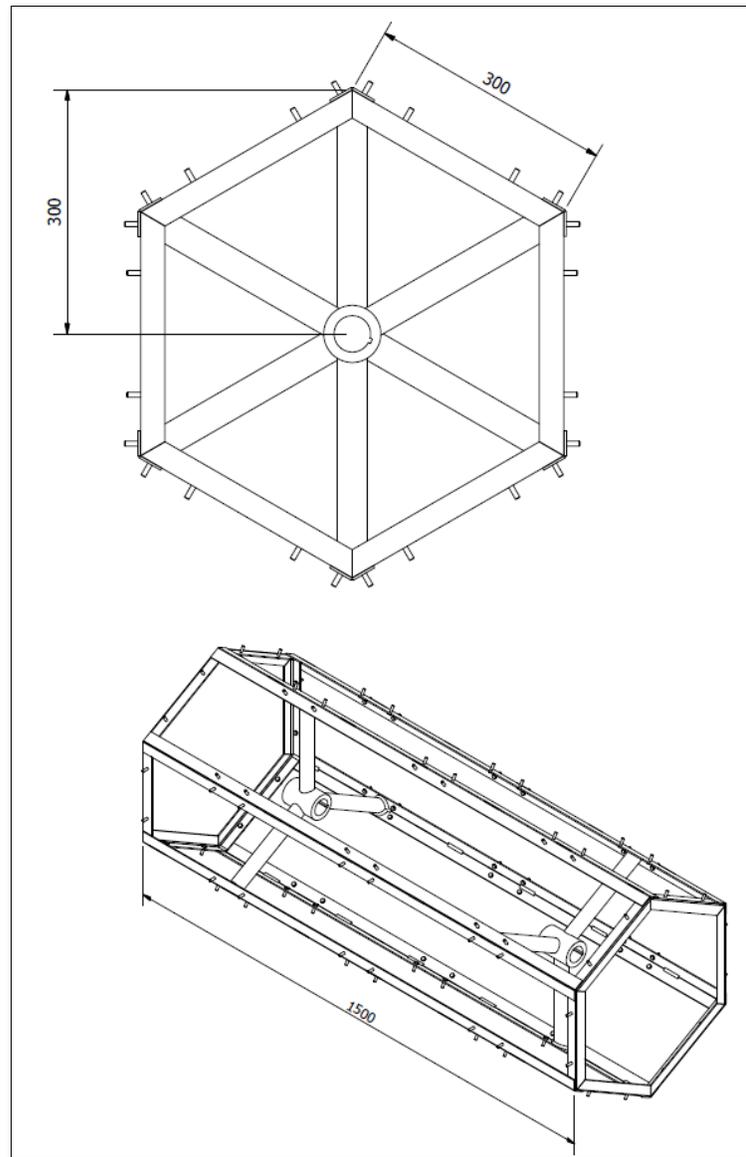


Figura 3.14: Dimensiones generales del hexágono de separación

3.1.2.2 Diseño del motor de separación

Para calcular la potencia requerida en el sistema de separación, se estiman mínimo 12 mazorcas dentro del sistema en un mismo instante y se considera un factor de carga igual a 2. Con la Ecuación 52 se estima el peso total que existiría en el sistema.

$$Peso_{Total} = \# \text{ de mazorcas} * Peso_{M\acute{a}x} * Fs = 28.8 \text{ kgf}$$

Además, se considera la carga debido al peso de la estructura que conforma el sistema de separación en aproximadamente 20 kg, utilizando la Ecuación 53 se obtiene la carga que se requiere mover por el sistema.

$$Carga = Peso_{Total} + Peso_{Estructura} * Fs = 675.5 N$$

Ec. 53

Se considera el diámetro teórico del hexágono de separación y en función de la Ecuación 54 se obtiene el torque o momento requerido.

$$M = Carga * \frac{Diametro}{2} = 202.7 N.m$$

Ec. 54

La velocidad de giro se estimó en base a las cajas reductoras de velocidad existentes en el mercado y como referencia se consideró [5], la potencia se obtiene en función de la Ecuación 55.

$$P = M * v$$

Ec. 55

Donde:

P es la Potencia requerida, en W.

M es el momento requerido, obtenido en la Ecuación 47

v es la velocidad de giro igual a 35 rpm o $3.67 \frac{rad}{s}$

El valor de la potencia es:

$$P = 742.74 W$$

Se requiere un motor de 742.74 W, debido a que comercialmente los motores se disponen en valores de potencia estándar listados en [17], se selecciona un motor de 1HP o 745.7 W.

3.1.2.3 Eje de separación: Diseño a fatiga

En función de materiales existentes en el mercado se seleccionó el acero AISI 1018, el cual posee las siguientes características mecánicas según [15]:

- Resistencia a la tensión = 500 MPa
- Resistencia a la fluencia = 304 MPa

El momento flector mínimo se calcula en función de la Ecuación 56, en base al peso generado por la estructura, considerando la peor condición donde el peso de la estructura se concentre en un punto medio del eje.

$$M_{\min} = \frac{196.6 \text{ N}}{2} * 0.79 \text{ m} = 77.7 \text{ N.m}$$

Ec. 56

El momento flector máximo se calcula en función de la Ecuación 57, considerando el peso más la carga debido al peso de las mazorcas.

$$M_{\max} = 77.7 \text{ N.m} + \frac{675.5 \text{ N}}{2} * 0.79 \text{ m} = 344.5 \text{ N.m}$$

Ec. 57

El momento torsor mínimo es cero, el momento torsor máximo sobre el eje sería en la peor condición el valor obtenido de la Ecuación 54.

Utilizando los datos obtenidos, se calcula el momento flector y torsor, tanto medio como alternante. Valores que sirven para calcular los esfuerzos que soporta el eje de fragmentación y posteriormente encontrar el valor del factor de seguridad.

$$\begin{aligned} \text{Momento Flector Medio} &= 211.1 \text{ N.m} \\ \text{Momento Flector Alternante} &= 133.4 \text{ N.m} \\ \text{Momento Torsor Medio} &= 101.32 \text{ N.m} \\ \text{Momento Torsor Alternante} &= 101.32 \text{ N.m} \end{aligned}$$

En función de las Ecuaciones 8 y 9 se calculan los esfuerzos flector y torsor, medio y alternante respectivamente, los resultados se listan a continuación:

$$\begin{aligned} \text{Esfuerzo Flector Medio} &= 25.24 \text{ MPa} \\ \text{Esfuerzo Flector Alternante} &= 15.95 \text{ MPa} \\ \text{Esfuerzo Torsor Medio} &= 6.06 \text{ MPa} \\ \text{Esfuerzo Torsor Alternante} &= 6.06 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Se obtiene el esfuerzo medio y alternante equivalente en función de la Ecuación 10, los resultados se presentan a continuación:

$$\begin{aligned} \text{Esfuerzo Alternante Equivalente} &= 19.09 \text{ MPa} \\ \text{Esfuerzo Medio Equivalente} &= 27.33 \text{ MPa} \end{aligned}$$

El límite a la fatiga de la probeta se calcula en función de la Ecuación 11, y es igual a:

$$Se' = 0.506 * Sut = 253 \text{ MPa}$$

Se calculan los factores modificadores para reemplazar en la Ecuación 12, donde para acero laminado en caliente se tiene:

$$\begin{aligned} a &= 4.51 \\ b &= -0.265 \end{aligned}$$

Reemplazando los valores de a y b en la Ecuación 13, se obtiene el factor de acabado superficial (ka).

$$ka = 4.51 * (500)^{-0.265} = 0.869$$

El factor de tamaño (kb) se obtiene de la Ecuación 14 y el diámetro del eje, se tiene:

$$kb = 0.879 * \left(\frac{4.44 \text{ cm} * 1 \text{ in}}{2.54 \text{ cm}} \right)^{-0.107} = 0.8288$$

Para torsión el factor de carga (kc) es igual a 0.59, considerando una temperatura máxima de operación el factor de temperatura (kd) es igual a 1.01 y la confiabilidad seleccionada en 95% lo cual da como resultado un factor de confiabilidad (ke) de 0.868.

El factor de efectos varios (kt), se obtiene en función de la Ecuación 15, donde la sensibilidad a la muesca es de 0.2 y el valor del factor de concentración de esfuerzos (kts), es de 2.8, dando como resultado:

$$kt = \frac{1}{q * (kts - 1) + 1} = \frac{1}{0.2 * (2.8 - 1) + 1} = 0.735$$

Se obtiene el límite a la fatiga en función de la Ecuación 12, cuyo resultado es:

$$Se = 0.868 * 0.829 * 0.59 * 1.01 * 0.868 * 0.735 * 253 \text{ MPa} = 69.26 \text{ MPa}$$

Para el cálculo del factor de seguridad del eje se utiliza la Ecuación 16, según método de la recta modificada de Goodman, en diseño de elementos de máquina a vida infinita, cuyo resultado es:

$$\frac{19.09 \text{ MPa}}{69.26 \text{ MPa}} + \frac{27.33 \text{ MPa}}{500 \text{ MPa}} = \frac{1}{n}$$

$$n = 3.1$$

El eje seleccionado posee un factor de seguridad de 3.1 lo cual asegura una resistencia adecuada y un funcionamiento óptimo ante las cargas que actuarán sobre el mismo, considerando la peor condición.

3.1.2.4 Eje de separación: Diseño a rigidez

En el análisis por rigidez se considera la carga distribuida en los apoyos según la Figura 3.14, el valor de carga máxima se obtuvo en la Ecuación 53. Se puede observar en la Figura 3.15 la distribución de cargas en el eje, la cual se encuentra distribuida en los dos apoyos, además se obtiene el valor de las reacciones.

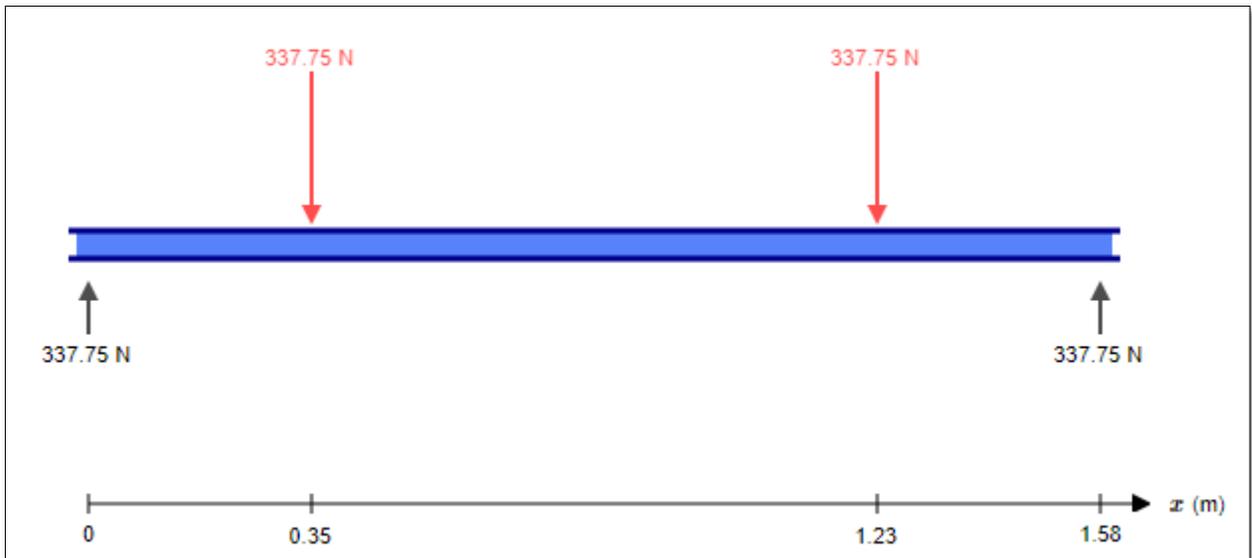


Figura 3.15: Distribución de carga en el eje de separación

En la Figura 3.16 se puede observar los resultados obtenidos en el diagrama de fuerza cortante, donde el valor de las reacciones en cada apoyo es de 337.75 N.

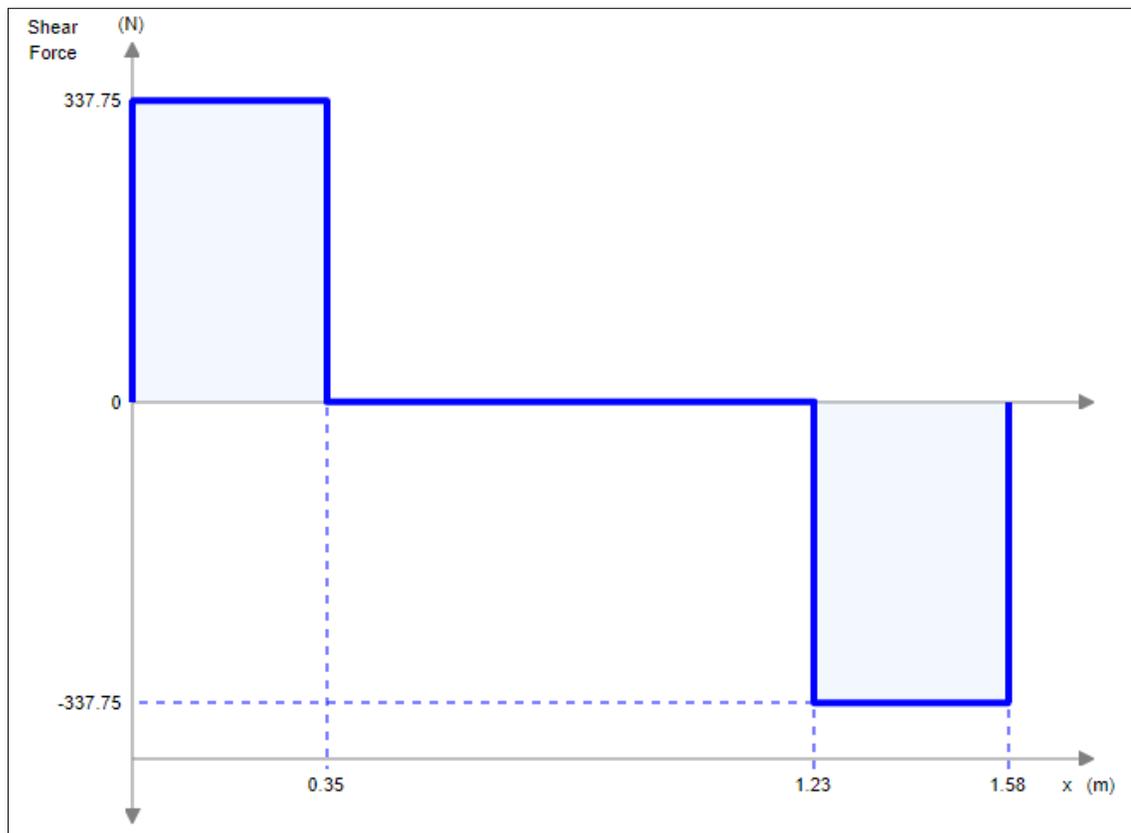


Figura 3.16: Diagrama de fuerza cortante eje de separación

En la Figura 3.17 se observan los resultados obtenidos en el diagrama de momento flexionante, el máximo soportado por el eje es de 118.212 Nm en el punto medio.

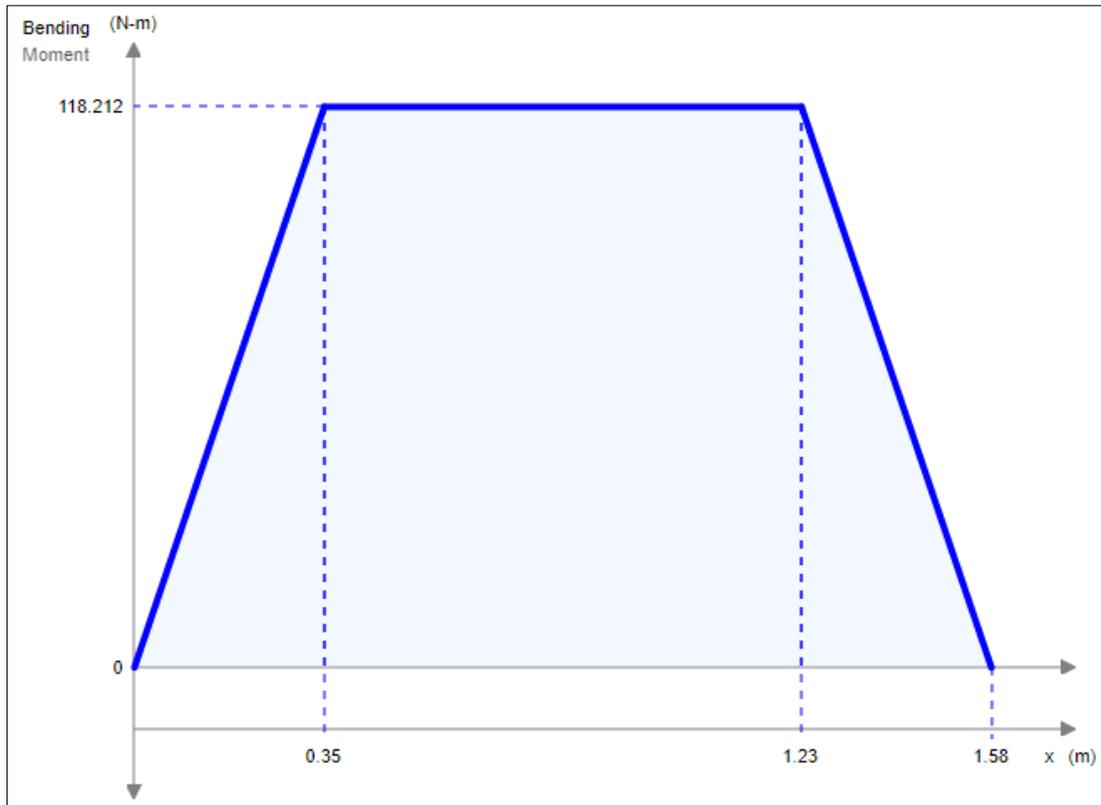


Figura 3.17: Diagrama de momento flexionante en el eje de separación

En la Tabla 3.3 se encuentran los valores de la deflexión máxima, se considera como parte de precisión moderada debido a que la velocidad máxima del eje de fragmentación es 35 r.p.m., la deflexión máxima permitida para el eje de fragmentación se calcula en función de la Ecuación 17, cuyo resultado es.

$$Y_{\text{máx}} = \frac{0.0005 \text{ mm}}{\text{mm de longitud}} * 1580 \text{ mm} = 0.79 \text{ mm}$$

La deflexión del eje de fragmentación se obtiene por el método de superposición [13], en función la Ecuación 58 se obtiene la deflexión a una distancia de 0.35 y en función de la Ecuación 59 se obtiene la deflexión a una distancia de 1.23 m del primer apoyo.

$$Y_{B1} = \frac{-P * a^2 * b^2}{3 * E * I * L}$$

Ec. 58

$$Y_{C1} = \frac{-P * b * x}{6 * E * I * L} (L^2 - b^2 - x^2)$$

Ec. 59

Donde:

P es la carga.

E es el módulo de elasticidad del acero.

I es la inercia del eje, igual a $\frac{\pi * D^4}{64}$.

a es la distancia desde la carga hasta el segundo apoyo.

b es la distancia desde el primer apoyo hasta la carga.

x es la distancia desde el segundo apoyo hasta la ubicación teórica de la segunda carga.

L es la longitud del eje.

En la Figura 3.18 se encuentran los valores de las distancias para calcular la deflexión debido a la primera carga a 0.35 m del primer apoyo.

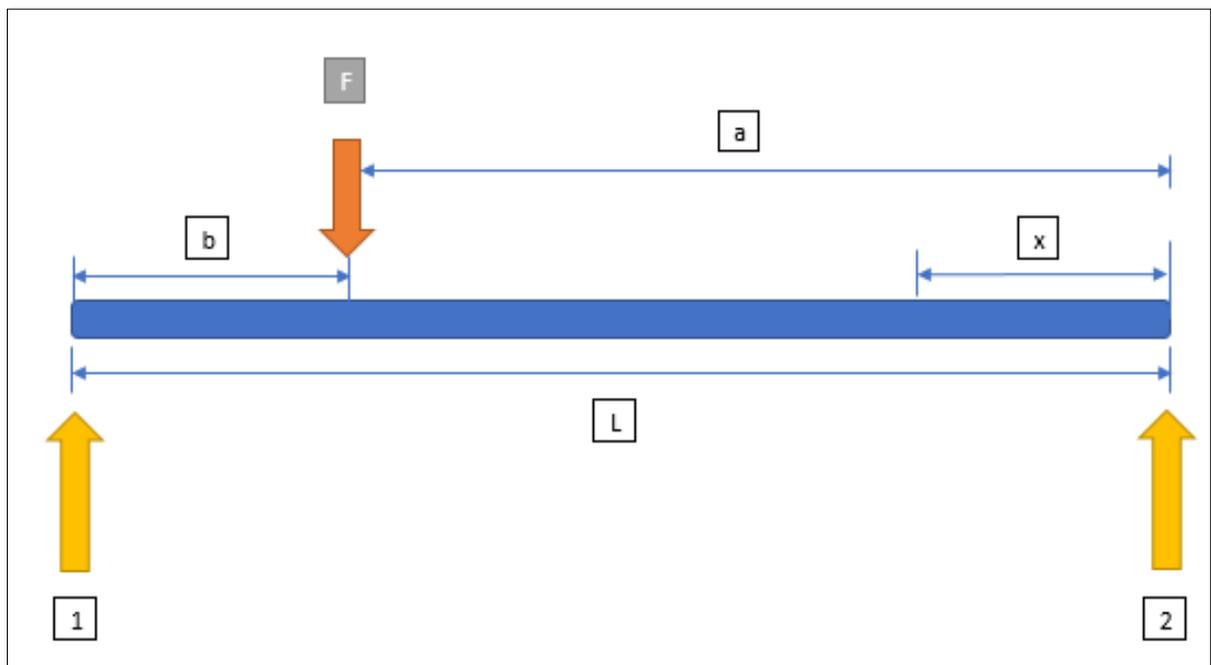


Figura 3.18: Primera carga para calcular la deflexión

Reemplazando los valores respectivos en las Ecuaciones 58 y 59 se obtienen los siguientes resultados:

$$Y_{B1} = -0.33 \text{ mm}$$

$$Y_{C1} = -0.25 \text{ mm}$$

En la Figura 3.19 se encuentran los valores de las distancias para calcular la deflexión debido a la segunda carga a 1.23 m del primer apoyo.

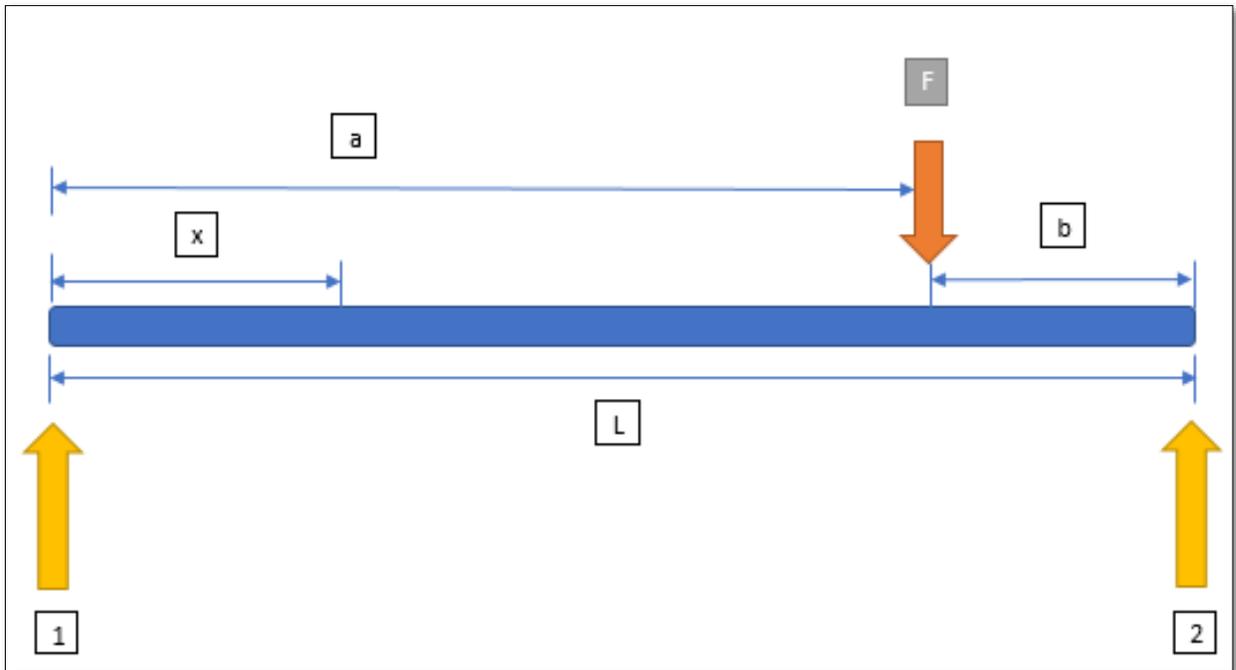


Figura 3.19: Segunda carga para calcular la deflexión

Reemplazando los valores respectivos en las Ecuaciones 58 y 59 se obtienen los siguientes resultados:

$$Y_{B2} = -0.25 \text{ mm}$$

$$Y_{C2} = -0.33 \text{ mm}$$

Según el teorema de superposición se obtienen los valores de la deflexión en las posiciones de aplicación de las cargas, según la Ecuación 60 y 61.

$$Y_B = Y_{B1} + Y_{B2} = -0.58 \text{ mm}$$

Ec. 60

$$Y_C = Y_{C1} + Y_{C2} = -0.58 \text{ mm}$$

Ec. 61

Comparando la deflexión máxima permitida con la deflexión teórica del eje, el factor de seguridad se calcula en función de la Ecuación 19, cuyo resultado es:

$$n = \frac{0.79}{0.58} = 1.35$$

El factor de seguridad del cálculo por rigidez es de 1.35, teniendo en cuenta que se considera un factor de carga de 2. Además, con el objetivo de verificar los valores del diseño por rigidez se simuló el eje en el software Inventor Professional 2016 de Autodesk, se pueden observar los resultados de la simulación en la Figura 3.20.

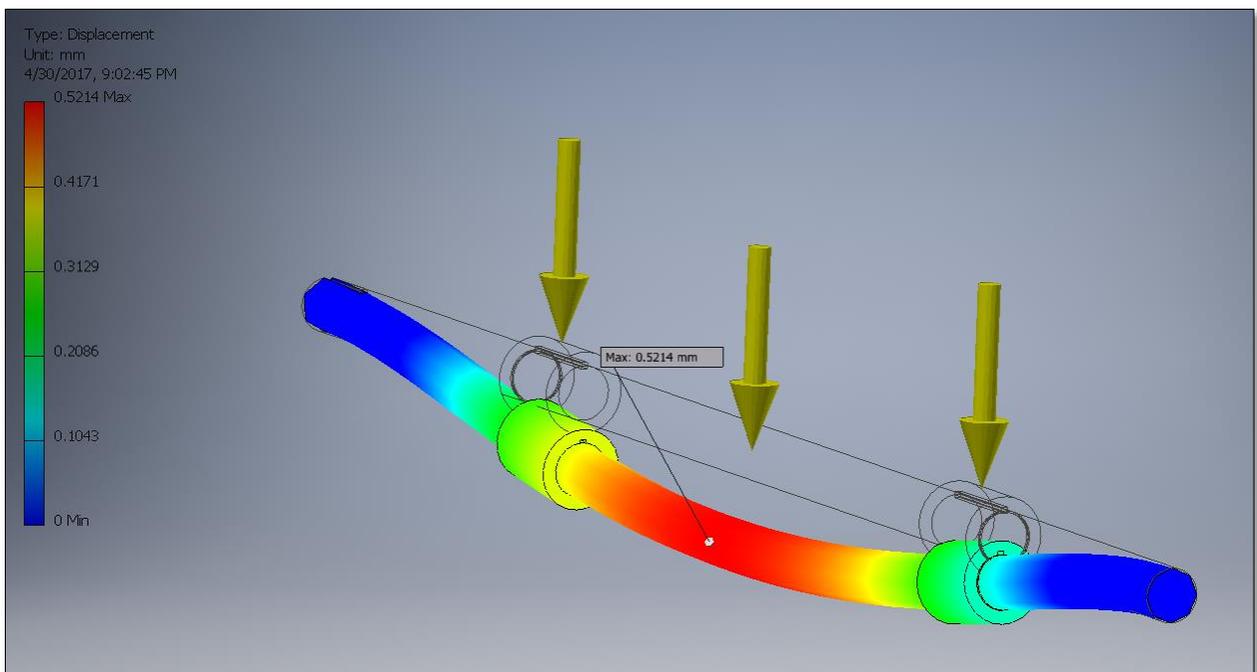


Figura 3.20: Simulación de deflexión del sistema de separación

De la simulación se obtiene un valor de deflexión máxima del eje igual a 0.5214 mm, aproximado al valor de los cálculos realizados, esto asegura que el eje no supera la deflexión máxima permitida.

3.1.2.5 Selección de la malla

Para la selección de la malla deben considerar las dimensiones de la Tabla 3.4, donde se listan valores de varias muestras de las semillas de cacao, se tomó como referencia el grosor y la longitud.

Tabla 3.4: Dimensiones de las semillas

# de Muestra	Grosor (mm)	Longitud (mm)
1	15	26
2	11	25
3	19	18
4	20	30
5	14	26
6	14	29
7	9	23
8	13	25
9	17	27
10	11	26

El grosor máximo es de 20 mm y la longitud máxima es de 30 mm, además en [5] se hace referencia al grosor máximo de una semilla igual 20 mm y su longitud máxima 30 mm, corroborando los datos obtenidos. Con lo cual se estima la abertura requerida en la malla para la correcta separación de las semillas y la corteza.

Según el catálogo de [14] se seleccionó malla hexagonal de 3/4 de pulgada o 19 mm de acero galvanizado, en la Figura 3.21 observa la malla seleccionada, disponible en espesor de 0.71 mm.

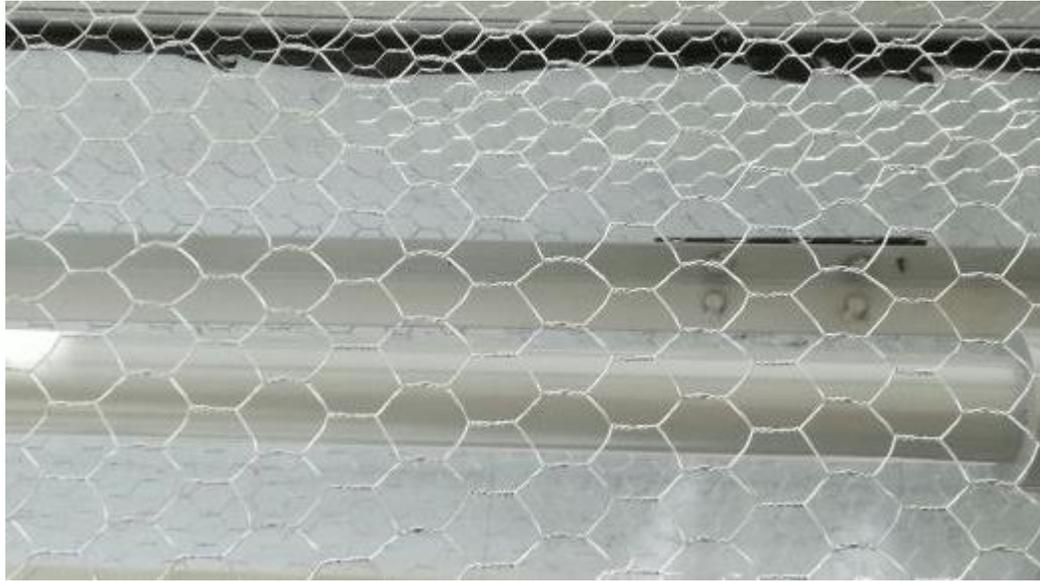


Figura 3.21: Malla hexagonal de 5/8 de pulgada

3.1.2.6 Rodamientos del eje de separación

Para dimensionar los rodamientos del eje de separación se parte de las siguientes características:

- Vida útil requerida = 1'000.000 de revoluciones.
- Vida útil requerida mínima en horas (L_h) = 20000.
- Velocidad máxima de trabajo = 35 r.p.m.
- Carga radial = 675.5 N.
- Carga Axial = 500 N.
- Factor de carga = 2.
- Diámetro del Eje = 1.75 pulgadas o 44.45 mm.

La carga equivalente requerida para la selección del rodamiento se calcula en función de la Ecuación 47, cuyo resultado es:

$$C_{equivalente} = 9.91 \text{ kN}$$

El factor de esfuerzos dinámicos F_L , se calcula en función de la Ecuación 48 y es igual a:

$$F_L = \sqrt[p]{\frac{L_h}{500}} = 3.42$$

El factor de velocidad F_n , se calcula en función de la Ecuación 49, siendo igual a:

$$F_n = \sqrt[p]{\frac{33\frac{1}{3}}{n}} = 0.984$$

En función de la Ecuación 50 se obtiene el valor de la carga dinámica requerida (C_{req}), considerando un factor de concentración de esfuerzo adicional debido a la fatiga mecánica por cargas fluctuantes igual a 2, el resultado es:

$$C_{req} = \frac{C_{equivalente} * F_L}{F_n} * F_C = 19.82 \text{ kN}$$

Se selecciona el rodamiento UCP 209-28 con soporte P 209 según el catálogo de [15], que tiene una capacidad de carga dinámica especificada de 34.1 kN. Se calcula la vida útil del rodamiento en función de la Ecuación 51, cuyo resultado es el siguiente:

$$L = 5'092.514 \text{ revoluciones}$$

Se comprueba que el rodamiento seleccionado supera significativamente el valor de la vida útil requerida.

3.2 DISEÑO ELÉCTRICO

3.2.1 SELECCIÓN DEL VARIADOR DE VELOCIDAD

Con el objetivo de determinar una velocidad de trabajo idónea y además permitir al operario controlar la velocidad del sistema de fragmentación se requiere implementar un variador de velocidad para el motor dimensionado en la Sección 3.1.1.3, considerando una potencia de 1 HP, y en base al catálogo de variadores de frecuencia de propósito general de ABB [10], se selecciona el modelo ACS50 con las siguientes características principales:

- Alimentación: Monofásica 110 V o Bifásica 220 V, (L/R – N/S), con PE.
- Frecuencia de trabajo: 50 Hz – 60 Hz.
- Modos de arranque: Par cuadrático (P&F) – Par constante (CT).
- Relé NA con modo de Fallo (FLT) y En marcha (RUN).
- Voltaje de salida: trifásico 220 V (T1/U – T2/V – T3/W), con PE.

Debido a la implementación del variador de frecuencia se tiene como requerimiento que el voltaje de alimentación del motor de fragmentación sea tipo trifásico, para permitir acoplar eléctricamente el variador y el motor.

Principalmente se requiere variar la velocidad del motor de fragmentación para determinar durante las pruebas de funcionamiento una velocidad optima que reduzca al mínimo el daño provocado a las semillas de cacao debido a las cuchillas.

3.2.2 VOLTAJE DE TRABAJO DE LA MÁQUINA

Como premisa se parte de los datos obtenidos en el Anexo A, datos de las visitas técnicas, donde el voltaje disponible en los lugares a ser instalada tentativamente la máquina es de 220 V y 110 V, se procede a realizar la selección del voltaje de trabajo de la máquina, en función de la Ecuación 62 se determina la corriente en base al voltaje y potencia.

$$I = \frac{P}{V}$$

Ec. 62

Donde:

P es la potencia.

V es el voltaje.

I es la intensidad de corriente.

Considerando que se tienen la posibilidad de utilizar 110 V o 220 V se determina la corriente necesaria para conectar solo un motor con potencia igual a 1 HP o 745.7 W, donde para 110 V se tiene:

$$I = \frac{745.7 \text{ W}}{110 \text{ V}} = 6.8 \text{ A}$$

Para 220 V se tiene:

$$I = \frac{745.7 \text{ W}}{220 \text{ V}} = 3.4 \text{ A}$$

En base a los resultados obtenidos y considerando que el calibre de un cable depende principalmente de la corriente a conducirse, se selecciona como voltaje de operación para la máquina 220 V bifásico, para el diseño de las diferentes partes del sistema eléctrico de la máquina se consideran los componentes de la Tabla 3.5, para los elementos de control y señalización se estimó un consumo de 0.5 A.

Tabla 3.5: Componentes eléctricos principales

Componente	Potencia (HP)	Voltaje (V)	Intensidad de Corriente (A)	Fases
Motor de fragmentación	1	220	3.4	Trifásico
Motor de separación	1	220	3.4	Bifásico
Variador de frecuencia	1	220	(Mismo consumo del motor)	Bifásico
Elementos de señalización	-	220	0.5	Bifásico
Elementos de control	-	220	0.5	Bifásico
Corriente Total			7.8	

El motor de fragmentación se requiere que sea trifásico debido al variador de frecuencia, el cual es de entrada bifásica de 220 V y salida trifásica de 220 V.

3.2.3 POTENCIA ELÉCTRICA TOTAL REQUERIDA PARA EL FUNCIONAMIENTO DE LA MÁQUINA

Para dimensionar la potencia requerida en el lugar de la instalación de la máquina se parte de la corriente total de la Tabla 3.5, teniendo en consideración picos de corriente debido a sobrecargas momentáneas, se añade un factor de carga eléctrico igual a 2 y en función de la Ecuación 63 se calcula la potencia que se requiere disponer en el sitio de la instalación de la máquina.

$$P = I_T * V * F_{ce} = 7.8 A * 220 V * 2 = 3.5 kW$$

Ec. 63

Donde:

P es la potencia requerida.

V es el voltaje de operación.

I_T es la intensidad de corriente total del sistema.

F_{ce} es el factor de carga eléctrico, igual a 2.

El resultado de la potencia requerida es de 3.5 kW, necesarios para el óptimo funcionamiento de la máquina en el lugar de instalación.

3.2.4 DIMENSIONAMIENTO DEL CONDUCTOR

El dimensionamiento del calibre mínimo del conductor para el circuito de potencia de la máquina se realiza en función de las características eléctricas de cada componente principal, Tabla 3.5, y la capacidad de intensidad de corriente según el calibre, Tabla 3.6.

Tabla 3.6: Tabla de calibre de cables AWG

AWG	Diameter [inches]	Diameter [mm]	Area [mm ²]	Resistance [Ohms / 1000 ft]	Resistance [Ohms / km]	Max Current [Amperes]	Max Frequency for 100% skin depth
0000 (4/0)	0.46	11.684	107	0.049	0.16072	302	125 Hz
000 (3/0)	0.4096	10.40384	85	0.0618	0.202704	239	160 Hz
00 (2/0)	0.3648	9.26592	67.4	0.0779	0.255512	190	200 Hz
0 (1/0)	0.3249	8.25246	53.5	0.0983	0.322424	150	250 Hz
1	0.2893	7.34822	42.4	0.1239	0.406392	119	325 Hz
2	0.2576	6.54304	33.6	0.1563	0.512664	94	410 Hz
3	0.2294	5.82676	26.7	0.197	0.64616	75	500 Hz
4	0.2043	5.18922	21.2	0.2485	0.81508	60	650 Hz
5	0.1819	4.62026	16.8	0.3133	1.027624	47	810 Hz
6	0.162	4.1148	13.3	0.3951	1.295928	37	1100 Hz
7	0.1443	3.66522	10.5	0.4982	1.634096	30	1300 Hz
8	0.1285	3.2639	8.37	0.6282	2.060496	24	1650 Hz
9	0.1144	2.90576	6.63	0.7921	2.598088	19	2050 Hz
10	0.1019	2.58826	5.26	0.9989	3.276392	15	2600 Hz
11	0.0907	2.30378	4.17	1.26	4.1328	12	3200 Hz
12	0.0808	2.05232	3.31	1.588	5.20864	9.3	4150 Hz
13	0.072	1.8288	2.62	2.003	6.56984	7.4	5300 Hz
14	0.0641	1.62814	2.08	2.525	8.282	5.9	6700 Hz
15	0.0571	1.45034	1.65	3.184	10.44352	4.7	8250 Hz
16	0.0508	1.29032	1.31	4.016	13.17248	3.7	11 k Hz
17	0.0453	1.15062	1.04	5.064	16.60992	2.9	13 k Hz
18	0.0403	1.02362	0.823	6.385	20.9428	2.3	17 kHz
19	0.0359	0.91186	0.653	8.051	26.40728	1.8	21 kHz
20	0.032	0.8128	0.518	10.15	33.292	1.5	27 kHz
21	0.0285	0.7239	0.41	12.8	41.984	1.2	33 kHz
22	0.0254	0.64516	0.326	16.14	52.9392	0.92	42 kHz
23	0.0226	0.57404	0.258	20.36	66.7808	0.729	53 kHz
24	0.0201	0.51054	0.205	25.67	84.1976	0.577	68 kHz
25	0.0179	0.45466	0.162	32.37	106.1736	0.457	85 kHz
26	0.0159	0.40386	0.129	40.81	133.8568	0.361	107 kHz
27	0.0142	0.36068	0.102	51.47	168.8216	0.288	130 kHz

Fuente: "American Wire Gauge Conductor Size Table" [16].

La máxima intensidad de corriente es en los motores de 1 HP, igual a 3.4 A cada uno, se determina el cable requerido para las conexiones, considerando la recomendación en [16] sobre la capacidad de corriente para la transmisión de potencia se sugiere que el cable no trabaje a más del 75% de su capacidad nominal, por lo que según la Ecuación 64 se calcula un cable con capacidad de al menos 4.53 A.

$$I_{nom} = \frac{I}{75\%} = 4.53 A$$

Donde:

I_{nom} es la capacidad nominal de intensidad corriente requerida.

I es la corriente de operación.

En función de la Tabla 3.6 y el resultado de la Ecuación 64 se determina que el calibre en el cable del circuito de potencia de la máquina es 15 AWG, el cual dispone una capacidad máxima de corriente para transmisión de potencia de 4.7 A, debido a que comercialmente se puede disponer solo de 16 AWG y 14 AWG, se selecciona el calibre 14 AWG, con capacidad máxima de 5.9 A, para asegurar que no exista sobre carga de temperatura en el mismo.

Para el circuito de control de la máquina se tiene un consumo de máximo 0.5 A, en función de la Ecuación 64 se determina la corriente nominal para seleccionar el calibre del cable de control, cuyo resultado es:

$$I_{nom} = \frac{I}{75\%} = 0.67 A$$

Se determina que el calibre requerido en el cable del circuito de control de la máquina es 23 AWG, comercialmente se dispone de 24 AWG y 22 AWG, se selecciona el calibre 22 AWG, con capacidad máxima de 0.92 A.

Para la alimentación principal de energía de la máquina se tiene un consumo de máximo 7.8 A, en función de la Ecuación 64 se determina la corriente nominal para seleccionar el calibre del cable requerido, cuyo resultado es:

$$I_{nom} = \frac{I}{75\%} = 10.4 A$$

Se determina que el calibre requerido en el cable alimentación de la máquina es 11 AWG, comercialmente se dispone de 12 AWG y 10 AWG, para asegurar que no exista sobre carga de temperatura, se selecciona el calibre 10 AWG, con capacidad máxima de 15 A.

3.2.5 PROTECCIONES

Se consideran necesario utilizar protecciones en el sistema eléctrico con el objetivo de proteger a los equipos instalados en máquina, se dimensionan fusible y disyuntor con base en las especificaciones de la Tabla 3.5.

3.2.5.1 Fusibles

Los fusibles de protección del sistema eléctrico se diseñan con el objetivo de proteger a los equipos ante un posible cortocircuito, se considera el criterio de diseño de [19], donde la corriente nominal del fusible debe ser superior a la corriente necesaria para que la máquina trabaje, pero menor que la corriente máxima permisible del cable utilizado, con el objetivo de evitar deterioro del cable en caso de un cortocircuito, la condición se muestra expresada en la Ecuación 65.

$$I_T \leq I_n \leq I_z$$

Ec. 65

Donde:

I_T es la corriente de la máquina, 7.8 A.

I_n es la corriente nominal del fusible.

I_z es la corriente máxima admisible del cable principal, 15 A.

Reemplazando los valores de la Tabla 3.5 y de la Sección 3.2.2, se obtiene el rango de corriente nominal requerida en el fusible.

$$7.8 \leq I_n \leq 15$$

Comercialmente se disponen de fusibles con una corriente nominal de 6, 10 y 16 amperios, según el criterio de diseño, se selecciona un fusible de 10 amperios, brindando una protección adecuada al conductor utilizado, evitando deterioros por sobrecarga de temperatura, y asegurando el paso de corriente que el sistema eléctrico de la máquina requiere.

3.2.5.2 Disyuntor

Para el dimensionamiento del disyuntor se considera que debe trabajar a máximo 80% de su capacidad nominal, el consumo total de corriente de los componentes eléctricos de la máquina es de 7.8 A, valor utilizado en la Ecuación 66.

$$I_{disyuntor} = \frac{I_{nom}}{80\%} = 9.75 A$$

Ec. 66

Donde:

$I_{disyuntor}$ es la capacidad de corriente requerida en el disyuntor.

I_{nom} es la corriente nominal de operación de la máquina.

El valor aproximado de corriente que se puede obtener comercialmente para el disyuntor es 10 A, con lo cual en la Ecuación 67 se obtiene el porcentaje de trabajo.

$$\text{Porcentaje de trabajo del disyuntor} = \frac{I_{nom}}{I_{disyuntor}} = \frac{7.8}{10} * 100\% = 78\%$$

Ec. 67

Para una adecuada protección del sistema eléctrico de la máquina se requiere emplear un disyuntor de 10 A, el cual trabajaría a un 78% de su capacidad nominal.

3.2.6 SISTEMA DE CONTROL

El sistema de control de la máquina permite al usuario controlar y visualizar la velocidad de giro de las cuchillas de fragmentación, visualizar la velocidad de giro del hexágono de separación, detener automáticamente los motores en caso de emergencia, además de calcular valores estimados del producto procesado en función del número de macocas que ingresan al proceso.

3.2.6.1 Conteo de mazorcas y estimación de producto procesado por valores estadísticos

El conteo de mazorcas se realiza en la entrada de la etapa de fragmentación, mediante un interruptor de fin de carrera de barra ajustable [21], el PLC cuenta el número de pulsos enviados por el sensor, y calcula el peso de producto procesado, semillas dañadas y rechazadas en kilogramos, y el porcentaje de la bandeja de almacenamiento que se encuentra llena.

En la Tabla 3.7 se observan los valores promedio de las variables del proceso, los cuales se calcularon en función de los valores obtenidos al procesar 90 mazorcas, documentados en la Sección 4.2.7.

Tabla 3.7: Valores promedio de las variables del proceso

Valores promedio	
Rechazo [g]	27.01
Daño [g]	5.07
Peso de semillas [g]	234.58
Capacidad de la Bandeja	0.24%

Todos los valores a excepción de la capacidad de la bandeja se encuentran expresados en gramos, y corresponden al valor promedio por cada mazorca procesada. Por ejemplo, al procesar 10 mazorcas se obtiene un peso de semillas de 2,345.8 g y 50.7 g de semillas dañadas, con lo cual la bandeja se llenaría 2.4% de su capacidad total.

Se muestra en el HMI al operario los valores calculados en función de los promedios obtenidos, como información referencial sobre el proceso.

3.2.6.2 Velocidad de fragmentación

La velocidad de giro de las cuchillas en el sistema de fragmentación se calcula en función de interrupciones que un fin de carrera de barra ajustable [21] envía al PLC y el tiempo real entre dos interrupciones consecutivas. Según la Ecuación 68 se obtiene la velocidad en rpm.

$$rpm = \frac{60 s}{(T_{interrupciones})} * Interrupciones$$

Ec. 68

Donde:

rpm es la velocidad de giro del eje, en rpm.

T_{interrupciones} es el tiempo entre dos interrupciones consecutivas, en segundos.

Interrupciones es el número de interrupciones que existe en cada revolución, igual a 1.

La velocidad del eje de las cuchillas se muestra en la pantalla del HMI en todo momento siempre y cuando el motor se encuentre encendido. También se utiliza para determinar situaciones posibles en las cuales se requiera parar automáticamente el motor.

El rango de velocidad de giro de las cuchillas es de 17 rpm máximo y 10 rpm mínimo, donde el tiempo entre cada interrupción para la velocidad máxima es de 3.53 segundos y 6 segundos para la velocidad mínima.

El variador de velocidad permite reducir la velocidad a un valor inferior del límite mínimo establecido. Pero se observó que una reducción inferior a 8 rpm produce atascamiento de las mazorcas en el fragmentador debido a la reducción del torque, por lo cual se establece como límite mínimo de velocidad 10 rpm.

3.2.6.3 Velocidad de separación

La velocidad de giro del hexágono de separación se calcula en función de interrupciones que un fin de carrera de resorte [21] envía al PLC y el tiempo real entre dos interrupciones consecutivas. Según la Ecuación 68 se obtiene la velocidad en rpm.

La velocidad del eje del hexágono se mantiene en un valor fijo en todo momento a 35 rpm y se muestra en la pantalla del HMI cuando el motor se encuentra encendido, se utiliza para determinar situaciones posibles en las cuales se requiera parar automáticamente el motor.

El tiempo entre cada interrupción para 35 rpm de velocidad, es de 1.71 segundos, el motor no cuenta con un variador de velocidad y gira en todo momento a una velocidad constante.

3.2.6.4 Vida útil de los sensores de velocidad

Se determino la vida útil de los finales de carrera utilizados para medir la velocidad de giro de los ejes de cada sistema en Función de la Ecuación 69.

$$Vida\ útil = \frac{Número\ mínimo\ de\ ciclos}{Ciclos\ de\ funcionamiento\ por\ minuto}$$

Ec. 69

Donde:

Vida útil es el mínimo número de ciclos especificados por el fabricante.

Número mínimo de ciclos es la vida útil en número de ciclos especificado por el fabricante [21], igual a 10'000,000 de ciclos.

Ciclos de funcionamiento por minuto es el número de interrupciones por minuto.

En el eje de fragmentación se tiene una velocidad máxima de 17 rpm, y en el hexágono de separación una velocidad fija de 35 rpm. Se estima la vida útil mínima del fin de carrera del separador, debido a ser el sensor que trabaja a mayor frecuencia.

$$Vida\ útil = \frac{10'000,000\ ciclos}{35\ \frac{ciclos}{minuto}} = 285,714\ minutos = 4,761\ horas$$

Se asegura el correcto funcionamiento del fin de carrera con mayor frecuencia de funcionamiento por mínimo 4,761 horas, considerando un funcionamiento máximo de 6 horas diarias el fin de carrera tiene una vida útil mínima de 793 días.

3.2.6.5 Condiciones de paro automático

El PLC monitorea el correcto funcionamiento de cada sistema y en caso de un mal funcionamiento o un posible accidente los desactiva. Las posibles causas que desactivarían los sistemas se listan a continuación:

- Fallo de los sensores de velocidad.
- Fallo del variador de velocidad del motor de fragmentación.
- Fallo del motor o caja reductora del sistema de fragmentación.
- Fallo del motor o caja reductora del sistema de separación.
- Atascamiento del eje del sistema de fragmentación, por falla mecánica o accidente.
- Atascamiento del eje del hexágono de separación, por falla mecánica o accidente.
- Reducción de la velocidad de giro del eje de fragmentación por debajo del límite mínimo establecido.

Se utiliza la velocidad de giro de cada motor y el modo de funcionamiento seleccionado por el operario para determinar las condiciones de paro automático, en función del tipo de error que se produzca se muestra una indicación visual en el HMI.

3.3 DIAGRAMA DE FLUJO DEL FUNCIONAMIENTO

La máquina diseñada cuenta con dos modos de funcionamiento, fragmentación y separación. Donde en modo fragmentación se accionan los motores de los dos sistemas, fragmentación y separación, siempre y cuando se cumplan los parámetros de funcionamiento.

En modo de separación únicamente se activa el motor del hexágono de separación, se puede activar con dos propósitos, primero cuando el operador acabe de fragmentar todas las mazorcas y solo requiera que el sistema del separador se mantenga activo hasta que

sean expulsados todos los fragmentos restantes en el sistema, ahorrando energía al apagar el motor del fragmentador, segundo para realizar la limpieza correspondiente de la malla cuando se requiera.

3.3.1 DIAGRAMA DE FUNCIONAMIENTO GENERAL

En la Figura 3.22 se puede apreciar el diagrama de funcionamiento general de la máquina, donde la acción que el operario debe realizar sobre el control de la máquina es seleccionar el modo de operación, con las opciones de modo de fragmentación y separación.

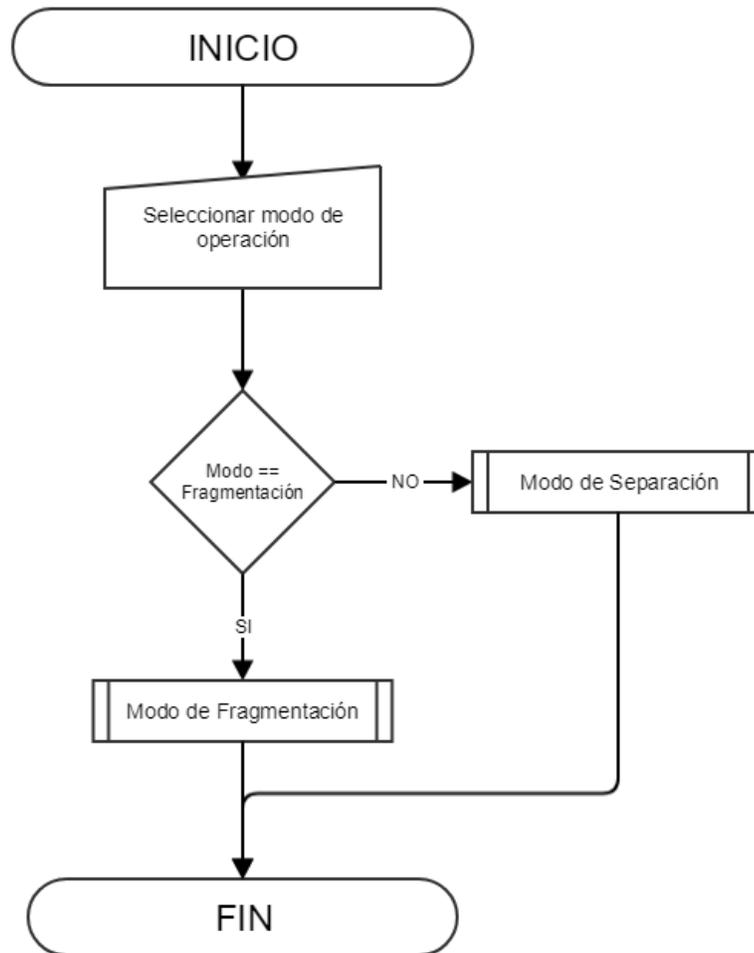


Figura 3.22: Diagrama de funcionamiento general de la máquina

3.3.2 DIAGRAMA DE MODO DE SEPARACIÓN

En la Figura 3.23 se puede apreciar el diagrama de funcionamiento del modo de separación de la máquina, donde si el operario selecciona este modo de operación la máquina enciende el motor de separación a la velocidad nominal de 35 rpm, con el objetivo de permitir que el operario realice la limpieza correspondiente de la malla en el hexágono de separación, o cuando, al finalizar la fragmentación de todas las mazorcas, se requiera que el separador continúe funcionando.

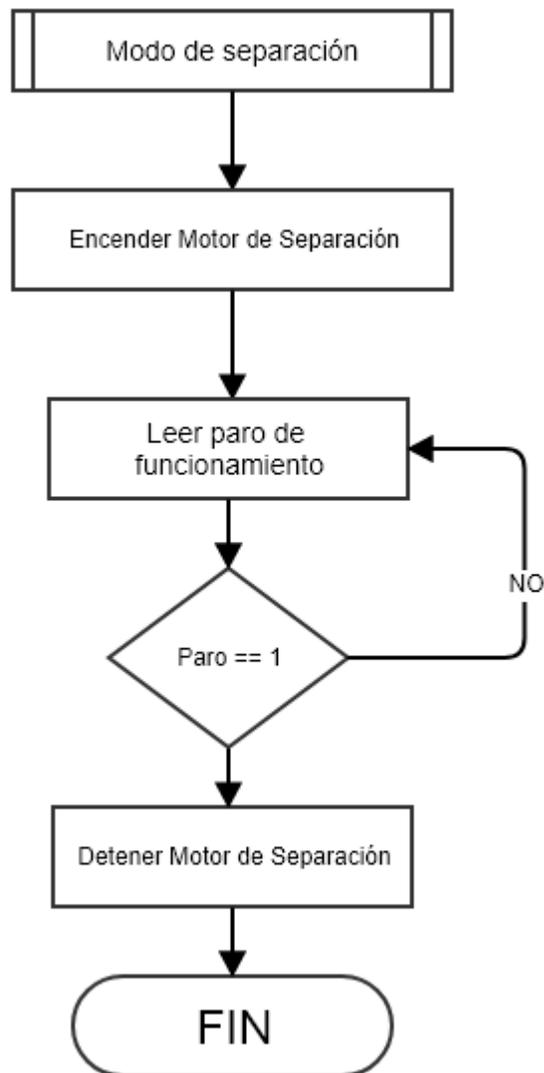


Figura 3.23: Diagrama de modo de separación

3.3.3 DIAGRAMA DE MODO DE FRAGMENTACIÓN

En la Figura 3.24 se puede apreciar el diagrama de funcionamiento para el modo de fragmentación de la máquina, donde se requiere que la bandeja de almacenamiento este correctamente posicionada, lo cual se comprueba con el fin de carrera. En caso de no encontrarse en la ubicación correspondiente la bandeja no activan los sistemas, se presenta un error y activa la luz indicadora correspondiente.

Si la bandeja esta correctamente ubicada se activa el motor de separación y después de 3 minutos el motor de fragmentación. Se realiza esta pausa de tiempo debido a una consideración de seguridad del variador de velocidad, la cual indica que no se debe conectar la alimentación de entrada más de una vez cada tres minutos.

Existen dos condiciones de paro general del sistema, donde la primera es el sistema de paro de emergencia activado por el operario de manera manual para desactivar la máquina de manera instantánea en el caso de que se presente un accidente. El segundo es el paro de funcionamiento normal, ubicado en el panel de control principal, también activado por el operario al finalizar de procesar las mazorcas, en el cual ambos sistemas se detienen al mismo tiempo. Adicional se dispone de un paro automático controlado por el PLC.

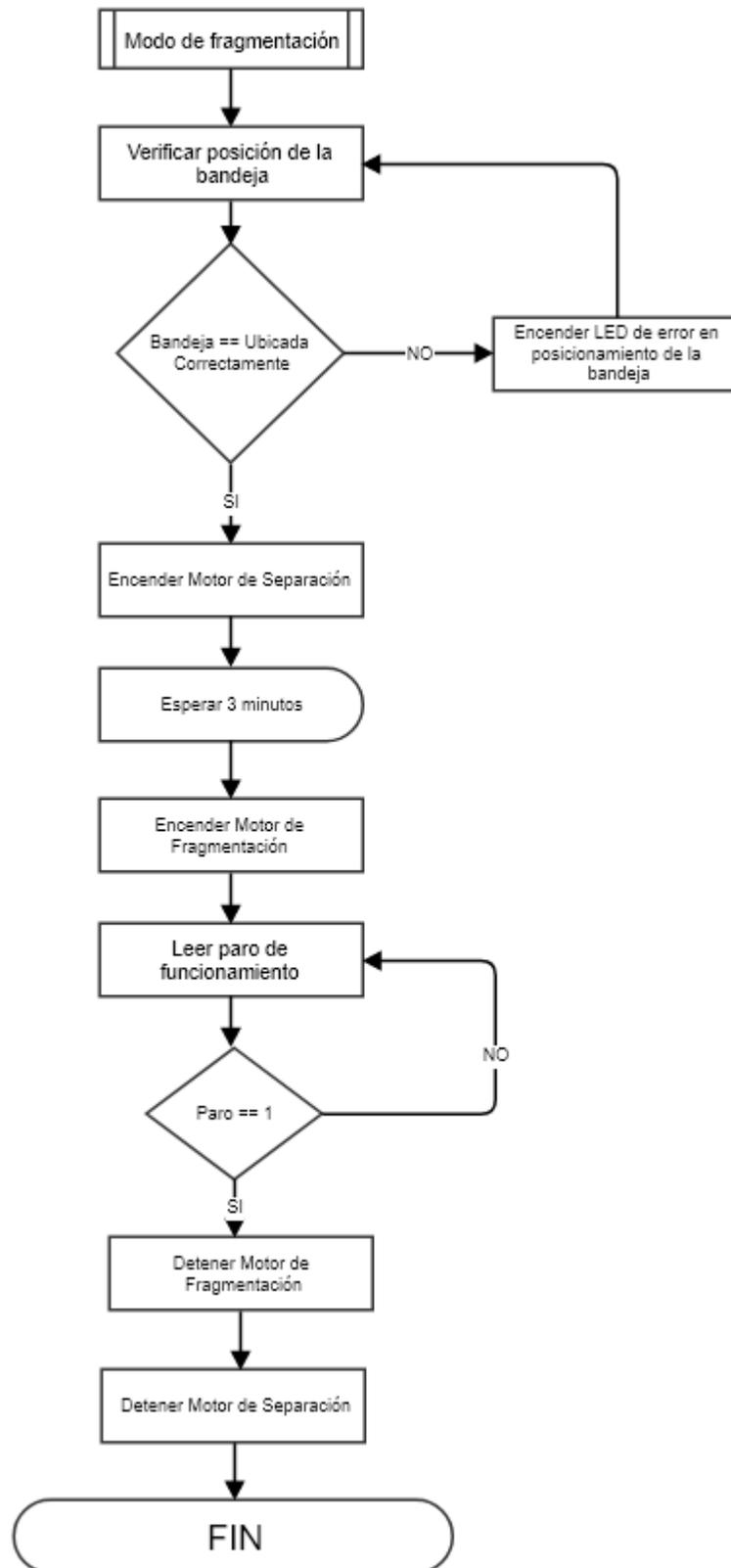


Figura 3.24: Diagrama de modo de extracción

3.3.4 FUNCIONAMIENTO DEL PLC

En Plano D01-004 se puede apreciar el diagrama de flujo de funcionamiento del PLC, en el cual se tiene como variables de entradas el estado del fin de carrera del eje de separación y del eje de fragmentación, el estado del modo de funcionamiento seleccionado por el usuario, y la señal del sensor de conteo de mazorcas.

La velocidad de giro de los motores se calcula según lo especificado en la Sección 3.2.6.2 y 3.2.6.3, la velocidad obtenida del motor de fragmentación y de separación se muestra en el HMI controlado por el PLC.

Partiendo del estado de funcionamiento de la máquina y de la velocidad de giro de cada motor, se crean alertas visuales en el HMI en el caso de que falla alguno de los sistemas motrices.

El cálculo de mazorcas ingresadas al sistema se realiza mediante el conteo del número de interrupciones de un fin de carrera de barra ajustable, debido al paso de las mazorcas de cacao hacia las cuchillas.

En caso de presentarse algún problema de funcionamiento según las causas especificadas en la Sección 3.2.6.5 el PLC desactiva automáticamente el motor correspondiente al tipo de error.

Además, el operario puede acceder a la información recopilada durante el proceso, mediante un pulsador en el panel del HMI, el cual muestra una pantalla con datos sobre la capacidad de la bandeja, el peso de las semillas en la bandeja, el peso de las semillas afectas debido a la fragmentación y el peso de las semillas expulsadas como desperdicio por el sistema de separación.

En el Plano D01-005 se observa el diagrama de flujo del HMI, el cual muestra la información del proceso, los datos se calculan en función de valores promedio recopilados de las pruebas de funcionamiento, los parámetros estadísticos utilizados se calculan en la Sección 3.2.6.1.

3.4 CIRCUITO DE POTENCIA

Para el circuito de fuerza se listan los componentes a tener en consideración en la Tabla 3.8, utilizando la nomenclatura y simbología establecida en la norma IEC – 60617 [18].

Tabla 3.8: Componentes del circuito de fuerza

Componente	Referencia
Motor de fragmentación	MF
Motor de separación	MS
Contactador de fragmentación	KM1
Contactador de separación	KM2
Variador de frecuencia	U
Energía eléctrica – 220 VAC 2 Fases + PE	
Disyuntor	Q
Relé térmico fragmentación	F1
Relé térmico separación	F2

Considerando los componentes y el diagrama de flujo del sistema, se desarrolla el diagrama del circuito de potencia en el software de simulación de circuitos de control CADe, que se puede observar en la Figura 3.25.

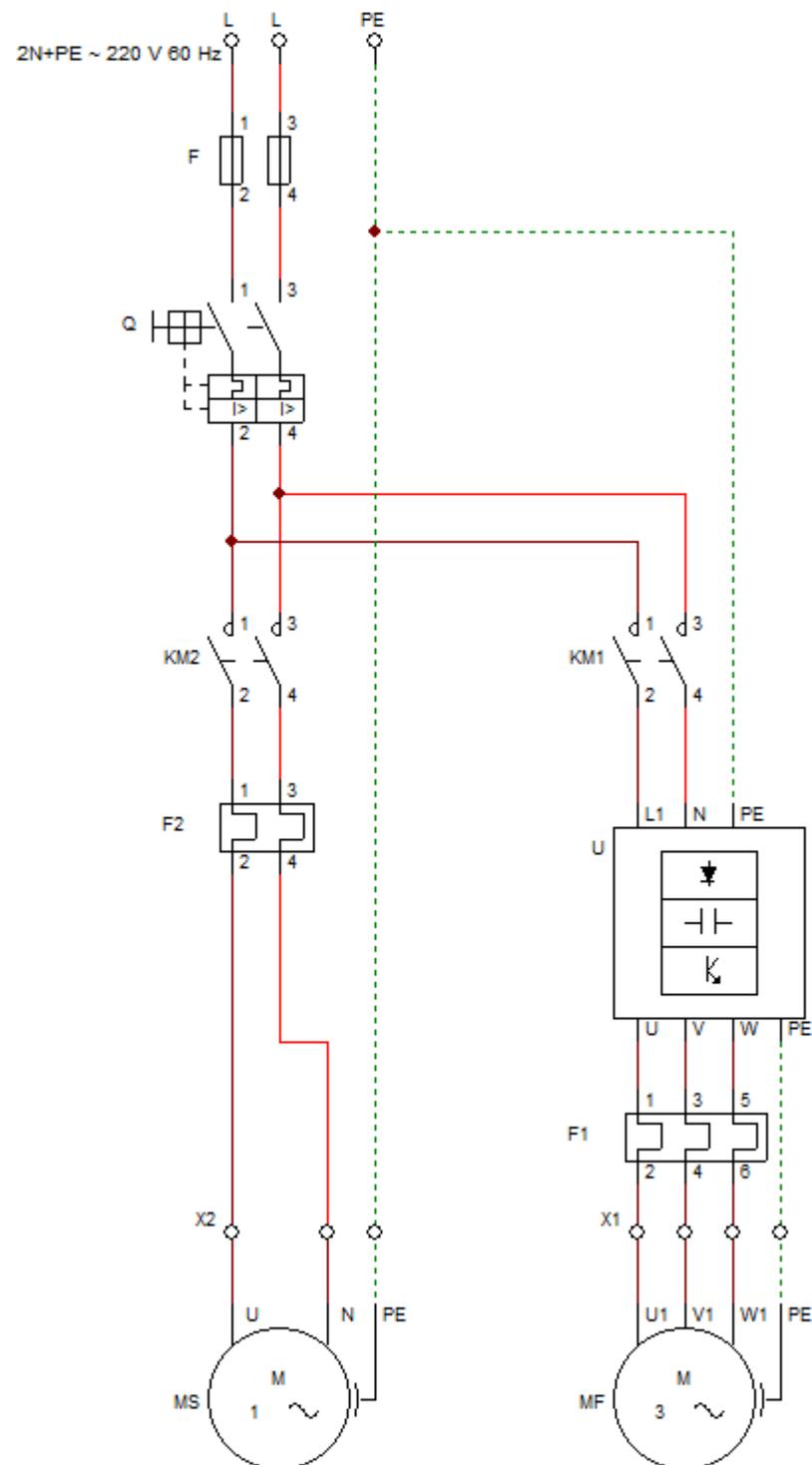


Figura 3.25: Diagrama del circuito de potencia

El variador de velocidad (U) tiene alimentación bifásica desde la red de energía eléctrica y salida trifásica hacia el motor de fragmentación.

3.5 CIRCUITO DE CONTROL

Para el circuito de control se listan los componentes a tener en consideración en la Tabla 3.9.

Tabla 3.9: Componentes del circuito de control

Componente	Referencia	Estado
LED de encendido: Modo Fragmentación	H1	NA
LED de encendido: Modo Separación	H2	NA
LED de encendido general	H3	NA
LED de paro de emergencia activo	H4	NA
LED de error de posicionamiento del cajón	H5	NA
Pulsador de encendido general	S1	NA
Pulsador de paro de emergencia	S2	NC
Switch de selección de operación	S3	-
Switch de posición de la bandeja de almacenamiento	S4	NA
Temporizador de encendido	KA	NA
Arduino PLC - PLDuino	-	-
Relé 1 PLC	K1	NC
Relé 2 PLC	K2	NC
Fin de carrera rpm fragmentador	S5	NA
Fin de carrera rpm separador	S6	NA
Pulsador información del proceso	S7	NC
Pulsador reinicio relés	S8	NC
Fin de carrera mazorcas	S9	NA
Convertor AC/DC - 220V/12V	T	-

En la Figura 3.26 se puede observar el diagrama del circuito de control, el que se realiza en función de los diagramas de flujo de funcionamiento de la máquina y de los componentes del circuito de control listados previamente.

El funcionamiento del sistema de forma general depende del estado de S4 y S3, el temporizador KA controla el tiempo previo al encendido del sistema de fragmentación, lo cual se implementa como consideración de seguridad del variador de velocidad.

El PLC lee la velocidad de giro de cada eje, y en caso de posible emergencia o fallo de algún sistema desactiva el motor correspondiente.

En la Tabla 3.10 se muestran las entradas y salidas del PLC.

Tabla 3.10: Entradas y salidas del PLC

ENTRADAS		SALIDAS	
Sensor velocidad fragmentador	30	Relé K2 separador COM	1
Sensor velocidad separador	31	Relé K2 separador NC	2
Contacto auxiliar Separador	32	Relé K1 fragmentador COM	4
Contacto auxiliar fragmentador	33	Relé K1 fragmentador NC	5
Pulsador de información del proceso	34		
Pulsador de reinicio de relés	35		
Sensor de ingreso de mazorcas	36		

CAPÍTULO IV

PRUEBAS Y RESULTADOS

4.1 CONSTRUCCIÓN DE LA MÁQUINA

En la construcción de la máquina se considera la selección de materiales realizada en el Capítulo III, y además los materiales especificados en cada plano de despiece, en la Tabla 4.1 se tiene el listado de materiales requeridos.

Tabla 4.1: Materiales necesarios para la construcción

Tipo	Cantidad	Material	Dimensiones
Barra perforada	300 mm	Spirafort 2-147M	70x50 mm
Barra perforada	400 mm	Spirafort 2-147M	70x40 mm
Barra redonda	635 mm	AISI 4340	38 mm
Eje Tolerancia H6	1750 mm	AISI 1018	44.41 mm – 1 ³ / ₄ "
Plancha	2	Acero Inoxidable AISI 304	1.22 m x 2.44 m x 0.7 mm
Plancha	1	Aluminio 6061 Corrugado	1.22 m x 2.44 m x 2 mm
Tubo Cuadrado	8 m	ASTM A-36	50 x 50 x 3 mm
Tubo Cuadrado	2 m	ASTM A-36	40 x 40 x 3 mm
Ángulo	11.5 m	ASTM A-36	30 x 30 x 3 mm
Ángulo	6 m	ASTM A-36	40 x 40 x 4 mm
Ángulo	2 m	ASTM A-36	50 x 50 x 3 mm
Platina	1.5 m	ASTM A-36	75 x 9 mm
Platina	3.3 m	ASTM A-36	50 x 6 mm
Platina	2.2 m	AISI 01 o DF2	57 x 6 mm
Barra Cuadrada	480 mm	AISI 1045	8 x 8 mm

A continuación, se describe la construcción de las partes de mayor relevancia de la máquina.

4.1.1 CONSTRUCCIÓN DEL EJE DE FRAGMENTACIÓN

En la construcción del eje de fragmentación, parte principal de la máquina, se utiliza como referencia los planos D03-002, D03-201 y D03-202, y se parte de los siguientes materiales:

- Barra redonda de acero AISI 4340.
- Platina de acero AISI 01 o DF2.

Cada cuchilla se rectificó en función del Plano D03-202, donde el filo cortante no supone posible afectación a las semillas de cacao. En la Figura 4.1 se puede observar la forma tridimensional de cada cuchilla.

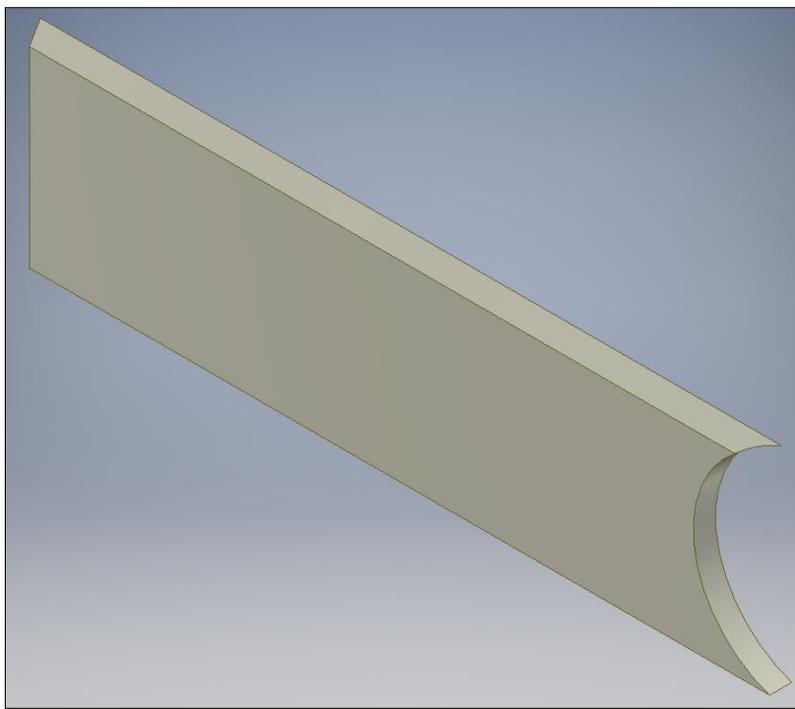


Figura 4.1: Cuchilla móvil

Se tiene 5 cuchillas distribuidas cada 72 grados y con un espaciamiento de 60 mm, se construyó un molde en base a la Figura 4.2 con el objetivo de situar con el ángulo correcto cada cuchilla sobre el cubo, para evitar deformaciones del eje debido a la soldadura, una vez que cada cuchilla se puntea en la posición indicada, se requiere dar un tiempo

considerable de enfriamiento entre cada cuchilla, con lo cual se conserva la tolerancia especificada del eje.

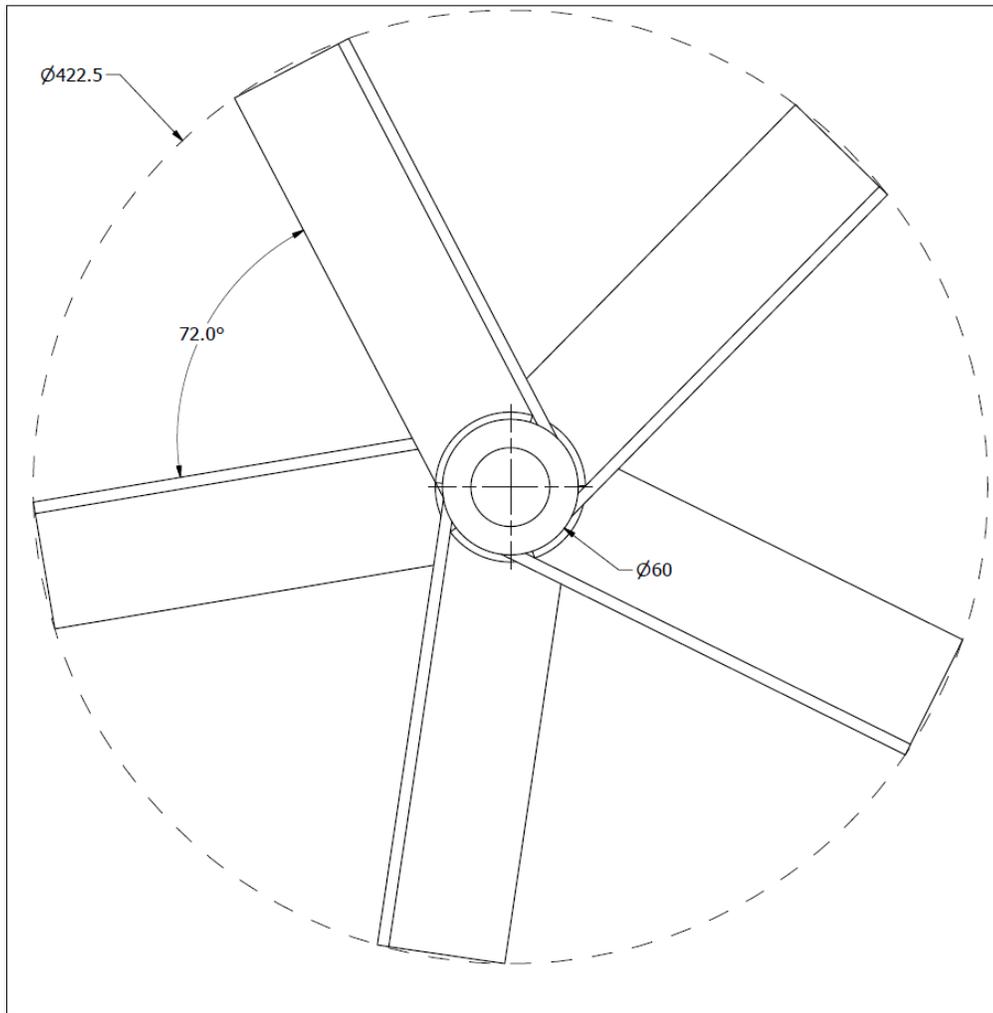


Figura 4.2: Eje de fragmentación

La soldadura se calculó previamente en la Sección 3.1.1.9, con electrodo E7018 [1] y utilizando el molde de la Figura 4.3 se procede a ensamblar las cuchillas sobre el cubo de fragmentación, mismo que debe estar previamente ubicado en la posición correcta sobre el eje, para evitar que la temperatura generada debido a la soldadura afecte la tolerancia del cubo respecto al eje.

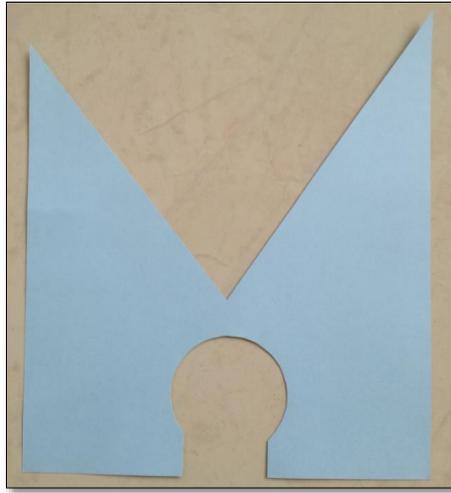


Figura 4.3: Molde de construcción, eje de fragmentación.

Se maquinan los orificios correspondientes a los pernos de fijación de cada chumacera, para ensamblar del eje en el soporte de la estructura, así como el orificio central por donde pasa el eje. Con el objetivo de asegurar una correcta alineación, previo a realizar las perforaciones se coloca un punto de suelda en ambas platinas, en la Figura 4.4 se puede observar las platinas de soporte unidas mediante un playo de presión para soldar con electrodo E7018 [1], garantizando la alineación de los alojamientos.

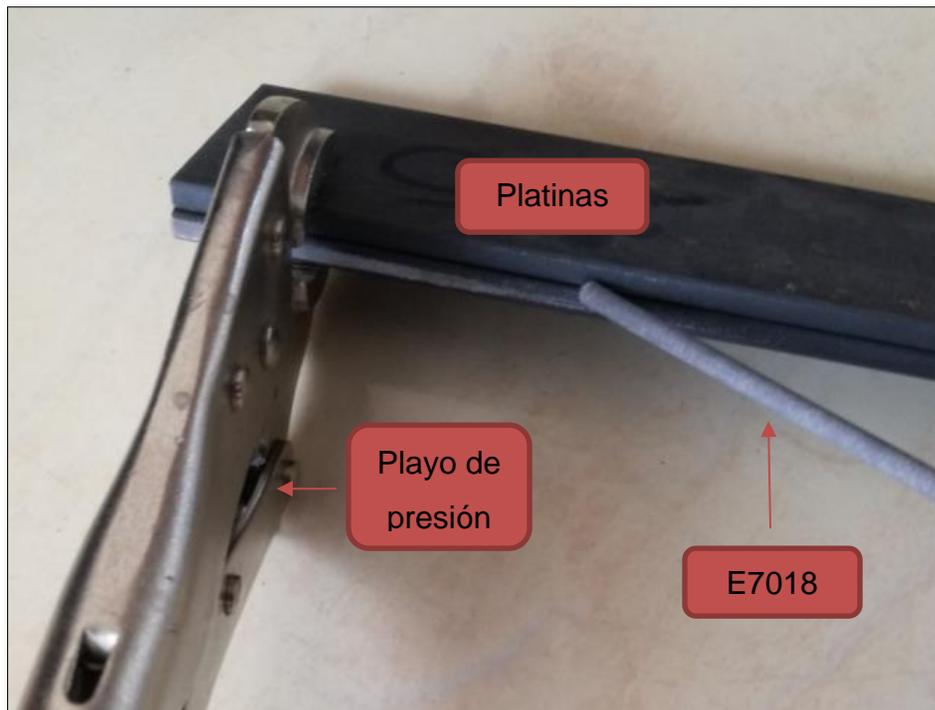


Figura 4.4: Alineación y fijación de platinas de soporte del eje de fragmentación.

Se utilizó para las perforaciones de los pernos de fijación de las chumaceras y de la estructura principal una fresa de 8mm de diámetro, con el objetivo de obtener la tolerancia requerida para una correcta alineación y que no exista juego entre perno y alojamiento. En la Figura 4.5 se puede observar el eje de fragmentación ensamblado y alineado respecto a las cuchillas fijas.



Figura 4.5: Eje de fragmentación instalado

4.1.2 CONSTRUCCIÓN DEL SOPORTE DEL SISTEMA DE SEPARACIÓN

En la construcción de la estructura de soporte del hexágono de separación se utiliza el Plano D03-011, donde el ángulo de inclinación que se requiere es de 2 grados con referencia al suelo, los apoyos frontales de la estructura son de mayor longitud que los posteriores para cumplir este parámetro, en la Figura 4.6 se puede observar las medidas de ambos soportes, frontal de 388 mm y posterior de 328 mm.

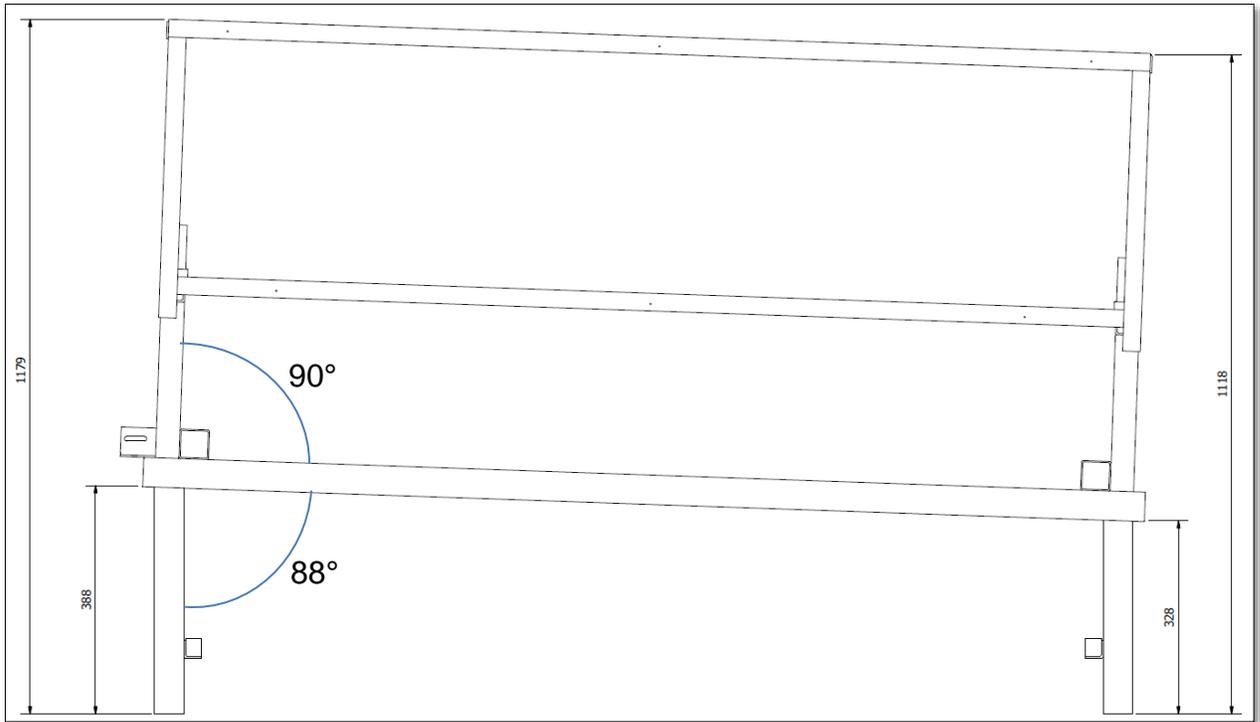


Figura 4.6: Estructura principal del sistema de separación

En la Figura 4.7 se puede observar la estructura ensamblada, con soldadura tipo MIG [1] aplicada en todos los puntos de contacto de cada pieza, para asegurar su rigidez.



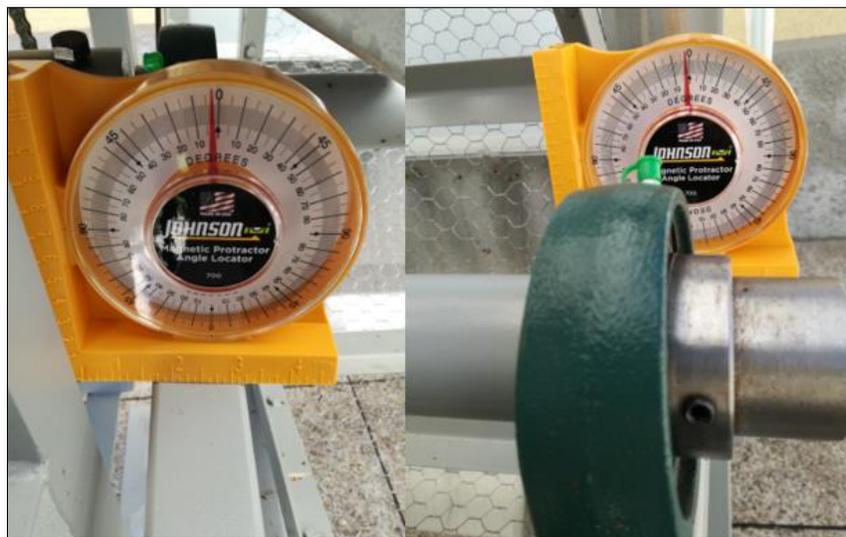
Figura 4.7: Ensamble de la estructura del sistema de separación

En la Figura 4.8 se observa la inclinación obtenida del ensamblaje de la estructura, con los 2 grados requeridos según la especificación del plano.



Figura 4.8: Inclinación del sistema de separación

Se verificó que la inclinación sea igual en las dos superficies principales de apoyo de la estructura del hexágono de separación de la Figura 4.11, garantizando que los elementos no sufran desgaste y trabajen de una manera uniforme. En la Figura 4.9, se observa que están correctamente niveladas.



(a)

(b)

Figura 4.9: Inclinación de la estructura. (a) Chumacera frontal (b) Chumacera posterior

4.1.3 CONSTRUCCIÓN DEL HEXÁGONO DE SEPARACIÓN

Para la construcción del hexágono de separación se utiliza el Plano D03-005, D03-006 y D03-007, para posicionar cada ángulo se utilizó una impresión en escala 1:1 en base a la Figura 4.10 como plantilla de los dos soportes laterales, se puntea y verifica que las piezas se encuentren alineadas correctamente en función del plano, previo a realizar la soldadura.

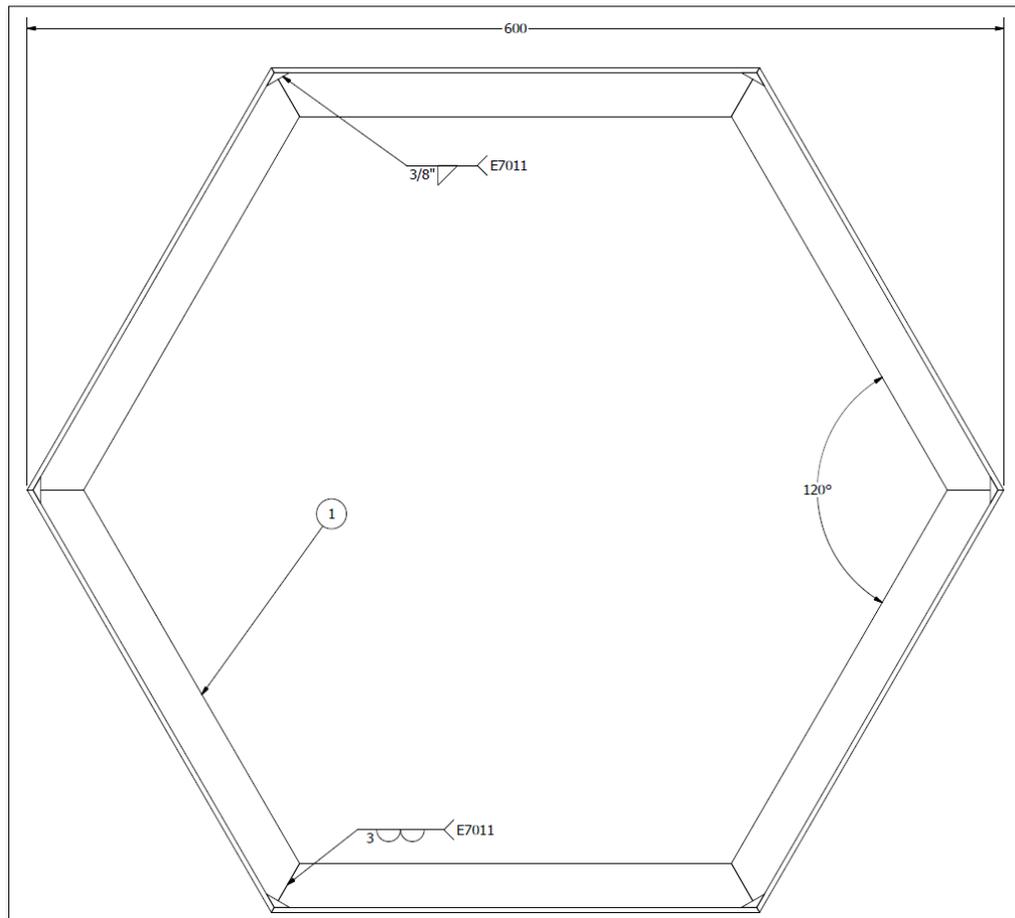


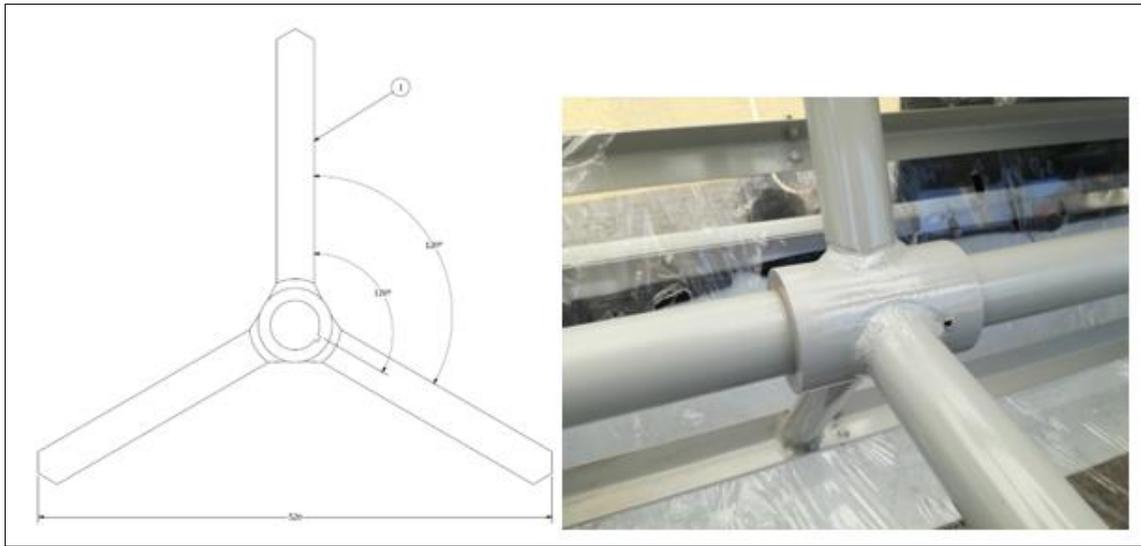
Figura 4.10: Plano D03-005, lateral del hexágono de separación.

En la Figura 4.11 se observa la estructura del Hexágono de separación ensamblada, con los 6 soportes longitudinales y los dos soportes laterales.



Figura 4.11: Estructura del hexágono de separación.

En la Figura 4.12 se observa la distribución utilizada según el plano D03-008 y el ensamblaje de un soporte interno en el eje, el cual se unirá al hexágono posteriormente.



(a) (b)
 Figura 4.12: Soporte interno (a) Plano (b) Ensamblaje

Posteriormente, para ensamblar los soportes internos sobre el eje se posiciono cada cubo según la especificación del Plano D03-009, sobre el cual se soldaron los tres soportes considerando un tiempo prudente de enfriamiento para evitar deformaciones, cada uno separado a 120 grados, en la Figura 4.13 se observan los dos cubos y 6 soportes internos instalados en el eje.

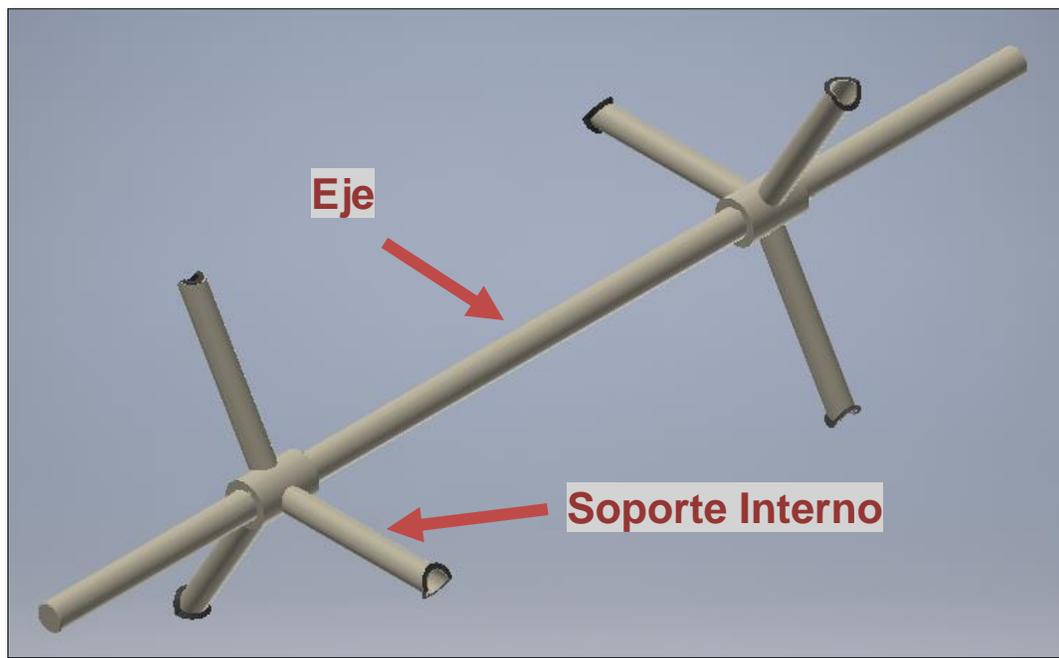


Figura 4.13: Soportes internos del hexágono sobre el eje

A continuación, en la Figura 4.14 se observa el hexágono de separación ensamblado completamente, los soportes internos se alinearon sobre los soportes longitudinales de la estructura para posteriormente soldar en cada punto de contacto. Además, se verifica la inclinación requerida del sistema de separación una vez se instala en la estructura.



(a)

(b)

Figura 4.14: Hexágono separador (a) Parte interna (b) Ángulo de inclinación

Las chumaceras del eje de separación se instalaron posicionando y alineando el hexágono sobre la estructura en función del Plano D03-013, se marca el punto de fijación de cada perno, se recomienda utilizar una fresa de 8 mm para realizar las perforaciones asegurando que no exista juego entre perno y alojamiento, en la Figura 4.15 se observan los pernos de fijación instalados en cada chumacera.



Figura 4.15: Chumaceras del hexágono de separación (a) Frontal (b) Posterior

4.1.4 ALINEACIÓN DEL MOTOR Y HEXÁGONO DE SEPARACIÓN

Debido a la inclinación requerida del separador, de 2 grados, y el acople directo de la caja reductora con el eje de separación, se requiere alinear y nivelar la flecha motriz debido al desnivel que puede existir en el piso del lugar de instalación. Se utiliza esponja automotriz de 1 pulgada de ancho por 5 milímetros de espesor, la cual al ajustar los pernos de cada elemento se comprime hasta 1.5 milímetros. Adicional, permite reducir la vibración generada en las partes motrices.

En la Figura 4.16 se observa dentro del recuadro rojo la esponja instalada, se utilizó una sola capa entre la base y el motorreductor, los elementos de fijación son los recomendados por el fabricante del equipo.



Figura 4.16: Caja reductora del sistema de separación instalada.

En la Figura 4.17 se puede observar la esponja instalada para nivelar la chumacera frontal del eje, en este caso se requirió utilizar dos capas de esponja en cada punto de contacto con la estructura, debido a que el nivel del piso del lugar de la instalación provocó un ligero levantamiento de la base del motorreductor respecto al separador.

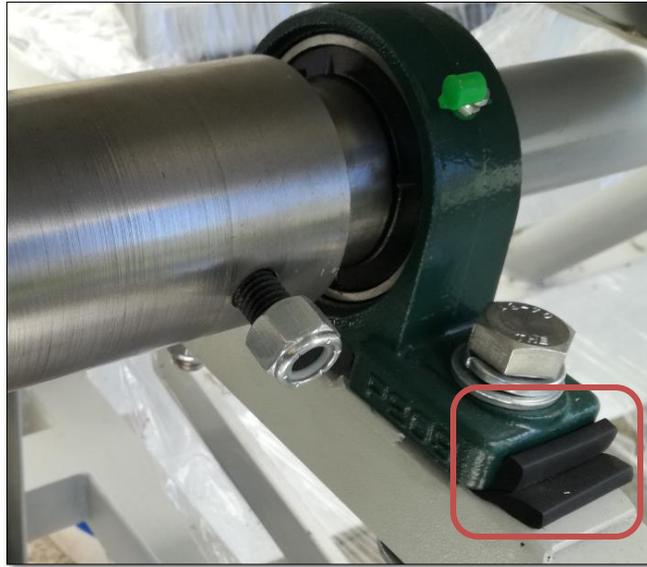


Figura 4.17: Chumacera frontal del sistema de separación instalada.

En la Figura 4.18 se observa instalado el motorreductor del separador, nivelado correctamente, donde se verifica que el ángulo de inclinación es igual entre ambos elementos, motorreductor y eje del hexágono de separación de la Figura 4.11.



Figura 4.18: Inclinación del motorreductor

4.1.5 INSTALACIÓN DE LA CADENA

En la instalación de la cadena diseñada en la Sección 3.1.1.7, se utilizan las ranuras maquinadas en la base del motorreductor las cuales le permiten mover el equipo y templar adecuadamente la cadena, en la Figura 4.19 se puede observar las ranuras en la estructura de soporte del reductor.

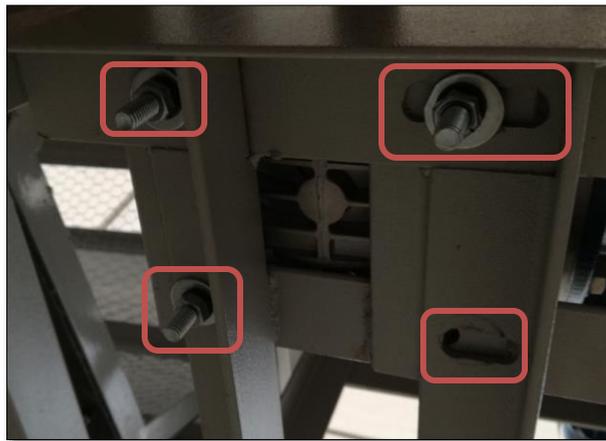


Figura 4.19: Ranuras de la base del reductor de fragmentación

Para cerrar la cadena en el sistema de transmisión sobre los piñones se utiliza el candado y seguro de la Figura 4.20.



Figura 4.20: Candado y seguro de la cadena del sistema de fragmentación

En la Figura 4.21 se puede observar la cadena del sistema de fragmentación instalada y templada, debido al recorrido que se tiene por las ranuras de la base del motor, la cadena se inclina hacia la izquierda.



Figura 4.21: Cadena del sistema de fragmentación instalada

4.1.6 INSTALACIÓN DE LA MALLA

En la instalación de la malla seleccionada en la Sección 3.1.2.5 se utiliza los pernos soldados en el hexágono de separación, como soportes para ajustar y templar correctamente la malla, en la Figura 4.22 se observa la posición de la malla entre los pernos de cada platina de sujeción.

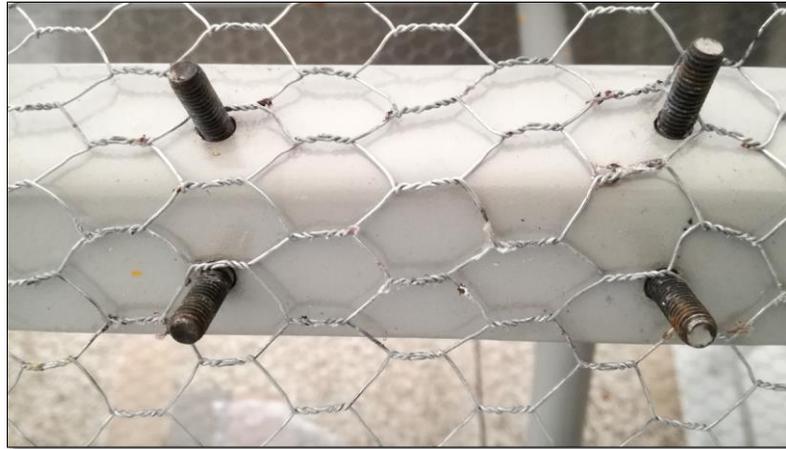


Figura 4.22: Ajuste de la malla en los pernos del hexágono

Debido al ancho que se dispone comercialmente de la malla, 1 metro, en los puntos de unión las dos partes que recubren al hexágono las dos mallas se ajustan en un mismo soporte, en la Figura 4.23 se observan las dos mallas sobre un mismo soporte.



Figura 4.23: Punto de unión de las dos mallas del hexágono

Una vez que la malla se encuentra ajustada en todos los pernos de los soportes del hexágono se colocan las platinas de seguridad, con el objetivo de evitar que la malla durante el funcionamiento normal de la máquina se salga de la posición instalada, en la Figura 4.24 se puede observar la platina instalada.



Figura 4.24: Platina de seguridad

4.1.7 PROTECCIONES DE ACERO INOXIDABLE

Como recubrimiento de la máquina, en la parte lateral se utilizó acero inoxidable de 0.7 mm de espesor, así como en la base del sistema de fragmentación, para facilitar la limpieza que se debe realizar conforme se requiera.

En la Figura 4.25 se observan los recubrimientos instalados en la etapa de separación, donde la parte superior principalmente sirve como protección, debido al peligro que representan para los operarios las partes motrices del sistema.



(a)

(b)

Figura 4.25: Protección de acero inoxidable, sistema de separación (a) Lateral (b) Inferior

La base del sistema de fragmentación se observa en la Figura 4.26, donde los dobleces del recubrimiento de acero inoxidable aseguran que el producto se guía adecuadamente hasta la parte frontal del hexágono de separación.



Figura 4.26: Base del sistema de fragmentación

El doblez del recubrimiento lateral inferior del separador sirve para guiar adecuadamente sobre la bandeja de almacenamiento todo el producto separado, en la Figura 4.27 se puede observar el propósito del doblez en el recuadro rojo.



Figura 4.27: Doble lateral inferior del separador

Además, se utilizaron las protecciones de acero inoxidable, que se observan en la Figura 4.28 para aislar el sistema de fragmentación, debido al riesgo que implican para el operario las cuchillas.

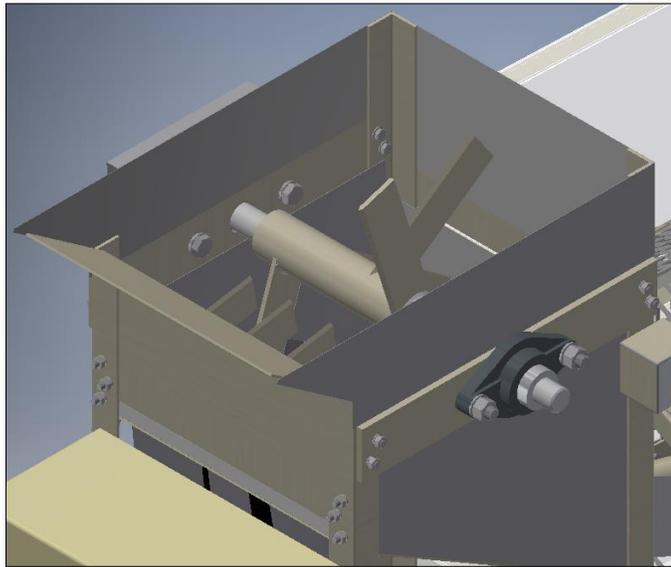


Figura 4.28: Recubrimiento del sistema de fragmentación

4.1.8 CUCHILLAS FIJAS

Para maquinar las perforaciones de las cuchillas fijas se alinearon y soldaron en conjunto, para que los orificios de los pernos sean iguales en todas las partes, en la Figura 4.29 se puede observar la fijación de las platinas mediante un playo de presión, y la aplicación de un punto de suelda con electrodo E7018 [1].

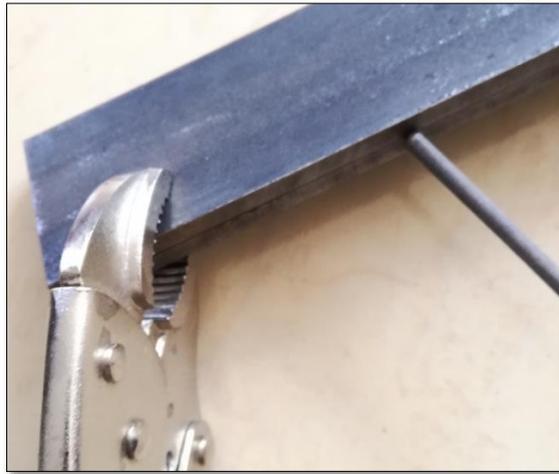


Figura 4.29: Fijación de las cuchillas previo a ser maquinadas

Se utilizó una fresa de 8 mm para realizar las perforaciones de cada agujero de los pernos, en la Figura 4.30 se puede observar el resultado de maquinar las cuchillas de forma conjunta.



Figura 4.30: Orificios de los pernos de sujeción de las cuchillas fijas

Las cuchillas fijas se instalan en las posiciones diseñadas por medio de pernos de fijación, según el par de apriete del Anexo B, para pernos M8 inoxidables CL-70, igual a 14.2 N.m, con una arandela tipo Growler y plana, en la Figura 4.31 se pueden observar las partes requeridas para fijar cada cuchilla.

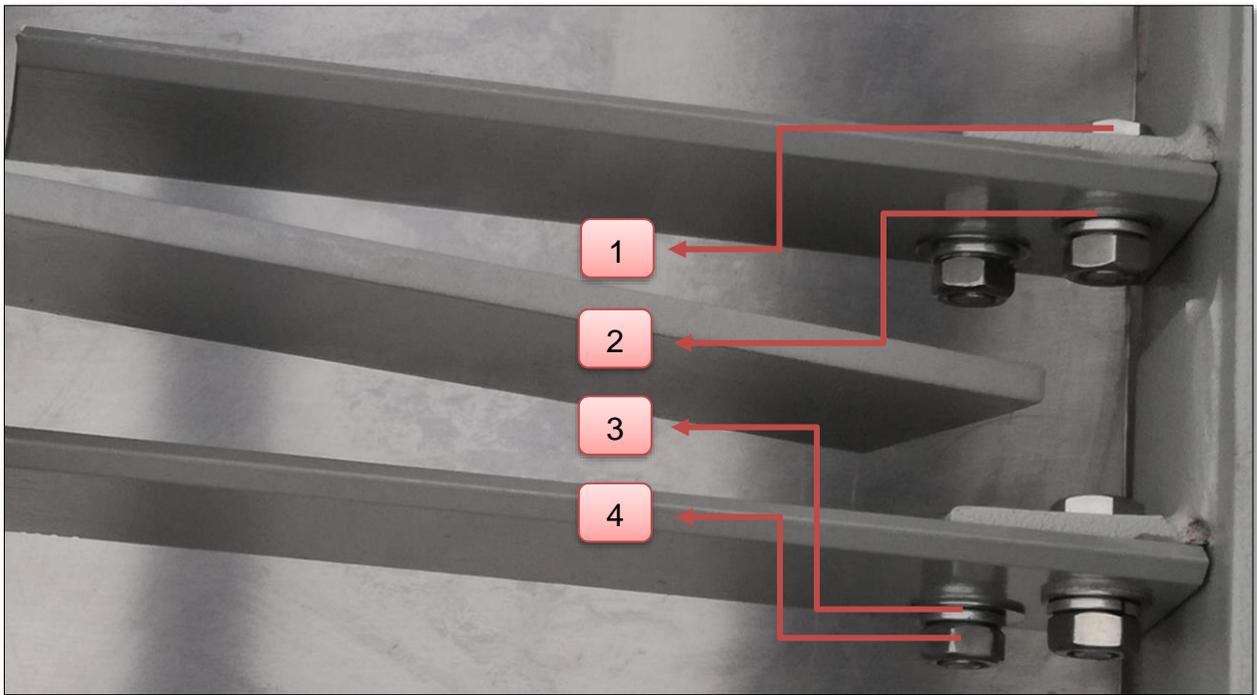


Figura 4.31: Partes para fijar cada cuchilla

Donde:

1. Perno de acero inoxidable métrico M8 x 25.
2. Arandela Plana de acero inoxidable M8.
3. Arandela de presión de acero inoxidable M8.
4. Tuerca de acero inoxidable métrico M8 x 6.

Se requiere utilizar la llave de tuercas número 13, en la Figura 4.32 se observan las 6 cuchillas instalas en el sistema de fragmentación.



Figura 4.32: Cuchillas fijas instaladas

4.1.9 PINTURA

Considerando el lugar de operación de la máquina, el recubrimiento seleccionado es pintura electrostática H.7008 RAL 1013, en polvo tipo híbrida epoxy-poliéster con alta protección específicamente diseñado para elementos que requieran máxima resistencia al exterior. En la Figura 4.33 se observa el acabado de la pintura en la estructura del sistema de fragmentación, con acabado texturizado, lo que mejora la apariencia general de la máquina.



Figura 4.33: Estructura del fragmentador

Se aplicaron dos capas de pintura de 80 micras sobre la estructura principal de la máquina, de tal forma que se garantiza una mayor protección ante el deterioro por uso y efectos ambientales. En la Figura 4.34 se observa el acabado de la pintura en la estructura del separador, con acabado texturizado.



Figura 4.34: Estructura del separador

En la estructura del hexágono de separación y las cuchillas fijas y móviles se empleó pintura con acabado lizo, para reducir la fricción que existe entre el producto y las partes metálicas, debido a que están en contacto directo, en las Figuras 4.12, 4.32 y 4.35 se puede observar el acabado que se obtiene en cada elemento.



Figura 4.35: Cuchillas fijas y móviles del sistema de fragmentación

4.1.10 INSTALACIÓN ELÉCTRICA

Se ensambla la caja de control en función del diagrama de control realizado en la Sección 3.3 y tomando en consideración los parámetros de diseño de la Sección 3.2. En la Figura 4.36 se puede observar la distribución de los componentes eléctricos.



Figura 4.36: Distribución de componentes eléctricos

Los colores utilizados para la identificación de los cables de la caja de control se listan en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2: Identificación de conductores

Tipo	Calibre	Color
Fase 1	AWG 14	Rojo
Fase 2	AWG 14	Amarillo
Tierra	AWG 14	Verde

La distribución de los elementos del panel de control se muestra en la Figura 4.37.



Figura 4.37: Distribución de componentes de control e indicadores

Las funciones de control que el operario puede realizar son las siguientes:

- Selección del modo de funcionamiento, mediante el switch de 3 posiciones SSO, se elige entre separación y mantenimiento, las cuales activan los LEDs Fragmentador y Separador respectivamente.
- Encendido general del sistema, mediante el switch con llave de seguridad de dos posiciones, se conecta o se corta la energía general del sistema, el LED Energía indica el estado del sistema.

Las siguientes consideraciones se toman en cuenta para operar la máquina:

- Para la activación del Fragmentador la bandeja debe estar correctamente posicionada, de no cumplir este parámetro no se acciona el sistema.
- Para la activación del Separador no es requerimiento que la bandeja este posicionada, solo se acciona el sistema de separación para permitir la limpieza de la malla del hexágono, referirse al manual de mantenimiento y operación.
- En caso de que cualquier pulsador de emergencia se encuentre activo ningún sistema enciende, o si un pulsador de emergencia se activa durante la operación los sistemas se detienen.

Debido a las condiciones de trabajo de la máquina se utilizó para la alimentación eléctrica principal un conector Legrand tipo tripolar con tierra, que brinda la protección necesaria y permite una conexión segura, en la Figura 4.38 se observa el conector.



Figura 4.38: Conector Legrand tripolar con tierra

4.2 PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO

Con la máquina ensamblada completamente se realizan las pruebas de funcionamiento correspondientes, partiendo de un dato principal:

- Velocidad de procesamiento: Indica la capacidad en mazorcas por minuto a la cual se realiza la prueba de la máquina.

Se obtienen los siguientes datos como resultado:

- Peso del producto procesado: Peso de las semillas procesadas que se encuentran dentro de la bandeja, en gramos.
- Rechazo: Peso de las semillas procesadas expulsadas junto con la corteza residual, en gramos.
- Daño: Peso de las semillas afectadas por el proceso de fragmentación, en gramos.
- Contaminación: Peso de los pedazos de corteza procesado dentro de la bandeja de almacenamiento, en gramos.

- Rendimiento: Relación entre la pérdida potencial de peso de semillas y el peso total de semillas procesadas sin considerar la contaminación, expresada porcentualmente.

4.2.1 MUESTRAS DE MAZORCAS PARA LAS PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO

Se realizan 5 pruebas de funcionamiento, en cada una se procesan 15 mazorcas de diferentes longitudes y diámetros. Adicionalmente, se realiza una prueba de funcionamiento continuo en la cual se procesan 90 mazorcas, con lo que se obtienen los datos documentados a continuación. Además, con los resultados de la prueba final se calcula la capacidad de la bandeja de almacenamiento.

En cada prueba realizada se utiliza una muestra aleatoria de mazorcas de diferentes tamaños, las cuales se observan en la Figura 4.39.



Figura 4.39: Mazorcas de cacao para pruebas.

4.2.2 PRIMERA PRUEBA

La primera prueba se realizó con una velocidad de procesamiento de 15 mazorcas por minuto, los resultados obtenidos se encuentran en la Tabla 4.3.

Tabla 4.3: Primera prueba de funcionamiento

Prueba 1		
15 mazorcas por minuto		
Rechazo	368	gramos
Dañadas	56	gramos
Pérdida Potencial	424	gramos
Peso Producto	1930	gramos
Rendimiento	78.0%	
Contaminación	379	gramos

En el Anexo C se encuentra el producto procesado en la bandeja de almacenamiento y la corteza residual en fragmentos pequeños en la parte posterior de la máquina. En la Figura 4.40 se observa el estado de la máquina durante funcionamiento.



Figura 4.40: Estado de la máquina durante funcionamiento

4.2.3 SEGUNDA PRUEBA

La segunda prueba se realizó con una velocidad de procesamiento de 7.5 mazorcas por minuto, los resultados obtenidos se encuentran en la Tabla 4.4.

Tabla 4.4: Segunda prueba de funcionamiento

Prueba 2		
15 mazorcas - 2 minutos		
Rechazo	278	gramos
Dañadas	32	gramos
Pérdida Potencial	310	gramos
Peso Producto	1752	gramos
Rendimiento	82.3%	
Contaminación	256	gramos

En el Anexo D se presentan los resultados obtenidos, donde se observó que grandes fragmentos de mazorca que son expulsados por la parte frontal del hexágono e ingresan a la bandeja de almacenamiento, razón por la cual se requiere añadir una protección adicional para evitar dicha situación.

4.2.4 TERCERA PRUEBA

La tercera prueba se realizó con una velocidad de procesamiento de 7.5 mazorcas por minuto, los resultados obtenidos se encuentran en la Tabla 4.5.

Tabla 4.5: Tercera prueba de funcionamiento

Prueba 3		
15 mazorcas - 2 minutos		
Rechazo	373	gramos
Dañadas	45	gramos
Pérdida Potencial	418	gramos
Peso Producto	2104	gramos
Rendimiento	80.1%	
Contaminación	314	gramos

4.2.5 CUARTA PRUEBA

La cuarta prueba se realizó con una velocidad de procesamiento de 5 mazorcas por minuto, los resultados obtenidos se encuentran en la Tabla 4.6.

Tabla 4.6: Cuarta prueba de funcionamiento

Prueba 4		
15 mazorcas - 3 minutos		
Rechazo	301	gramos
Dañadas	47	gramos
Pérdida Potencial	348	gramos
Peso Producto	2054	gramos
Rendimiento	83.1%	
Contaminación	266	gramos

4.2.6 QUINTA PRUEBA

La quinta prueba se realizó con una velocidad de procesamiento de 5 mazorcas por minuto, los resultados obtenidos se encuentran en la Tabla 4.7.

Tabla 4.7: Quinta prueba de funcionamiento

Prueba 5		
15 mazorcas - 3 minutos		
Rechazo	336	gramos
Dañadas	78	gramos
Pérdida Potencial	414	gramos
Peso Producto	2126	gramos
Rendimiento	80.5%	
Contaminación	314	gramos

4.2.7 PRUEBA FINAL

La prueba final se realizó procesando 90 mazorcas durante 15 minutos, con una velocidad de procesamiento de 6 mazorcas por minuto, requerimiento principal de la

máquina. En la Tabla 4.8 se puede observar los datos obtenidos, debido al peso del cacao procesado no se obtuvo como dato el peso de la contaminación.

Tabla 4.8: Prueba final de funcionamiento

Prueba Final		
90 mazorcas		
Rechazo	2431	gramos
Dañadas	456	gramos
Pérdida Potencial	2887	gramos
Peso Semillas	21112	gramos
Rendimiento	86.3%	
Bandeja llena	21.97%	

En el Anexo E se observa los resultados obtenidos, en la Figura 4.41 se observa el cacao procesado en la prueba final.



Figura 4.41: Cacao procesado en la prueba final

Considerando la cantidad de mazorcas y la aleatoriedad de tamaño, se calculó en función de la Ecuación 70 que porcentaje de la bandeja se llenó.

$$\text{Bandeja Llena} = \frac{L_p}{L_t} * 100\% = \frac{34.5}{157} * 100\% = 21.97\%$$

Ec. 70

Donde:

L_t es la longitud de la bandeja, igual a 157 cm.

L_p es la longitud ocupada por el producto procesado, igual a 34.5 cm.

El resultado obtenido sirve como base para determinar la capacidad real de la bandeja de almacenamiento, calculada en el análisis de resultados de la Sección 4.3.

4.2.8 PRODUCTO RECHAZADO

En la Figura 4.42 se puede observar el producto rechazado debido a que el mucílago se endureció dentro de la mazorca, impidiendo una separación adecuada por las razones detalladas en la Sección 1.5.5.



Figura 4.42: Producto rechazado, semillas con mucílago seco

En la Figura 4.43 se puede observar el producto rechazado debido a mazorcas enfermas con moniliasis o podridas.



Figura 4.43: Producto rechazado, mazorcas enfermas o podridas

4.2.9 PRODUCTO DAÑADO

Debido a la geometría de las cuchillas de fragmentación, un porcentaje reducido de la producción se afecta durante el corte de cada mazorca, en la Figura 4.44 se puede observar una muestra del producto dañado total o parcialmente.



Figura 4.44: Producto dañado, semillas afectadas parcial o totalmente

Se tienen diferentes tipos de afectación a las semillas, clasificados en 3 tipos de daño, que se observan en la Figura 4.33.

- Corte total: Semilla fragmentada totalmente.
- Corte parcial grave: Semilla con un corte considerable.
- Corte parcial leve: Semilla sin mayor afectación.

Se observó que existe un daño de corte total y grave en mazorcas con las características descritas en la sección 4.2.7, debido a que el mucílago no permite que las semillas se separen con facilidad, las cuchillas terminan causando daños. El corte parcial no se considera de gran afectación para las semillas ni su proceso de fermentación debido a la capa de mucílago que recubre la semilla.

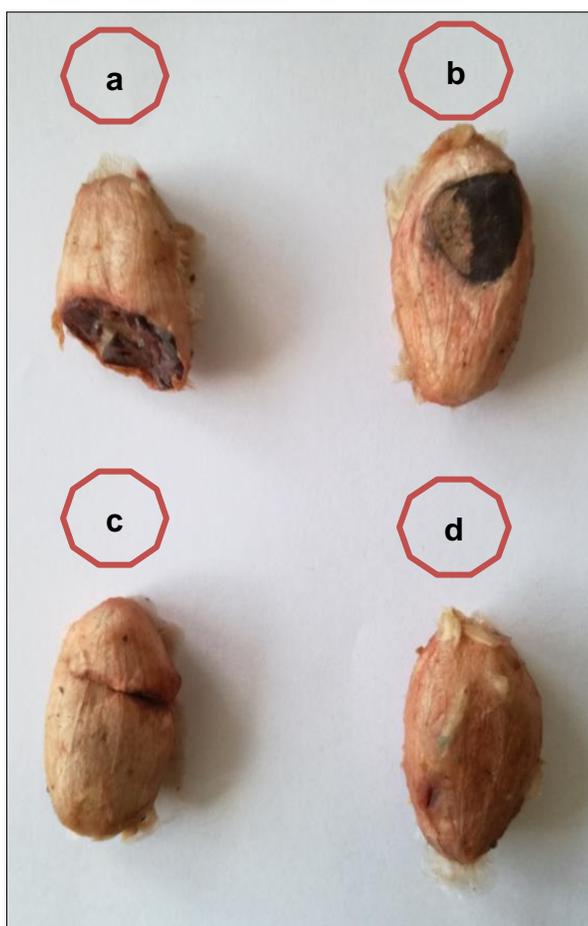


Figura 4.45: Semillas dañadas (a) Corte total (b) Corte parcial grave (c) y (d) Corte parcial leve

En la Figura 4.34 se observa, resaltado en recuadros rojos, las semillas dañadas, el daño provocado durante la extracción manual es en la mayoría de los casos de tipo corte total.



Figura 4.46: Semillas dañadas en el proceso de extracción manual

4.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Se plantean límites inferiores y superiores para realizar el análisis correspondiente de los resultados obtenidos en la Sección 4.2, como parámetros principales se consideran el peso del producto rechazado, semillas dañadas debido al proceso de fragmentación y el rendimiento de la máquina. Adicionalmente, se calcula la capacidad en cantidad de mazorcas que la bandeja de almacenamiento puede soportar.

4.3.1 PRODUCTO RECHAZADO

Se calculó el porcentaje de rechazo en función de la Ecuación 71.

$$\% \text{ Rechazo} = \frac{P_R}{P_T} * 100\%$$

Ec. 71

Donde:

P_T es el peso total del producto procesado.

P_R es el peso del producto rechazado por el proceso de separación.

En la Tabla 4.9 se observan los porcentajes de producto rechazado en cada prueba.

Tabla 4.9: Porcentaje de producto rechazado

Prueba	Rechazo
1	15.6%
2	13.5%
3	14.8%
4	12.5%
5	13.2%
6	10.1%

El promedio de rechazo obtenido es de 13.3%, según los valores de 6 pruebas.

Se plantean los siguientes límites para el análisis:

- Límite superior = 15% de rechazo.
- Límite inferior = 0% de rechazo.

En la Figura 4.47 se muestran los porcentajes de semillas rechazadas, donde se grafica el límite superior, el rechazo, límite inferior y promedio de rechazo.

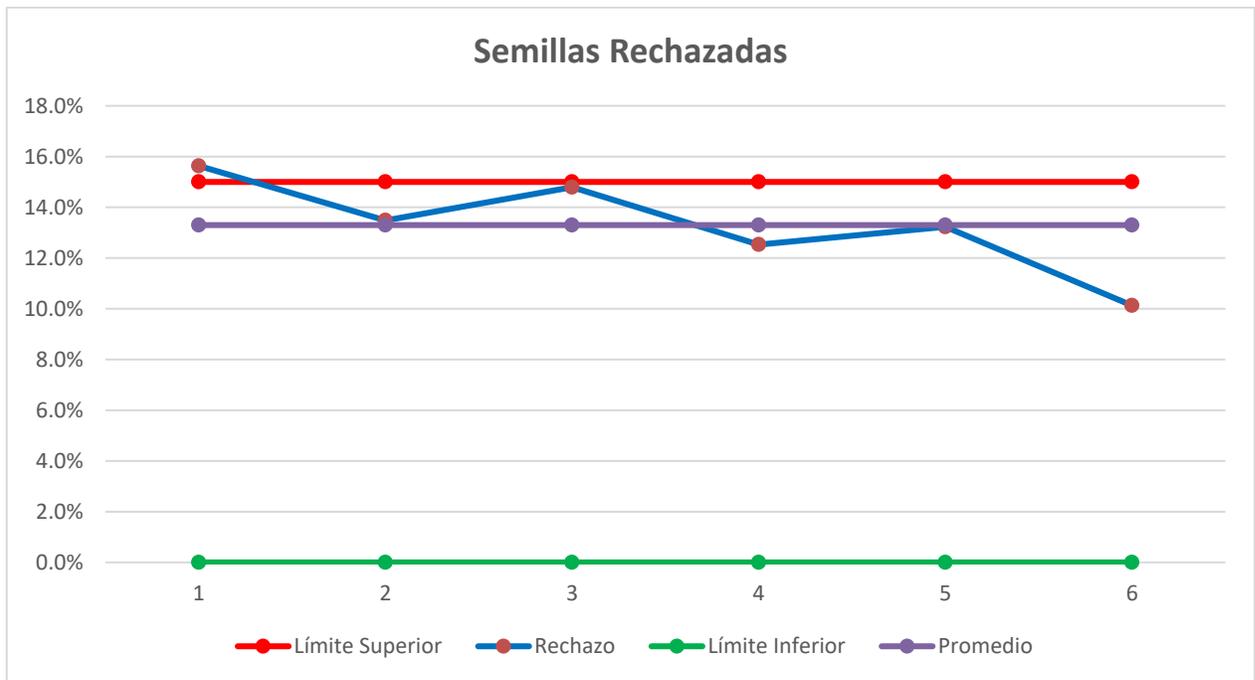


Figura 4.47: Gráfica de porcentajes de semillas rechazadas

Se observa que la primera prueba, donde se procesaron 15 mazorcas en un minuto, tiene un resultado que se encuentra fuera de rango, debido a la alta velocidad de ingreso de mazorcas a la máquina no se separan adecuadamente las semillas de la corteza. El error se corrige adecuadamente en las pruebas 2 a 5, donde el porcentaje de rechazo está por debajo del límite superior. Lo cual es aceptable debido a que la velocidad máxima requerida de procesamiento para las mazorcas es de 6 por minuto, en las pruebas 2 y 3 se tiene una velocidad de 7.5 mazorcas por minuto, y en 4 y 5 se tiene 5 mazorcas por minuto. Mientras que en la prueba 6, se procesa el producto a una velocidad de 6 mazorcas por minuto y se obtiene el menor valor de rechazo de las pruebas realizadas.

4.3.2 SEMILLAS DAÑADAS

Se calculó el porcentaje de daño en función de la Ecuación 72.

$$\% \text{ Daño} = \frac{P_D}{P_T} * 100\%$$

Ec. 72

Donde:

P_T es el peso total del producto procesado.

P_D es el peso del producto dañado por el proceso de fragmentación.

En la Tabla 4.10 se observan los porcentajes de producto dañado en cada prueba.

Tabla 4.10: Porcentaje de producto dañado

Prueba	Daño
1	2.4%
2	1.6%
3	1.8%
4	2.0%
5	3.1%
6	1.9%

El promedio de daño de semillas obtenido es de 2.1%, según los valores de 6 pruebas.

Se plantean los siguientes límites para el análisis:

- Límite Superior = 5% de semillas dañadas
- Límite Inferior = 0% de semillas dañadas

En la Figura 4.48 se muestran los porcentajes de semillas dañadas, donde se grafica el límite superior, porcentaje de semillas dañadas, límite inferior y promedio de daño.

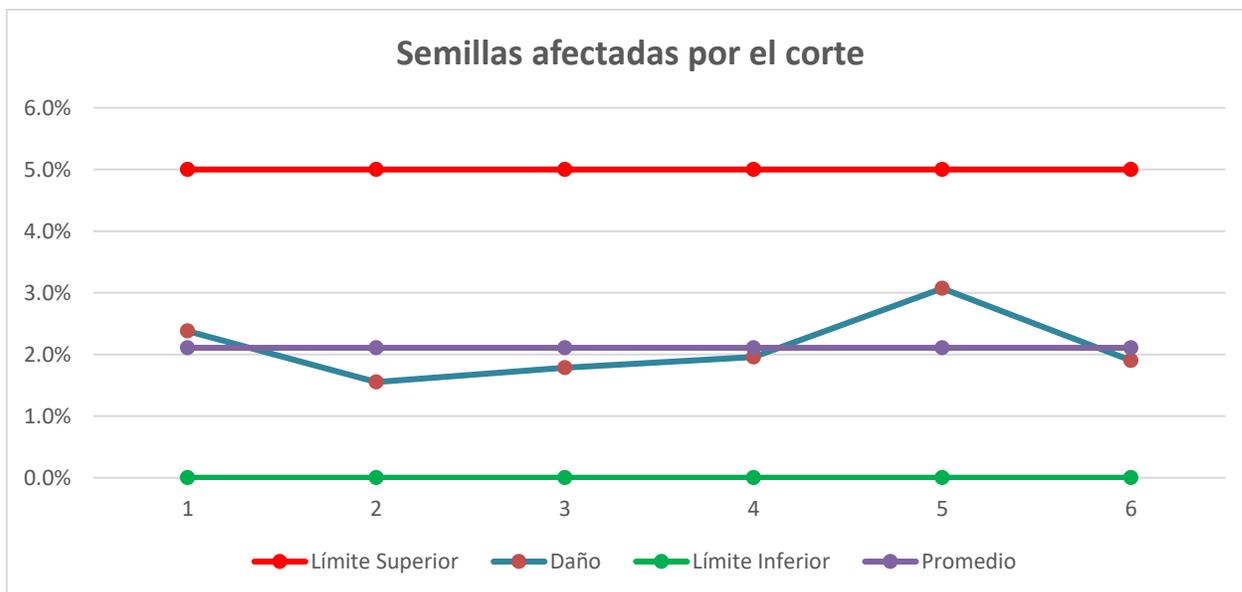


Figura 4.48: Gráfica de porcentajes de semillas dañadas

Se puede observar que el daño causado a las semillas debido al sistema de fragmentación se mantiene prácticamente constante, dentro de lo cual cabe recalcar que se consideraron todas las afectaciones listadas en la Sección 4.2.8, a pesar de que el corte parcial leve no afecta los procesos posteriores de las semillas ni su calidad. Por lo cual la pérdida real por daño de semillas es menor a los porcentajes presentados, cumpliendo así con el objetivo de la máquina, manteniendo el porcentaje de semillas afectadas por debajo del límite superior.

4.3.3 RENDIMIENTO DE LA MÁQUINA

Se calculó el rendimiento de la máquina en cada prueba en función de la Ecuación 73.

$$\text{Rendimiento de la máquina} = \frac{P_R + P_D}{P_T} * 100\%$$

Ec. 73

Donde:

P_T es el peso total del producto procesado.

P_D es el peso del producto dañado por el proceso de fragmentación.

P_R es el peso del producto rechazado por el proceso de separación.

En la Tabla 4.11 se tiene el rendimiento de la máquina obtenido de cada prueba

Tabla 4.11: Rendimiento de la máquina

Prueba	Rendimiento
1	78.0%
2	82.3%
3	80.1%
4	83.1%
5	80.5%
6	86.3%

El promedio de rendimiento de la máquina obtenido es de 81.7%, según los valores de 6 pruebas.

Se plantean los siguientes límites para el análisis:

- Límite superior = 100% de rendimiento.
- Límite inferior = 85% de rendimiento.

En la Figura 4.49 se muestran el rendimiento de la máquina, donde se grafica el límite superior, rendimiento de cada prueba, límite inferior y promedio del rendimiento.

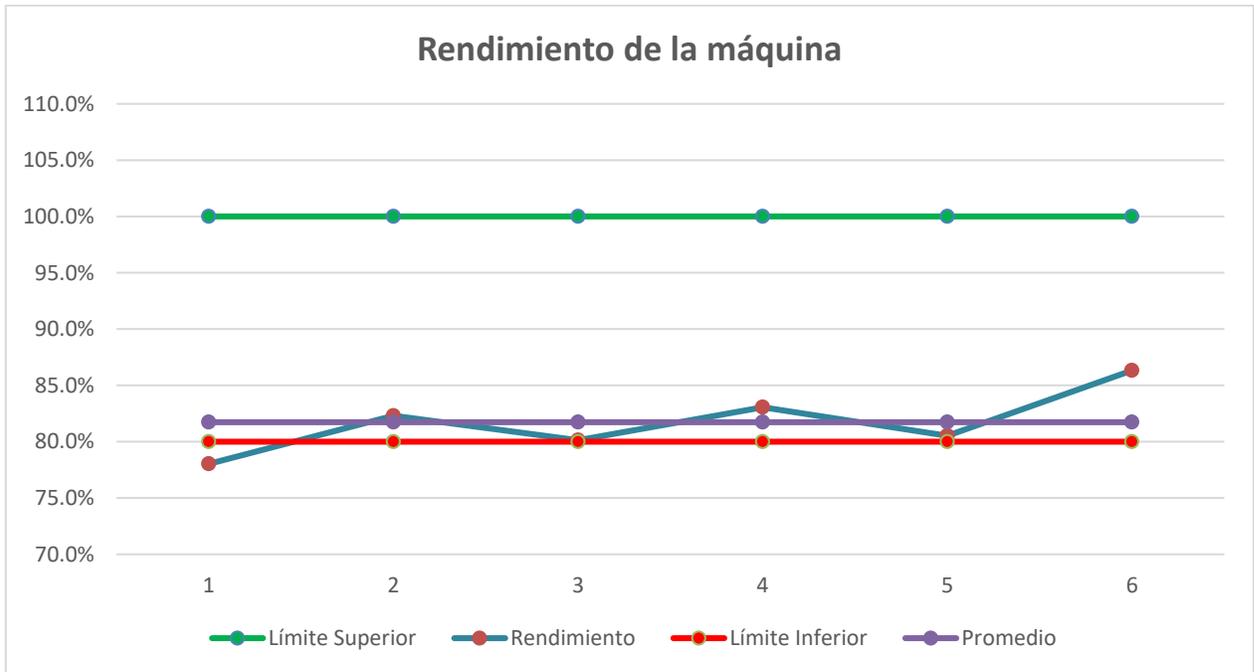


Figura 4.49: Gráfica del rendimiento de la máquina

El rendimiento de la máquina durante la primera prueba realizada se observa que esta fuera del rango determinado, razón por la cual se recomienda no procesar a más de la velocidad de diseño, 6 mazorcas por minuto.

En la prueba final se obtienen un rendimiento de 86.3%, superior al promedio, con lo cual se verifica el cumplimiento del requerimiento de la velocidad de trabajo y con la premisa de que en las pruebas realizadas se procesaron mazorcas de hasta 30 cm de longitud y de 14 cm de diámetro, se comprueba la hipótesis planteada.

4.3.4 CAPACIDAD DE LA BANDEJA DE ALMACENAMIENTO

Se calcula la capacidad de mazorcas de la bandeja de almacenamiento, en función del porcentaje de llenado que se obtuvo en la Prueba 4, se utiliza la Ecuación 74 para obtener el promedio que cada mazorca llena de la bandeja, considerando que se puede llenar el 100% del espacio disponible.

$$Promedio\ por\ mazorca = \frac{Porcentaje\ de\ bandeja\ llena}{Cantidad\ de\ mazorcas\ procesadas}$$

En función de la Ecuación 75 se obtiene la capacidad de mazorcas procesadas que se pueden almacenar en la bandeja, en la Tabla 4.12 se listan los resultados obtenidos.

$$Capacidad\ de\ mazorcas\ procesadas = \frac{100\%}{Promedio\ por\ mazorca}$$

Ec. 75

Tabla 4.12: Capacidad de la bandeja de almacenamiento

Capacidad de la Bandeja		
Capacidad Total de la Bandeja	100%	
Promedio Por Mazorca	0.244%	
Capacidad de mazorcas procesadas	410	Mazorcas

Se determina en promedio que 410 mazorcas llenaran el espacio disponible en la bandeja de almacenamiento, con lo cual se estima el tiempo de funcionamiento continuo antes de requerir parar la máquina para vaciar la bandeja en función de la Ecuación 76.

$$Tiempo\ de\ funcionamiento\ continuo = \frac{Capacidad\ de\ mazorcas}{6\ mazorcas\ por\ minuto} = \frac{410}{6} = 68.33\ minutos$$

Ec. 76

Se determina que en promedio la máquina funcionaria alrededor de una hora continuamente sin requerir detener el proceso para vaciar la bandeja.

4.3.5 VALORES PROMEDIO DE LOS DATOS OBTENIDOS

En la Tabla 4.13 se muestran los promedios de cada dato recopilado, en función de los resultados de la prueba final donde se procesaron mazorcas de diferentes tamaños, además del cálculo de la capacidad de la bandeja de almacenamiento se obtiene que en promedio cada mazorca llena un 0.244% de la capacidad total.

Tabla 4.13: Valores promedio de los datos obtenidos

Promedio	
Rechazo [g]	27.01
Dañadas [g]	5.07
Pérdida Potencial [g]	32.08
Peso Semillas [g]	234.58

Los valores promedio se utilizan en el PLC para calcular valores aproximados, en función de la cantidad de mazorcas que ingresan al sistema para ser procesadas, la información obtenida se muestra en el HMI de la máquina.

4.3.6 CÁLCULO DEL COSTO TOTAL DE LA MÁQUINA

Se calcula el costo total de la máquina considerando dos tipos de gastos principales, materiales eléctricos y metalmecánica, con valores aproximados. A continuación, en la Tabla 4.14 se listan los costos de los materiales eléctricos utilizados en la construcción de la máquina, donde el rubro considerado como extras corresponde al valor de los cables, conectores, canaletas, etc.

Tabla 4.14: Costos de materiales eléctricos

Costos de materiales eléctricos			
Componente	Cantidad	Costo	Total
Motorreductor 1 HP 220 bifásico	1	\$ 550.00	\$ 550.00
Motorreductor 1 HP 220 trifásico	1	\$ 420.00	\$ 420.00
Variador de frecuencia 1 HP ABB	1	\$ 180.00	\$ 180.00
Contactador 1 HP	2	\$ 12.00	\$ 24.00
Temporizador en conexión	1	\$ 9.00	\$ 9.00
Luces LEDs	5	\$ 1.50	\$ 7.50
Selectores de posición	2	\$ 3.50	\$ 7.00
Gabinete liviano 40x40x20	1	\$ 40.00	\$ 40.00
Pulsadores de emergencia	2	\$ 7.00	\$ 14.00
PLC	1	\$ 100.00	\$ 100.00
Extras	1	\$ 150.00	\$ 150.00
TOTAL			\$ 1,501.50

En materiales eléctricos se tiene un valor total de \$1,501.50, a continuación, en la Tabla 4.15 se listan los costos incurridos debido a trabajos metalmecánicos en la construcción de la máquina.

Tabla 4.15: Costos metalmecánicos

Costos de partes mecánicas	
Perfiles de acero estructural	\$ 250.00
Acero DF2 cuchillas	\$ 100.00
Protecciones de acero inoxidable	\$ 120.00
Material Ejes	\$ 170.00
Aluminio corrugado	\$ 100.00
Piñones y cadena	\$ 100.00
Malla	\$ 10.00
Chumaceras	\$ 90.00
Pernos, arandelas y tuercas	\$ 55.00
Pintura	\$ 80.00
TOTAL	\$ 1,075.00

El valor total de los costos de partes mecánicas es de \$1,075.00. En la Tabla 4.16 se detallan los costos aproximados debido a la mano de obra, se estimó el costo de diseño en un 15% del total de materiales eléctricos, mecánicos y costo por construcción mecánica.

En el valor por construcción mecánica se consideran los gastos de maquinado de los ejes y cuchillas, gastos de consumo eléctrico, entre otros.

Tabla 4.16: Costos de mano de obra

Costos de mano de obra	
Diseño	\$ 536.00
Construcción mecánica	\$ 1,000.00
TOTAL	\$ 1,536.00

El valor total de los costos generados por mano de obra se estima en \$1,536.00, con lo que se obtiene, en la Tabla 4.17 el costo total de construcción de la máquina.

Tabla 4.17: Costo de construcción total

COSTO TOTAL	
Costos de materiales eléctricos	\$ 1,501.50
Costos de partes mecánicas	\$ 1,075.00
Costo de mano de obra	\$ 1,536.00
Imprevistos	\$ 100.00
TOTAL	\$ 4,212.50

El valor total de construcción de la máquina para la extracción de la pulpa de cacao se estima en \$4,212.50, se recomienda realizar un análisis de mercado para estimar un posible precio de venta del equipo.

CONCLUSIONES

- La máquina diseñada para extraer la pulpa del fruto del cacao admite mazorcas de hasta 31 cm de longitud y 15 cm de diámetro, con una capacidad de procesamiento recomendada, en función de la información recopilada en las pruebas, de 8 mazorcas por minuto; la capacidad de la bandeja de almacenamiento es de 410 mazorcas, con lo cual se cumple con los requerimientos propuestos para el proyecto.
- Los fragmentos de corteza residual expulsados por la máquina permiten una descomposición orgánica de menor tiempo, los residuos expulsados son en promedio de un tercio del tamaño que los residuos producto de la extracción manual.
- En caso de cosechar mazorcas enfermas con moniliasis, o que hayan madurado de manera acelerada, y se quiera extraer su contenido, procesarlas de manera manual, debido a que la máquina rechaza gran parte de las semillas contenidas en la mazorca.
- La interfaz implementada permite acceder de manera sencilla a los modos de funcionamiento de la máquina, no se requiere de conocimientos avanzados para operar el equipo diseñado, debido al riesgo de atascamiento es imprescindible utilizar sistemas de paro de emergencia manual y automático como medida de seguridad en caso de que existiese un accidente.
- El operario puede controlar las funciones de la máquina de manera sencilla y práctica, solo mediante el accionamiento de selectores de posición para lo cual no se requiere conocimientos avanzados, además los elementos del sistema de

control garantizan una larga vida, considerando las posibles condiciones adversas de funcionamiento.

- La información del proceso visualizada en el HMI se calcula en función de valores promedio obtenidos de procesar 90 mazorcas de diferentes diámetros y longitudes, el operario puede utilizar esta información como referencia.
- Las pruebas realizadas permitieron obtener datos de gran relevancia sobre la máquina, como por ejemplo el rendimiento, que, debido a la falta de investigación en esta sección de maquinaria agrícola, provee una base sólida sobre la cual se pueden seguir desarrollando proyectos adicionales.
- Durante el diseño resulta beneficioso verificar que los ejes tengan un factor de seguridad aceptable no solo por fatiga sino por rigidez, debido a que si existiesen cargas que superen los límites establecidos, aun cuando la fatiga no represente un problema, los mecanismos garantizarían la confiabilidad requerida en la máquina, principalmente en los elementos de rodadura.
- Se realizaron simulaciones de los elementos mecánicos por software utilizando elementos finitos con el objetivo de verificar los resultados obtenidos de manera teórica, comprobando que el factor de seguridad de cada parte tenga un valor aproximado por ambos métodos.
- Resultado de las pruebas se observó que un factor de gran relevancia para el proceso es el estado de las mazorcas que ingresan al sistema, por lo cual un adecuado manejo del cultivo y una preclasificación es recomendable, para evitar que entren al sistema mazorcas enfermas con moniliasis o maduras debido a la intervención de la fauna silvestre.

- Debido a las partes móviles de la máquina, es imprescindible que se instalen protecciones para evitar accidentes de los operarios, y sistemas de paro de emergencia que en situaciones que se requieran permitan desactivar los mecanismos de manera inmediata.
- Durante las pruebas de funcionamiento se observó la necesidad de implementar un sistema de paro automático de los motores, lo cual mejora sustancialmente los sistemas de seguridad disponibles en la máquina.
- Debido a las condiciones de funcionamiento y el producto que se requiere procesar, es de gran importancia garantizar que se pueda realizar una adecuada limpieza de la máquina sin que existan afectaciones estructurales o de los sistemas eléctricos.
- Considerando los resultados de las pruebas 1 a 5, se concluye que se requiere de un proceso de tamizado posterior al secado, en el cual se remuevan los pequeños residuos contaminantes de corteza, en el Anexo F se muestra un ejemplo de un secador de cacao artesanal con una malla que sirve como tamiz.
- Se determinó, mediante los resultados de las pruebas, que la máquina tiene un rendimiento promedio del 81.7% y 2.1% de daño a las semillas, datos que sirve como referencia para el desarrollo de maquinaria para el sector cacaotero, adicional los datos obtenidos durante el desarrollo del proyecto, sirven como base de información para el desarrollo de futuras investigaciones multidisciplinarias.
- Se considera de gran importancia alinear y nivelar correctamente los ejes durante la construcción, y en el montaje corroborar las tolerancias indicadas en el plano mediante instrumentos, por ejemplo, nivel o medidor de ángulo, con el objetivo de

evitar principalmente el desgaste y alargar la vida útil de los elementos motrices, y de manera general mejorar la vida útil de la máquina, requerimiento del usuario.

- Las pruebas de procesamiento realizadas permitieron obtener de manera exitosa información que permitió corroborar que el objetivo principal de la máquina y la hipótesis planteada se cumplieron.

RECOMENDACIONES

- En caso de requerir el cambio de alguna pieza o elemento de la máquina referirse al manual de operación y mantenimiento, donde se encuentran listados códigos de las partes con referencia al lugar de adquisición, evitando instalar elementos que no sean adecuados para el correcto funcionamiento de la máquina.
- Previo a utilizar la máquina, leer completamente el manual de operación, y tener en cuenta todas las precauciones indicadas, debido al riesgo existente para los operarios.
- Se recomienda que los operarios de la maquina utilicen siempre guantes de protección, debido a que si existiese algún atascamiento esto ayudaría a reducir el daño producido.
- Es recomendable siempre instalar sistemas de paro de emergencia antes de realizar cualquier prueba de funcionamiento en un sistema motriz con posibilidad de atascamiento.
- Realizar pruebas de carga eléctrica en el lugar de trabajo, para verificar que se disponga la potencia mínima requería para el correcto funcionamiento de la máquina y evitar daños en los elementos que la conforman.

- Realizar con una frecuencia moderada y en función del uso que se le dé a la máquina ajustes en la tensión de la cadena, regulando la posición del motor de fragmentación, para evitar el desgaste en los piñones y la cadena.
- Previo a instalar la máquina en el lugar de funcionamiento, asegurarse que el piso este correctamente nivelado. En el caso que existan ejes que no se encuentren a nivel con respecto al piso, por defecto del diseño, verificar que el eje conducido y el sistema motriz se encuentren correctamente alineados entre sí. La no alineación genera concentración de esfuerzos y con el uso continuo termina por deformar las piezas, se debe utilizar un medidor de inclinación para comprobar los ángulos de los elementos.
- Considerando la diferencia del grado de resistencia mecánica entre pernos de acero inoxidable y galvanizado, disponibles en el mercado nacional, se recomienda siempre utilizar pernos inoxidables en uniones con presencia de cargas moderadas, y pernos galvanizados cuando las cargas se pueden considerar nulas o muy bajas, y para el caso de máquinas que trabajen con productos alimenticios se recomienda siempre utilizar, por razones de sanidad y asepsia, acero inoxidable, con el objetivo de garantizar protección contra la oxidación o corrosión y por ende evitar contaminación durante el proceso.
- De ser requerido por el usuario se recomienda cambiar la bandeja de almacenamiento por un sistema de recolección de semillas con inclinación hacia el lateral de la máquina para reducir el costo de fabricación y aumentar el tiempo de funcionamiento continuo, reduciendo el precio de venta y aumentando la productividad.

- Se recomienda asear al menos una vez por semana, en caso de usar frecuentemente la máquina, todas las partes en contacto directo con las mazorcas utilizando detergente adecuado para remover grasa.
- Se recomienda verificar la vida útil de los elementos electromecánicos del sistema de control con el objetivo de asegurar siempre un correcto funcionamiento del equipo.
- Cuando se realicen actividades de limpieza o mantenimiento preventivo en la máquina se recomienda proteger los motores y los sistemas eléctricos, a pesar de que la maquina está diseñada con protecciones en dichas partes, con el objetivo de garantizar protección adicional y alargar la vida útil de los equipos.
- El rendimiento de la máquina en promedio es del 82.3%, considerando que desde 75% hasta un 85% se considera un valor aceptable, pero con capacidad de mejoras, se sugiere aumentar la longitud del hexágono de separación, en un metro, debido a que el mayor desperdicio se produce por semillas rechazadas.
- Realizar un análisis financiero y de mercado del sector productivo en el cual se pretende comercializar la máquina para poder estimar un precio comercial competitivo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] R. Budynas y J. Nisbett, Diseño en ingeniería mecánica de Shigley, 8va Ed, México D.F.: McGraw-Hill, 2008.
- [2] A. Pytel y F. Singer, Resistencia de materiales, 4ta Ed, México: Alfaomega, 2008.
- [3] R. Norton, Diseño de maquinaria, 4ta Ed, México D.F.: McGraw-Hill, 2009.
- [4] J. Shigley y J. Uicker, Teoría de máquinas y mecanismos, México: McGraw-Hill, 2001.
- [5] F. Colmenares, “Diseño y construcción de un prototipo experimental desmucilaginador de cacao”, Escuela de ingeniería mecánica, Universidad industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia, 2006.
- [6] A. Rodríguez, “Estudio de tres métodos para la obtención de pulpa del mesocarpio del cacao”, Facultad de ingeniería y ciencias agropecuarias, Universidad de las Américas, Quito, Ecuador, 2013.
- [7] Lutheran World Relief, Caja de herramientas para cacao. [En línea]. Estados Unidos, 2013. Disponible en: www.cacaomovil.com
- [8] Pinhalense, Pinhalense. [En línea]. Brazil, 2016. Disponible en: www.pinhalense.com.br
- [9] A. Rosero y R. Toapanta, “Diseño de una máquina separadora de la semilla del cacao”, Facultad de ingeniería mecánica, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador, 2008.
- [10] ABB, “Convertidores de frecuencia ABB de propósito general”. 2017. [En línea] Disponible en: new.abb.com
- [11] nexoLOCAL, Despulpadora de cacao. [En línea]. Ecuador, 2016. Disponible en: <http://portoviejo.nexolocal.com.ec/>
- [12] A. Nieto Quijorna, “Elementos de Máquinas”, Área de Ingeniería Mecánica, Universidad de Castilla, España, 2007.
- [13] R. L. Mott, Resistencia de Materiales, 5ta Ed, México: Pearson, 2009.

- [14] IdealAlambrec, "Catalogo de productos". [En línea]. Ecuador, 2017. Disponible en: <http://www.idealambrec.bekaert.com>.
- [15] Ivan Bohman C.A., "Catalogo de aceros y accesorios para transmision de potencia". [En línea]. Ecuador, 2017. Disponible en: www.ivanbohman.com.ec
- [16] Solaris, "American Wire Gauge Conductor Size Table", [En línea]. Estados Unidos, 2017. Disponible en: www.solaris-shop.com
- [17] WEG, "Catálogo de motores BT". 2017. [En línea]. Disponible en: www.weg.net
- [18] AENOR, "Simbolos Gráficos para esquemas", España: Asociación Española de Normalización y Certificación, 1996.
- [19] A. Martínez, V. Blanca, N. Castilla y R Pastor, "Cálculo de fusibles de una instalación eléctrica en baja tensión", España: Univesidad Politécnica de Valencia, 2003.
- [20] CropLife, "'Monilieasis del cacao". 2017. [En línea]. Disponible en: www.croplifela.org
- [21] Panasonic, "Compact Size Limit Switches VL(AZ8)". 2017. [En línea]. Disponible en: www.panasonic-electric-works.com