



Universidad
Nacional
de Loja

Universidad Nacional de Loja

Facultad de la Energía, las Industrias y los Recursos Naturales no Renovables

Carrera de Ingeniería Electromecánica

Desarrollo de un dispositivo electromecánico para identificar según la tonalidad de la epidermis los frutos del café cosechados.

Trabajo de Titulación, previo a
la obtención del título de
Ingeniero Electromecánico

AUTOR:

Cristian Fernando Pupiales Ordóñez

DIRECTOR:

Dr. Miguel Ángel Caraballo Núñez, PhD.

Loja – Ecuador

2023

Educamos para **Transformar**

Certificación

Loja, 07 de septiembre de 2023

Dr. Miguel Ángel Caraballo Núñez, PhD.

DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

CERTIFICO:

Que he revisado y orientado todo proceso de la elaboración del Trabajo de Titulación denominado: **Desarrollo de un dispositivo electromecánico para identificar según la tonalidad de la epidermis los frutos del café cosechados**, previo a la obtención del título de **Ingeniero Electromecánico**, de la autoría del estudiante **Cristian Fernando Pupiales Ordóñez**, con **cédula de identidad Nro. 1722751425**, una vez que el trabajo cumple con todos los requisitos exigidos por la Universidad Nacional de Loja, para el efecto, autorizo la presentación del mismo para su respectiva sustentación y defensa.

Dr. Miguel Ángel Caraballo Núñez, PhD.

DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Autoría

Yo, **Cristian Fernando Pupiales Ordóñez**, declaro ser autor del presente Trabajo de Titulación y eximo expresamente a la Universidad Nacional de Loja y a sus representantes jurídicos de posibles reclamos y acciones legales, por el contenido del mismo. Adicionalmente acepto y autorizo a la Universidad Nacional de Loja, la publicación de mí Trabajo de Titulación en el Repositorio Digital Institucional - Biblioteca Virtual.

Firma: 

Cédula de Identidad: 1722751425

Fecha: 23 de noviembre de 2023

Correo electrónico: cfpupialeso@unl.edu.ec

Teléfono: 0967316368

Carta de autorización por parte del autor, para consulta, reproducción parcial o total y/o publicación electrónica del texto completo, del Trabajo de Titulación.

Yo, **Cristian Fernando Pupiales Ordóñez**, declaro ser autor del Trabajo de Titulación denominado: **Desarrollo de un dispositivo electromecánico para identificar según la tonalidad de la epidermis los frutos del cafeto cosechados**, como requisito para optar por el título de **Ingeniero Electromecánico**, autorizo al sistema Bibliotecario de la Universidad Nacional de Loja para que, con fines académicos, muestre la producción intelectual de la Universidad, a través de la visibilidad de su contenido en el Repositorio Institucional.

Los usuarios pueden consultar el contenido de este trabajo en el Repositorio Institucional, en las redes de información del país y del exterior, con las cuales tenga convenio la Universidad. La Universidad Nacional de Loja, no se responsabiliza por el plagio o copia del Trabajo de Titulación que realice un tercero.

Para constancia de esta autorización en la ciudad de Loja, a los veintitrés días del mes de noviembre del dos mil veintitrés.

Firma: 

Autor: Cristian Fernando Pupiales Ordóñez

Cédula: 1722751425

Dirección: Loja, Calle Soldado Vicente Rosero y Cabo Gonzalo Montesdeoca.

Correo electrónico personal: cfpupialeso@unl.edu.ec

Teléfono: 0967316368

DATOS COMPLEMENTARIOS:

Director del trabajo de titulación: Dr. Miguel Ángel Caraballo Núñez, PhD.

Dedicatoria

El presente trabajo va dedicado a todas las personas que de alguna manera me han respaldado a lo largo de mis estudios universitarios y en especial a mis padres Serafina y Ángel, mis hermanas Iveth, Karina y Lorena, mis sobrinos Bryan, Ana y Alicia, mi cuñado Adrián, y mi tío José, que han sido mi equipo de apoyo.

Cristian Fernando Pupiales Ordóñez

Agradecimientos

Mi sincero agradecimiento a la Universidad Nacional de Loja, a la Facultad de la Energía, las Industrias y los Recursos Naturales No Renovables, a la Carrera de Ingeniería Electromecánica, a las autoridades y personal docente, quienes me brindaron sus enseñanzas durante mi formación profesional.

De manera especial al Dr. Miguel Ángel Caraballo Núñez, PhD., director del presente trabajo de titulación, quién a través de sus conocimientos y motivación ha sabido orientarme adecuadamente para la realización y culminación de esta labor investigativa.

De igual manera expresar mis reconocimientos al Sr. Víctor Guamán, propietario de café “Don Víctor”; al Ing. José Miguel Fernández, investigador del laboratorio de alimentos de la UTPL; y los docentes de la carrera Ing. Jefferson Camacho e Ing. Byron Solórzano, quienes brindaron información y aportaron a lo largo de esta investigación con predisposición y ánimo colaborativo.

Cristian Fernando Pupiales Ordóñez

Índice de contenidos

Portada	i
Certificación	ii
Autoría	iii
Carta de autorización	iv
Dedicatoria	v
Agradecimientos	vi
Índice de contenidos	vii
Índice de tablas:	xi
Índice de figuras:	xii
Índice de anexos:	xv
1. Título	1
2. Resumen	2
Abstract.....	3
3. Introducción	4
4. Marco teórico	6
4.1 Características de los frutos del cafeto.....	6
4.1.1 Escala de color visual.....	6
4.1.2 Diámetro característico o equivalente.....	7
4.1.3 Peso fresco	7
4.1.4 Densidad aparente	8
4.1.5 Ángulo de reposo	8
4.1.6 Muestra cosechada	8
4.2 Máquinas clasificadoras de alimentos por color de tipo industrial.....	9
4.2.1 Modelos de clasificadoras	10
4.2.1.1 Blizzard.....	10
4.2.1.2 Halo.	11
4.2.1.3 Sistema clasificador por medio de rodillos.....	12
4.2.1.4 WYCS8-512.	13
4.2.1.5 WYB1.....	14
4.2.2 Descripción del proceso de clasificación	15
4.2.2.1 Unidad de autonomía.....	15
4.2.2.2 Unidad de posicionamiento.	15
4.2.2.3 Unidad enlace pulmón.	15

4.2.2.4	Unidad de selección.....	15
4.3	Fundamentos de Mecánica.....	16
4.3.1	Transportadores.....	16
4.3.1.1	Elementos de un transportador con órgano de tracción flexible.	16
4.3.1.2	Determinación del órgano de tracción tipo cadena.	17
4.3.1.3	Torque requerido por el transportador de cadenas.	22
4.3.2	Diseño de árboles y ejes.....	23
4.3.2.1	Procedimiento de cálculo.....	23
4.3.3	Dimensionamiento de rodamientos.....	28
4.3.3.1	Procedimiento de cálculo.....	28
4.3.4	Acoplamientos	29
4.3.4.1	Rígidos.....	29
4.3.4.2	Flexibles.....	29
4.3.5	Bastidores.....	30
4.3.5.1	Vigas.....	30
4.3.5.2	Columnas.....	31
4.3.5.3	Placas.....	33
4.3.5.4	Pernos.....	33
4.4	Fundamentos de Automatización.....	37
4.4.1	Elementos para reconocimiento de color.....	37
4.4.1.1	Sensores de color.....	37
4.4.1.2	Sensores de visión o cámaras.....	37
4.4.2	Elementos para visualización de datos	38
4.4.2.1	Pantallas LCD.....	38
4.4.3	Elementos para desplazamiento de objetos.....	39
4.4.3.1	Motores eléctricos.....	39
4.4.4	Elementos para control general de sistemas	39
4.4.4.1	Tarjetas de desarrollo.....	39
4.4.4.2	Lenguaje de programación: Python.....	39
4.4.5	Otros elementos usados.....	40
4.5	Métodos de evaluación de soluciones.....	41
4.5.1	Método ordinal corregido de criterios ponderados	41
4.5.2	Matriz de confusión	42
4.6	Experiencias vinculadas a los selectores por color de frutos del cafeto	43

4.6.1	Sistema basado en Arduino (Universidad Tecnológica de Pereira).....	43
4.6.2	Sistema basado en Python (Universidad Autónoma del Caribe)	44
4.6.3	Sistema basado en Labview (Centro Nacional de Investigaciones de Café)	44
5.	Metodología	45
5.1	Área de estudio	45
5.2	Materiales y equipos	45
5.2.1	Recursos bibliográficos.....	45
5.2.2	Recursos informáticos.....	45
5.2.3	Herramientas de taller	45
5.3	Procedimiento	46
5.4	Procesamiento y análisis de datos.....	47
5.4.1	Análisis de las características de los frutos del cafeto	47
5.4.2	Estudio general de los componentes	48
5.4.3	Diseño electrónico	51
5.4.3.1	Requerimientos electrónicos.....	51
5.4.3.2	Selección de componentes.....	51
5.4.3.3	Propuesta de diseño electrónico.	55
5.4.4	Diseño mecánico.....	57
5.4.4.1	Requerimientos mecánicos.	57
5.4.4.2	Diseño de componentes.	57
5.4.4.3	Propuesta de diseño mecánico.....	87
5.4.5	Implementación del prototipo	88
5.4.5.1	Subunidad de censado.	88
5.4.5.2	Unidad de enlace pulmón.	89
5.4.5.3	Unidad de posicionamiento.	92
5.4.5.4	Unidad de autonomía.....	93
5.4.5.5	Subunidad de eyección.	94
5.4.5.6	Unidad de control y automatización.....	95
5.4.6	Validación del prototipo	96
6.	Resultados.....	98
6.1	Propuesta general de diseño.....	98
6.2	Descripción del sistema electrónico.....	99
6.3	Descripción del sistema mecánico	101
6.3.1	Subunidad de censado.....	101

6.3.2	Unidad enlace pulmón	102
6.3.3	Unidad de posicionamiento.....	103
6.3.4	Unidad de autonomía	104
6.3.5	Subunidad de eyección	104
6.3.6	Conjunto.....	105
6.4	Modelo electromecánico construido	106
6.4.1	Características	106
6.4.2	Manual de seguridad	108
6.4.2.1	Para la instalación del prototipo.	108
6.4.2.2	Previo al uso del prototipo.....	109
6.4.2.3	Durante el uso del prototipo.	110
6.4.2.4	Posterior al uso del prototipo.....	111
6.4.3	Instrucciones de operación.....	112
6.4.4	Costos de implementación	113
6.5	Desempeño del sistema.....	113
7.	Discusión	114
8.	Conclusiones	118
9.	Recomendaciones	119
10.	Bibliografía	120
11.	Anexos	125

Índice de tablas:

Tabla 1. Valores de diámetro característico y peso fresco.....	7
Tabla 2. Densidades aparentes del café	8
Tabla 3. Valores de los coeficientes de rozamiento.....	20
Tabla 4. Valores individuales del factor de servicio.....	20
Tabla 5. Descripción de los tipos de solicitudes	24
Tabla 6. Coeficientes parciales de seguridad.....	25
Tabla 7. Coeficientes recomendados para desviación torsional permitida.....	27
Tabla 8. Factores de esfuerzos estáticos	29
Tabla 9. Coeficientes límite recomendados para deflexión	30
Tabla 10. Tarjetas de desarrollo.....	39
Tabla 11. Escala de color en categorías y conversión de colores	47
Tabla 12. Diámetro característico y peso fresco para acotamiento.....	47
Tabla 13. Identificación de alternativas a elegir	48
Tabla 14. Priorización de alternativas.....	49
Tabla 15. Componentes considerados para la propuesta del prototipo.....	50
Tabla 16. Análisis de requerimientos electrónicos	51
Tabla 17. Recursos disponibles para reconocimiento e iluminación	51
Tabla 18. Recursos disponibles para control y registro del desplazamiento	52
Tabla 19. Recursos disponibles para control general del sistema.....	52
Tabla 20. Análisis de requerimientos mecánicos.....	57
Tabla 21. Registro del primer ensayo	97
Tabla 22. Valores calculados para el primer ensayo.....	97
Tabla 23. Propuesta de componentes del clasificador y prioridad de diseño	98
Tabla 24. Recursos seleccionados para cubrir los requerimientos electrónicos	99
Tabla 25. Costo de materiales del prototipo	113
Tabla 26. Resultados finales de ensayos	113

Índice de figuras:

Figura 1. Escalas de maduración y color (Marín et al., 2003a).	6
Figura 2. Planos y dimensiones de simetría del fruto del cafeto (Carvajal et al., 2012).	7
Figura 3. Ángulo de reposo α (Juárez et al., 2018).	8
Figura 4. Muestra de café cereza.	9
Figura 5. Clasificadora fotoeléctrica en una planta procesadora (Couceiro et al., 2013).	9
Figura 6. Clasificador Blizzard (TOMRA, 2021b).	10
Figura 7. Clasificador Halo (TOMRA, 2021a).	11
Figura 8. Clasificador por medio de rodillos (Corporación Industrial Urapan, 2015).	12
Figura 9. Clasificador WYCS8-512 (WENYAO, 2021a).	13
Figura 10. Clasificador WYCS8-512 (WENYAO, 2021b).	14
Figura 11. Diagrama de proceso de clasificadoras por color.	15
Figura 12. Máquinas de transporte continuo (Matos, 2011).	16
Figura 13. Elementos de un transportador con órgano flexible (Matos, 2011).	17
Figura 14. Transportadores con cadenas portantes (Á. Rodríguez, 2019).	18
Figura 15. Disposición de la carga en un transportador (Matos, 2011).	19
Figura 16. Factores de longitud efectiva en columnas (Hibbeler, 2011).	31
Figura 17. Tracción inicial en un perno (Gonzalez, 2020).	34
Figura 18. Perno sometido a cortante simple (Deutschman et al., 1987).	35
Figura 19. Falla de la placa por aplastamiento (Deutschman et al., 1987).	35
Figura 20. Falla de la placa a tensión (Deutschman et al., 1987).	36
Figura 21. Detalles de sensor de visión.(Corona et al., 2014).	38
Figura 22. Vistas de la pantalla LCD (Nextion, 2022).	38
Figura 23. Matriz de confusión (Pérez & Gegúndez, 2021).	42
Figura 24. Mapa de altimetría de la provincia de Loja (Dávila, 2020).	45
Figura 25. Diagrama de proceso del proyecto.	46
Figura 26. Evaluación del peso específico de cada criterio.	48
Figura 27. Matriz de evaluación de alternativas.	49
Figura 28. Funcionamiento de elementos electrónicos.	55
Figura 29. Esquema de programación del circuito de control.	56
Figura 30. Esquema de las etapas de funcionamiento del Módulo A.	57
Figura 31. Elementos electrónicos de la subunidad de censado.	58
Figura 32. Bosquejo de la subunidad de censado.	58
Figura 33. Bosquejo unidad enlace pulmón.	61

Figura 34. Diagrama de cuerpo libre de la unión de las catalinas.	66
Figura 35. Diagrama de cuerpo libre de los elementos montados en eje.....	67
Figura 36. Diagramas para el plano $x-z$	68
Figura 37. Diagramas para el plano $y-z$	69
Figura 38. Diagrama de torsión.	70
Figura 39. Secciones del bastidor.	73
Figura 40. Diagrama de cuerpo libre de la unión que soporta el motor.	75
Figura 41. Diagrama de cuerpo libre del apoyo.....	79
Figura 42. Desmembramiento de elementos del apoyo.....	79
Figura 43. Componentes del peso distribuido.	80
Figura 44. D.C.L. del elemento inclinado del apoyo con la carga en y	80
Figura 45. D.C.L. del elemento vertical del apoyo.....	82
Figura 46. Bosquejo unidad de posicionamiento.....	83
Figura 47. Bosquejo de la unidad de autonomía.....	84
Figura 48. Bosquejo subunidad de eyección.	86
Figura 49. Funcionamiento de elementos mecánicos.	87
Figura 50. Subunidad de censado fabricada.	88
Figura 51. Elementos del bastidor fabricado.	92
Figura 52. Unidad de enlace pulmón fabricada.	92
Figura 53. Unidad de posicionamiento fabricada.	93
Figura 54. Unidad de autonomía fabricada.....	93
Figura 55. Subunidad de eyección fabricada.	94
Figura 56. Unidad de control y automatización instalada.	95
Figura 57. Ejemplo de registro de datos por contenedor.	96
Figura 58. Diseño conceptual del prototipo.....	99
Figura 59. Circuito de control electrónico.	100
Figura 60. Circuito del Módulo A.	101
Figura 61. Subunidad de censado diseñada.	102
Figura 62. Bastidor diseñado.	102
Figura 63. Unidad enlace pulmón diseñada.....	103
Figura 64. Unidad de posicionamiento diseñada.	104
Figura 65. Unidad de autonomía diseñada.....	104
Figura 66. Subunidad de eyección diseñada.	105
Figura 67. Conjunto diseñado.....	105

Figura 68. Prototipo implementado.	106
Figura 69. Pantallas de funcionamiento.....	107
Figura 70. Prueba del funcionamiento del prototipo.	113

Índice de anexos:

Anexo 1. Estados de maduración y propiedades físico-químicas del café cereza.	125
Anexo 2. Entrevistas realizadas a personas vinculadas al procesamiento del café.	127
Anexo 3. Propiedades de las secciones transversales comunes.	129
Anexo 4. Tablas para el cálculo de placas rectangulares y elípticas.	130
Anexo 5. Detalle de características de elementos usados en automatización.	132
Anexo 6. Detalles del archivo de simulación del circuito de control general.	141
Anexo 7. Detalles del archivo de simulación del Módulo A.	141
Anexo 8. Detalles de la cadena seleccionada.	142
Anexo 9. Detalles de la catalina seleccionada.	143
Anexo 10. Detalles del eje seleccionado.	144
Anexo 11. Detalles del motor seleccionado.	145
Anexo 12. Detalles del rodamiento seleccionado.	146
Anexo 13. Detalles del acoplamiento seleccionado.	147
Anexo 14. Detalles de tubos de aluminio.	148
Anexo 15. Detalles de pernos.	149
Anexo 16. Detalles de la placa de soporte del motor.	149
Anexo 17. Detalles de perfiles angulares.	150
Anexo 18. Fórmulas para vigas doblemente empotradas.	151
Anexo 19. Detalles del servomotor.	152
Anexo 20. Costo detallado de los elementos utilizados.	153
Anexo 21. Registro de ensayos de funcionamiento.	156
Anexo 22. Programa de control.	159
Anexo 23. Planos electrónicos.	159
Anexo 24. Planos mecánicos.	159
Anexo 25. Video del funcionamiento del prototipo.	159

1. Título

Desarrollo de un dispositivo electromecánico para identificar según la tonalidad de la epidermis los frutos del café cosechados.

2. Resumen

En el presente trabajo se muestra el diseño de un dispositivo electromecánico que identifica por la tonalidad de la epidermis los frutos del cafeto cosechados, como una alternativa de mejora al método de selección manual convencionalmente utilizado en el medio. Para ello, se inició identificando los componentes para el funcionamiento del dispositivo, por medio de una búsqueda bibliográfica sobre las características físicas del producto a clasificar y la evaluación de máquinas industriales que llevan a cabo la clasificación por color, obteniendo la propuesta general de diseño de un sistema automático de reconocimiento de frutos por color, basado en un transportador por cadena. A partir de esto, se diseñaron el circuito de control del dispositivo y los componentes mecánicos, mediante la definición de los requerimientos, seguido de una selección de elementos y culminando en el diseño de los componentes, los cuales fueron: el contenedor, los encarriladores, la cabina de identificación, los eyectores, el transportador inclinado por cadena de rodillos y el tablero de control con una tarjeta Raspberry-Pi programada en el lenguaje Python. Posteriormente, se evaluó el dispositivo diseñado para la identificación mediante su implementación en un prototipo, este se validó por medio de las métricas de la matriz de confusión, obteniendo las características de: 49,32% de precisión, 44,45% de exactitud y 46,76% de rendimiento global, clasificando en cinco categorías, con una velocidad de 23,07 g/min. Se finalizó concluyendo que, en comparación con trabajos previos, a pesar de su rendimiento bajo, el dispositivo se destacó por su capacidad de clasificar en la mayor cantidad de categorías.

***Palabras clave:** café, selección por colores, prototipo de clasificadora, transportador de rodillos.*

Abstract.

As an alternative to the conventional manual selection method currently used in the environment, this study illustrates the design of an electromechanical device that identifies harvested coffee berries by their epidermis color. The project started by identifying the components for the operation of the device, by means of a bibliographic search on the physical characteristics of the product to be classified and the evaluation of industrial machines that carry out the classification by color, obtaining the general proposal for the design of an automatic system for the recognition of fruits by color, based on a chain conveyor. By defining the requirements, the control circuit and mechanical components of the device were developed, followed by the selection of elements, and concluded with the design of the components, namely the container, the rails, the identification booth, the ejectors, the roller chain conveyor, and the Raspberry Pi control board. As a result of the implementation of the identification device in a prototype, the confusion matrix metrics were used to validate the results, resulting in 49.32% accuracy, 44.45% accuracy, 46.76 % overall performance, classified into five categories, with a speed of 23.07 g/min. Even though the device had low performance, it stood out for its ability to classify in the most categories, compared to previous works.

Keywords: *coffee, color sorting, sorter prototype, roller conveyor.*

3. Introducción

Uno de los productos agrícolas más cotizados mundialmente y de mayor producción comercial en países tropicales es el café, según López (2015), en Ecuador la provincia de Loja es considerada pionera en la producción de café arábigo en cantidad y calidad.

El procesamiento o beneficio del café inicia con la identificación de los frutos del cafeto cosechados, su objetivo es seleccionar los más aptos para su aprovechamiento, y conjuntamente sirve como parámetro del estado de salud de la plantación de procedencia, según lo indican Fisgativa (2021) y Khalajabadi (2017).

Para este fin se utiliza métodos a escala industrial como el boyado y tamizado que consideran las propiedades del tamaño y la densidad respectivamente, mientras que a mediana y pequeña escala es común la selección manual, siendo esta última la única que atiende a la recomendación técnica de identificar los frutos por la tonalidad roja característica de su epidermis como los de madurez necesaria para un aprovechamiento de calidad, indicada por Fernández (2017).

El procesamiento de frutos en un estado de madurez no apto dificulta el beneficio de diferentes maneras: inmaduros, distintivos por el color verde o amarillo, incrementan el número de granos partidos; sobremaduros, distintivos por el color rojo oscuro o negruzco, favorecen al ataque de hongos en los granos. Además, alteran el sabor de la bebida provocando infusiones con sabor a fruta agria (F. Fernández, 2017; Marín et al., 2003b).

Por lo expuesto previamente, se plantea la siguiente pregunta de investigación: “¿Qué diseño debe tener un dispositivo electromecánico que realice la identificación por tonalidad de la epidermis de los frutos del cafeto cosechados en la provincia de Loja, de modo que se pueda reconocer diferentes estados de maduración, incrementando la productividad y eficiencia de los procesos postcosecha y reduciendo los ataques de hongos en el producto beneficiado?”.

Por consiguiente, la hipótesis general formulada que el presente proyecto pretende verificar corresponde a: “El dispositivo electromecánico diseñado para la identificación por el tono de la epidermis de los frutos del cafeto cosechados, discriminará cinco tonos entre los frutos, con una precisión del 40% y una exactitud del 40%”.

Los objetivos planteados para este proyecto son los siguientes:

Objetivo general:

- Diseñar un dispositivo electromecánico que identifique por la tonalidad de la epidermis los frutos del cafeto cosechados.

Objetivos específicos:

- Conocer los componentes para el funcionamiento del dispositivo que identifique por tonalidades de la epidermis.
- Diseñar los componentes mecánicos y el circuito de control del dispositivo para identificación.
- Evaluar el dispositivo para identificación diseñado mediante su fabricación.

En la primera sección de este documento, marco teórico, se recopila información de utilidad sobre: características colorimétricas y mecánicas de los frutos del cafeto así también como de la muestra cosechada; máquinas selectoras de alimentos por color; teoría de diseño mecánico; elementos usados en automatización; teoría de métodos de evaluación de soluciones; y experiencias vinculadas al procesamiento del café.

En la segunda sección, metodología, se especifica los procedimientos a detalle de selección, cálculo y modelado de componentes del dispositivo, tanto electrónicos como mecánicos. Se inicia analizando las características de los frutos del cafeto y se procede a un estudio general de componentes derivando en el diseño electrónico y mecánico del dispositivo, para finalizar con la fabricación y evaluación del mismo.

En la tercera sección, resultados, se expone: la propuesta general de diseño; las descripciones del sistema electrónico de reconocimiento y del mecanismo para ordenamiento; además del funcionamiento y desempeño del prototipo implementando.

Finalmente se presenta la discusión, conclusiones y recomendaciones basadas en los resultados del proyecto, además, se acompaña de la respectiva bibliografía utilizada y los anexos generados en el presente trabajo.

4. Marco teórico

4.1 Características de los frutos del cafeto

Los frutos del cafeto, denominados café cereza o cerezas de café (INEN, 2006), según los estudios de Carvajal et al. (2011) y Marín et al. (2003a), manifiestan una relación entre sus estados de maduración y varias de sus propiedades físico-químicas como se muestra en el **Anexo 1**, a continuación se describen algunas de ellas.

4.1.1 Escala de color visual

Se encuentra definida en base al sistema de colores Pantone, cuyos componentes en porcentaje son los colores cian, magenta, negro y amarillo (por sus siglas en inglés CMKY), precisando los colores correspondientes a los ocho estados de maduración que se definen en días después de la floración (ddf) (Marín et al., 2003a), en la **Figura 1** se muestra la escala de color asociada a los estados de maduración correspondientes.

Estado	Edad del Fruto (ddf)	(% Escala de Color Pantone *				Escala de Color Visual
		Cian (C)	Magenta (M)	Amarillo (Y)	Negro (K)	
 VERDE 1	182	35	0	100	40	Color verde oscuro
 VERDE 2	186	35	0	100	20	Color verde oscuro
 VERDE 3	189	40	20	100	15	Coloración verde oscura brillante
 VERDE AMARILLO	203	20	0	100	40	Coloración verde con tonalidades amarillas
 PINTON	210	20 10	0 75	100 80	40 0	Coloreado predominantemente. Alguna tonalidad de verde cerca al pedúnculo
 MADURO	217	0 10	100 80	90 70	10 15	Color rojo brillante a rojo opaco
 SOBREMADURO	224	10 0	100 35	50 0	30 100	Color morado brillante a morado oscuro opaco
 SECO	231	0 0	0 0	35 25	100 80	Color café oscuro, la cereza se encuentra arrugada, hasta frutos completamente secas (pulpa adherida a la almendra)

*Pantone Process Color Guide (75)

Figura 1. Escalas de maduración y color (Marín et al., 2003a).

4.1.2 Diámetro característico o equivalente

En granulometría, es la propiedad correspondiente a partículas sólidas no esféricas a granel, generalmente se utiliza el diámetro de una esfera de volumen equivalente a una de las partículas (Salager, 2007).

Para el caso de los frutos del cafeto, se determina relacionando las tres longitudes características del fruto E1, E2 y P, mostradas en la **Figura 2**, que se encuentran en los planos ortogonales principales (Carvajal et al., 2012).

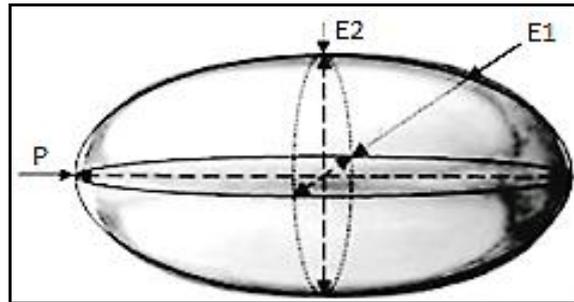


Figura 2. Planos y dimensiones de simetría del fruto del cafeto (Carvajal et al., 2012).

El estudio realizado por Marín et al. (2003), presenta los valores de diámetro característico correspondientes a cada estado de maduración, los cuales se muestran en la **Tabla 1** a continuación.

4.1.3 Peso fresco

También llamado peso húmedo, “es el peso de una muestra incluido el del agua que contiene” (Real Academia de Ingeniería, n.d.). Para el caso de las cerezas de café se considera el peso del fruto recién cosechado.

El estudio realizado por Marín et al. (2003), presenta los valores de peso fresco correspondientes a cada estado de maduración, los cuales se muestran en la **Tabla 1**.

Tabla 1.

Valores de diámetro característico y peso fresco

Estado	Diámetro característico [mm]	Peso fresco [g]
Verde 1	11,54	1,33
Verde 2	13,21	1,33
Verde 3	13,92	1,74
Verde amarillo	13,85	1,62
Pintón	13,38	1,75
Maduro	14,22	1,99
Sobremaduro	14,09	1,88
Seco	10,57	0,66

Fuente: (Marín et al., 2003b)

4.1.4 Densidad aparente

Para el manejo de material granular se requiere diferenciar la densidad real de la aparente, la primera es el cociente entre la masa y el volumen real del producto, es decir, sin considerar los espacios entre granos (poros); en el segundo caso es el resultado del cociente entre la masa real y el volumen aparente, es decir, considerando los poros (Camacho et al., 2011).

Se muestra en la **Tabla 2**, la comparación de dos estudios sobre la densidad aparente del café en diferentes estados resultantes de procesamientos.

Tabla 2.

Densidades aparentes del café

Densidad aparente [kg/m ³]	Uribe (1977)	Presente estudio (2006)	
		Café seleccionado	Café sin seleccionar
Fruto	600	621,57	616,5
Pulpa fresca	270	266,74	298,2
Grano de café en baba	800	826,71	803,4
Grano de café lavado	650	701,87	693,66
Grano de café escurrido	s.d.	687,17	678,31
Grano de café seco de agua	520	s.d.	s.d.
Grano de café pergamino	380	391,44	385,75
Grano de café almendra	680	709,99	707,31

Fuente: (Montilla et al., 2008)

4.1.5 Ángulo de reposo

Según el estudio realizado por Juárez et al. (2018): se define como el ángulo entre el radio de la base y la generatriz del cono formado por los frutos en equilibrio, como se muestra en la **Figura 3**, esto una vez que se depositan los frutos desde un contenedor sobre una superficie plana. Se precisa que su valor se encuentra entre 15,09° y 20,18°, además que es una característica que no varía con el estado de maduración del café cereza. (pp. 115-118)

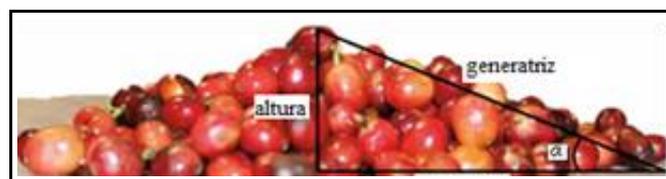


Figura 3. Ángulo de reposo α (Juárez et al., 2018).

4.1.6 Muestra cosechada

“La recomendación técnica es solo cosechar y comercializar frutos maduros para asegurar una buena calidad del grano” (Fernández, 2017, p.124), los especialistas en el procesamiento del café consultados (ver **Anexo 2**), indican que el resultado de la cosecha estará

generalmente constituido por frutos maduros y en menor grado por frutos verdes y sobremaduros, como se muestra en la **Figura 4a**, además se puede esperar varios frutos unidos por su rama, hojas y piedras pequeñas, como se muestra en la **Figura 4b**.

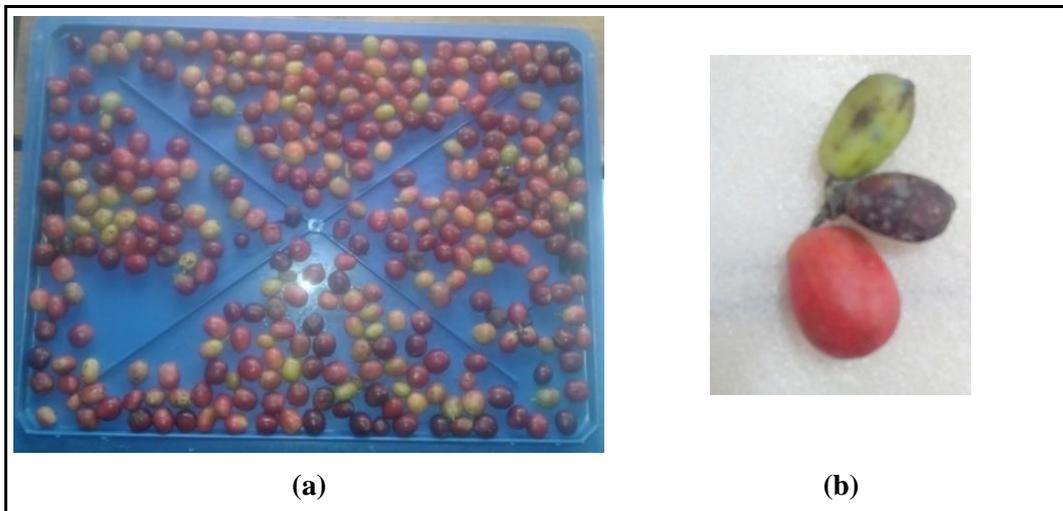


Figura 4. Muestra de café cereza.

4.2 Máquinas clasificadoras de alimentos por color de tipo industrial

Los clasificadores de color o máquinas clasificadoras de color son equipos utilizados para el reconocimiento de características colorimétricas en un producto, utilizando sensores ópticos y de visión reconocen factores que pueden responder a estados de maduración, defectos o enfermedades del producto, todas estas caracterizadas por su color exterior.

Suminsa Industrial (2021) indica que estos equipos pueden ser utilizados en industrias de procesamiento de alimentos como el trigo, arroz, entre otros y Couceiro et al. (2013) señala que entre ellas podemos destacar las llamadas ópticas, fotoeléctricas o por color, como muestra la **Figura 5**, que disponen de cámaras de diferentes longitudes de onda, monocromáticas, tricromáticas, infrarrojas o las que emplean tecnología láser o de rayos X.



Figura 5. Clasificadora fotoeléctrica en una planta procesadora (Couceiro et al., 2013).

4.2.1 Modelos de clasificadoras

En el comercio electrónico se puede encontrar distintas clasificadoras por color, dependiendo de las propiedades del alimento a clasificar disponen mecanismos y métodos apropiados para el procesamiento, generalmente se encuentran a escala industrial. A continuación, se describe algunos modelos comerciales.

4.2.1.1 Blizzard. Se encuentra acondicionada para recibir el producto de una cinta transportadora, que lo deposita a la entrada del clasificador para que por caída libre se presente a la cámara de luz led pulsada para su reconocimiento y posteriormente sea eyectado por una pistola de aire para su clasificación, finalmente por gravedad se disponga hacia otros sistemas de procesamiento.

Recomendada para clasificación de verduras congeladas rápidamente de forma individual como: pimientos, brócoli, coliflor, apio; y fruta congelada rápidamente de manera individual como: manzanas, moras, fresas (TOMRA, 2021b).

En la **Figura 6a** se muestra la máquina clasificadora y en la **Figura 6b** su principio de funcionamiento.

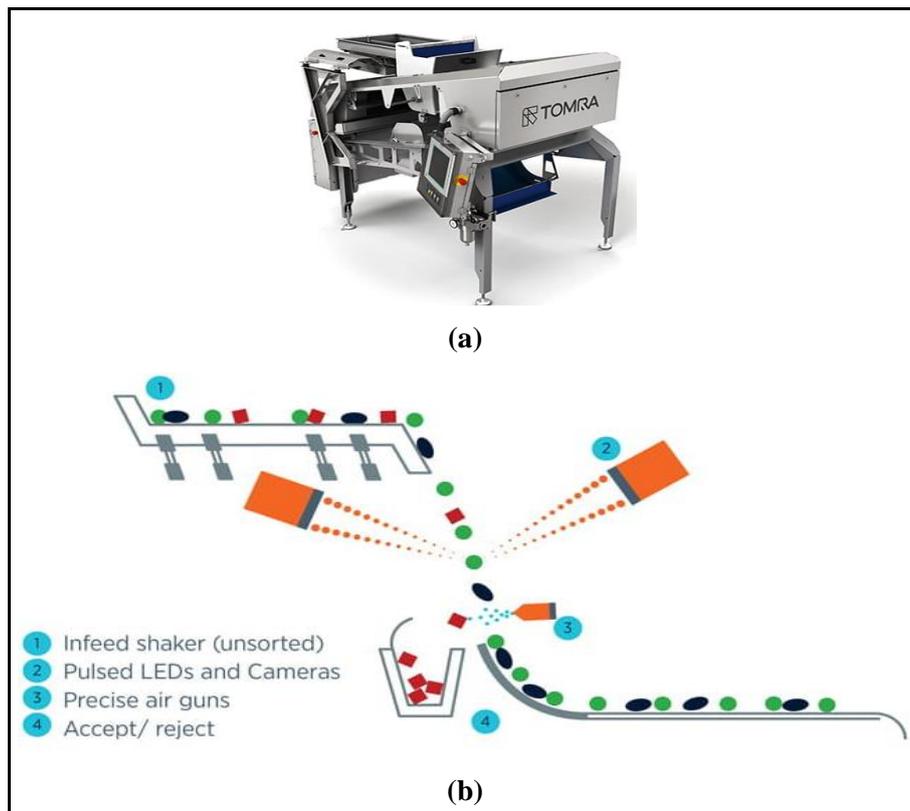


Figura 6. Clasificador Blizzard (TOMRA, 2021b).

Este modelo tiene como característica relevante la sencillez de su programación al separar solo en dos categorías, se lo puede ocupar en cascada con otros modelos iguales para la separación de mayor cantidad de categorías.

4.2.1.2 Halo. Este modelo está equipado para recibir el producto desde una cinta transportadora elevadora, que en su descarga posiciona el producto por caída libre para el reconocimiento mediante una combinación de un circuito cerrado de cámaras y sensores infrarrojos, posteriormente los eyectores tipo paleta desvían individualmente el producto según las categorías de clasificación y finalmente la descarga se realiza por medio de conductos dirigidos a cintas transportadoras.

Recomendada para aplicaciones de los procesadores de: papas (con o sin piel), remolacha, zanahoria; y para aplicaciones para productos frescos o envasados: encurtidos, pepinillos, tomates (TOMRA, 2021a).

En la **Figura 7a** se muestra la máquina clasificadora y en la **Figura 7b** su principio de funcionamiento.

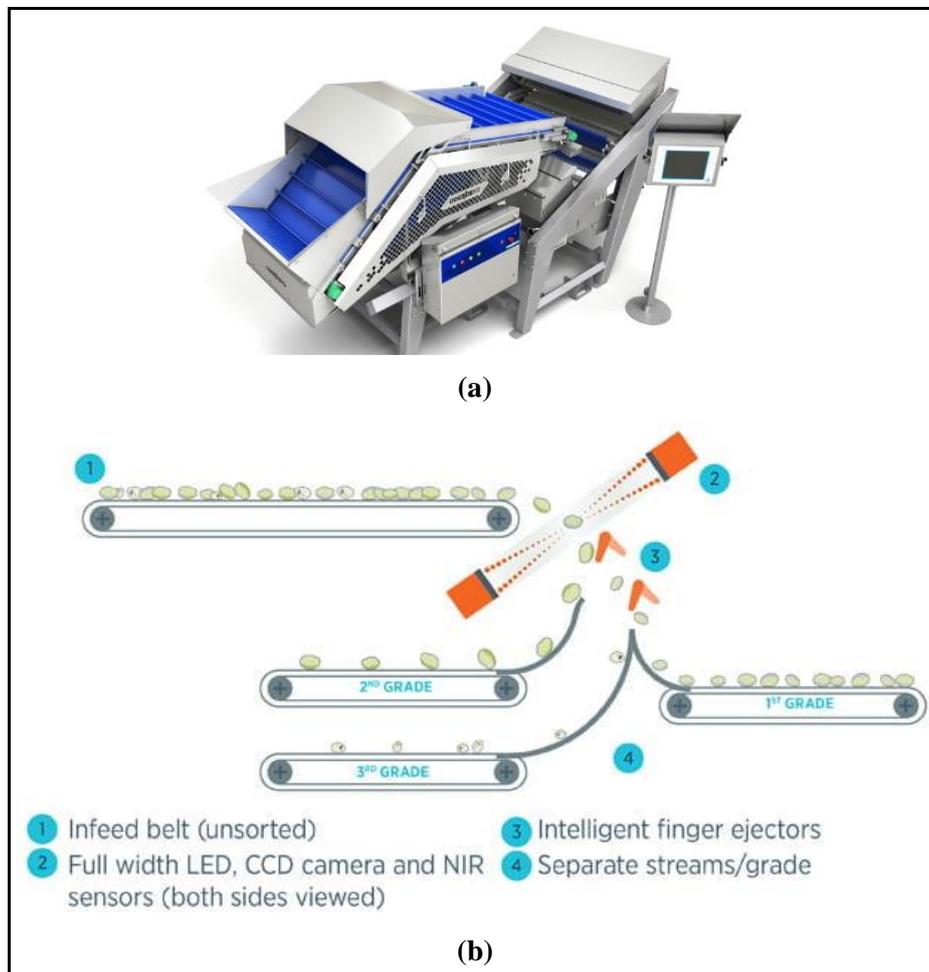


Figura 7. Clasificador Halo (TOMRA, 2021a).

De este modelo se puede rescatar la manera particular de la cinta transportadora, por el ángulo y el material que dispone, permite que los excedentes de producto ingresados en un contenedor de la cinta descendan a los subsecuentes, así asegurando el ingreso de la cantidad de producto que pueden manejar los sensores y eyectores.

4.2.1.3 Sistema clasificador por medio de rodillos. Esta máquina se caracteriza por tener módulos independientes de procesamiento, el ingreso del producto se hace vía una volteadora la cual es encargada de vaciar las gavetas de producto sobre el elevador de rodillos, en este se realiza una primera separación del producto de manera que no se apile, posteriormente se pasa al singulador donde se individualiza el producto y se transporta a un cuarto iluminado donde se usan cámaras de alta definición para reconocer la categoría del producto y posteriormente ser eyectado por un rodillo con mecanismo especial o por una pistola de aire (Corporación Industrial Urapan, 2015).

En la **Figura 8a** se muestra el clasificador y en la **Figura 8b** sus módulos.

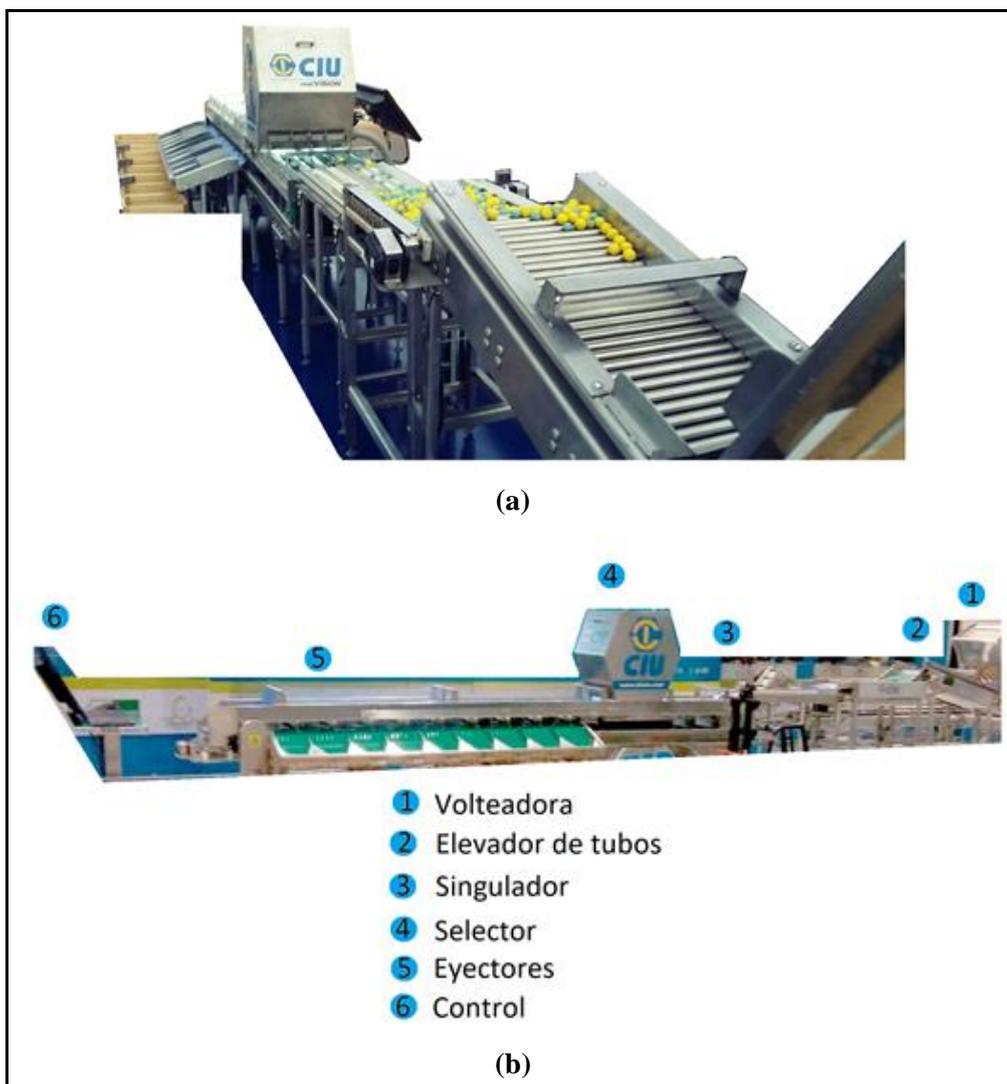


Figura 8. Clasificador por medio de rodillos (Corporación Industrial Urapan, 2015).

Este modelo al estar construido modularmente se destaca por la facilidad de transporte, mantenimiento, reemplazo o incorporación de componentes a la cadena de selección. También es de notar el uso de rodillos preferentemente para el traslado de los productos relativamente pequeños a través de los procesos.

4.2.1.4 WYCS8-512. Al iniciar el funcionamiento del clasificador por color, el producto ingresa desde la tolva de alimentación hacia las rampas de una manera uniforme, esto se logra por la acción del vibrador. Las cámaras CCD comprueban el estado del producto mientras se desplaza por caída libre, si se encuentran productos no calificados o impurezas, el eyector separa los productos defectuosos (WENYAO, 2021a).

En la **Figura 9a** se muestra el clasificador y en la **Figura 9b** su principio de funcionamiento.

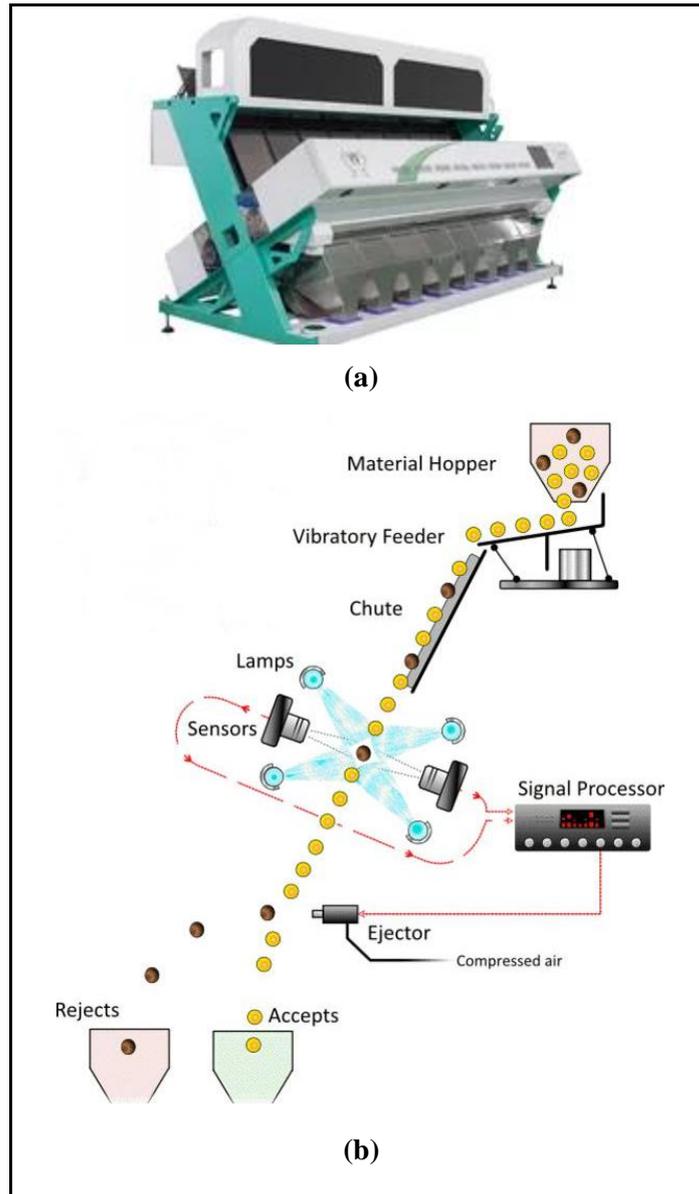


Figura 9. Clasificador WYCS8-512 (WENYAO, 2021a).

La característica considerable de este modelo es la dosificación del producto por medio de una plataforma vibradora en la base de la tolva de ingreso, este movimiento está muy ligado a la velocidad del producto que puedan manejar los sensores, así como a la resistencia al impacto del producto a clasificarse.

4.2.1.5 WYB1. Una vez ingresado el producto a este clasificador, una cinta transportadora lo desplaza hasta el sector de reconocimiento, donde se encuentra con la iluminación adecuada para que las cámaras CCD identifiquen defectos o impurezas y sean expulsados por un eyector del tipo pistola de aire. Este modelo multifunción es muy efectivo en la selección de granos secos como: almendras, frijol rojo, maní (WENYAO, 2021b).

En la **Figura 10a** se muestra el clasificador y en la **Figura 10b** su principio de funcionamiento.

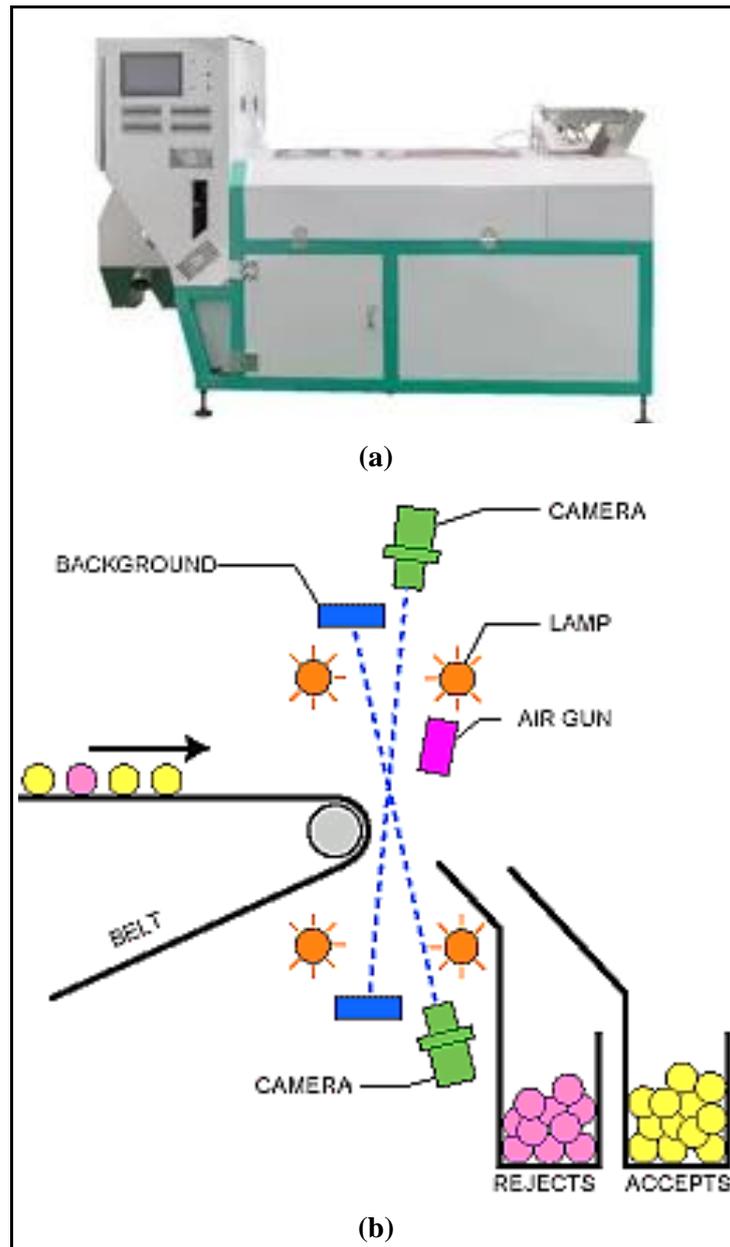


Figura 10. Clasificador WYCS8-512 (WENYAO, 2021b).

La novedad que presenta este modelo es la cabina que cubre todo el proceso, el fin es evitar el ingreso de luz exterior que cree interferencias en las cámaras que identifican los colores.

4.2.2 Descripción del proceso de clasificación

Las máquinas clasificadoras por color, en general, operan según la interacción mostrada en la **Figura 11**. Las unidades presentes corresponden, en síntesis, a las operaciones básicas de cada etapa del proceso de clasificación y sirven de orientación para nuevas propuestas de diseño. A continuación, se describen a detalle.

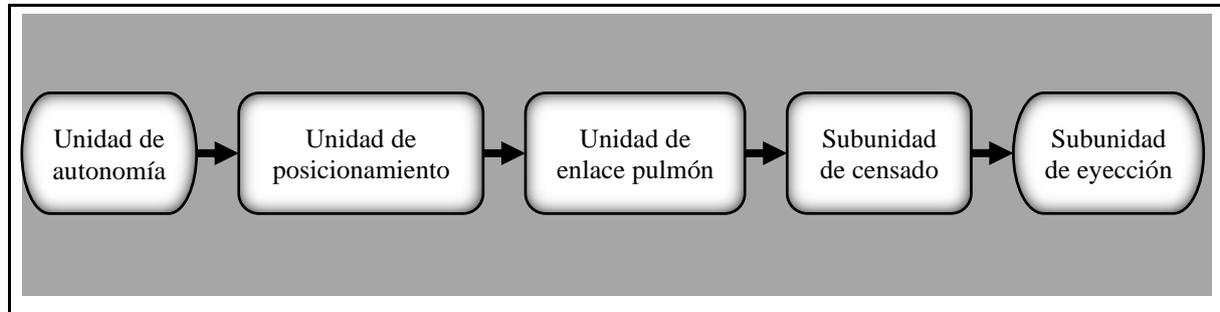


Figura 11. Diagrama de proceso de clasificadoras por color.

4.2.2.1 Unidad de autonomía. Parte del sistema donde se receipta la carga a granel que posteriormente se suministrará a la unidad de posicionamiento, garantizando su descarga suave y regular. Algunos ejemplos son: vibrador con tolva dinámica y estática, elevadores de carga asociada al plano vertical y horizontal, elevadores por lamas oscilantes, entre otros (TAD, 2020a).

4.2.2.2 Unidad de posicionamiento. Parte del sistema que recibe piezas a granel para posicionarlas y evacuarlas de un determinado modo y cadencia dependiendo del proceso. Algunos ejemplos son: alimentadores de cascada (también llamados de lamas oscilantes o stepfeeder), alimentadores mecánicos, alimentadores vibratorios, entre otros (TAD, 2020b).

4.2.2.3 Unidad enlace pulmón. Parte del sistema encargado del desplazamiento de la carga, este enlaza una unidad de posicionamiento con una unidad o equipo de producción. Algunos ejemplos son: vibrador rectilíneo, lineal, transportador de banda, entre otros (TAD, 2020c).

4.2.2.4 Unidad de selección. Corresponde a una unidad de producción, es decir, realiza un proceso demandante (Westreicher, 2020), por consiguiente, el resto de unidades se orientan a la operatividad de esta.

Está compuesta por dos subunidades:

- *Subunidad de censado:* encargada del reconocimiento del producto.
- *Subunidad de eyección:* encargada de la separación del producto según la categoría reconocida.

Dependiendo de la máquina clasificadora la unidad de posicionamiento y la unidad enlace pulmón pueden intercambiar sus posiciones en el diagrama del proceso.

4.3 Fundamentos de Mecánica

A continuación, se presenta teoría y metodología de cálculo para elementos que, en conjunto, permiten el desplazamiento de frutos a granel de tamaño relativamente pequeño, de forma fluida y con un orden lineal, además que darán soporte a los distintos componentes.

4.3.1 Transportadores

Se conoce a las máquinas destinadas al transporte, trasiego o sostén de distintos materiales a granel, considerando su principio de funcionamiento Matos (2011) divide en:

- *Máquinas de transporte periódico:* son equipos que realizan el trasiego de materiales en intervalos de tiempo y en uno de sus movimientos lo realiza vacío, por ejemplo, las grúas, montacargas y elevadores.
- *Máquinas de transporte continuo:* son equipos que mantienen un flujo constante de materiales en toda su traza, sin intervalos ni interrupciones. En la **Figura 12** se presenta los grupos en que se dividen y los más comunes.

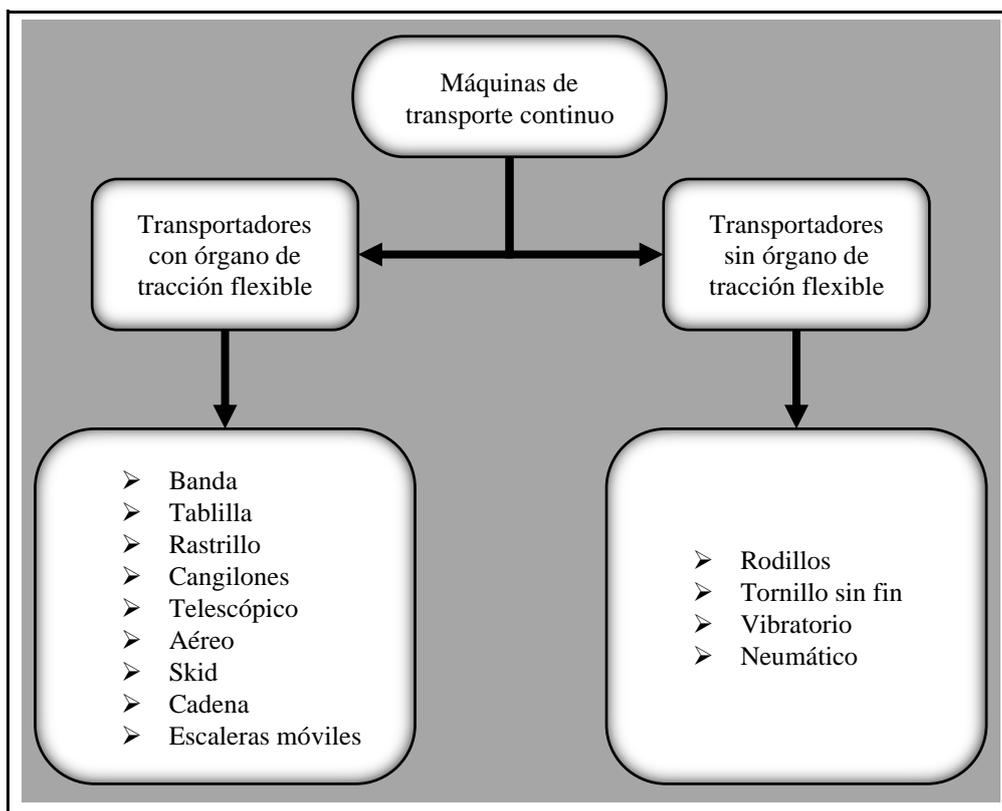


Figura 12. Máquinas de transporte continuo (Matos, 2011).

4.3.1.1 Elementos de un transportador con órgano de tracción flexible. Según indica (Matos, 2011) y como se muestra en la **Figura 13**, las partes que constituyen un transportador en general con órgano de tracción flexible son:

1. *Órgano de tracción:* parte que transportará el material, entre ellos se encuentran las bandas o cintas, cangilones, cadenas, así como combinaciones de los mismos.

2. *Bastidor*: estructura que da soporte a la banda transportadora y demás componentes, existe de tres tipos: montados al suelo, suspendidos en el techo e híbridos.
3. *Accionamiento o impulsor*: para bandas transportadoras se usa tambores, y para cadenas se usa catalinas.
4. *Reenvío*: para bandas transportadoras se usa tambores, y para cadenas se usa catalinas.
5. *Atezado o tensor*: para bandas transportadoras se usa tambores, y para cadenas se usa tensores mecánicos del tipo tornillo o tornillo muelle.
6. *Ramal de trabajo*: zona del transportador donde se concentra el material a transportar.
7. *Ramal libre*: zona del transportador sin concentración de material.
8. *Dispositivos de carga*: también llamados alimentadores pueden ser del tipo tornillo sinfín, por arrastre, rotativo o vibratorio.
9. *Dispositivos de descarga*: generalmente se realiza donde se encuentra el dispositivo de accionamiento y de forma directa a través de una tolva.

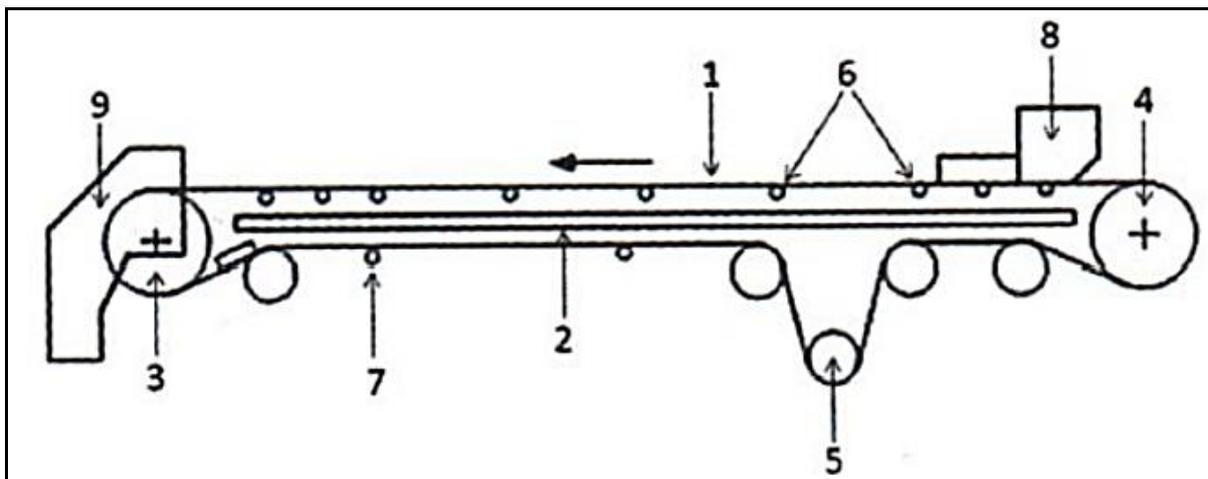


Figura 13. Elementos de un transportador con órgano flexible (Matos, 2011).

4.3.1.2 Determinación del órgano de tracción tipo cadena. El proceso para este propósito planteado por Rodríguez (2019), contempla la realización de las siguientes etapas como se explica a continuación.

4.3.1.2.1 Identificar el tipo de transportador. Primero se distingue como viaja la carga en el transportador, pueden ser transportadores de cadenas portantes o transportadores de arrastre; segundo, el tipo de desplazamiento de los elementos tractores, pueden ser cadenas arrastrantes o cadenas con rodillos; y tercero, se puntualiza su disposición de trabajo, pueden ser horizontal, inclinado o vertical. En la **Figura 14** se muestra las referencias a considerarse respecto a transportadores con cadenas portantes.

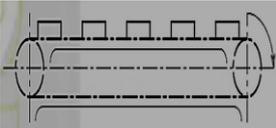
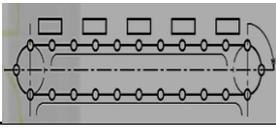
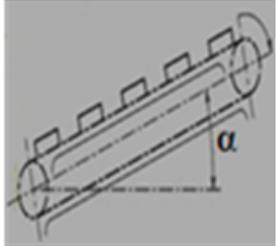
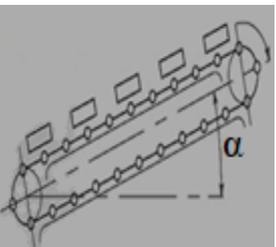
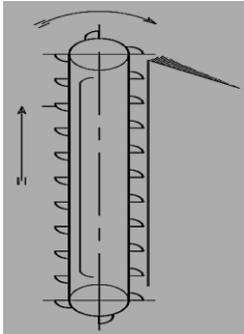
Tipo	Referencia
Transporte horizontal con cadenas arrastrantes	
Transporte horizontal con cadenas con rodillos	
Transporte inclinado con cadenas arrastrantes	
Transporte inclinado con cadenas con rodillos	
Transporte vertical	

Figura 14. Transportadores con cadenas portantes (Á. Rodríguez, 2019).

En este punto es necesario disponer de un bosquejo, diseño o planteamiento de la geometría requerida para el transportador, con detalle en la vinculación entre: el material a transportar, el órgano de tracción y su conjunto de elementos que le permiten unirse a la cadena.

También se requerirá de información sobre: la masa del material a transportar, ángulo de inclinación del transportador, longitud del desarrollo de la cadena, tipo de material de las cadenas y guías por donde circulan, velocidad del movimiento de traslación, entre otros.

4.3.1.2 Determinar el peso del material a transportar. Dependerá del tipo de transportación según lo indica Matos (2011), para carga a granel en contenedores (**Figura 15a**) y por piezas o bultos (**Figura 15b**), que tienen en común cargas por cantidades separadas se determina el peso por unidad de longitud o peso unitario como se muestra en la **Ecuación 1**.

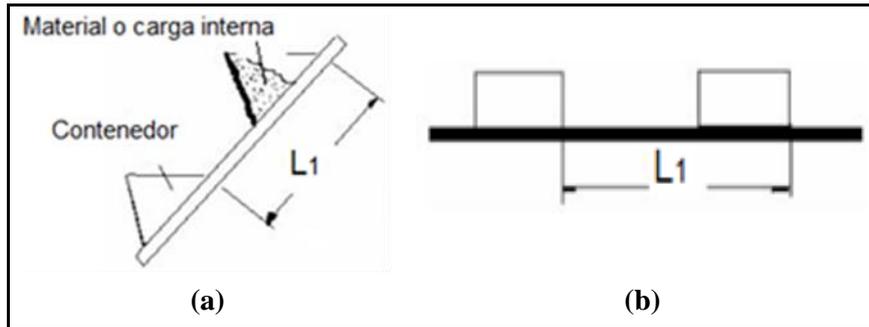


Figura 15. Disposición de la carga en un transportador (Matos, 2011).

$$p_m = \frac{9,81 \cdot m_m}{L_1} \text{ [N/m]} \quad (1)$$

Donde:

m_m : masa del material [kg]

L_1 : separación entre cargas [m]

Posteriormente se calcula el peso del material en el ramal de trabajo como se muestra en la **Ecuación 2** a continuación:

$$P_m = p_m \cdot L_2 \text{ [N]} \quad (2)$$

Donde:

p_m : peso del material por unidad de longitud [N/m]

L_2 : distancia del ramal de trabajo [m]

4.3.1.2.3 Determinar el peso de los accesorios de la cadena. Corresponde al peso tanto de los elementos que conforman el órgano de tracción (tablillas, cangilones, etc.), así como de los elementos de enlace a la cadena del transportador (aletas, pernos, tuercas, etc.).

Inicialmente se determina el peso de la cantidad de elementos correspondientes a cada uno de los accesorios, como se muestra en la **Ecuación 3**, de la siguiente manera:

$$P_i = 9,81 \cdot m_i \cdot N_i \text{ [N]} \quad (3)$$

Donde:

m_i : masa de un accesorio [kg]

N_i : cantidad de elementos

A continuación, se calcula el peso del conjunto de accesorios, según la **Ecuación 4**:

$$P_a = \sum_{i=1}^n P_i \text{ [N]} \quad (4)$$

Donde:

P_i : peso de los elementos de un accesorio [kg]

n : cantidad de accesorios

4.3.1.2.4 Hallar el coeficiente de rozamiento. Cuando las cadenas trabajan por arrastre en las vías de desplazamiento, existe el rozamiento por deslizamiento, en la **Tabla 3** se presentan los coeficientes según los cuerpos en contacto y la condición de la superficie.

Tabla 3.

Valores de los coeficientes de rozamiento

Cuerpos en contacto	Coeficiente de rozamiento ($f r_d$)	
	Superficies secas	Superficies lubricadas
Cadenas de acero sobre guías en madera dura	0,44	0,29
Cadenas de acero sobre guías en acero	0,30	0,20
Cadenas de acero sobre guías ásperas u oxidadas	0,35	0,25
Cadenas de acero sobre guías en polietileno a densidad alta y peso molecular muy alto	0,18	0,05

Fuente: (Á. Rodríguez, 2019)

Se debe considerar que, al iniciar el movimiento de la cadena el coeficiente de rozamiento estático puede presentar de 1,5 a 3 veces los valores del coeficiente de rozamiento dinámico presentados en la tabla anterior, por lo que el coeficiente de rozamiento estático se calculará usando un valor intermedio como se muestra en la **Ecuación 5**:

$$f r_e = 2,25 \cdot f r_d \quad (5)$$

Donde:

$f r_d$: coeficiente de rozamiento dinámico

4.3.1.2.5 Hallar el factor de servicio. Se trata de un factor de ajuste de la fuerza de tracción del transportador, se basa en las condiciones y características de funcionamiento. La **Tabla 4** presenta los valores individuales del factor de servicio.

Tabla 4.

Valores individuales del factor de servicio

No.	Condiciones de funcionamiento		Factor de servicio (Fsi)
1	Colocación de la carga	Equilibrada	1,0
		No equilibrada	1,2
2	Características de la carga	Uniforme: cantidad de sobrecarga inferior a 5%	1,0
		Con variaciones mínimas: cantidad de sobrecarga 5-20%	1,2
		Con variaciones fuertes: cantidad de sobrecarga 20-40%	1,5
3	No. de arranques - paradas	Inferiores a 5 cada día	1,0
		De 5 cada día a 2 cada hora	1,2
		Más de 2 cada hora	1,5

4	Ambiente de trabajo	Bastante limpio	1,0
		Bastante polvoso o sucio	1,2
		Húmedo, muy sucio o corrosivo	1,3
5	Horas de funcionamiento	Hasta 10	1,0
		Más de 10	1,2

Fuente: (Á. Rodríguez, 2019)

Para el cálculo de la fuerza de tracción se utilizará el factor de servicio general, este corresponderá al producto de los factores de servicio individuales de las condiciones de funcionamiento y se determina como se muestra en la **Ecuación 6**:

$$F_{S_g} = \prod_{i=1}^5 F_{S_i} \quad (6)$$

Donde:

F_{S_i} : Factor de servicio individual

4.3.1.2.6 Determinación de la fuerza de tracción individual preliminar. Se realiza un cálculo basado en los puntos previamente expuestos, se destaca que el peso de la cadena no se considera en este punto. Para el caso de un transporte inclinado de cadenas arrastrantes, la manera de cálculo de la fuerza de tracción por cadena se muestra en la **Ecuación 7**:

$$T_p = \frac{[\cos(\alpha) \cdot (P_m + P_a) \cdot f_{r_e} + \sin(\alpha) \cdot P_a] \cdot F_{S_g}}{N_c} \text{ [N]} \quad (7)$$

Donde:

α : ángulo de inclinación del transportador [°]

P_m : peso del material [N]

P_a : peso de los accesorios [N]

f_{r_e} : coeficiente de rozamiento estático

F_{S_g} : factor de servicio general

N_c : cantidad de cadenas

4.3.1.2.7 Selección de la cadena. Se realiza según las solicitaciones admisibles para los materiales de construcción, es decir, para la carga de rotura de la cadena, la cual se determina usando un factor de seguridad recomendado de al menos 8 veces el esfuerzo de tracción preliminar individual, estableciéndose de la forma mostrada en la **Ecuación 8**:

$$T_r = 8 \cdot T_p \text{ [N]} \quad (8)$$

Donde:

T_p : fuerza de tracción individual preliminar [N]

Este valor deberá ser igualado o superado por la resistencia máxima a la tracción de la cadena seleccionada (T_c), cuyo valor se encuentra en los catálogos de fabricantes, así como el peso por unidad de longitud correspondiente y el modelo que deberá responder a la geometría planteada previamente.

Haciendo uso del peso por unidad de longitud de la cadena seleccionada y la longitud de su desarrollo, se determina el peso de la cadena de la manera mostrada en la **Ecuación 9**:

$$P_c = 9,81 \cdot p_c \cdot L_3 \text{ [N]} \quad (9)$$

Donde:

p_c : peso de la cadena por unidad de longitud [kg/m]

L_3 : longitud del desarrollo de la cadena [m]

Se calcula la fuerza de tracción individual definitiva considerando el peso de las cadenas, para el caso de un transporte inclinado de cadenas arrastrantes está la **Ecuación 10**:

$$T_d = \frac{[\cos(\alpha) \cdot (P_m + P_a + N_c \cdot P_c) \cdot fr_e + \sin(\alpha) \cdot (P_a + N_c \cdot P_c)] \cdot FS_g}{N_c} \text{ [N]} \quad (10)$$

Donde:

α : ángulo de inclinación del transportador [°]

P_m : peso del material [N]

P_a : peso de los accesorios [N]

P_c : peso de la cadena [N]

N_c : cantidad de cadenas

fr_e : coeficiente de rozamiento estático

FS_g : factor de servicio general

Con este valor se recalcula la carga de rotura de la cadena como en la **Ecuación 11**:

$$T_{r2} = 8 \cdot T_d \text{ [N]} \quad (11)$$

Donde:

T_d : fuerza de tracción individual definitiva [N]

Se procede a la verificación de la resistencia a la tracción, según las siguientes situaciones:

- $T_c \geq T_{r2}$; la selección es correcta, finaliza esta etapa.
- $T_c < T_{r2}$; la selección es incorrecta, se deberá regresar al inicio de esta etapa y seleccionar una cadena con una mayor T_c .

4.3.1.3 Torque requerido por el transportador de cadenas. La recomendación de Rodríguez (2019), es iniciar calculando la potencia necesaria en el eje motriz de la máquina,

como se muestra en la **Ecuación 12**:

$$N = T_d \cdot N_c \cdot v \text{ [W]} \quad (12)$$

Donde:

T_d : fuerza de tracción individual definitiva [N]

N_c : cantidad de cadenas

v : velocidad de traslación de la cadena [m/s]

A continuación, se determina la velocidad angular de las catalinas impulsoras posterior a su definición, como se muestra en la **Ecuación 13**:

$$\omega = \frac{60 \cdot v}{Z \cdot P} \text{ [rpm]} \quad (13)$$

Donde:

v : velocidad de traslación de la cadena [m/s]

Z : número de dientes

P : paso de la catalina o cadena [m]

Consecutivamente se encuentra el torque o momento torsor requerido por la máquina, este valor corresponde al de diseño como se muestra en la **Ecuación 14**:

$$M_{t.diseño} = \frac{60}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{N}{\omega} \text{ [N.m]} \quad (14)$$

Donde:

N : potencia requerida por la máquina [W]

ω : velocidad angular de las catalinas [rpm]

Con estos valores se procede a la búsqueda y selección del motor adecuado en los catálogos y hojas de datos proporcionados por los fabricantes, en este punto se considera el uso de uso de transmisiones, controladores de velocidad y demás detalles para el funcionamiento.

El torque a la salida del sistema motor seleccionado, se plantea como el momento torsor definitivo (M_t) y se usa para el cálculo de los ejes del transportador.

4.3.2 Diseño de árboles y ejes

Se conoce como árbol al elemento cuya dimensión de sección transversal (generalmente circular) es mucho más pequeña que su longitud, y que, siendo parte de un sistema mecánico, transmite la potencia desde un motor hacia el resto de componentes giratorios (Mott, 2006). En el caso de no transmitir potencia y simplemente soportar cargas, recibirá el nombre de eje, aunque en el medio se usa indistintamente el término.

4.3.2.1 Procedimiento de cálculo. Con base en las orientaciones indicadas por Hamrock et al. (2000), se considera la ejecución de las siguientes etapas, explicadas a

continuación.

4.3.2.1.1 Identificación del tipo de sollicitación. Los ejes al acoplarse a elementos como piñones, engranajes, poleas y otros, se encuentran sometidos a combinaciones de fuerzas de deformación, por lo tanto, se lleva a cabo un estudio previo de las mismas, según los elementos a los que se transmita potencia, así como las condiciones de trabajo a las que se encontrará sometido por su propósito en una máquina o mecanismo.

La sollicitación a la que el eje se encuentre sometido y su método de resolución corresponderá a uno de los siguientes tipos, mostrados en la **Tabla 5**.

Tabla 5.

Descripción de los tipos de sollicitaciones

Sollicitaciones	Características	Métodos de resolución
Simple	Se encontrarán actuando únicamente ya sea el esfuerzo de torsión o el de flexión, que son de relevancia en ejes, mientras que los esfuerzos de tracción, compresión y cortante son de bajo impacto	Teoría de flexión y torsión simples
Compuestas	Cuando actúan simultáneamente esfuerzos en un eje se tiene los siguientes casos: flexión con tracción-compresión, torsión con tracción-compresión, flexión con torsión, y el caso general donde actúan las tensiones de tracción-compresión axial, flexión, torsión y cortante	Teorías de falla
Variables	Los esfuerzos se encuentran actuando de manera cíclica, es decir, varían a lo largo del tiempo en un ciclo, en vez de permanecer constantes como las cargas estáticas.	Resistencia a la fatiga
Dinámicas	se originan al existir un cambio brusco de la carga, es decir, un cambio de velocidad (aceleración) en la aplicación de la carga.	Principio de conservación de la energía

Fuente: (Deutschman et al., 1987; Hamrock et al., 2000)

Para el caso de sollicitaciones variables y dinámicas, es recomendable tener en cuenta el análisis para cargas estáticas (sollicitaciones simples y compuestas), ya que el diámetro del eje a seleccionar deberá atender a la sollicitación más crítica.

4.3.2.1.2 Desarrollo del diagrama de cuerpo libre. Los elementos de máquinas montados en el eje se sustituyen por su carga equivalente estática o por sus componentes de torsión.

4.3.2.1.3 Desarrollo de los diagramas de fuerza cortante y momento flector. Se trazan en los planos $x-z$ y $y-z$, se puede graficar el momento total a lo largo del eje considerando que

será igual a la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de los momentos en $x-z$ y $y-z$.

4.3.2.1.4 Desarrollo del diagrama de pares de torsión. Se traza en el plano considerando el balance de los pares de torsión.

4.3.2.1.5 Sección transversal crítica. Se identifica la sección transversal o localización crítica a lo largo del eje z , en donde los momentos y el par de torsión son mayores.

4.3.2.1.6 Determinación del coeficiente de seguridad. Para esto, se precisa de los coeficientes parciales recomendados como los que se encuentran en la **Tabla 6**, y son seleccionados de acuerdo al caso de estudio.

Tabla 6.

Coefficientes parciales de seguridad

No.	Características		Valor	
1	Considera el grado de responsabilidad de la pieza		1,0 - 1,5	
2	Considera el error al determinar las cargas y las tensiones	Cálculo con gran precisión	1,2 - 1,5	
		Cálculo con poca precisión	2,0 - 3,0	
3	Considera la heterogeneidad del material y su sensibilidad a los posibles defectos en el maquinado de la pieza	Para cálculos de fatiga	1,5 - 2,0	
		Los cálculos se refieren al límite de resistencia, para materiales frágiles y poco plásticos	Materiales poco plásticos (aceros de alta resistencia revenidos a bajas temperaturas)	2,0 - 3,0
			Para materiales frágiles	3,0 - 4,0
			Para materiales muy frágiles	4,0 - 6,0
	Los cálculos se hacen partiendo del límite de fluencia del material y las cargas son estáticas	$0,45 - 0,55$	1,2 - 1,5	
σ_f/σ_r		$0,55 - 0,70$	1,4 - 1,8	
		$0,70 - 0,90$	1,7 - 2,2	

Fuente: (Caraballo, 2020)

En este punto, se asume el material del eje y se procede a la selección de los coeficientes con los detalles que se indica, por ejemplo: para la selección del valor del coeficiente parcial número tres, en el caso de materiales plásticos, el valor depende del cociente entre el esfuerzo de fluencia (σ_f) y del esfuerzo de ruptura (σ_r) del material del eje.

Una vez seleccionados los valores de estos coeficientes, según la experiencia del diseñador se puede agregar algunos más, y finalmente se obtiene un coeficiente global haciendo el producto de todos los parciales, como se muestra en la **Ecuación 15**:

$$n_s = \prod_{i=1}^k n_i \quad (15)$$

Donde:

n_i : valor del coeficiente de seguridad parcial

k : cantidad de coeficientes parciales de seguridad

4.3.2.1.7 Determinación del esfuerzo admisible. También conocido como esfuerzo de diseño o permisible, permite el planteamiento de la condición de resistencia y se calcula de la manera presentada en la **Ecuación 16**:

$$\sigma_{adm} = \frac{\sigma_f}{n_s} \text{ [MPa]} \quad (16)$$

Donde:

σ_f : esfuerzo de fluencia del material [MPa]

n_s : coeficiente global de seguridad

4.3.2.1.8 Aplicación del método de resolución. Se busca hallar el esfuerzo equivalente a la acción de las solicitaciones a las que se encuentra sometido el eje, con el fin de realizar la respectiva verificación mediante su comparación con el esfuerzo admisible.

A continuación, se expone las fórmulas del criterio de falla para el caso de un eje circular macizo de material dúctil, sometido a una solicitación combinada de esfuerzos de torsión, flexión y tracción-compresión axial.

Para el caso descrito corresponde la aplicación del criterio de Tresca para materiales plásticos (Hamrock et al., 2000), donde la resistencia equivalente es la **Ecuación 17**:

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\left(\frac{F_{ap}}{\pi \cdot d^2}\right)^2 + \left(\frac{M_x}{0,1 \cdot d^3}\right)^2 + \left(\frac{M_y}{0,1 \cdot d^3}\right)^2 + 4 \cdot \left(\frac{M_t}{0,2 \cdot d^3}\right)^2} \text{ [MPa]} \quad (17)$$

Donde:

F_{ap} : fuerza axial aplicada [N]

M_x : máximo momento flector en el plano x - z [N. mm]

M_y : máximo momento flector en el plano y - z [N. mm]

M_t : máximo momento torsor [N. mm]

d : diámetro útil del eje [mm]

Se verifica la resistencia del eje, según las siguientes situaciones:

- $\sigma_{eq} \leq \sigma_{adm}$; el eje cumple con las solicitaciones, finaliza esta etapa.
- $\sigma_{eq} > \sigma_{adm}$; el eje no cumple con las solicitaciones, se recalcula considerando un

diámetro mayor del eje o un material con mayor esfuerzo de fluencia.

4.3.2.1.9 Verificación de la rigidez torsional. Según Deutschman et al. (1987), se inicia calculando el módulo polar de la sección, en este caso de un eje circular macizo, como se indica en la **Ecuación 18**:

$$J = \frac{\pi \cdot d^4}{32} \text{ [mm}^4\text{]} \quad (18)$$

Donde:

d : diámetro del eje [mm]

Seguidamente se determina el módulo de elasticidad en cortante del material del eje, de la forma mostrada en la **Ecuación 19**:

$$G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \gamma)} \text{ [GPa]} \quad (19)$$

Donde:

E : módulo de elasticidad del material del eje [GPa]

γ : coeficiente de Poisson del material

Con estos valores se determina la deformación angular del eje, en la **Ecuación 20**:

$$\theta = \frac{180}{\pi} \cdot \frac{M_t \cdot L_{act}}{J \cdot G} \text{ [}^\circ\text{]} \quad (20)$$

Donde:

M_t : momento torsor [N. mm]

L_{act} : longitud activa torsora del eje [mm]

J : módulo polar de la sección [mm⁴]

G : módulo de elasticidad en cortante [MPa]

En este punto, se requiere del valor de la deformación torsional límite o admisible a comparar, esta se obtiene según los coeficientes recomendados presentados en la **Tabla 7**.

Tabla 7.

Coefficientes recomendados para desviación torsional permitida

Tipo de aplicación	Coeficiente de límite de deformación torsional (θ_{cf})	
	Descripción	Valor
Flechas de máquinas herramientas	0,08 grados por pie de longitud	0,00026 °/mm
Flechas de transmisión	1° cada 20 veces el diámetro de la flecha	1/20d °/mm
Flechas de levas (sobre todo en motores de combustión interna)	0,5 grados independiente de la longitud de la flecha	0,5 °

Fuente: (Deutschman et al., 1987)

Seleccionado el tipo de aplicación y su valor de coeficiente correspondiente, la deformación angular admisible se calcula de la forma mostrada en la **Ecuación 21**:

$$\theta_{adm} = \theta_{cf} \cdot L_{act} \text{ [}^\circ\text{]} \quad (21)$$

Donde:

θ_{cf} : coeficiente recomendado [°/mm]

L_{act} : longitud activa torsora del eje [mm]

Se verifica la deformación angular del eje, según las siguientes situaciones:

- $\theta \leq \theta_{adm}$; el eje cumple con las solicitaciones, finaliza esta etapa.
- $\theta > \theta_{adm}$; el eje no cumple con las solicitaciones, se recalcula considerando como crítica la deformación angular del eje y se verifica para el resto de solicitaciones.

4.3.3 Dimensionamiento de rodamientos

También conocidos como cojinetes de rodadura o baleros, son elementos que permiten el movimiento relativo entre dos elementos de máquina por medio del uso de bolas o rodillos entre una pista estática y una móvil. En general, albergan ejes rotatorios y resisten cargas puntualmente radiales, estos elementos se encuentran normalizados a modo que el diseñador mecánico selecciona de un catálogo el apropiado en modelo y dimensiones (Faires, 1999).

4.3.3.1 Procedimiento de cálculo. Según lo indicado en el catálogo de FAG (2000), se busca hacer una comparación entre la solicitación del rodamiento y su capacidad de carga, como a continuación muestra el método de cálculo.

4.3.3.1.1 Consideraciones previas. Es necesario conocer los siguientes datos: dispositivo y lugar de montaje de los rodamientos, carga, velocidad, disposición del eje, espacio de montaje y exigencias a las que se encontrará sometido.

4.3.3.1.2 Identificación del modelo apropiado de rodamiento. Se lo realiza principalmente por el tipo de carga a soportar, esta puede ser: radial, axial o combinada. Aquí también influyen factores de geometría (pueden ser despiezables, agujero cónico, etc.) y de funcionamiento que se requiera.

4.3.3.1.3 Tipo de solicitación. Depende de la velocidad del movimiento relativo entre los aros de los rodamientos, si es nula o muy lenta (velocidad menor a 10 rpm) se considera estática, caso contrario se considera dinámica.

4.3.3.1.4 Selección del rodamiento solicitado estáticamente. Se calcula la capacidad de carga estática como muestra la **Ecuación 22**:

$$C_0 = f_s \cdot P_0 \text{ [kN]} \quad (22)$$

Donde:

f_s : factor de esfuerzos estáticos

P_0 : Carga estática equivalente [kN]

El factor de esfuerzos estáticos se toma como valor de seguridad contra deformaciones demasiado elevadas en los puntos de contacto de los cuerpos rodantes, sus valores dependen del tipo de exigencia como se muestra en la **Tabla 8**.

Tabla 8.

Factores de esfuerzos estáticos

Tipo de exigencia	Valores f_s
Reducida	0,7 - 1,0
Normal	1,0 - 1,5
Elevada	1,5 - 2,5

Fuente: (FAG, 2000)

La carga estática equivalente es un valor teórico, es una carga que origina la misma sollicitación en el punto de contacto más cargado entre cuerpos rodantes y camino de rodadura que la carga combinada real. Para el caso estático depende de la relación entre la carga axial (Fa) y la carga radial (Fr) siguiente:

- $Fa/Fr \leq 0,8$; entonces: $P_0 = Fr$ [N]
- $Fa/Fr > 0,8$; entonces: $P_0 = 0,6Fr + 0,5Fa$ [N]

Determinada la capacidad de carga estática Co , producida por las cargas axiales y radiales actuantes, se procede a la búsqueda o comparación con la capacidad de carga estática del rodamiento, indicada en las tablas de características dadas por los fabricantes.

4.3.4 Acoplamientos

Son elementos usados para conectar entre sí dos ejes por sus extremos, para la transmisión de potencia (Mott, 2006). Se elige el adecuado por la característica de par a transmitir y los posibles grados de desalineamiento, estas características se contrastan con las disponibles en los catálogos de fabricantes. Las dos clases generales se exponen a continuación.

4.3.4.1 Rígidos. Su objetivo es unir firmemente los ejes evitando el movimiento relativo entre ellos, lo hacen a través de bridas que se montan en los extremos de los ejes y se unen mediante pernos. Este tipo de acoplamientos solo deben emplearse cuando sea posible mantener una alineación precisa entre los dos ejes, tanto al momento de la instalación como durante el funcionamiento continuo de la máquina (Mott, 2006).

4.3.4.2 Flexibles. Están diseñados para transmitir par torsional uniforme y al mismo tiempo permitir cierto desalineamiento axial, radial y angular. Su característica flexibilidad es

tal que cuando se produce el desalineamiento las piezas se mueven con poca o ninguna resistencia, por lo tanto, no se desarrollan esfuerzos axiales o flexionantes apreciables en el eje.

4.3.5 Bastidores

En una máquina, son estructuras estacionarias que funcionan de base y soporte para la fijación de los elementos y componentes constitutivos (H. Rodríguez, 2020).

Según la aplicación lo requiera los bastidores pueden tomar diferentes formas, generalmente se consideran elementos como vigas, columnas y placas para su construcción o como soporte de componentes, estos se adaptarán al diseño y se calculan según la metodología que se detalla a continuación.

4.3.5.1 Vigas. En el caso de soporte de elementos de máquinas, se calculan teniendo en cuenta únicamente la deformación o flecha, puesto que las tensiones aplicadas son siempre mucho menores que las máximas admisibles (Kerguignas & Caignaert, 1980).

El cálculo de la deformación máxima ($\Delta_{m\acute{a}x}$) se puede realizar dependiendo de la disposición de elementos por medio de métodos de cálculo como el de doble integración, en base a tablas o por software y este valor no debe superar la deflexión permitida.

En la **Tabla 9**, se muestran los coeficientes para el cálculo de la deflexión permitida por flexión recomendados por Mott, (2006).

Tabla 9.

Coefficientes límite recomendados para deflexión

Tipo de precisión	Coefficiente límite de deflexión (Δ_{cf}) [mm / mm de longitud de viga]
General	0,000 5 – 0,003
Moderada	0,000 01 – 0,000 5
Alta	0,000 001 – 0,000 01

Fuente: (Mott, 2006)

Seleccionado el tipo de precisión y su valor de coeficiente correspondiente, la deflexión permitida se calcula de la forma mostrada en la **Ecuación 23**:

$$\Delta_{per} = \Delta_{cf} \cdot L_{viga} \text{ [mm]} \quad (23)$$

Donde:

Δ_{cf} : coeficiente recomendado [mm/mm]

L_{viga} : longitud de la viga [mm]

Se procede a la verificación de la deflexión, según las siguientes situaciones:

- $\Delta_{m\acute{a}x} \leq \Delta_{per}$; la viga cumple con las solicitaciones, finaliza esta etapa.
- $\Delta_{m\acute{a}x} > \Delta_{per}$; la viga no cumple con las solicitaciones, se recalcula considerando una mayor \u00e1rea transversal o diferente material.

4.3.5.2 Columnas. Son elementos estructurales que est\u00e1n sometidos principalmente a cargas axiales a lo largo de su eje longitudinal y se distinguen por su forma delgada o esbelta en comparaci\u00f3n con su longitud. Al aumentar la carga gradualmente, pueden fallar debido a la flexi\u00f3n lateral o pandeo, antes que por aplastamiento o cedencia (Pytel & Singer, 2008).

De acuerdo con Hibbeler (2011), el dise\u00f1o de columnas de acero utilizando el m\u00e9todo del esfuerzo permisible se lleva a cabo siguiendo el procedimiento que se indica a continuaci\u00f3n.

4.3.5.2.1 Factor de longitud efectiva. Depender\u00e1 de las condiciones de sujeci\u00f3n de los extremos de la columna, estos pueden estar articulados, fijos o libres como se muestra en la **Figura 16**.

4.3.5.2.2 Relaci\u00f3n de esbeltez efectiva. Considera el radio de giro de la secci\u00f3n transversal (ver **Anexo 3**) y corresponde a la relaci\u00f3n presentada en la **Ecuaci\u00f3n 24**.

Referencia				
Tipo de articulaci\u00f3n	Extremos articulados	Un extremo articulado y otro fijo	Extremos fijos	Un extremo fijo y otro libre
Factor de longitud efectiva (K)	1	0,7	0,5	2

Figura 16. Factores de longitud efectiva en columnas (Hibbeler, 2011).

$$Re_{efec} = \frac{K \cdot L}{r_g} \quad (24)$$

Donde:

K : factor de longitud efectiva

L : longitud de columna [mm]

r_g : radio de giro [mm]

4.3.5.2.3 Relación de esbeltez crítica. Este valor corresponde a la relación presentada en la **Ecuación 25**:

$$Re_{crit} = \left(\frac{K.L}{r_g} \right)_c = \sqrt[2]{\frac{2 \cdot \pi^2 \cdot E}{\sigma_f}} \quad (25)$$

Donde:

E : módulo de elasticidad del material de la columna [MPa]

σ_f : esfuerzo de fluencia del material [MPa]

4.3.5.2.4 Tipo de columna y esfuerzo permisible. Dependen de la siguiente relación entre la esbeltez efectiva (Re_{efec}) y crítica (Re_{crit}):

- $Re_{efec} < Re_{crit}$; entonces es una columna corta o intermedia y el esfuerzo permisible corresponde a la **Ecuación 26**:

$$\sigma_{perm} = \frac{\left[1 - \frac{(Re_{efec})^2}{2 \cdot (Re_{crit})^2} \right] \cdot \sigma_f}{\left[\frac{5}{3} \right] + \left[\frac{3 \cdot Re_{efec}}{8 \cdot Re_{crit}} \right] - \left[\frac{(Re_{efec})^3}{8 \cdot (Re_{crit})^3} \right]} \text{ [MPa]} \quad (26)$$

- $Re_{efec} \geq Re_{crit}$; entonces es una columna larga y el esfuerzo permisible corresponde a la **Ecuación 27**:

$$\sigma_{perm} = \frac{12 \cdot \pi^2 \cdot E}{23 \cdot (Re_{efec})^2} \text{ [MPa]} \quad (27)$$

- Para cargas excéntricas o momentos flexionantes, el esfuerzo permisible se determina a través del coeficiente de seguridad presentado previamente, utilizando la **Tabla 6** y las **Ecuaciones 15** y **16**.

4.3.5.2.5 Aplicación de la fórmula de interacción. En el caso general el diseño de una columna deberá considerar tanto cargas axiales como esfuerzos flexionantes si los hubiera.

Considerando las contribuciones de esfuerzos independientes aplicados en una columna, para evitar la falla se deberá cumplir con la **Ecuación 28** y la **Ecuación 29**:

$$\frac{P/A}{(\sigma_a)_{perm}} + \frac{M \cdot c/I}{(\sigma_b)_{perm}} \leq 1 \quad (28)$$

$$\frac{\sigma_a}{(\sigma_a)_{perm}} + \frac{\sigma_b}{(\sigma_b)_{perm}} \leq 1 \quad (29)$$

Donde:

σ_a : esfuerzo axial causado por una fuerza P en una columna con sección transversal A . [MPa]

σ_b : esfuerzo flexionante causado por la aplicación de un momento M en una columna que tiene una distancia c desde el eje neutro a la fibra más alejada de la sección y un momento de inercia I . [MPa]

$(\sigma_a)_{perm}$: esfuerzo axial permisible [MPa]

$(\sigma_b)_{perm}$: esfuerzo flexionante permisible [MPa]

Estas ecuaciones consideran que, si la columna está expuesta únicamente a carga axial, la relación entre flexión y esfuerzo será igual a cero, y el diseño se basará únicamente en el esfuerzo axial permitido. De manera similar, cuando no hay carga axial presente, la relación entre carga axial y esfuerzo será cero, y el requisito de esfuerzo se basará en el esfuerzo de flexión permitido.

4.3.5.3 Placas. Corresponden a elementos estructurales planos delgados, que geoméricamente se pueden aproximar a una superficie bidimensional que trabaja predominantemente a flexión (Timoshenko & Woinowsky-Krieger, 1970).

Las fórmulas de cálculo para placas rectangulares deducidas de los métodos que proporciona la teoría de la elasticidad, los esquemas de cálculo y los coeficientes respectivos, se presentan en el **Anexo 4**, de donde, para el caso de una carga distribuida, la determinación de la deflexión ($\Delta w_{m\acute{a}x}$) corresponde a la **Ecuación 30**:

$$\Delta w_{m\acute{a}x} = K_1 \cdot \frac{q \cdot R^4}{E \cdot h^3} \text{ [mm]} \quad (30)$$

Donde:

K_1 : coeficientes para placas rectangulares que depende de R/r

R : dimensión menor de la placa [mm]

q : carga uniformemente distribuida [N/mm^2]

h : espesor de la placa [mm]

E : módulo de elasticidad del material de la placa [MPa]

Estos valores no deberán superar el límite de flexión permitido que se calcula en base a la **Tabla 9** y la **Ecuación 23** previamente descritos.

4.3.5.4 Pernos. Se trata de un dispositivo roscado creado para atravesar agujeros en las partes que se desean unir, y luego asegurarse al apretar una tuerca desde el extremo opuesto a la cabeza del perno (Mott, 2006).

A continuación, se detallan los modos de falla a considerar.

4.3.5.4.1 Tracción inicial. Se conoce al esfuerzo o carga inducida por la operación de apriete (Faires, 1999), como se muestra en la **Figura 17**.

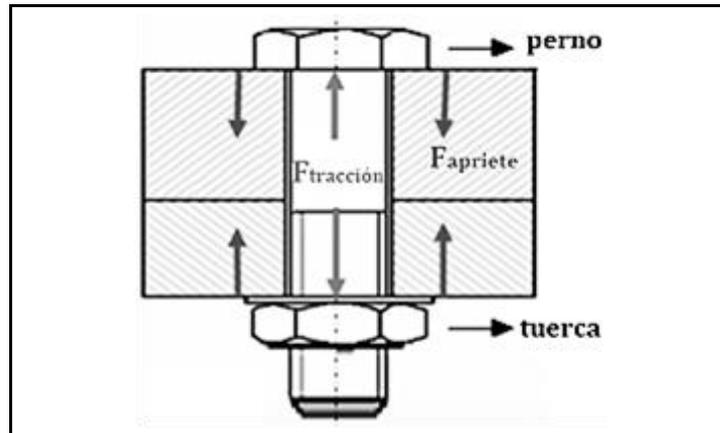


Figura 17. Tracción inicial en un perno (Gonzalez, 2020).

La relación entre el par o momento torsional aplicado (T_{in}) y la tracción inicial o apriete (F_{ap}), según lo indican Maney (1947) y Mott (2006), se muestra en la **Ecuación 31**:

$$T_{in} = C \cdot d_p \cdot F_{ap} \text{ [Nm]} \quad (31)$$

Donde:

C : coeficiente de par: 0,20 perno sin lubricar; 0,15 perno lubricado

d_p : diámetro del perno [m]

F_{ap} : fuerza de apriete [N]

En los catálogos se encuentran los pares de apriete máximos que pueden soportar los pernos dependiendo de la clase de calidad, además de la carga de prueba y de ruptura.

Se deberá comprobar la resistencia a la tracción, primero calculando el esfuerzo de tracción aplicado (σ_p), según la **Ecuación 32**:

$$\sigma_p = \frac{F_{ap}}{A_p} \text{ [MPa]} \quad (32)$$

Donde:

F_{ap} : fuerza de apriete [N]

A_p : área de esfuerzo perno [mm^2]

A continuación, la carga máxima de sujeción ($\sigma_{p.adm}$), se suele tomar el 75 % de la carga de prueba, como se muestra en la **Ecuación 33**:

$$\sigma_{p.adm} = 0,75 \cdot \sigma_{p.prueba} \text{ [MPa]} \quad (33)$$

Donde:

$\sigma_{p.prueba}$: carga de prueba [N]

Por último, se verifica los esfuerzos de tracción axial en el perno, según las siguientes situaciones:

- $\sigma_p \leq \sigma_{p.adm}$; el perno cumple con las solicitaciones, finaliza esta etapa.
- $\sigma_p > \sigma_{p.adm}$; el perno no cumple con las solicitaciones, se recalcula considerando una mejor calidad o un diámetro mayor.

En los siguientes modos de falla, para la verificación de resistencia se ocupa un coeficiente de seguridad con valores entre 4 y 6 (Pytel & Singer, 2008).

4.3.5.4.2 Por cortante simple. Según Deutschman et al. (1987), para el caso donde se presenten las fuerzas como se muestra en la **Figura 18**, el esfuerzo de corte (τ) en el perno se obtiene por la **Ecuación 34**.

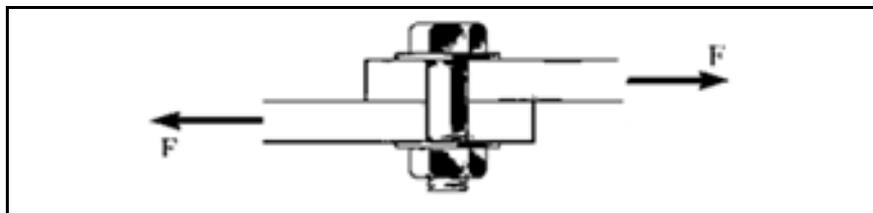


Figura 18. Perno sometido a cortante simple (Deutschman et al., 1987).

$$\tau = \frac{F}{\frac{\pi \cdot d_p^2}{4}} \text{ [MPa]} \quad (34)$$

Donde:

F : fuerza aplicada [N]

d_p : diámetro del perno [mm]

Para la verificación de resistencia se considera el esfuerzo cortante (τ_p) como el 50% del esfuerzo de fluencia (σ_p), además de un factor de seguridad (Pytel & Singer, 2008).

4.3.5.4.3 Por aplastamiento de la placa o del perno. Según Deutschman et al. (1987), para el caso donde se presenten las fuerzas como se muestra en la **Figura 19**, el esfuerzo por aplastamiento (σ_b) se obtiene por la **Ecuación 35**.

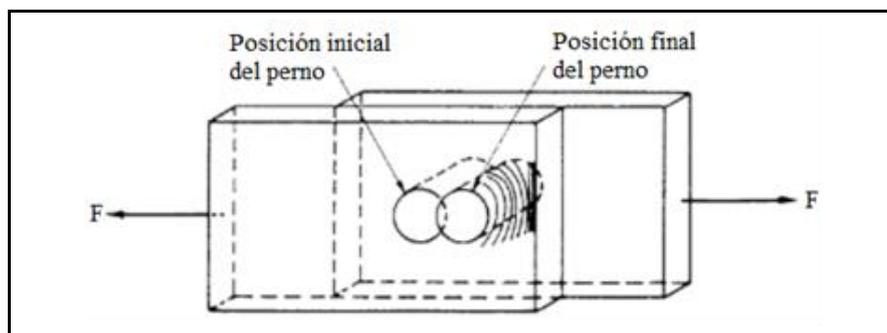


Figura 19. Falla de la placa por aplastamiento (Deutschman et al., 1987).

$$\sigma_b = \frac{F}{d_p \cdot t} \text{ [MPa]} \quad (35)$$

Donde:

F : fuerza aplicada [N]

d_p : diámetro del agujero [mm]

t : espesor de la placa [mm]

Se verifica la resistencia con el esfuerzo de fluencia (σ_p) y un factor de seguridad.

4.3.5.4 Por tensión de las placas. Según Deutschman et al. (1987), para el caso donde se presenten las fuerzas como se muestra en la **Figura 20**, el esfuerzo de tensión (σ_t) se obtiene por la **Ecuación 36**.

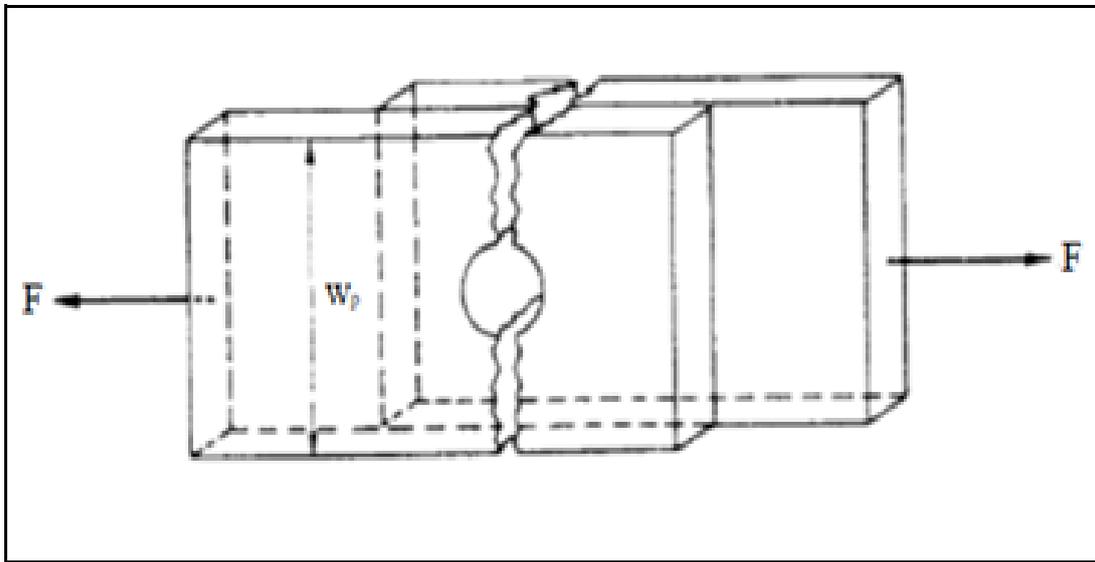


Figura 20. Falla de la placa a tensión (Deutschman et al., 1987).

$$\sigma_t = \frac{F}{(w_p - d_{ef}) \cdot t} \text{ [MPa]} \quad (36)$$

Donde:

F : fuerza aplicada [N]

w_p : ancho de la placa [mm]

d_{ef} : diámetro del agujero [mm]

t : espesor de la placa [mm]

Se verifica la resistencia con el esfuerzo de fluencia (placas) y un factor de seguridad.

4.4 Fundamentos de Automatización

A continuación, se describen algunos tipos de elementos que, en conjunto, permiten reconocer ciertos parámetros mediante imágenes, presentar información por pantallas y controlar procesos vía software. El detalle de características se encuentra en el **Anexo 5**.

4.4.1 Elementos para reconocimiento de color

4.4.1.1 Sensores de color. La sensación producida en el ojo humano por la longitud de onda reflejada desde la superficie de un objeto se interpreta como color (RAE, 2014), a partir de esto los sensores buscan captar este fenómeno físico y transformarlo a señales eléctricas.

Corona et al. (2014), indican que estos sensores se dividen en dos vertientes:

- *Basados en filtros:* consisten en tres fotodiodos provistos cada uno como un filtro de color primario: rojo, verde y azul, el cual genera una salida de voltaje en cada canal proporcional a la irradiación en cada uno de los fotodiodos que dependerán de la luz existente en el ambiente.
- *Basados en la irradiación de una fuente de color fija:* consiste en la irradiación de luz de color primario de manera secuencial sobre un objeto, a la vez que un elemento fotosensible registra la intensidad de la luz reflejada para cada color.

4.4.1.2 Sensores de visión o cámaras. Su principio de funcionamiento es la formación de imágenes a través de elementos unitarios llamados píxeles, los cuales se ordenan en forma de matriz (Corona et al., 2014).

Una vez detectada la luz en el sensor, pasa a convertirse en una imagen o video que se podrá procesar para obtención de bordes, determinación de trayectorias, reconocimiento facial entre otros.

A continuación, se presenta el detalle de los sensores de visión: en la **Figura 21a** se muestra la disposición de la matriz de píxeles con su arreglo interno y en la **Figura 21b** el diagrama de tareas de funcionamiento.

Este tipo de sensores existen en dos tipos de tecnologías y según Liarte (2009) las describe como:

- *CCD:* traducido del inglés “dispositivo de carga acoplada”, una vez que se entrega la señal analógica enviada por una celda, esta es digitalizada posteriormente por la cámara.
- *CMOS:* traducido del inglés “semiconductor complementario de metal óxido”, en este caso al ser celdas independientes la digitalización se lleva a cabo por transistores internos de cada celda.

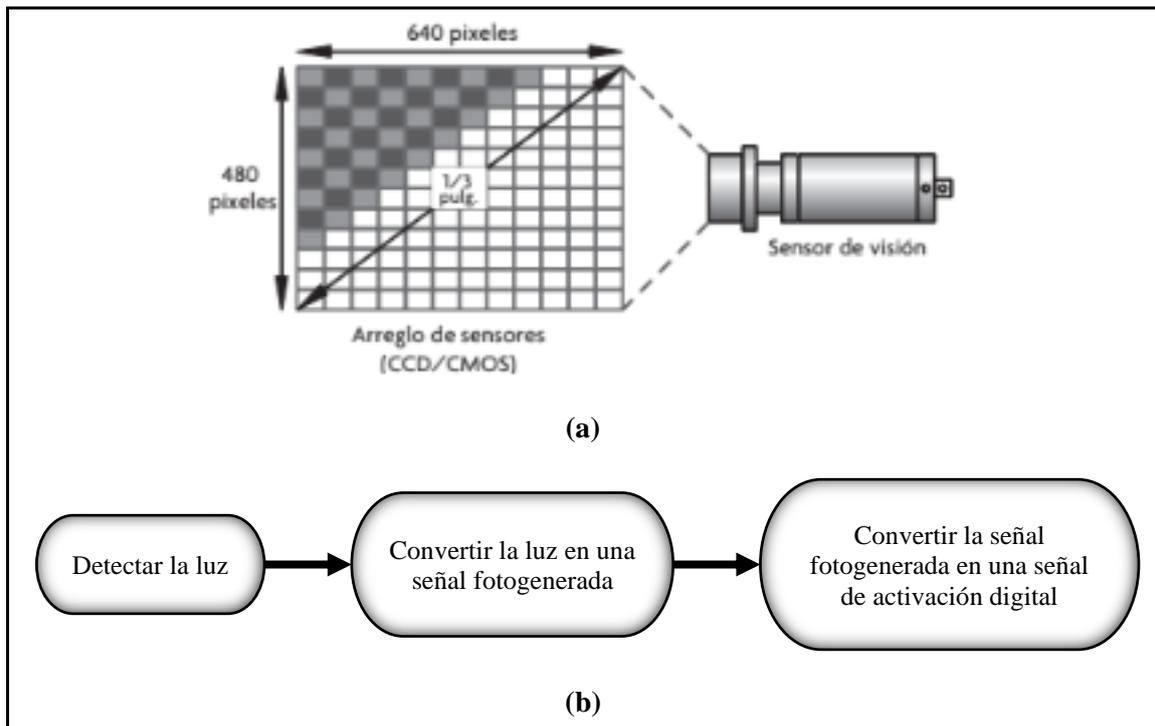


Figura 21. Detalles de sensor de visión.(Corona et al., 2014).

4.4.2 Elementos para visualización de datos

4.4.2.1 Pantallas LCD. Las pantallas de cristal líquido son dispositivos optoelectrónicos muy usados en aplicaciones generales como relojes, calculadoras, celulares y en aplicaciones del tipo industrial por su variedad de tamaños, alta eficiencia energética, y su tecnología integrada HDMI, es decir usa una interfaz multimedia de alta definición (Prat, 2013).

Estas permiten a más de la presentación de información una interacción con el usuario si disponen del modo táctil, un modelo comercial se muestra por la parte frontal en la **Figura 22a**, y por la parte posterior en la **Figura 22b**.

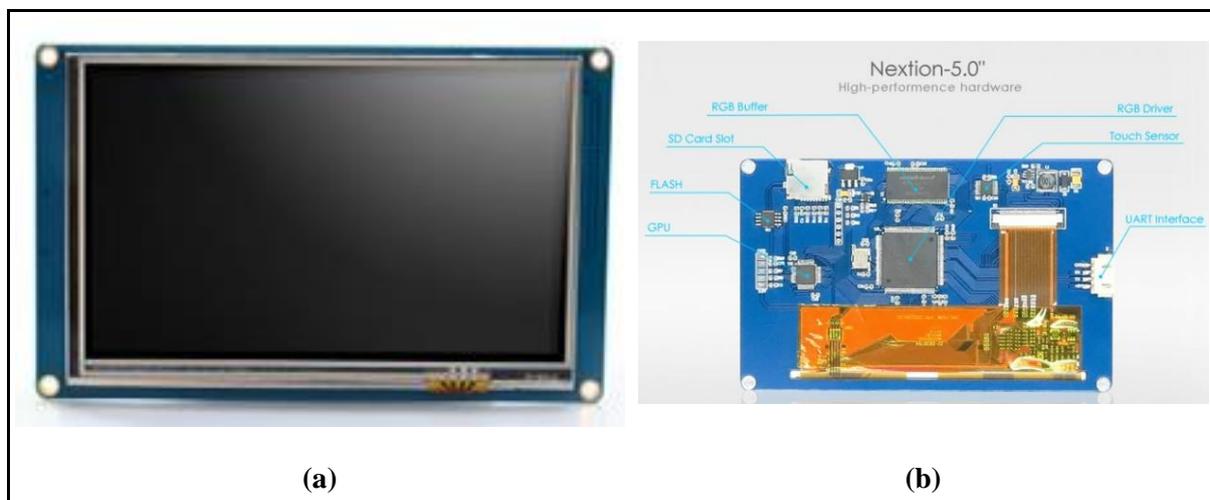


Figura 22. Vistas de la pantalla LCD (Nextion, 2022).

4.4.3 Elementos para desplazamiento de objetos

4.4.3.1 Motores eléctricos. Son actuadores que transforman la energía eléctrica en energía mecánica rotacional o lineal y generalmente se los clasifica según el tipo de energía con que son alimentados y el tipo de movimiento que realizan (Corona et al., 2014).

De este tipo de elementos los que funcionan con corriente directa y generan un movimiento rotacional en el mercado se puede encontrar los siguientes modelos:

- *Motores DC:* B07SQXRSNR, GMPG 404 774
- *Servomotores:* SG90, HS-322HD
- *Motores PAP:* 17HS4401(NEMA17), SY57STH56-2804A(NEMA23)

Todos estos elementos deben ir acompañados de sus respectivos controladores o drivers:

- *Para motores DC:* L298N.
- *Para servomotores:* PCA9685.
- *Para motores PAP:* DVR8825, TB6560, TB6600.

4.4.4 Elementos para control general de sistemas

4.4.4.1 Tarjetas de desarrollo. Son herramientas para prototipado de sistemas electrónicos, utilizadas para la validación de diseños y como posibles soluciones de un producto final (González & Silva, 2013).

En el mercado se dispone de algunos modelos con distintas funcionalidades y características, como se puede ver en la **Tabla 10**.

Tabla 10.

Tarjetas de desarrollo

Placa	Fabricante	Microcontrolador/ Procesador	Pines I/O	Frecuencia de trabajo	Plataforma IDE	Lenguaje de programación
Arduino UNO	Arduino	ATMEGA328P	16	16 MHz	Arduino	C++
Raspberry Pi	Raspberry Pi Foundation	Broadcom BCM2837B0	40	1.4 GHz	Raspbian	C++, Python
ESP32	Espressif	Tensilica Xtensa LX6	24	160 MHz	Arduino	JavaScript, C++
ATTINY85	Microchip technology/Atmel	tinyAVR/Atmel	6	20 MHz	Arduino	C, C++, JavaScript

Fuente: Aguirre (2020)

4.4.4.2 Lenguaje de programación: Python. Dispone de una licencia de código abierto y tiene el objetivo de ser fácil para leer y programar. Guzmán (2023), precisa las características que se detalla a continuación.

4.4.4.2.1 De alto nivel. Esto indica que es bastante cercano al lenguaje humano. Otros lenguajes como C++ o ensamblador se acercan al lenguaje máquina o de microprocesadores.

- *Ventajas:* fácil de programar, sintaxis sencilla por la manera como se acomodan los caracteres.
- *Desventaja:* tiempo de ejecución lento porque tiene que pasar varias capas de traducción para llegar al lenguaje máquina.

4.4.4.2 Interpretado. El microprocesador lee el código escrito línea por línea, lo traduce al lenguaje máquina y luego lo transforma a binario para ser ejecutado. Se diferencia de los lenguajes compilados como C o Java que leen todo el programa y generan un ejecutable directamente en lenguaje binario.

- *Ventajas:* se puede ejecutar enseguida de ser programado acortando el tiempo de pruebas.
- *Desventaja:* susceptible a errores y rendimiento bajo en producción. La programación se ejecuta hasta llegar al error, esto consume un tiempo que disminuye el rendimiento en programación.

4.4.4.3 Extensible. Se puede añadir módulos o bibliotecas, se puede hacer funcional una función básica agregando más código.

4.4.4.4 Multiparadigma. Permite la programación de distintas formas refiriéndose a la manera de acomodo del código, es decir, el método de programación. Entre ellos están: programación orientada a objetos, programación orientada a eventos, funcional, estructurado, declarativo línea a línea, etc.

4.4.4.5 Tipado dinámico y débil. Corresponde al tipo de espacio asignado en la memoria a un dato (texto, número, letra, etc.), este puede cambiar a lo largo del programa. A diferencia del caso de ser tipado estricto y fuerte que no puede cambiar a lo largo del programa.

- *Ventajas:* una variable declarada puede iniciar con un valor numérico y terminar con elementos como matrices, se declara menos variables y se necesita menos espacio de memoria.
- *Desventaja:* proclive a errores.

4.4.4.6 Biblioteca de visión artificial: OpenCV. Permite el análisis y tratamiento de imágenes capturadas por distintos medios electrónicos, es muy popular por su disponibilidad gratuita y las mejoras realizadas desde su lanzamiento, uno de los usos relevantes es la detección de objetos y rostros.

4.4.5 Otros elementos usados

Se pueden encontrar principalmente fuentes de alimentación, elementos para iluminación de objetos, elementos para activación de cargas, sensores de objetos, entre otros.

4.5 Métodos de evaluación de soluciones

4.5.1 Método ordinal corregido de criterios ponderados

En la etapa de diseño conceptual, al disponer de un conjunto de alternativas concierne su respectiva tasación de manera que sirva para la toma de decisiones, estas se basarán en la ponderación bajo criterios que tomen en cuenta distintas características del sistema.

Según Riba (2002), para tomar decisiones se requiere de los siguientes elementos:

- *Alternativas*: al menos dos de diferentes características, aunque se recomienda de tres a seis.
- *Criterios*: establecidos para la valuación de alternativas y con una ponderación relativa.

El presente método permite obtener resultados globales y significativos evitando la evaluación de parámetros de cada propiedad y de estimaciones numéricas de cada criterio, la aplicación según lo indica Riba (2002), se realiza de la siguiente manera:

1. Se crea una matriz con los criterios seleccionados, es decir, se ubica en una columna los criterios, se considera el orden vertical y se los ubica en una fila superior de izquierda a derecha, de esta manera formando una matriz cuadrada.
2. Se confronta los criterios asignando los siguientes valores:
 - *1*: si el criterio de la fila es superior que el de la columna.
 - *0,5*: si el criterio de la fila es equivalente al de la columna.
 - *0*: si el criterio de la fila es inferior que el de la columna.
3. Se suman los valores asignados a lo largo de la fila de cada criterio, además se agrega una unidad a este valor, así evitando una valoración nula del criterio menos favorable.
4. Se realiza la suma de los totales de cada criterio y se calculan los valores ponderados individuales o peso del criterio con respecto a este.
5. Se crea una matriz de criterios (filas) contra alternativas (columnas) para valorar estas últimas, por ejemplo, según las siguientes pautas: *1*, muy bajo; *2*, bajo; *3*, medio; *4*, bueno; *5*, muy bueno.
6. Se calcula el puntaje asignado de cada criterio a cada alternativa, realizando el producto del valor asignado con el peso del criterio respectivo calculado previamente.
7. El puntaje de cada alternativa corresponderá a la suma de los puntajes obtenidos en cada criterio, con estos valores se podrá comparar entre alternativas.

4.5.2 Matriz de confusión

En la etapa de validación y pruebas, las métricas de evaluación dan una estimación de como de bien funciona un modelo en base a diferentes criterios (Pérez & Gegúndez, 2021).

Para la aplicación se necesita conocer: la salida esperada del modelo, asumiendo el funcionamiento ideal y; la salida obtenida del modelo.

En base a la comparación entre las clases positivas y negativas obtenidas por el modelo con las clases positivas y negativas esperadas, se obtienen las cuatro métricas básicas de un problema de clasificación:

- *Verdaderos positivos (VP)*: si salida obtenida asignada como positiva coincide con la salida esperada.
- *Verdaderos negativos (VN)*: si salida obtenida asignada como negativa coincide con la salida esperada.
- *Falsos positivos (FP)*: si salida obtenida asignada como positiva no coincide con la salida esperada.
- *Falsos negativos (FN)*: si salida obtenida asignada como negativa no coincide con la salida esperada.

A la agrupación de estas cuatro métricas se conoce como la matriz de confusión, como se muestra en la **Figura 23**.

		Salida del Modelo (Obtenida)	
		Clase Positiva	Clase Negativa
Salida Esperada (Ideal o Conocida)	Clase Positiva	VP	FN
	Clase Negativa	FP	VN

Figura 23. Matriz de confusión (Pérez & Gegúndez, 2021).

A partir de esta matriz se derivan las siguientes métricas:

- *Precisión*: corresponde al porcentaje de muestras que son realmente de la clase positiva respecto del total de muestras que el sistema ha clasificado como positivos, se calcula mediante la **Ecuación 37**:

$$Precisión = \frac{VP}{VP + FP} \quad (37)$$

- *Exactitud*: corresponde al porcentaje de muestras de la clase positiva que han sido bien clasificados, se calcula mediante la **Ecuación 38**:

$$Exactitud = \frac{VP}{VP + FN} \quad (38)$$

- *F1*: valor práctico para evaluar el rendimiento de un modelo combinando la precisión y la exactitud (Heras, 2020), se calcula mediante la **Ecuación 39**:

$$F1 = 2 * \frac{Precisión * Exactitud}{Precisión + Exactitud} \quad (39)$$

- *Macro promedios*: se utilizan para obtener las métricas globales de un clasificador con muestras de datos desbalanceados (Fuentes, 2021). Se calcula haciendo la media aritmética de la precisión y la exhaustividad para con ellas calcular el valor F1 global (López, 2021).

4.6 Experiencias vinculadas a los selectores por color de frutos del cafeto

Para el presente proyecto, se revisaron los trabajos que se encuentran recopilados por la Unidad de Vigilancia Tecnológica e Inteligencia Competitiva (2018). A continuación, se describe los de mayor relevancia y desarrollo en el tema.

4.6.1 Sistema basado en Arduino (Universidad Tecnológica de Pereira)

La tesis presentada por los señores Paulo Castaño y Flor Zuluaga con el tema: “Diseño de un sistema electrónico de sensor cromático para la selección de grano de café”, tiene como objetivo la clasificación de frutos de café dependiendo de dos estados: maduro y verde.

Presentan el diseño de una estructura tipo cilindro en acero AISI 304 de 50 cm de alto por 25 cm de ancho, donde se ingresan los frutos por gravedad hacia una cámara. Aquí son reconocidos utilizando el sensor monocromático TSC-3200, el cual envía una señal a la tarjeta controladora Arduino Uno para su procesamiento. A su vez, esta envía señales a dos solenoides que abren y cierran compuertas de ductos. Dependiendo de la clase a la que pertenezca el fruto, este será trasladado a una banda transportadora o a un contenedor de rechazo.

Como resultado, se obtuvo un prototipo que permitió llenar un depósito de 5 kg con frutos maduros en un lapso de 5 horas, incluyendo la presencia de 500 g de café degradado y cuya fabricación costó \$850 dólares.

4.6.2 Sistema basado en Python (Universidad Autónoma del Caribe)

La tesis presentada por los señores Jean Herrera y Silfri Medina con el tema: “Diseño de un sistema automático de selección de frutos de café mediante técnicas de visión artificial”, tiene como objetivo la identificación de los frutos de café en buen estado para separarlos de los frutos no aptos para producción.

El prototipo propuesto se encuentra en un contenedor de fondo blanco con iluminación tipo LED blanca. Los frutos de café se ubican individualmente en los espacios intermedios de una banda de superficie tipo medio rodillo, esta los transporta hacia los puntos de enfoque de dos cámaras que capturan las imágenes para ser analizadas por los algoritmos de visión artificial, implementados a través de la librería OpenCV de Python. Después de completar el trayecto, los frutos descienden hacia un mecanismo que los dirige según la decisión tomada por los algoritmos, este permite clasificarlos en dos contenedores diferentes: uno para los frutos de buena calidad y otro para los de mala calidad.

Los resultados de esta investigación indican la obtención de un 87% de efectividad en la detección de la broca y la clasificación por color en conjunto.

4.6.3 Sistema basado en Labview (Centro Nacional de Investigaciones de Café)

El artículo presentado por los señores Paula Ramos, Juan Sanz y Carlos Oliveros, con el tema: “Identificación y clasificación de frutos de café en tiempo real, a través de la medición de color”, tiene como objetivo presentar la componente electrónica de un método para la identificación de cuatro estados de maduración de los frutos de café.

El montaje experimental propuesto consiste en un disco rotatorio de 22 cuencas, el cual es movido por un motor DC con control de velocidad vía PWM (modulación por ancho de pulso). En las cuencas, se realiza el ingreso individual de frutos, los cuales son censados al cruzar frente al sensor de color provisto en el módulo electrónico AXE045, correspondiente a la familia de microcontroladores PICAXE, al cual se le agregó una corona de 12 LEDs de alto brillo de luz blanca. El control del sistema se realiza usando los módulos de tiempo real del software LabView mediante un computador.

Los resultados presentados en esta investigación muestran que tiene la capacidad de identificar y separar hasta 50 frutos por segundo, con una eficacia de aproximada del 94,8%.

5. Metodología

5.1 Área de estudio

El proyecto se llevó a cabo en la provincia de Loja ubicada al sur del Ecuador, como se muestra en la **Figura 24**, pertenece a la zona de planificación 7, donde se cultiva café principalmente de la variedad Arábica, entre 1400 y 1800 metros sobre el nivel del mar.

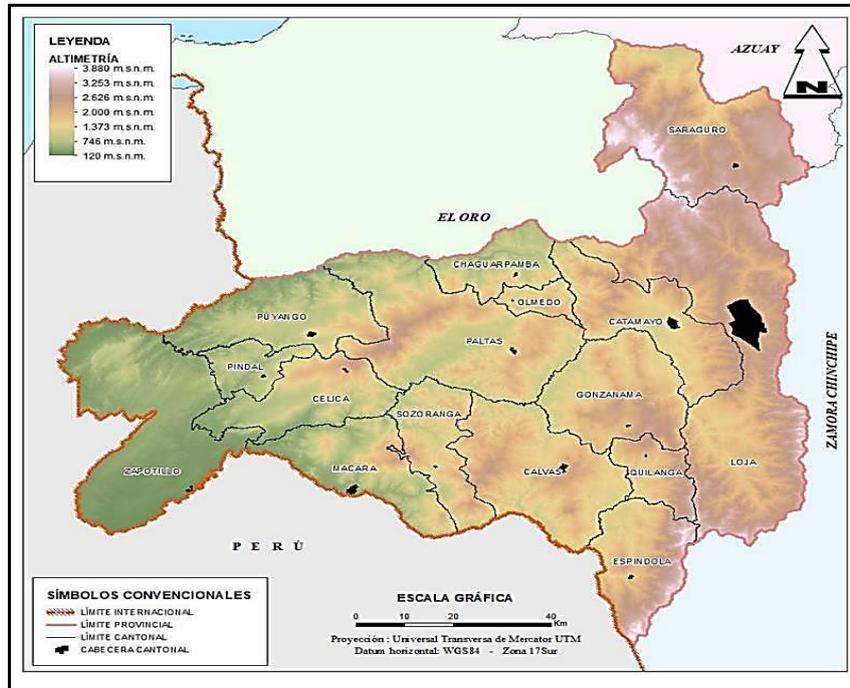


Figura 24. Mapa de altimetría de la provincia de Loja (Dávila, 2020).

5.2 Materiales y equipos

Para el desarrollo del presente proyecto, se emplearon los siguientes recursos.

5.2.1 Recursos bibliográficos

- *Libros:* diseño mecánico y diseño electrónico.
- *Catálogos:* elementos mecánicos y electrónicos, mecanismos de transporte de materiales a granel.
- *Tesis, revistas, artículos académicos:* caracterización y propiedades de los frutos del café.

5.2.2 Recursos informáticos

- *Hardware:* computador con sistema operativo Microsoft Windows 10 Home, tarjeta de desarrollo Raspberry Pi 4+B, drivers de control.
- *Software:* paquete Microsoft Office 2019, MDSollids, Solidworks 2020, Proteus 8 Professional, VNC® Viewer, sistema operativo Raspbian, Thonny IDE

5.2.3 Herramientas de taller

- Equipo básico para metalmecánica y electrónica.

5.3 Procedimiento

En el presente proyecto se aplicó: un enfoque de investigación cuantitativo, dado que se buscó el margen de efectividad de un prototipo; un tipo de investigación descriptiva, por cuanto se consideró los métodos de clasificación por color y sus componentes; y un método de estudio hipotético-deductivo.

Para el alcance de los objetivos específicos planteados en el presente proyecto, se estableció el desarrollo de actividades en el orden que se muestra en la **Figura 25**.

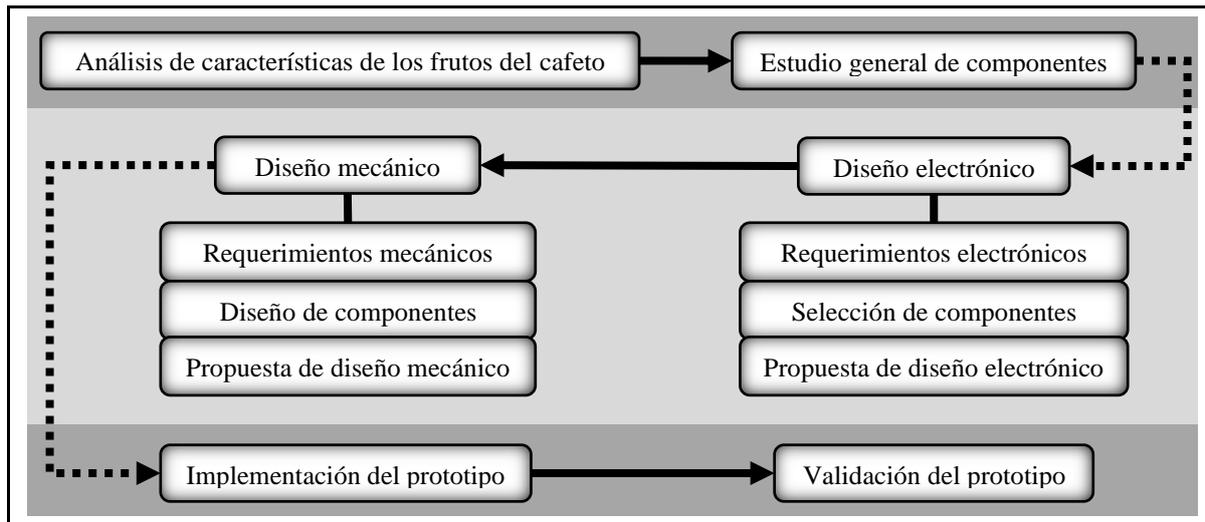


Figura 25. Diagrama de proceso del proyecto.

- *Análisis de las características de los frutos del café:* por medio de una búsqueda bibliográfica se recopiló los datos, se diferenciaron y organizaron los oportunos para este proyecto.
- *Estudio general de componentes:* se realizó a través de la evaluación de máquinas industriales que llevan a cabo la clasificación por color, como posibles alternativas de métodos que se ajusten al proyecto.
- *Diseño electrónico:* se plantearon los requerimientos electrónicos, se realizó la selección de elementos disponibles y compatibles, y posteriormente se presentó una propuesta de diseño desde el enfoque electrónico.
- *Diseño mecánico:* en base a los requerimientos mecánicos se realizó el cálculo y la proyección de elementos de los componentes respectivos, los cuales generaron la propuesta de diseño mecánico.
- *Implementación del prototipo:* se realizó la construcción y el montaje de los elementos acorde al diseño mecánico y electrónico propuesto.
- *Validación del prototipo:* se comprobó el funcionamiento del prototipo a través de pruebas que indicaron su rendimiento.

5.4 Procesamiento y análisis de datos

5.4.1 Análisis de las características de los frutos del café

De los datos presentados en el marco teórico, se discriminó los valores relevantes de las propiedades como a continuación se describe.

De la escala de color visual, los primeros estados de maduración: verde 1, verde 2, verde 3 y verde amarillo, tienen rangos muy cercanos entre ellos, por practicidad se los agrupó en una sola categoría llamada verde, quedando así en cinco categorías formadas por los ocho estados de maduración. Además, se convirtieron los valores de los rangos al espacio de color RGB (0-255 bytes), mayormente manejada por sensores y software de reconocimiento. Esto se muestra en la **Tabla 11**.

Tabla 11.

Escala de color en categorías y conversión de colores

Categorías	Estado	Espacio Pantone				Espacio RGB		
		Cian [%]	Magenta [%]	Amarillo [%]	Negro [%]	Rojo [byte]	Verde [byte]	Azul [byte]
Verde	Verde 1	35	0	100	40	99	153	0
	Verde 2	35	0	100	20	133	204	0
	Verde 3	40	20	100	15	130	173	0
	Verde amarillo	20	0	100	40	122	153	0
Pintón	Pintón	20	0	100	40	122	153	0
		10	75	80	0	230	64	51
Maduro	Maduro	0	100	90	10	230	0	23
		10	80	70	15	195	43	65
Sobremaduro	Sobremaduro	10	100	50	30	161	0	89
		0	35	0	100	0	0	0
Seco	Seco	0	0	35	100	0	0	0
		0	0	25	80	51	51	38

Del diámetro característico y el peso fresco, se realizó el cálculo del mínimo, máximo y promedio de los valores, con el fin de acotamiento de los elementos del sistema, como se muestra en la **Tabla 12**.

Tabla 12.

Diámetro característico y peso fresco para acotamiento

	Diámetro característico [mm]	Peso fresco [g]
Mínimo	10,57	0,66
Máximo	14,22	1,99
Promedio	13,10	1,54

De la densidad aparente, según la bibliografía consultada, para el fruto sin seleccionar es de $616,5 \text{ kg/m}^3$, mientras que el ángulo de reposo máximo se encuentra alrededor de los 20° .

5.4.2 Estudio general de los componentes

Una vez consultado sobre las máquinas clasificadoras de alimentos por color y analizado el funcionamiento de dichas máquinas, se realizó una evaluación de las alternativas usando el “método ordinal corregido de criterios ponderados”, desarrollado como se muestra a continuación.

Se planteó los elementos para la toma de decisiones:

- *Alternativas:* según los modelos presentados en el marco teórico, Blizzard, Halo, Sistema clasificador por medio de rodillos, WYCS8-512, y WYB1.
- *Criterios:* según los recomendados por Mott (2006), seguridad para el operador, desempeño, tamaño, facilidad de control, simplicidad del diseño, manufacturabilidad, disponibilidad de partes, y consumo energético.

A las alternativas se asignó un código para identificarlas, este consta de la letra “A” seguido de un número de orden, esto se muestra en la **Tabla 13**.

Tabla 13.

Identificación de alternativas a elegir

Marca	Modelo	Código Asignado
TOMRA	Blizzard	A-1
TOMRA	Halo	A-2
CIU	Sistema clasificador por medio de rodillos	A-3
WENYAO	WYCS8-512	A-4
WENYAO	WYB1	A-5

Se generó la matriz con los criterios seleccionados y su ponderación (**Figura 26**).

Matriz de criterios y ponderación	Seguridad para el operador	Desempeño	Tamaño	Facilidad de control	Simplicidad del diseño	Manufactura	Disponibilidad de partes	Mantenimiento	Consumo Energético	Sumatoria+1	Ponderación (Peso del Criterio)	
Seguridad para el operador		1	1	1	1	1	1	1	1	9,0	0,20	
Desempeño	0		1	1	1	0,5	0,5	0,5	0	5,5	0,12	
Tamaño	0	0		0	0	0	0	0,5	0	1,5	0,03	
Facilidad de control	0	0	1		0,5	0	0	0,5	0	3,0	0,07	
Simplicidad del diseño	0	0	1	0,5		0,5	0,5	0,5	0,5	4,0	0,09	
Manufacturabilidad	0	0,5	1	1	0,5		0,5	0,5	0,5	5,5	0,12	
Disponibilidad de partes	0	0,5	1	1	0,5	0,5		1	0	5,5	0,12	
Mantenimiento	0	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0		0	3,5	0,08	
Consumo Energético	0	1	1	1	0,5	0,5	1	1		7,0	0,16	
										Suma	44,5	1,00

Figura 26. Evaluación del peso específico de cada criterio.

Se generó la matriz de valoración de alternativas, usando los criterios y sus ponderaciones respectivas. A cada alternativa se asignó un valor de criterio acorde a las pautas: 1, muy bajo; 2, bajo; 3, medio; 4, bueno; 5, muy bueno, y se calculó el puntaje representativo sumando los puntajes parciales de cada criterio en cada alternativa, como se muestra en la **Figura 27**.

Criterios	Peso del Criterio	A-1		A-2		A-3		A-4		A-5	
		Valor	Puntaje								
Seguridad para el operador	0,20	5	1,01	5	1,01	5	1,01	3	0,61	5	1,01
Desempeño	0,12	3	0,37	3	0,37	4	0,49	3	0,37	3	0,37
Tamaño	0,03	3	0,10	2	0,07	2	0,07	2	0,07	4	0,13
Facilidad de control	0,07	5	0,34	4	0,27	5	0,34	4	0,27	4	0,27
Simplicidad del diseño	0,09	3	0,27	3	0,27	3	0,27	2	0,18	2	0,18
Manufacturabilidad	0,12	3	0,37	3	0,37	3	0,37	3	0,37	3	0,37
Disponibilidad de partes	0,12	3	0,37	4	0,49	3	0,37	2	0,25	2	0,25
Mantenimiento	0,08	3	0,24	3	0,24	3	0,24	2	0,16	3	0,24
Consumo Energético	0,16	2	0,31	4	0,63	4	0,63	2	0,31	2	0,31
Puntaje representativo			3,38		3,72		3,79		2,58		3,13

Figura 27. Matriz de evaluación de alternativas.

Se priorizó según el puntaje alcanzado por las alternativas, como muestra la **Tabla 14**.

Tabla 14.

Priorización de alternativas

Código	Puntaje	Prioridad
A-1	3,38	3
A-2	3,72	2
A-3	3,79	1
A-4	2,58	5
A-5	3,13	4

La alternativa A-3 alcanzó el mayor orden de prioridad, por lo que es la alternativa de referencia para la propuesta general de diseño.

Conforme a la alternativa de referencia, se consideraron componentes equivalentes para la propuesta con las siguientes características: cumplir las mismas funciones, ajustarse a las propiedades de los frutos del cafeto y existir o poder construirse en el medio. Estos componentes considerados se muestran en la **Tabla 15**.

La selección definitiva de componentes para la propuesta, se realizó bajo el criterio de

capacidad y experiencia en fabricación del autor del proyecto, esta consideró las características como: complejidad de los componentes, existencia de elementos que conforman los componentes, disponibilidad de materiales y herramientas para la ejecución, y costo. La escala de valoración manejada corresponde con: 1, poco viable; 2, medianamente viable; y 3 muy viable.

Tabla 15.

Componentes considerados para la propuesta del prototipo

Unidad	Subunidad	Alternativa referencial	Componentes considerados	Valoración
Autonomía	---	Alimentación por cajas en volteadora	Contenedor	3
			Tolva	2
			Deslizadores	1
Posicionamiento	---	Singulador	Alimentador de lamas	2
			Alimentador centrífugo	1
			Alimentador estático	3
Enlace pulmón	---	Elevador de rodillos	Cadena de rodillos	3
			Cinta transportadora	2
			Transportador de rodillos	1
Selección	Censado	Cuarto de reconocimiento equipado con cámaras	Estructura prismática rectangular con sensores	3
			Estructura prismática hexagonal con sensores	2
			Cubierta general	1
	Eyección	Rodillo con mecanismo especial	Impulsores mecánicos	3
			Impulsores neumáticos	2
			Impulsores hidráulicos	1

Una vez que se definió los componentes de las unidades del prototipo, para su diseño se identifica el proceso demandante, como indica Westreicher (2020), en este caso corresponde a la subunidad de censado y en torno a la cual se definieron el orden de diseño del resto de las unidades y subunidades como se lista a continuación:

1. *Unidad de selección- subunidad de censado:* estructura prismática con sensores.
2. *Unidad enlace pulmón:* cadena transportadora de rodillos.
3. *Unidad de posicionamiento:* alimentador estático.
4. *Unidad de autonomía:* contenedor.
5. *Unidad de selección-subunidad de eyección:* impulsores mecánicos.

En este punto, se tomó en cuenta agregar una unidad de control y automatización para completar la integración de las unidades del proceso. Esta unidad al contener la subunidad de censado, en correspondencia con el proceso demandante, se diseñó en primer lugar.

5.4.3 Diseño electrónico

5.4.3.1 Requerimientos electrónicos. Se analizaron para cada componente propuesto del prototipo según la prioridad de diseño, como se muestra en la **Tabla 16**.

Tabla 16.

Análisis de requerimientos electrónicos

P.	Unidad-Subunidad	Componentes propuestos	Requerimientos electrónicos	
			Principales	Secundarios
1	Selección-Censado	Estructura prismática rectangular con sensores	Reconocimiento de color	Iluminación de objetos
2	Enlace pulmón	Cadena de rodillos	Control del desplazamiento de objetos	Registro de movimiento
3	Posicionamiento	Alimentador estático	---	---
4	Autonomía	Contenedor	---	---
5	Selección-Eyección	Impulsores mecánicos	Control del desplazamiento de objetos	---
6	Control y automatización	Tablero de control	Control general del sistema	Visualización de datos Activación de cargas Alimentación de cargas

5.4.3.2 Selección de componentes. Se presentaron los recursos disponibles en el mercado que pueden solventar los requerimientos electrónicos principales y secundarios.

Para la subunidad de censado, se requirieron elementos que principalmente atiendan al reconocimiento del color de objetos, y según las recomendaciones de los fabricantes se dispuso de elementos que presten la iluminación adecuada para los sensores. Estos elementos se presentan en la **Tabla 17**.

Tabla 17.

Recursos disponibles para reconocimiento e iluminación

Requerimientos	Recursos disponibles	Tipo	Componente
Reconocimiento de color	Sensores de color	Basados en filtros	TCS3472
		Basados en irradiación	TCS3200
	Sensores de visión	CCD	ReadytoSky-1000TVL-CCD
		CMOS	Raspberry Pi-Cámara PIXY2-CAM

Iluminación de objetos	Bombillas	LED	Maviju-FocoLED-Dicroico Ledvance-Slim Plafón-Cuadrado
------------------------	-----------	-----	--

Para la unidad enlace pulmón y la subunidad de eyección, se necesitaron elementos que se encarguen del control del desplazamiento de objetos y que registren su movimiento. Estos elementos se asocian al actuador respectivo, que generalmente es un motor con sensores internos o externos, dependiendo la aplicación. La **Tabla 18** muestra algunos de estos.

Tabla 18.

Recursos disponibles para control y registro del desplazamiento

Requerimientos	Recursos disponibles	Tipo	Componente
Control del desplazamiento de objetos	Drivers de control	Para Motores DC	L298N / Relé
		Para Servomotores	PCA9685
		Para motores PAP	DVR8825 TB6560 TB6600
Registro de movimiento	Sensor de objetos	Fotoeléctrico	LM393
		Inductivo	LJ12A3-4-Z/BX

Para la unidad de control y automatización, se precisó de elementos que se ocupen principalmente del control general del sistema y que permitan: la visualización de datos, la activación de cargas y la alimentación eléctrica del sistema. Estos se muestran en la **Tabla 19**.

Tabla 19.

Recursos disponibles para control general del sistema

Requerimientos	Recursos disponibles	Tipo	Componente
Control general del sistema	Tarjetas de desarrollo	Microcontrolador	Arduino-UNO Raspberry Pi-4-Model B Espressif-ESP32-CAM (Tarjeta) Digispark-ATTINY85
Visualización de datos	Pantallas	LCD	Waveshare-HDMI LCD(B)-5inch Nextion-NX8048T050
Activación de cargas	Relé	Simple Doble	Módulo Relé-1 Canal Módulo Relé-2 Canales
Alimentación de cargas	Fuentes	AC DC	Regleta Cortapicos ATX 450W Transformador Fuente-JC-60-12 Fuente 24V/5A

Con los elementos presentados, se consideró un análisis integrador secuencial para la selección de los componentes respectivos, como se explica a continuación.

5.4.3.2.1 Reconocimiento de color. De lo expuesto en el marco teórico y según Corona

et al. (2014), el método de captación de los sensores de color se limita al promedio de la irradiación de color captada desde el objeto en las inmediaciones del sensor, es decir, reconocerá como un solo color la combinación de los colores del fondo y del objeto si este último no se encuentra totalmente alineado con el sensor.

Por otro lado, el método de los sensores de visión de formar imágenes mediante píxeles, permite la detección del objeto y obviar el fondo, por lo que admite un rango mayor de distancia que los sensores de color para el posicionamiento y captura de la coloración de los objetos. Con respecto a su tipo de tecnología, los elementos CMOS poseen mayor velocidad de respuesta frente a los CCD.

De acuerdo a estas características y considerando el costo (ver **Anexo 5**, sensores de visión), el componente factible para este proyecto correspondió a la Raspberry Pi-Cámara.

5.4.3.2.2 Control general del sistema. Como consecuencia de la selección del sensor de visión, para su funcionamiento se requiere de la tarjeta de desarrollo proporcionada por su fabricante, este componente es la tarjeta Raspberry Pi-4-Model B.

Al comparar las características de esta tarjeta de desarrollo con el resto de opciones, se puede destacar la mayor disponibilidad de pines de entrada y salida (pines I/O), así como una frecuencia de trabajo superior. Esto se puede notar en la **Tabla 10**, en el marco teórico.

Con respecto al lenguaje de programación que utiliza esta tarjeta, se puede destacar las características de ser de alto nivel, interpretado, extensible, multiparadigma y de tipado dinámico débil, como lo indica Guzmán (2023) y se detalla en el marco teórico. Además de disponer de la biblioteca exclusiva de visión artificial Open CV, la cual se encuentra solo disponible para el lenguaje Python, por lo que el resto de tarjetas no tienen acceso a esta.

En base a las características señaladas y considerando el costo (ver **Anexo 5**, tarjetas de desarrollo), la tarjeta Raspberry Pi-4-Model B se alineó con los requerimientos para este proyecto.

5.4.3.2.3 Iluminación de objetos. Para evitar interferencias de color en la captura de la imagen, se consideró el uso de iluminación del tipo luz blanca, como lo indica Ramos et al., (2010), cuya temperatura de color corresponde entre 5000 K y 6500 K. Tomando en cuenta que la iluminación se requirió ubicarse cerca del sensor de visión para no deslumbrarlo, la mejor opción fue disponer de un elemento con un soporte con las menores dimensiones posibles.

Por lo tanto, el componente que se ajustó con estas características es el foco LED dicroico de la marca Maviju, cuyas características se detallan en el **Anexo 5** (bombillas).

5.4.3.2.4 Control del desplazamiento de objetos. Los drivers requeridos por la tarjeta

de desarrollo para el manejo de motores, como se indica en el marco teórico y se detalla en el **Anexo 5** (drivers de control), dependieron de la función que cumplen, de donde se planteó:

- Para un movimiento constante, en un solo sentido y poca exigencia de carga: el uso de un motor DC con un módulo de relé.
- Para un movimiento alternativo, con control de posición y poca exigencia de carga: el uso de servomotores con el driver múltiple de control PCA9685.
- Para un movimiento con control de velocidad y alta exigencia de carga: el uso de un motor PAP con el driver para el manejo tolerante de corriente TB6560.

5.4.3.2.5 Registro de movimiento. Para controlar la posición de los elementos en la cadena de rodillos, se consideró el frecuente uso de materiales metálicos para su fabricación, por lo que la opción es el uso de un sensor del tipo fotoeléctrico, a estos corresponde el componente LM393, cuyas características se presentan en el **Anexo 5** (sensores de objetos).

5.4.3.2.6 Visualización de datos. Se planteó el uso de una pantalla táctil de cinco pulgadas (tamaño de un celular promedio), la cual permite tanto visualizar las imágenes captadas por el sensor de visión, así como servir de interfaz para el control por el usuario.

Los componentes disponibles en el mercado presentan características de funcionamiento muy similares, de las cuales por su costo se decantó por la pantalla Waveshare-HDMI LCD(B)-5inch, cuyas características se presentan en el **Anexo 5** (pantallas).

5.4.3.2.7 Activación de cargas. Conforme la tarjeta de desarrollo previamente seleccionada, al tener como característica el manejo de voltajes máximos de 3.3V con 16mA por pin, para la activación de cargas del tipo on-off se requiere de un relé. De los elementos previamente seleccionados se tiene el foco LED y el motor DC que se manejan como cargas de este tipo.

En el mercado se dispone de módulos con la electrónica adecuada para la conexión entre la tarjeta de desarrollo y las cargas, de los cuales se escogió un módulo de relé doble, donde el canal 1 se ocupa para el foco LED y el canal 2 para el motor DC. Las características de este componente se presentan en el **Anexo 5** (sensores de objetos).

5.4.3.2.8 Alimentación de cargas. Al disponer de distintos elementos electrónicos que pueden tener o no su propia fuente de alimentación, se organizó de la siguiente manera:

- Para cargas DC: una fuente general que pueda proveer voltajes de 3.3V, 5V y 12V para la tarjeta de desarrollo, los drivers y actuadores que lo requieran.
- Para carga AC: los elementos que dispongan de fuentes propias de fábrica se conectarán a una toma general.

En el caso de las cargas DC, estas características correspondieron con el modelo de fuente del tipo ATX 450W, como caso especial está el motor PAP que necesitó de una fuente de 24V/5A propia.

En el caso de las cargas AC, se optó por un cortapicos que unirá todas las fuentes para conectarlas a una toma general.

5.4.3.3 Propuesta de diseño electrónico. Se planteó el bosquejo del funcionamiento electrónico integrado de los elementos seleccionados para el prototipo, como se muestra en la **Figura 28** y a continuación se detalla.

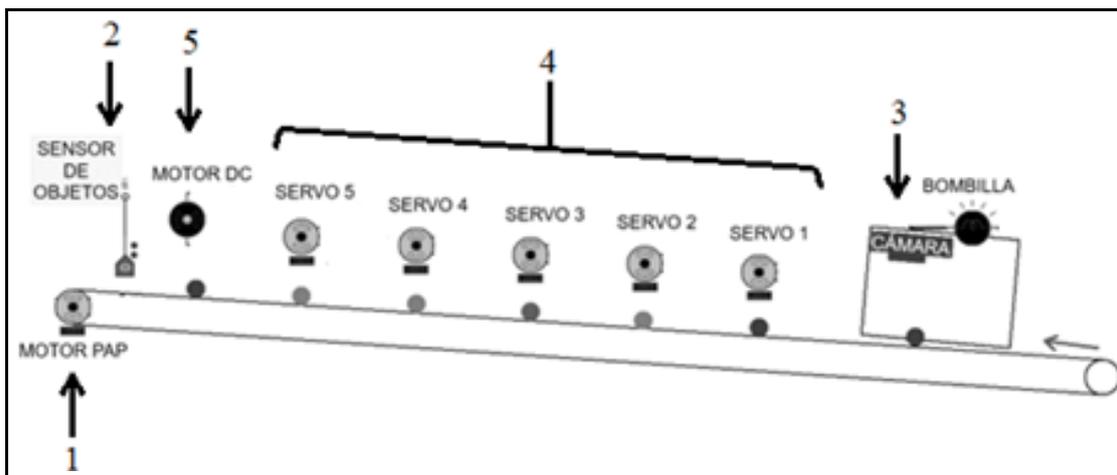


Figura 28. Funcionamiento de elementos electrónicos.

1. El motor desplaza los frutos del cafeto a través de las unidades de procesamiento.
2. El sensor de objetos mantiene la cadencia del movimiento del motor.
3. La cámara captura la imagen del fruto del cafeto presentada al desplazarse.
4. Los eyectores se activan de acuerdo al procesamiento de la tarjeta de desarrollo.
5. El motor en movimiento continuo evacúa elementos sobrantes.

Se vinculó los elementos electrónicos a través de la programación del circuito de control siguiendo el esquema mostrado en la **Figura 29** y tomándose las siguientes consideraciones: encendido por medio de un pulsador modular, control por medio de una pantalla táctil, apagado normal automático y un apagado de emergencia a través de un botón tipo hongo.

Para el apagado normal automático, se diseñó un circuito que se nombró *Módulo A*, el cual actúa una vez que la tarjeta de desarrollo envía la señal de apagado por medio de programación. En la **Figura 30** se esquematizan las etapas de funcionamiento de este circuito.

Mediante el software Proteus, se desarrollaron los esquemas del circuito de control general y del Módulo A, de modo que se simuló su funcionamiento y se presentó como se muestra en el **Anexo 6** y **Anexo 7**. A continuación, se describen.

Para el circuito de control general, la simulación consistió en una primera parte al funcionamiento conjunto de sensores y accionamientos, donde se probaron algunas estrategias mediante programación para solventar el esquema previamente planteado; y en segunda instancia, al funcionamiento del botón de emergencia, que se limitó al circuito de encendido y apagado.

Para el Módulo A, se simularon las etapas que lo componen, verificando su funcionamiento al momento de recibir las señales de la tarjeta de desarrollo. Posteriormente, se generó el modelo de la placa de circuito impreso (PCB) para su fabricación, culminando en el modelo en tres dimensiones con la disposición final de sus elementos.

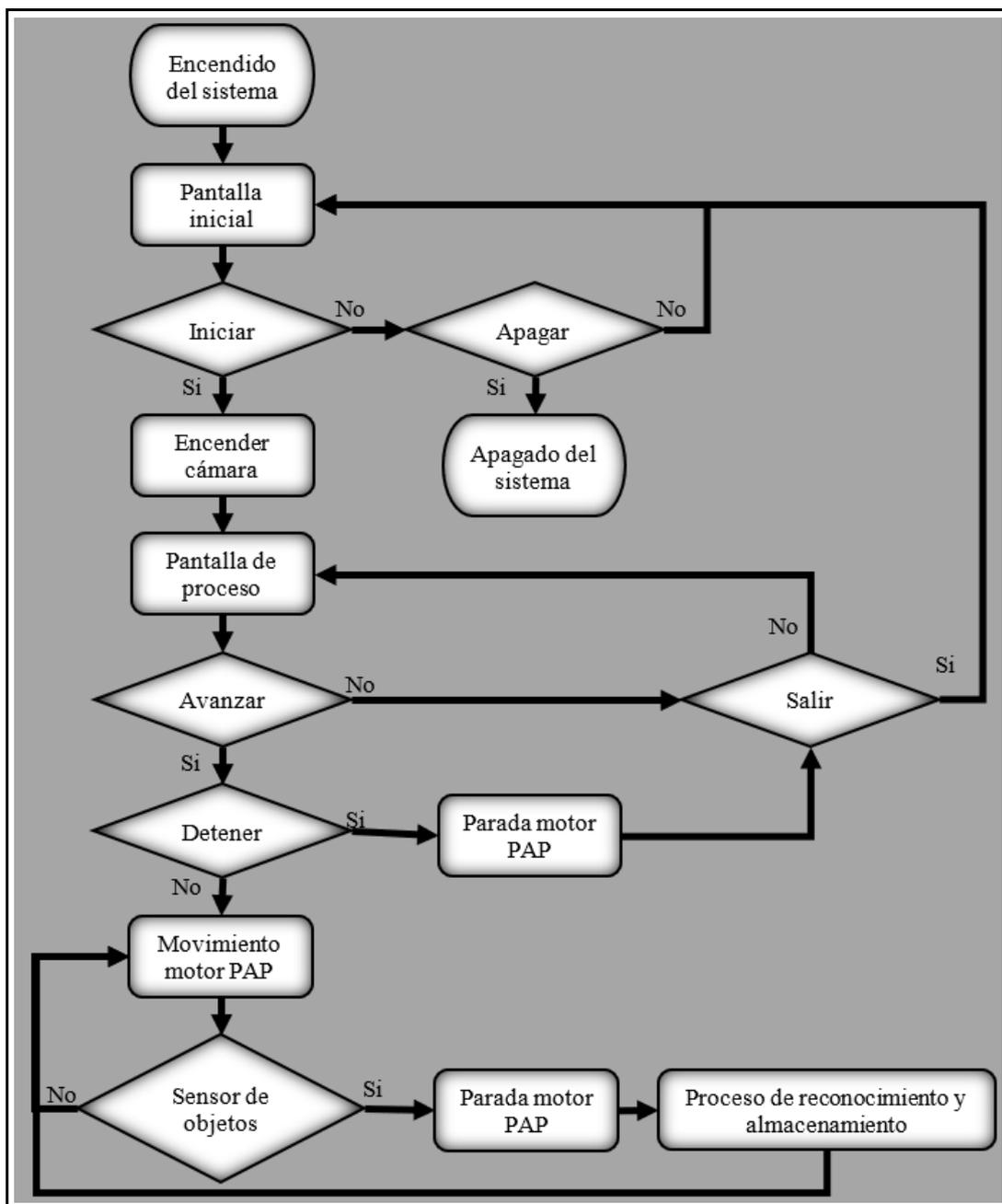


Figura 29. Esquema de programación del circuito de control.

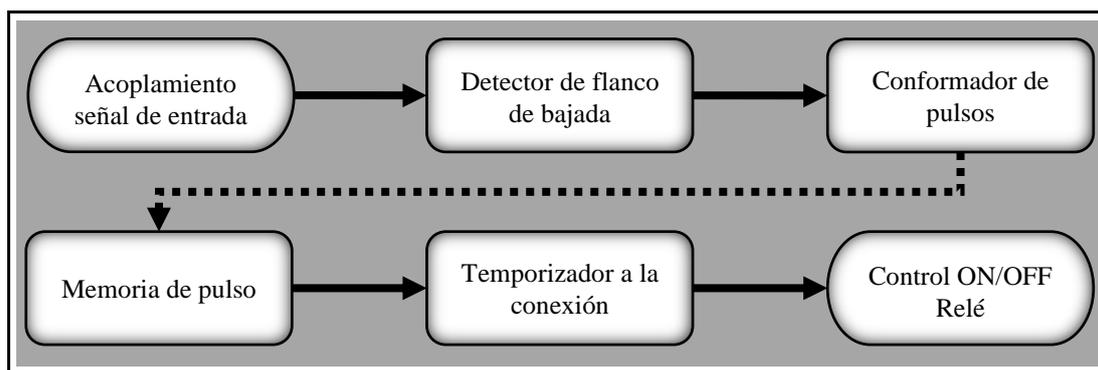


Figura 30. Esquema de las etapas de funcionamiento del Módulo A.

5.4.4 Diseño mecánico

5.4.4.1 Requerimientos mecánicos. Según la prioridad de diseño y considerando el planteamiento electrónico, se analizaron los requerimientos mecánicos de los componentes propuestos para el prototipo, como se muestra en la **Tabla 20**.

Tabla 20.

Análisis de requerimientos mecánicos

P.	Unidad-Subunidad	Componentes propuestos	Requerimientos mecánicos	
			Principales	Secundarios
1	Selección-Censado	Estructura prismática rectangular con sensores	Soporte de elementos electrónicos	Evitar el ingreso de luz
2	Enlace pulmón	Cadena de rodillos	Desplazamiento lineal de los frutos	Uso de motor PAP. Acorde a la subunidad de censado.
3	Posicionamiento	Alimentador estático	Ubicación individual de los frutos	Acorde a la unidad enlace pulmón
4	Autonomía	Contenedor	Recepción y abastecimiento de los frutos	Acorde a la unidad de posicionamiento
5	Selección-Eyección	Impulsores mecánicos	Separación de los frutos	Acorde a la unidad enlace pulmón
6	Control y automatización	Tablero de control	Soporte de elementos electrónicos	---

5.4.4.2 Diseño de componentes. Se calcularon los principales elementos de los componentes mecánicos siguiendo el orden de prioridad y de acuerdo a los requerimientos planteados, como se describe a continuación.

5.4.4.2.1 Subunidad de censado. Correspondió a una estructura prismática rectangular hueca que aloja a los elementos electrónicos que se muestran en la **Figura 31**.

Elementos electrónicos	Características		Imagen referencial
Raspberry Pi-Cámara	Tamaño:	20x25x9 mm	
	Soporte:	4 tornillos M2	
	Distancia al objetivo:	100 mm	
	Masa:	10 g	
	Adicional:	Cable plano	
Foco Led Dicroico	Tamaño:	50x50x47 mm	
	Soporte:	Base cuadrada 87x87 mm	
	Masa:	548,5 g	
	Adicional:	Gancho interno	

Figura 31. Elementos electrónicos de la subunidad de censado.

Se bosquejó la disposición tentativa de los elementos como se indica en la **Figura 32**.

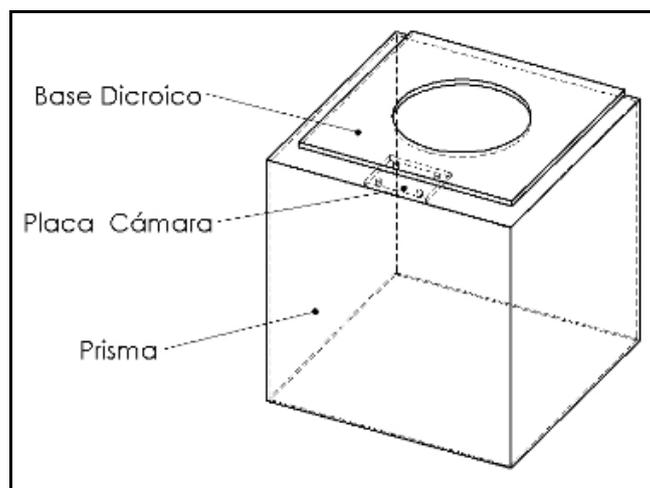


Figura 32. Bosquejo de la subunidad de censado.

Las dimensiones en bruto del prisma hueco, conforme el soporte del foco dicroico y la distancia al objetivo de la cámara, resultan de 100 mm tanto de lado exterior como de altura.

La cara superior, dispone de una perforación de 50 mm de diámetro para permitir la iluminación del foco led, del lado interno se ubica el módulo de la cámara, por lo tanto, se planteó hacerla separable del cuerpo, de manera que posibilite la instalación y aseguramiento de los elementos electrónicos.

Se propuso que este componente se fije a un bastidor y que el material para su fabricación, por disponibilidad, costo y considerando la etapa en la que se encuentra el proceso (selección de los frutos), sea de acero galvanizado de 0,70mm de espesor, prescindiendo de un material de grado alimenticio como el acero inoxidable.

Los datos que se recopilaron en este punto son:

- Largo y ancho de la base del prisma: $B_{L.pr} = 100$ mm
- Alto del prisma: $L_{pr} = 100$ mm
- Material: Lámina de acero galvanizado
 - Espesor: $e_{pr} = 0,70$ mm

- Esfuerzo de fluencia: $\sigma_f = 179$ MPa
- Módulo de elasticidad: $E = 200$ GPa
- Masa de los elementos electrónicos: $m_{elec} = 0,5585$ kg

Siguiendo la metodología detallada en el marco teórico, presentada por Hibbeler (2011) para columnas, se realizó el cálculo de la resistencia al peso de los componentes en el prisma hueco como se muestra a continuación:

1. *Factor de longitud efectiva:* según la disposición geométrica y la **Figura 16**, corresponde a una articulación del tipo: un extremo fijo y el otro libre, donde se asigna el factor $K = 2$.
2. *Relación de esbeltez efectiva:* de acuerdo con el **Anexo 21**, para la sección transversal de un tubo cuadrado, el área es:

$$A_s = B_{L.pr}^2 - (B_{L.pr} - 2 \cdot e_{pr})^2 \text{ [mm}^2\text{]}$$

$$A_s = 100^2 - (100 - (2 \cdot 0,70))^2 = 278,04 \text{ [mm}^2\text{]}$$

Y el radio de giro es:

$$r_g = \sqrt{\frac{B_{L.pr}^4 - (B_{L.pr} - 2 \cdot e_{pr})^4}{12 \cdot A_s}} \text{ [mm]}$$

$$r_g = \sqrt{\frac{100^4 - (100 - (2 \cdot 0,70))^4}{12 \cdot 278,04}} = 40,54 \text{ [mm]}$$

Aplicando la **Ecuación 24**, se obtiene:

$$Re_{efec} = \frac{K \cdot L_{pr}}{r_g} = \frac{2 \cdot 100}{40,54} = 4,93$$

3. *Relación de esbeltez crítica:* aplicando la **Ecuación 25**, se obtiene:

$$Re_{crit} = \sqrt{\frac{2 \cdot \pi^2 \cdot E}{\sigma_f}} = \sqrt{\frac{2 \cdot \pi^2 \cdot 200 \cdot 10^3}{179}} = 148,51$$

4. *Tipo de columna y esfuerzo permisible:* se realiza la comparación:

$$Re_{efec}: 4,93 < Re_{crit}: 148,51$$

Por lo que corresponde a una columna corta y se calculó el esfuerzo permisible según la **Ecuación 26**, de donde se obtuvo:

$$\sigma_{perm} = \frac{\left[1 - \frac{(Re_{efec})^2}{2 \cdot (Re_{crit})^2}\right] \cdot \sigma_f}{\left[\frac{5}{3}\right] + \left[\frac{3}{8} \cdot \frac{Re_{efec}}{Re_{crit}}\right] - \left[\frac{(Re_{efec})^3}{8 \cdot (Re_{crit})^3}\right]} \text{ [MPa]}$$

$$\sigma_{perm} = \frac{\left[1 - \frac{(4,93)^2}{2 \cdot (148,51)^2}\right] \cdot 179}{\left[\frac{5}{3}\right] + \left[\frac{3}{8} \cdot \frac{4,93}{148,51}\right] - \left[\frac{(4,93)^3}{8 \cdot (148,51)^3}\right]} = 106,55 \text{ [MPa]}$$

5. *Aplicación de la fórmula de interacción:* para este caso solo existieron cargas axiales generadas por el peso de los elementos electrónicos, esto es:

$$P_{elec} = 9,81 \cdot m_{elec} = 9,81 \cdot 0,5585 = 5,47 \text{ [N]}$$

Se aplicó la **Ecuación 28**, y se obtuvo:

$$\frac{P_{elec}/A_s}{(\sigma_a)_{perm}} \leq 1$$

$$\frac{5,47 / 278,04}{106,55} \leq 1 \rightarrow 0,000185 \leq 1$$

Por lo tanto, cumple con la condición para evitar la falla.

Se tuvo presente que los detalles internos de la estructura favorezcan el enfoque de la cámara, cuenten con cortes laterales para la entrada y salida de los frutos del cafeto, además de soportes para ajustarse a un bastidor.

5.4.4.2 Unidad enlace pulmón. Los requerimientos señalaron que esta unidad respondía a una máquina de transporte continuo, como lo indica Matos (2011). Considerando el modelo desarrollado por Herrera & Medina (2015), en donde para el transporte de frutos se utiliza una banda de rodillos de caucho, para el presente proyecto y en busca de mayor robustez se propuso el uso de una cadena de acero con rodillos de PVC.

Se inició bosquejando la posición del fruto en los elementos para su transporte, como se muestra la **Figura 33a**. A partir de esto, se tomó en cuenta el diámetro promedio de los frutos del cafeto (13,10 mm) para considerar las dimensiones de los elementos, como se muestra en la **Figura 33b**. Por último, se presentó un bosquejo de los elementos del transportador con órgano flexible, como muestra la **Figura 33c**.

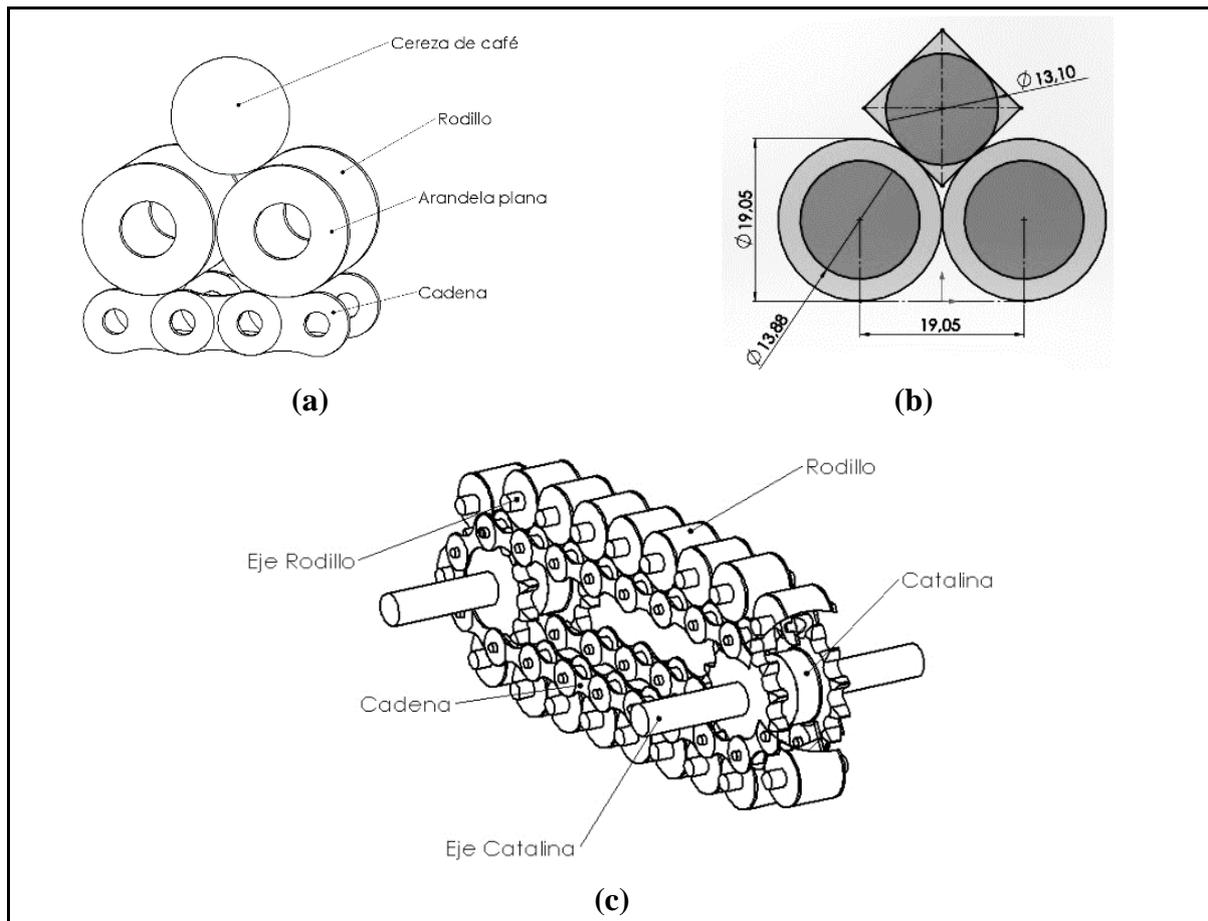


Figura 33. Bosquejo unidad enlace pulmón.

En el bosquejo se consideró que la cadena de rodillos transporte los frutos en los espacios intermedios entre rodillos, permita conservar una distancia de separación mínima entre frutos y, además, sea acorde a la subunidad de censado previamente diseñada. Por lo tanto, los elementos disponibles comercialmente que se plantea usar, por concordar geoméricamente según las dimensiones expuestas en la **Figura 33b**, son los siguientes:

- Cadena ANSI paso 35 (3/8”), 156 eslabones (1,486 m), con arandelas planas de 5/16” (18,75mm de diámetro exterior) soldadas pasando un eslabón, esto para compensar la distancia entre los centros de los rodillos. Los detalles de la cadena se muestran destacados en el **Anexo 8**.
- Rodillos de tubo PVC de 1/2”, roscado NPS, diámetro externo 3/4”, longitud 20mm, con alma de tuercas sin rosca y arandelas delgadas exteriores, esto para compensar el diámetro interno holgado del tubo y permitir una tolerancia para el giro del rodillo. La masa del conjunto individual es de 16,03 g.
- Pernos de 5/16” x 2” con tuercas de seguridad como ejes de los rodillos, estos concuerdan con el diámetro interno de las arandelas y a la longitud de los rodillos.

La masa del perno es de 18 g y de la tuerca de seguridad 5 g.

- Catalinas paso 35 (3/8”), 12 dientes, con una distancia entre ejes de 686 mm, esto en correspondencia al aprovechamiento de la cadena previamente seleccionada. Los detalles se muestran destacados en el **Anexo 9**.
- Ejes para las catalinas de varilla roscada de 5/16” (7,9 mm), con una longitud de 170 mm y fijación con tuercas de seguridad, esto con el fin de cambios rápidos si se requiere en la posición de los elementos a lo largo del eje. Los detalles se muestran destacados en el **Anexo 10**.

Buscando mantener solo un fruto en cada espacio intermedio entre los rodillos a lo largo de la cadena mientras se mueve, se aprovechó de la propiedad del ángulo de reposo de los frutos del cafeto; es así que los frutos que no se encuentren en el espacio mencionado se desplazan hacia la parte baja de la cadena por gravedad. Este método se basa en el sistema de clasificación por medio de rodillos desarrollado por la Corporación Industrial Urapan, (2015b).

Para lograrlo se planteó realizar el transporte de manera inclinada a un ángulo de 20° con respecto a la horizontal, la cadena se apoyó en una placa de acero galvanizado para evitar que se cuelgue y mantener el ángulo a lo largo del recorrido.

Tomando en cuenta el prototipo de Herrera & Medina (2015), donde usan una velocidad para el transporte de 1,2 m/min, para este proyecto se propuso la velocidad lineal de 1 m/min.

Los datos que se recopilaron en este punto son:

- Peso fresco máximo de los frutos de café: $m_m = 1,99$ g
- Separación entre cargas: $L_1 = 19,05$ mm
- Distancia del ramal de trabajo: $L_2 = 686$ mm
- Longitud de desarrollo de la cadena: $L_3 = 1,486$ m
- Masa del conjunto rodillo individual: $m_1 = 16,03$ g
- Cantidad de conjuntos rodillo: $N_1 = 78$
- Masa del perno eje rodillo: $m_2 = 18$ g
- Cantidad de pernos eje rodillo: $N_2 = 78$
- Masa de una tuerca de seguridad: $m_3 = 5$ g
- Cantidad de tuercas de seguridad: $N_3 = 78$
- Masa de una arandela soldada: $m_4 = 1,92$ g
- Cantidad de arandelas soldadas: $N_4 = 156$
- Ángulo de inclinación del transportador: $\alpha = 20^\circ$
- Cantidad de cadenas: $N_c = 2$

- Cadena: DIN ISO 06C-1 / ANSI 35
 - Resistencia máxima a la tracción: $T_c = 7,90$ kN
 - Masa por unidad de longitud: $p_c = 0,33$ kg/m
- Velocidad de traslación de la cadena: $v = 1$ m/min = 0,017 m/s
- Catalinas: 35B12
 - Número de dientes: $Z = 12$
 - Paso: $P = 3/8$ " = 9,525 mm
 - Peso: $P_5 = 0.20$ lbf = 0,89 N
- Ejes catalinas: Varilla roscada
 - Material: Acero SAE grado 2
 - Esfuerzo de fluencia (prueba): $\sigma_f = 33$ Kpsi = 227 MPa
 - Esfuerzo de ruptura: $\sigma_r = 60$ Kpsi = 414 MPa
 - Momento torsional máximo (Cs en el catálogo): $T_{in.máx} = 16,1$ Nm
 - Diámetro útil: $d_u = 5,97$ mm
 - Diámetro externo: $d_e = 7,9$ mm
 - Módulo de elasticidad: $E = 210$ GPa
 - Coeficiente de Poisson: $\gamma = 0,27$

Siguiendo la metodología detallada en el marco teórico, presentada por Rodríguez (2019), para la determinación del órgano de tracción tipo cadena, se realizó el cálculo de los elementos correspondientes como se muestra a continuación:

1. *Tipo de transportador*: de los requerimientos presentados y la **Figura 14**, corresponde a un transporte inclinado con cadenas arrastrantes.
2. *Peso del material a transportar*: aplicando la **Ecuación 1**, se obtuvo:

$$p_m = \frac{9,81 \cdot m_m}{L_1} = \frac{9,81 \cdot (1,99 \cdot 10^{-3})}{(19,05 \cdot 10^{-3})} = 1,02 \text{ [N/m]}$$

Aplicando la **Ecuación 2**, se obtuvo:

$$P_m = p_m \cdot L_2 = 1,02 \cdot (686 \cdot 10^{-3}) = 0,70 \text{ [N]}$$

3. *Peso de los accesorios de la cadena*: aplicando la **Ecuación 3**, se obtuvo respectivamente de los siguientes accesorios: conjunto rodillo, perno, tuerca de seguridad y arandela soldada:

$$P_1 = 9,81 \cdot m_1 \cdot N_1 = 9,81 \cdot (16,03 \cdot 10^{-3}) \cdot 78 = 12,27 \text{ [N]}$$

$$P_2 = 9,81 \cdot m_2 \cdot N_2 = 9,81 \cdot (18 \cdot 10^{-3}) \cdot 78 = 13,77 \text{ [N]}$$

$$P_3 = 9,81 \cdot m_3 \cdot N_3 = 9,81 \cdot (5 \cdot 10^{-3}) \cdot 78 = 3,83 \text{ [N]}$$

$$P_4 = 9,81 \cdot m_4 \cdot N_4 = 9,81 \cdot (1,92 \cdot 10^{-3}) \cdot 156 = 2,94 \text{ [N]}$$

Aplicando la **Ecuación 4**, el peso conjunto de accesorios obtenido es:

$$P_a = \sum_{i=1}^4 P_i = 12,27 + 13,77 + 3,83 + 2,94 = 32,81 \text{ [N]}$$

4. *Coefficiente de rozamiento*: según la **Tabla 3**, correspondió al coeficiente dinámico de cadenas de acero sobre guías de acero, en una superficie seca:

$$fr_d = 0,30$$

Usando la **Ecuación 5**, se obtuvo el coeficiente de rozamiento estático:

$$fr_e = 2,25 \cdot fr_d = 2,25 \cdot 0,30 = 0,68$$

5. *Factor de servicio*: según la **Tabla 4**, se obtuvo los siguientes valores de los factores de servicio individuales:

$$FS_1 = 1; FS_2 = 1; FS_3 = 1; FS_4 = 1,3; FS_5 = 1$$

Usando la **Ecuación 6**, se obtuvo:

$$FS_g = \prod_{i=1}^5 FS_i = 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1,3 \cdot 1 = 1,3$$

6. *Fuerza de tracción individual preliminar*: usando la **Ecuación 7**, se obtuvo:

$$T_p = \frac{[\cos(\alpha) \cdot (P_m + P_a) \cdot fr_e + \sin(\alpha) \cdot P_a] \cdot FS_g}{N_c} \text{ [N]}$$

$$T_p = \frac{[\cos(20) \cdot (0,70 + 32,81) \cdot 0,68 + \sin(20) \cdot 32,81] \cdot 1,3}{2}$$

$$T_p = 21,21 \text{ [N]}$$

7. *Selección de la cadena*: usando la **Ecuación 8**, se obtuvo:

$$T_r = 8 \cdot T_p = 8 \cdot 21,21 = 169,68 \text{ [N]}$$

Comparando con el T_c de la cadena seleccionada:

$$T_r: 169,68 \text{ [N]} \leq T_c: 7900 \text{ [N]}$$

Por lo que cumple la condición del método y se procedió a usar la **Ecuación 9**, de donde se obtuvo:

$$P_c = 9,81 \cdot p_c \cdot L_3 = 9,81 \cdot 0,33 \cdot 1,486 = 4,81 \text{ [N]}$$

Aplicando la **Ecuación 10**, se obtuvo:

$$T_d = \frac{[\cos(\alpha) \cdot (P_m + P_a + N_c \cdot P_c) \cdot fr_e + \sin(\alpha) \cdot (P_a + N_c \cdot P_c)] \cdot F_{Sg}}{N_c} \quad [\text{N}]$$

$$T_d = \frac{[\cos(20)(0,7 + 32,81 + 2 \cdot 4,81)0,68 + \sin(20)(32,81 + 2 \cdot 4,81)]1,3}{2}$$

$$T_d = 27,34 \quad [\text{N}]$$

Aplicando la **Ecuación 11**, se obtuvo:

$$T_{r2} = 8 \cdot T_d = 8 \cdot 27,35 = 218,8 \quad [\text{N}]$$

Se realizó la verificación:

$$T_c: 7900 \quad [\text{N}] \geq T_{r2}: 218,8 \quad [\text{N}]$$

Por lo tanto, la selección es correcta y finaliza la etapa.

A continuación, se aplicó la metodología para la determinación del torque requerido por el transportador de cadenas, se realizó el cálculo como se muestra a continuación:

1. *Potencia en el eje motriz*: usando la **Ecuación 12**, se obtuvo:

$$N = T_d \cdot N_c \cdot v = 27,34 \cdot 2 \cdot 0,017 = 0,93 \quad [\text{W}]$$

2. *Velocidad angular*: usando la **Ecuación 13**, se obtuvo:

$$\omega = \frac{60 \cdot v}{Z \cdot P} = \frac{60 \cdot 0,017}{12 \cdot (9,525 \cdot 10^{-3})} = 8,9 \quad [\text{rpm}]$$

3. *Torque de diseño*: usando la **Ecuación 14**, se obtuvo:

$$M_{t.diseño} = \frac{60}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{N}{\omega} = \frac{60}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{0,93}{8,9} = 0,998 \approx 1,0 \quad [\text{N} \cdot \text{m}]$$

4. *Selección del motor*: de los motores PAP existentes en el medio, el que cumplió con el requerimiento de torque es el modelo HY57STH56-2804A, cuyas características se detallan en el **Anexo 11**. De donde, se tomó la característica del torque de anclaje o holding torque (Mecatrónica LATAM, 2021), que correspondió a:

$$M_t = 1,26 \quad [\text{N} \cdot \text{m}]$$

Este valor se tomó como torque definitivo y a las catalinas motrices por su disposición les correspondió el torque equivalente a la mitad de este, es decir:

$$M_{t.c} = 0,63 \quad [\text{N} \cdot \text{m}]$$

Con este valor finaliza esta etapa.

Para la unión de las catalinas y el eje (varilla roscada) se planteó realizarlo por medio de tuercas de seguridad, por lo que se usó la metodología detallada en el marco teórico, presentada por Maney (1947) y Mott (2006), para la tracción inicial en pernos.

Se realizó el cálculo como se muestra a continuación:

1. *Fuerza de apriete requerido:* con el objetivo de evitar el movimiento relativo entre elementos, se realizó el análisis considerando las fuerzas de rozamiento entre la superficie de las tuercas y de las catalinas, para esto se representó el diagrama de cuerpo libre en la **Figura 34**.

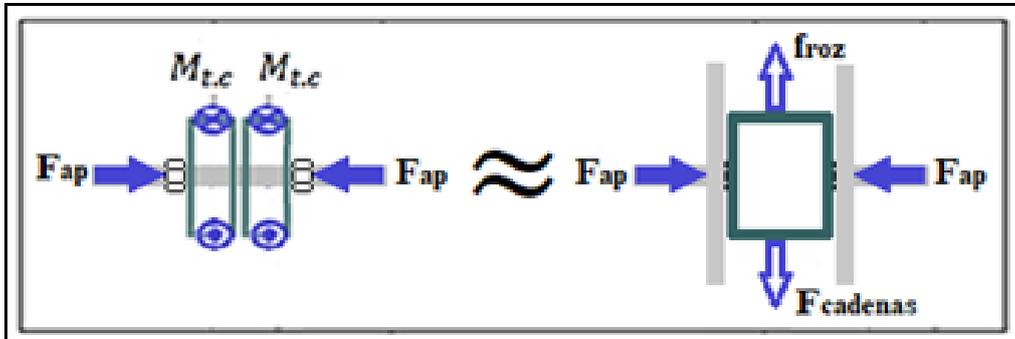


Figura 34. Diagrama de cuerpo libre de la unión de las catalinas.

Para la fuerza de rozamiento, se consideró el coeficiente general de rozamiento estático $\mu_{roz} = 0,74$, correspondiente a superficies de contacto acero-acero, y con la fuerza normal (F_{normal}), se obtuvo:

$$f_{roz} = \mu_{roz} \cdot F_{normal} = 2 \cdot \mu_{roz} \cdot F_{ap} \text{ [N]}$$

Del equilibrio de fuerzas se obtuvo:

$$f_{roz} = F_{cadenas} = T_d \cdot N_c \text{ [N]}$$

De la igualación de ecuaciones y despejando la fuerza de apriete (F_{ap}), se obtuvo:

$$F_{ap} = \frac{T_d \cdot N_c}{2 \cdot \mu_{roz}} = \frac{27,34 \cdot 2}{2 \cdot 0,74} = 36,95 \text{ [N]}$$

2. *Momento torsional:* se seleccionó el coeficiente $C = 0,20$, correspondiente a perno sin lubricar y aplicando la **Ecuación 31**, se obtuvo:

$$T_{in} = C \cdot d_u \cdot F_{ap} = 0,20 \cdot 5,97 \cdot 36,95 = 44,12 \text{ [Nmm]} = 0,044 \text{ [Nm]}$$

Comparando con el momento torsional máximo:

$$T_{in.m\acute{a}x}: 16,1 \text{ [Nm]} \geq T_{in}: 0,044 \text{ [Nm]}$$

Por lo tanto, la unión por tuercas a presión se consideró idónea para unir los elementos y evitar su movimiento relativo.

3. *Esfuerzo de tracción aplicado:* usando la **Ecuación 32**, se obtuvo:

$$\sigma_p = \frac{F_{ap}}{\frac{\pi \cdot d_u^2}{4}} = \frac{36,95}{\frac{\pi \cdot 5,97^2}{4}} = 1,32 \text{ [MPa]}$$

4. *Carga máxima de sujeción*: considerando el esfuerzo de prueba de la varilla roscada y aplicando la **Ecuación 33**, se obtuvo:

$$\sigma_{p.adm} = 0,75 \cdot \sigma_{p.prueba} = 0,75 \cdot 227 = 170,25 \text{ [MPa]}$$

5. *Verificación de la tracción axial*: se comparó el esfuerzo aplicado con el admisible:

$$\sigma_p: 1,32 \text{ [MPa]} \leq \sigma_{p.adm}: 170,25 \text{ [MPa]}$$

Por lo tanto, la varilla roscada cumple con las sollicitaciones y finaliza la etapa.

Siguiendo la metodología detallada en el marco teórico, presentada por Hamrock et al. (2000), para el diseño de árboles y ejes, se realizó el cálculo como se muestra a continuación:

1. *Tipo de sollicitación*: de la **Tabla 5**, correspondió a la sollicitación compuesta, cuyo método de resolución atiende al uso de las teorías de falla.
2. *Diagrama de cuerpo libre*: se representó en los planos x-z y x-y en la **Figura 35**.

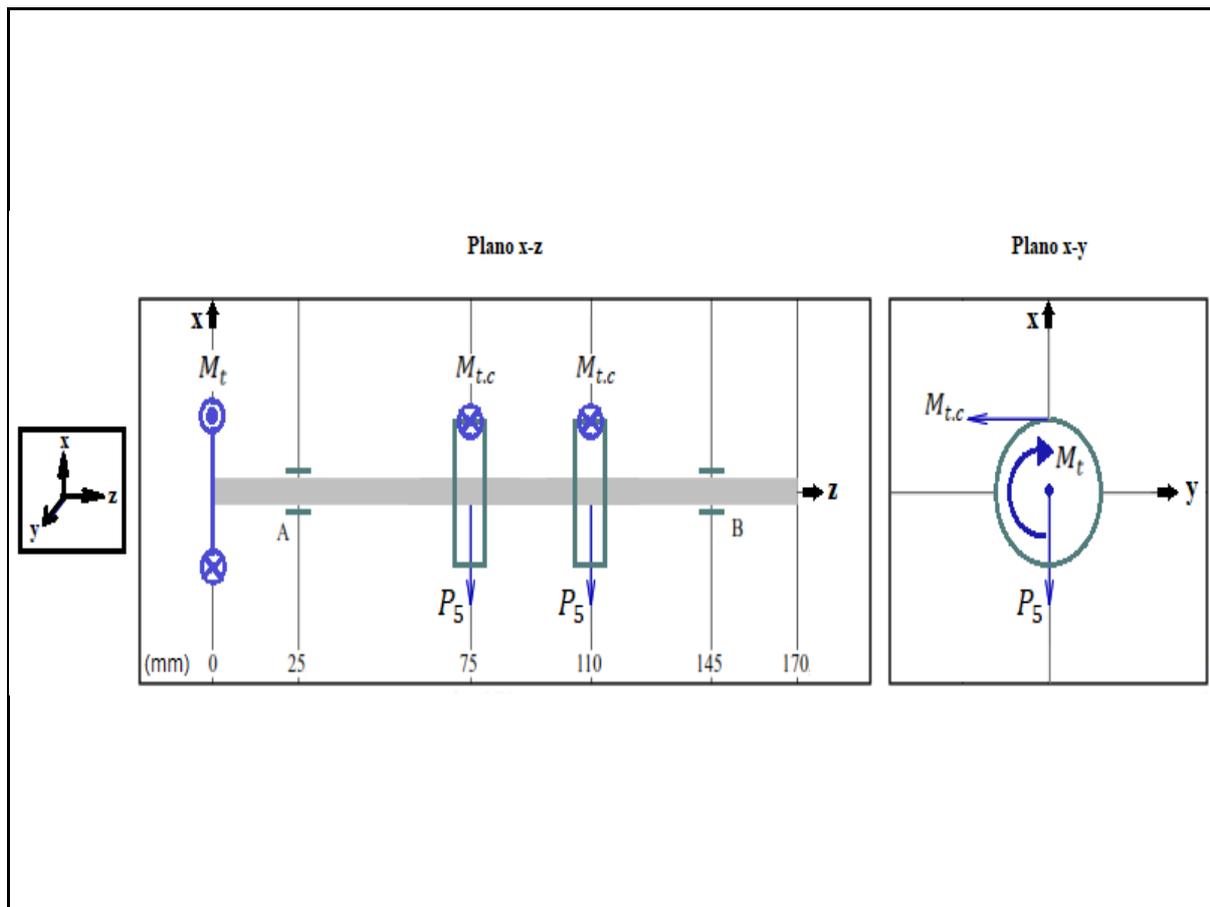


Figura 35. Diagrama de cuerpo libre de los elementos montados en eje.

3. *Diagramas de fuerza cortante y momento flector:* Para el plano $x-z$ se representó mediante la **Figura 36**.

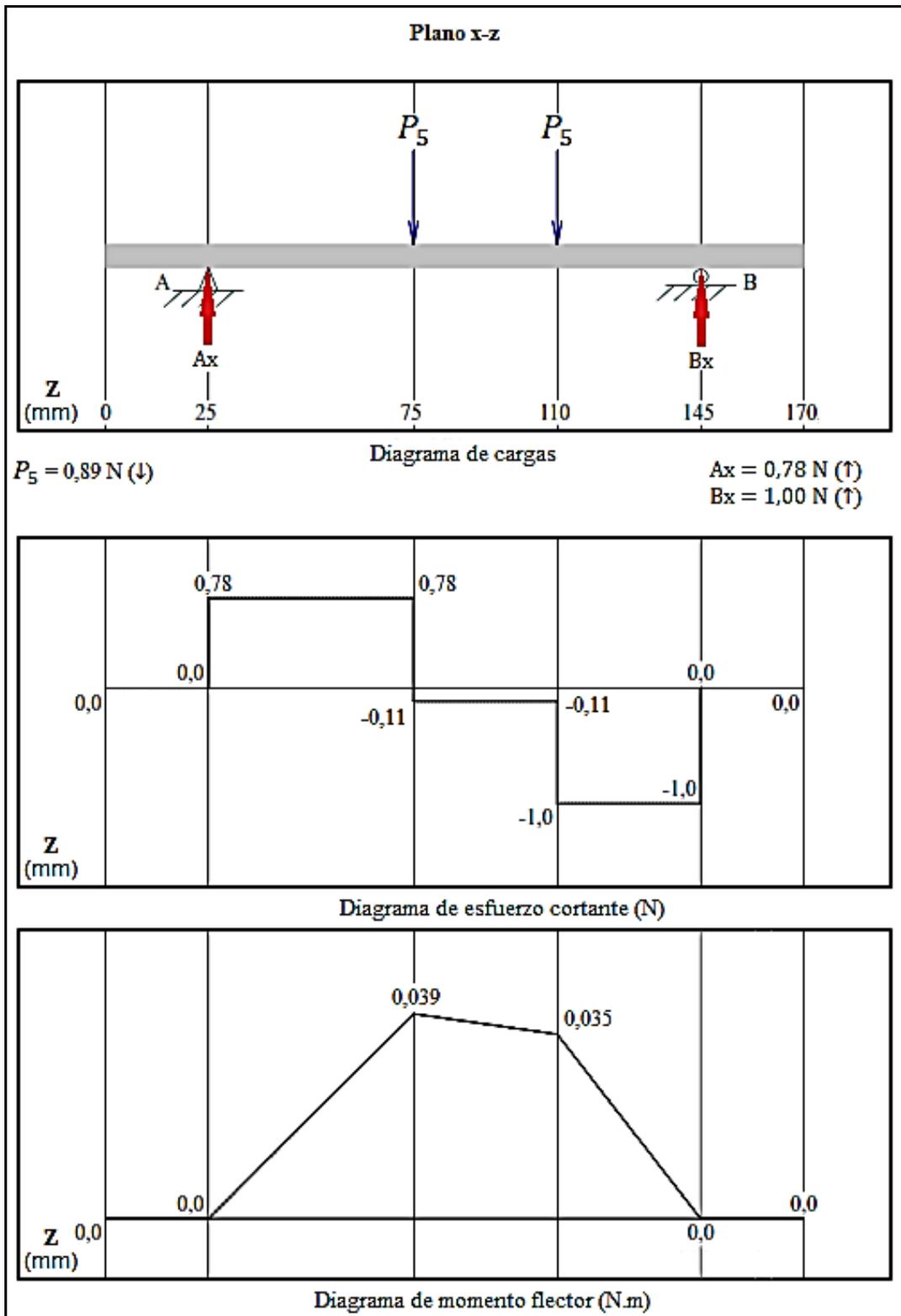


Figura 36. Diagramas para el plano $x-z$.

De aquí se obtuvo el momento máximo flector en el plano $x-z$:

$$M_x = 0,039 \text{ [N. m]} = 39 \text{ [N. mm]}$$

Para el plano y - z los diagramas de fuerza cortante y momento flector se representaron mediante la **Figura 37**.

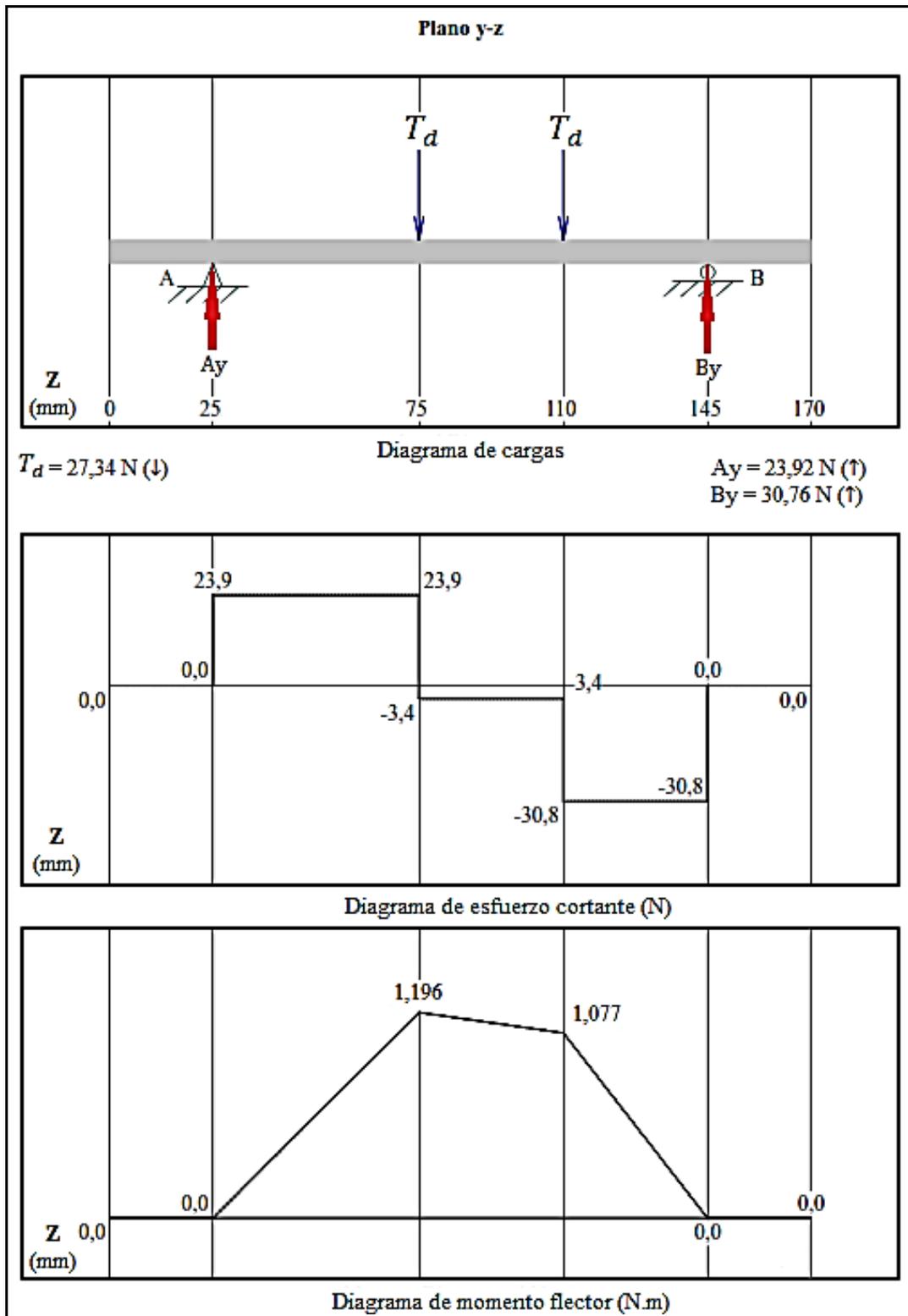


Figura 37. Diagramas para el plano y - z .

De aquí se obtuvo el momento máximo flector en el plano y - z :

$$M_y = 1,196 \text{ [N.m]} = 1196 \text{ [N.mm]}$$

4. *Diagrama de pares de torsión:* se consideró el balance de los pares de torsión y se representó mediante la **Figura 38**.

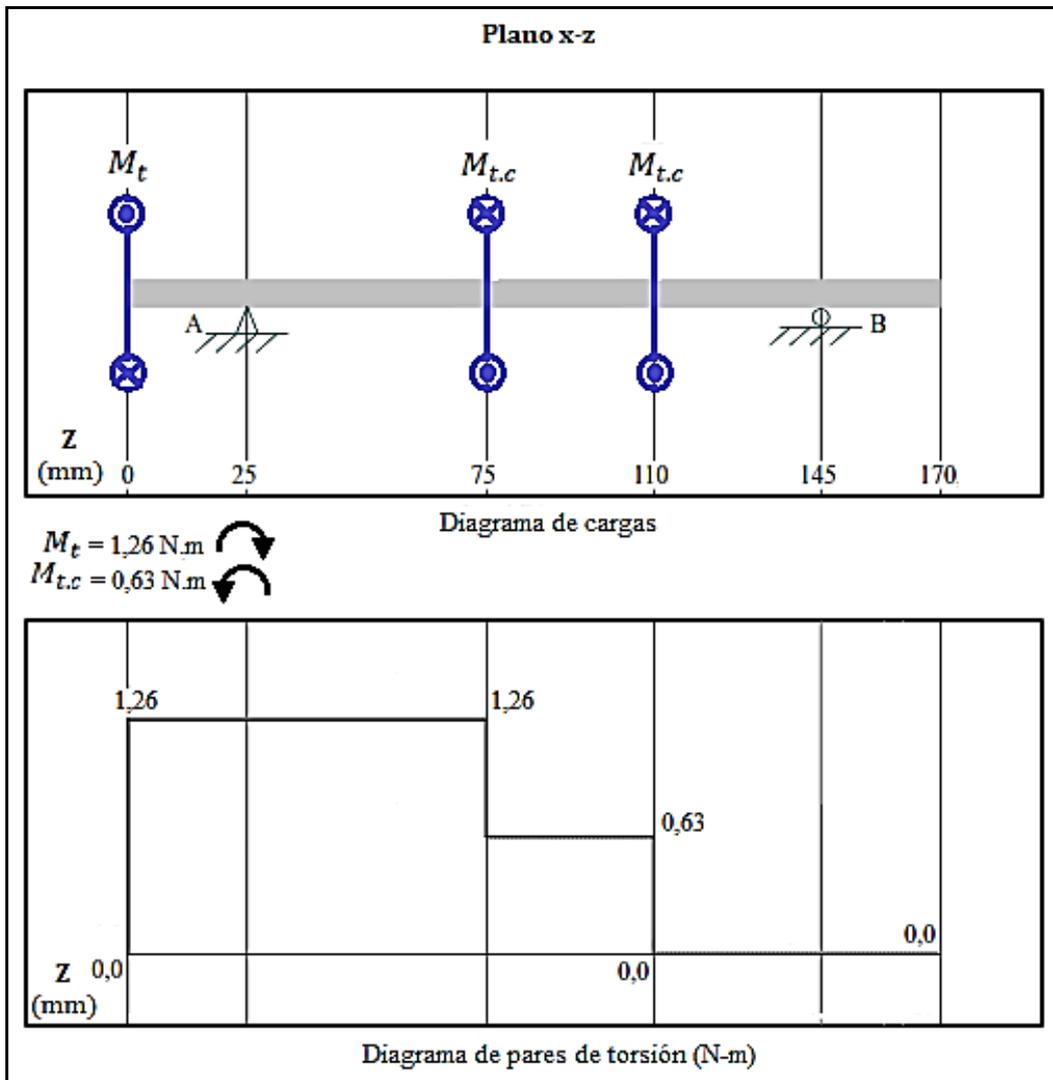


Figura 38. Diagrama de torsión.

De aquí se obtuvo que el momento máximo torsor es:

$$M_t = 1,26 \text{ [N.m]} = 1260 \text{ [N.mm]}$$

5. *Sección transversal crítica:* se ubicaron los valores mayores del momento de flexión y torsión a 75 mm desde el borde izquierdo del eje, por lo tanto, se consideró como la posición crítica.
6. *Coefficiente de seguridad:* según la **Tabla 6**, se consideraron los siguientes coeficientes parciales de seguridad:

$$n_1 = 1,25; n_2 = 1,2$$

Para el caso del tercer coeficiente parcial, dependió de la división como se muestra:

$$\frac{\sigma_f}{\sigma_r} = \frac{227}{414} = 0,548 \therefore n_3 = 1,6$$

Usando la **Ecuación 15**, se obtuvo:

$$n_s = \prod_{i=1}^3 n_i = 1,25 \cdot 1,2 \cdot 1,6 = 2,4$$

7. *Esfuerzo admisible*: aplicando la **Ecuación 16**, se obtuvo:

$$\sigma_{adm} = \frac{\sigma_f}{n_s} = \frac{227}{2,4} = 94,58 \text{ [MPa]}$$

8. *Esfuerzo equivalente*: aplicando la **Ecuación 17**, se obtuvo:

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\left(\frac{F_{ap}}{\pi \cdot d_u^2 / 4}\right)^2 + \left(\frac{M_x}{0,1 \cdot d_u^3}\right)^2 + \left(\frac{M_y}{0,1 \cdot d_u^3}\right)^2 + 4 \cdot \left(\frac{M_t}{0,2 \cdot d_u^3}\right)^2} \text{ [MPa]}$$

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\left(\frac{36,95}{\pi \cdot 5,97^2 / 4}\right)^2 + \left(\frac{39}{0,1 \cdot 5,97^3}\right)^2 + \left(\frac{1196}{0,1 \cdot 5,97^3}\right)^2 + 4 \cdot \left(\frac{1260}{0,2 \cdot 5,97^3}\right)^2}$$

$$\sigma_{eq} = 81,68 \text{ [MPa]}$$

En este punto se verificó que se cumpla con el esfuerzo admisible:

$$\sigma_{eq}: 81,68 \text{ [MPa]} \leq \sigma_{adm}: 94,58 \text{ [MPa]}$$

Por lo tanto, el eje soporta las solicitaciones de resistencia requeridas.

9. *Verificación de la rigidez torsional*: aplicando la **Ecuación 18**, se obtuvo:

$$J = \frac{\pi \cdot d_u^4}{32} = \frac{\pi \cdot (5,97)^4}{32} = 124,71 \text{ [mm}^4\text{]}$$

Aplicando la **Ecuación 19**, se obtuvo:

$$G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \gamma)} = \frac{210}{2 \cdot (1 + 0,27)} = 82,68 \text{ [GPa]}$$

Usando la **Ecuación 20** y considerando la distancia en donde actúa el torque mayor,

$L_{act} = 75 \text{ mm}$, se obtuvo:

$$\theta = \frac{180}{\pi} \cdot \frac{M_t \cdot L_{act}}{J \cdot G} = \frac{180}{\pi} \cdot \frac{1260 \cdot 75}{124,71 \cdot 82680} = 0,53 \text{ [}^\circ\text{]}$$

De la **Tabla 7**, se selecciona el coeficiente para flechas de transmisión y se obtuvo:

$$\theta_{cf} = \frac{1}{20 \cdot d_u} = \frac{1}{20 \cdot 5,97} = 0,0084 \text{ [}^\circ\text{/mm]}$$

Aplicando la **Ecuación 21**, se obtuvo:

$$\theta_{adm} = \theta_{cf} \cdot L_{act} = 0,0084 \cdot 75 = 0,63 \text{ [}^\circ\text{]}$$

Se realizó la verificación de la deformación angular del eje:

$$\theta: 0,53 [^\circ] \leq \theta_{adm}: 0,63 [^\circ]$$

Por lo tanto, el eje cumple con las sollicitaciones de rigidez y finaliza la etapa.

Para la determinación de los rodamientos se usó la metodología indicada en el catálogo de FAG (2000), que se detalló en el marco teórico y se realizó el cálculo como se muestra a continuación.

1. *Consideraciones previas:* la carga a soportar por los rodamientos, se calculó en base a las reacciones correspondientes de los diagramas de carga presentados en la **Figura 36** y la **Figura 37**, cuyas fuerzas resultantes en los soportes A y B fueron:

$$Fr_A = \sqrt{Ax^2 + Ay^2} = \sqrt{0,78^2 + 23,92^2} = 23,93 \text{ [N]}$$

$$Fr_B = \sqrt{Bx^2 + By^2} = \sqrt{1,0^2 + 30,76^2} = 30,77 \text{ [N]}$$

De estas, se tomó la mayor para el cálculo:

$$Fr = Fr_B = 30,77 \text{ [N]}$$

2. *Modelo apropiado de rodamiento:* el modelo apropiado correspondió a un rodamiento de bolas que soporte carga radial y cuyo diámetro interno se ajustó al diámetro del eje previamente seleccionado, en este caso fue de 7,9mm (diámetro externo de la varilla roscada).
3. *Tipo de sollicitación:* se comparó la velocidad angular previamente calculada con la del criterio, como se muestra:

$$\omega: 8,9 \text{ [rpm]} < \omega_{criterio}: 10 \text{ [rpm]}$$

Por lo tanto, correspondió a una sollicitación estática.

4. *Selección del rodamiento:* de la **Tabla 8**, se seleccionó el coeficiente para la exigencia normal:

$$f_s = 1,2$$

Al solo existir cargas radiales, se obtuvo:

$$P_0 = Fr = 30,77 \text{ [N]}$$

Usando la **Ecuación 22**, se obtuvo:

$$C_0 = f_s \cdot P_0 = 1,2 \cdot 30,77 = 36,92 \text{ [N]}$$

Con base en los datos preestablecidos de: diámetro interno de 8mm; capacidad de carga estática de 36,92N; y considerando un anillo de retención interno de diámetro nominal de 24mm, este para asegurar el rodamiento dentro de un cilindro de chumacera sin interferir con el aro interno del mismo, el rodamiento seleccionado correspondió al modelo SKF 628-2Z, cuyos detalles se muestran en el **Anexo 12**.

Con el propósito de seleccionar el acoplamiento entre el eje y el motor, se basó en los conceptos presentados por Mott (2006), que se detallaron en el marco teórico y se aplicaron como se describe a continuación.

1. *Tipo de acoplamiento:* conforme al criterio de alineamiento requerido por la aplicación, en este caso se contempló cierto desalineamiento, por lo tanto, se decantó por un acoplamiento flexible.
2. *Datos para la selección:* se consideró los diámetros de los elementos a unir que fueron: 7,9 mm para el eje de las catalinas (diámetro externo de la varilla roscada) y 8 mm para el eje del motor PAP seleccionado, de este último también se consideró el par a transmitir de 1260 Nmm.
3. *Selección del acoplamiento:* con las características establecidas, el acoplamiento seleccionado correspondió al modelo AFP 3030 08/08, cuyos detalles se muestran en el **Anexo 13**.

En este punto se procedió al cálculo de elementos del bastidor, para esto se bosquejaron dos secciones: el soporte de los elementos del transportador, como muestra la **Figura 39a**; y el apoyo del soporte, como se muestra en la **Figura 39b**. El primero se monta en el segundo.

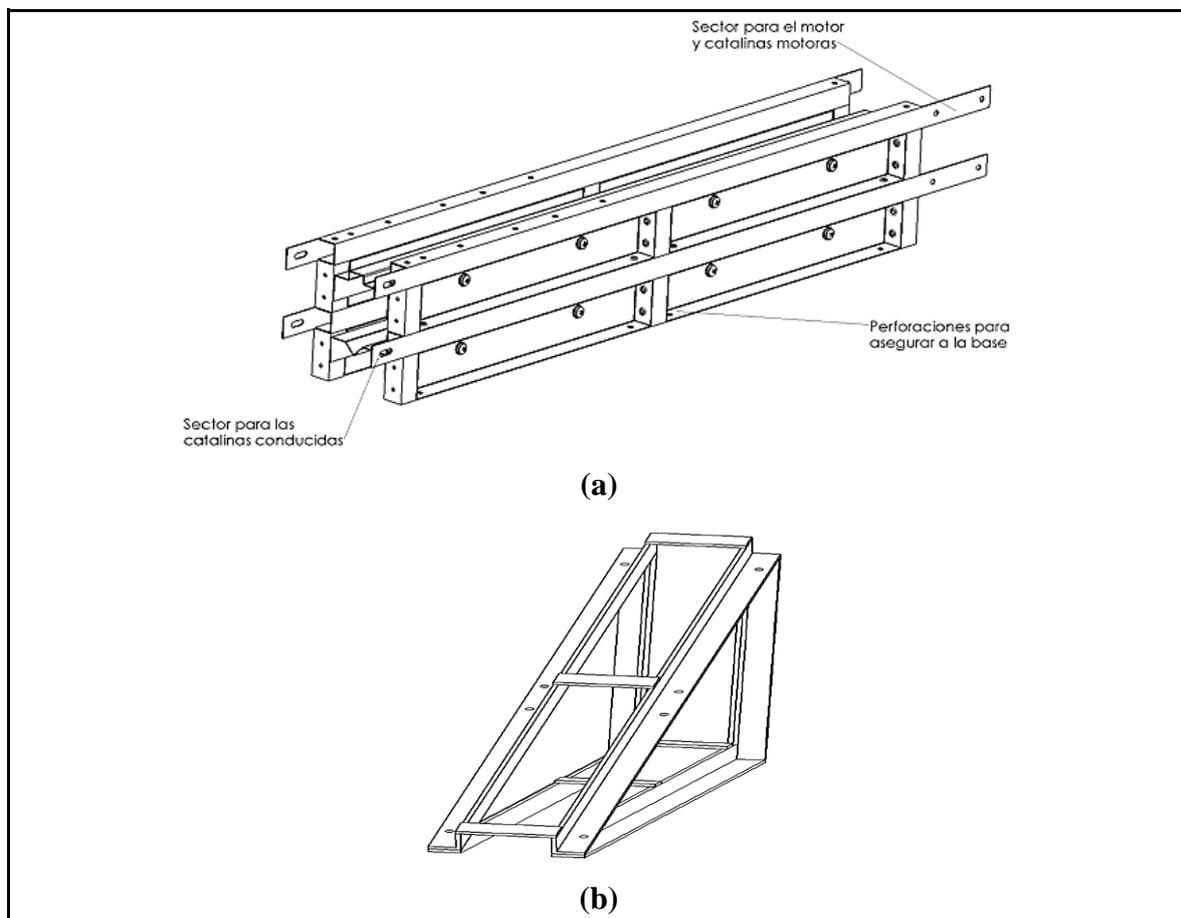


Figura 39. Secciones del bastidor.

Tomando en cuenta que el material considerado para la estructura en el trabajo de Herrera & Medina (2015) es la madera, indicando que el uso de metales provee de mayor resistencia y durabilidad, en el presente proyecto se propuso para que el soporte de los elementos del transportador sea tanto resistente como liviano y acorde con el bosquejo de la **Figura 39a**, el uso de los siguientes materiales:

- Tubos cuadrados de aluminio, de 19 mm de lado y 1 mm de espesor, para los elementos que actúan como vigas y columnas. Los detalles se encuentran en el **Anexo 14**.
- Placas de acero galvanizado de 0,75 mm de espesor, para los elementos transversales que soportan el recorrido de la cadena a lo largo del transportador.
- Remaches de aluminio de 1/8" x 1/2", para la unión de los elementos del soporte.
- Pernos M5 x 15 mm, para la unión de los elementos con el soporte. Los detalles se muestran en el **Anexo 15**.

En consideración de las sugerencias de diseño de bastidores presentadas por Mott (2006), donde indica que el uso de elementos del tipo vigas cortas, doblemente empotrados y con secciones transversales cerradas son estructuras de alta resistencia y rigidez, además, debido a la ubicación de la cadena de rodillos a lo largo del soporte, la carga se encuentra distribuida y tiene poca consideración. Por lo tanto, se despreciaron los esfuerzos en el sector intermedio del soporte.

Mientras que en el extremo donde se soporta el motor, el esfuerzo al que está sometido el soporte es considerable, por lo tanto, se centró el cálculo en el mismo.

El material de soporte del motor es de placa de acero de 2 mm, los detalles se muestran en el **Anexo 16**.

Los datos que se recopilaron en este punto son:

- Peso del motor: $P_M = 0,7 \text{ kgf} = 6,87 \text{ N}$
- Tubo cuadrado: 3/4" (Placa 1)
 - Material: Aluminio 6063 T5
 - Esfuerzo de fluencia: $\sigma_{f.placa1} = 10,7 \text{ kgf/mm}^2 = 107 \text{ MPa}$
 - Espesor: $e_{placa1} = 1 \text{ mm}$
- Soporte del motor: Placa 2
 - Material: Acero 1008
 - Esfuerzo de fluencia: $\sigma_{f.placa2} = 250 \text{ MPa}$
 - Espesor: $e_{placa2} = 2 \text{ mm}$

- Pernos: M5
 - Material: Acero ISO clase 4.8
 - Esfuerzo de fluencia (prueba): $\sigma_{f,p} = 310$ MPa
 - Esfuerzo de corte (50% esfuerzo fluencia): $\tau_p = 155$ MPa
 - Diámetro: $d_p = 5$ mm
- Ángulo de inclinación del transportador: $\alpha = 20^\circ$

Siguiendo la metodología sobre pernos presentada por Deutschman et al. (1987), se realizó el cálculo de los elementos correspondientes como se muestra a continuación:

1. *Diagrama de cuerpo libre de la unión:* corresponde a la unión entre la placa que funcionó de soporte al motor con el soporte de los elementos del transportador, como se muestra en la **Figura 40**.

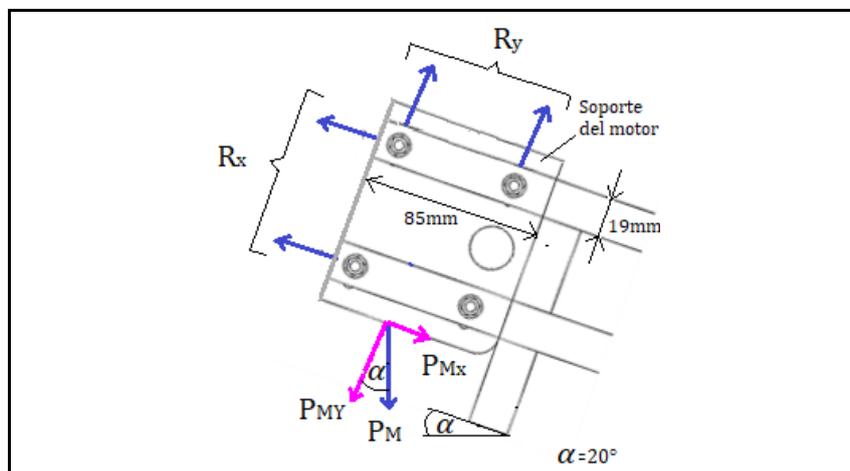


Figura 40. Diagrama de cuerpo libre de la unión que soporta el motor.

Se noto que los pernos se encuentran sometidos a fuerzas perpendiculares a su eje longitudinal, por lo que se despreció el fallo por tracción y se concentró en el resto de modos de falla.

Se calculó los componentes en x y y del peso del motor y se obtuvo:

$$P_{Mx} = P_M \cdot \text{sen}(\alpha) = 6,87 \cdot \text{sen}(20) = 2,35 \text{ [N]}$$

$$P_{My} = P_M \cdot \text{cos}(\alpha) = 6,87 \cdot \text{cos}(20) = 6,46 \text{ [N]}$$

2. *Cálculo por cortante simple:* aplicando la **Ecuación 34**, se obtuvo los componentes en x y y :

$$\tau_x = \frac{P_{Mx}/2}{\frac{\pi \cdot d_p^2}{4}} = \frac{2,35/2}{\frac{\pi \cdot 5^2}{4}} = 0,06 \text{ [MPa]}$$

$$\tau_y = \frac{P_{My}/2}{\frac{\pi \cdot d_p^2}{4}} = \frac{6,46/2}{\frac{\pi \cdot 5^2}{4}} = 0,16 \text{ [MPa]}$$

Se calculó el resultante:

$$\tau = \sqrt{\tau_x^2 + \tau_y^2} = \sqrt{0,06^2 + 0,16^2} = 0,17 \text{ [MPa]}$$

Utilizando un factor de seguridad de 1,5 (poco riesgo) se calculó el esfuerzo que debería resistir el material, en base al despeje de la **Ecuación 16**:

$$\tau_{p.material} = \tau \cdot n_s = 0,17 \cdot 1,5 = 0,255 \text{ [MPa]}$$

Por lo que se comprueba la resistencia a cortante del perno.

3. *Cálculo por aplastamiento del perno*: aplicando la **Ecuación 35**, y considerando la placa de aluminio se obtuvo los componentes en x y y:

$$\sigma_{b.x} = \frac{P_{Mx}/2}{d_p \cdot t} = \frac{2,35/2}{5 \cdot 1} = 0,24 \text{ [MPa]}$$

$$\sigma_{b.y} = \frac{P_{My}/2}{d_p \cdot t} = \frac{6,46/2}{5 \cdot 1} = 0,65 \text{ [MPa]}$$

Se calculó el resultante:

$$\sigma_b = \sqrt{\sigma_{b.x}^2 + \sigma_{b.y}^2} = \sqrt{0,24^2 + 0,65^2} = 0,69 \text{ [MPa]}$$

Utilizando un factor de seguridad de 1,5 (poco riesgo) se calculó el esfuerzo que debería resistir el material:

$$\sigma_{f.p.material} = \sigma_b \cdot n_s = 0,69 \cdot 1,5 = 1,035 \text{ [MPa]}$$

Por lo que se comprobó la resistencia al aplastamiento por la placa de aluminio.

De la misma manera se aplicó considerando la placa de acero y se obtuvo:

$$\sigma_{b.x} = \frac{P_{Mx}/2}{d_p \cdot t} = \frac{2,35/2}{5 \cdot 2} = 0,12 \text{ [MPa]}$$

$$\sigma_{b.y} = \frac{P_{My}/2}{d_p \cdot t} = \frac{6,46/2}{5 \cdot 2} = 0,32 \text{ [MPa]}$$

$$\sigma_b = \sqrt{\sigma_{b.x}^2 + \sigma_{b.y}^2} = \sqrt{0,12^2 + 0,32^2} = 0,34 \text{ [MPa]}$$

$$\sigma_{f.p.material} = \sigma_b \cdot n_s = 0,34 \cdot 1,5 = 0,51 \text{ [MPa]}$$

Por lo que se comprobó la resistencia al aplastamiento por la placa de acero.

4. *Cálculo por tensión de las placas:* aplicando la **Ecuación 36** para la placa de aluminio, se obtuvo los componentes en x y y :

$$\sigma_{t.x} = \frac{P_{Mx}/2}{(w_{p.x} - d_{ef}).t} = \frac{2,35/2}{(19 - 5).1} = 0,08 \text{ [MPa]}$$

$$\sigma_{t.y} = \frac{P_{My}/2}{(w_{p.y} - 2.d_{ef}).t} = \frac{6,46/2}{(85 - 10).1} = 0,04 \text{ [MPa]}$$

Se calculó el resultante:

$$\sigma_t = \sqrt{\sigma_{t.x}^2 + \sigma_{t.y}^2} = \sqrt{0,08^2 + 0,04^2} = 0,09 \text{ [MPa]}$$

Utilizando un factor de seguridad de 1,5 (poco riesgo) se calculó el esfuerzo que debería resistir el material:

$$\sigma_{f.placa1.material} = \sigma_b \cdot n_s = 0,09 \cdot 1,5 = 0,135 \text{ [MPa]}$$

Por lo que se comprobó la resistencia a ruptura de la placa de aluminio.

De la misma manera se aplicó considerando la placa de acero y se obtuvo:

$$\sigma_{t.x} = \frac{P_{Mx}/2}{(w_{p.x} - d_{ef}).t} = \frac{2,35/2}{(19 - 5).2} = 0,04 \text{ [MPa]}$$

$$\sigma_{t.y} = \frac{P_{My}/2}{(w_{p.y} - 2.d_{ef}).t} = \frac{6,46/2}{(85 - 10).2} = 0,02 \text{ [MPa]}$$

$$\sigma_t = \sqrt{\sigma_{t.x}^2 + \sigma_{t.y}^2} = \sqrt{0,04^2 + 0,02^2} = 0,04 \text{ [MPa]}$$

$$\sigma_{f.placa2.material} = \sigma_b \cdot n_s = 0,04 \cdot 1,5 = 0,06 \text{ [MPa]}$$

Por lo que se comprobó la resistencia a ruptura de la placa de acero.

Considerando los criterios del material presentados para el soporte de los elementos y en correspondencia al bosquejo del apoyo mostrado en la **Figura 39b**, se propuso el uso de:

- Perfil angular 20 x 3 mm, los detalles se muestran en el **Anexo 17**.
- Pletina de acero de 3/4" x 1/8".

Los datos que se recopilaron en este punto son:

- Peso de elementos a soportar:
 - Cadena de rodillos con accesorios y material: $P_{comb} = 43,13 \text{ N}$
 - Catalinas (4): $P_5 = 3,56 \text{ N}$
 - Ejes (2): $P_6 = 0,35 \text{ N}$
 - Rodamientos (4): $P_7 = 0,39 \text{ N}$

- Acoplamiento: $P_8 = 0,44$ N
- Motor: $P_9 = 6,87$ N
- Placa de soporte motor: $P_{10} = 3,76$ N
- Chumaceras (3): $P_{11} = 1,97$ N
- Estructura de soporte: $P_{12} = 14,09$ N
- Perfil: “L” 20x20x3 mm
 - Material: Acero ASTM A36
 - Esfuerzo de fluencia: $\sigma_{f.perfil} = 250$ MPa
 - Esfuerzo de ruptura: $\sigma_{r.perfil} = 400$ MPa
 - Módulo de elasticidad: $E = 200$ GPa
 - Módulo de inercia (x): $I = 0,38$ cm⁴ = $3,8 \cdot 10^{-9}$ m⁴
 - Radio de giro (mayor): $r_g = 0,78$ cm = $7,8 \cdot 10^{-3}$ m
 - Área transversal: $A_s = 1,03$ cm² = $103 \cdot 10^{-6}$ m²
 - Distancia desde el eje neutro hasta la fibra más alejada: $c = 6,5 \cdot 10^{-3}$ m

Se procedió con el cálculo de los elementos del apoyo como se muestra a continuación:

1. *Consideraciones previas:* el peso aproximado de elementos a soportar por el apoyo, incluido una tolerancia del 10% por el resto de elementos no considerados que también se disponen en el bastidor, correspondió a:

$$P_E = \left(P_{comb} + \sum_{i=5}^{12} P_i \right) \cdot 1,10 = (74,56) \cdot 1,10 \approx 82 \text{ [N]}$$

Se planteó que este peso sea soportado en dos estructuras triangulares laterales (ver **Figura 39b**), por lo que corresponde a un peso distribuido y se ocupó la mitad de este valor para el cálculo y análisis, por lo que se obtuvo:

$$P_{E'} = \frac{P_E}{2} = \frac{82}{2} = 41 \text{ [N]}$$

2. *Análisis como bastidor:* se presentó el diagrama de cuerpo libre correspondiente a una estructura lateral del apoyo, como se muestra en la **Figura 41**.

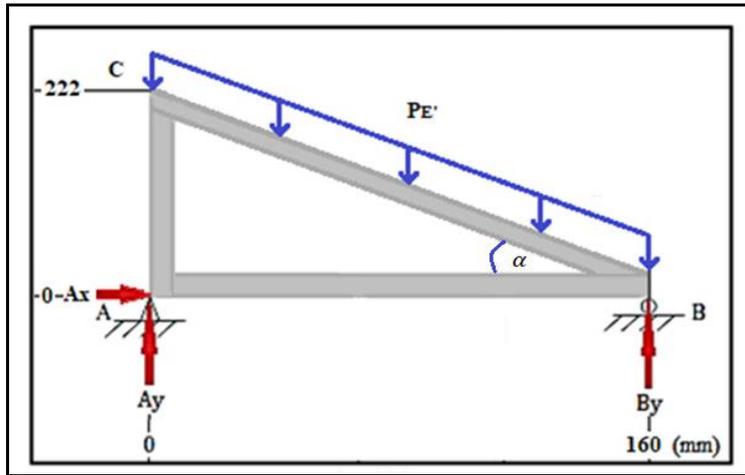


Figura 41. Diagrama de cuerpo libre del apoyo.

Se realizó el cálculo de las reacciones como se muestra:

$$\curvearrowright \sum M_A = 0 \rightarrow (B_y \cdot x) - \left(P_{E'} \cdot \frac{x}{2}\right) = 0 \rightarrow B_y = \frac{P_{E'}}{2} = \frac{41}{2} = 20,5 \text{ [N]}$$

$$\uparrow \sum F_y = 0 \rightarrow A_y + B_y - P_{E'} = 0 \rightarrow A_y = P_{E'} - B_y = 20,5 \text{ [N]}$$

$$\rightarrow \sum F_x = 0 \rightarrow A_x = 0 \text{ [N]}$$

3. *Análisis por el método de nodos:* se desmembró los elementos, según la **Figura 42.**

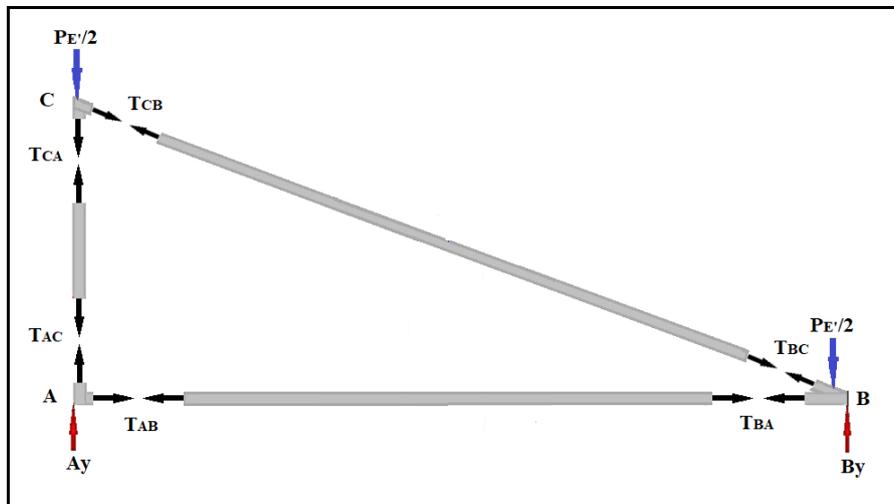


Figura 42. Desmembramiento de elementos del apoyo.

Del equilibrio de fuerzas en el nodo A, se obtuvo:

$$\rightarrow \sum F_x = 0 \rightarrow T_{AB} = 0 \text{ [N]}$$

$$\uparrow \sum F_y = 0 \rightarrow A_y + T_{AC} = 0 \rightarrow T_{AC} = -20,5 \text{ [N]}$$

Del equilibrio de fuerzas en el nodo C, se obtuvo:

$$\rightarrow \sum F_x = 0 \rightarrow T_{CB} \cdot \cos(\alpha) = 0 \rightarrow T_{CB} = 0 \text{ [N]}$$

$$\uparrow \sum F_y = 0 \rightarrow -T_{CA} - \frac{P_{E'}}{2} - T_{CB} \cdot \text{sen}(\alpha) = 0 \rightarrow T_{CA} = -20,5 \text{ [N]}$$

Del equilibrio de fuerzas en el nodo B , se obtuvo:

$$\uparrow \sum F_y = 0 \rightarrow B_y - \frac{P_{E'}}{2} + T_{BC} \cdot \text{sen}(\alpha) = 0 \rightarrow T_{BC} = 0 \text{ [N]}$$

$$\rightarrow \sum F_x = 0 \rightarrow -T_{BA} - T_{BC} \cdot \text{cos}(\alpha) = 0 \rightarrow T_{BA} = 0 \text{ [N]}$$

Estos valores indicaron que solo la barra AC se encontró a compresión.

4. Análisis individual de elementos.

4.1. *Elemento BC*: Se descompuso el peso distribuido en sus componentes en x y y , como se muestra en la **Figura 47**.

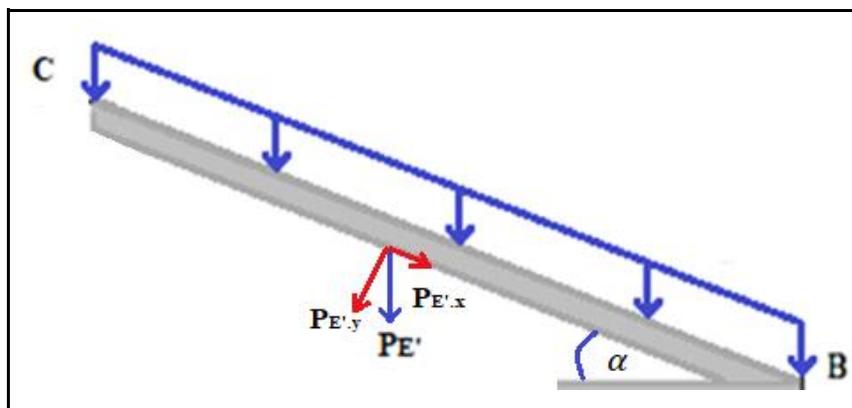


Figura 43. Componentes del peso distribuido.

$$P_{E'.x} = P_{E'} \cdot \text{sen}(\alpha) = 41 \cdot \text{sen}(20) = 14,02 \text{ [N]}$$

$$P_{E'.y} = P_{E'} \cdot \text{cos}(\alpha) = 41 \cdot \text{cos}(20) = 38,53 \text{ [N]}$$

Primeramente, se consideró el efecto de la componente en y ($P_{E'.y}$). Al ser un elemento soldado, se analizó como una viga doblemente empotrada y se realizó el diagrama de cuerpo libre, como se muestra en la **Figura 44**.

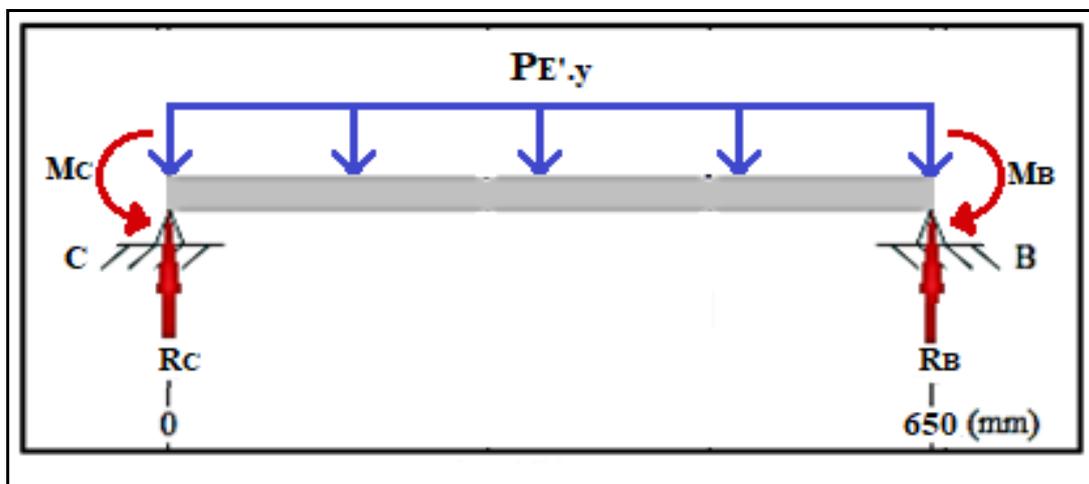


Figura 44. D.C.L. del elemento inclinado del apoyo con la carga en y .

Se calculó según las fórmulas presentadas en el **Anexo 18** (caso 3), los momentos y la flecha máxima respectivamente:

$$M_C = M_B = -\frac{P_{E'.y} \cdot L_{viga}}{12} = -\frac{38,53 \cdot (650 \cdot 10^{-3})}{12} = -2,09 \text{ [Nm]}$$

$$\Delta_{m\acute{a}x} = \frac{P_{E'.y} \cdot L_{viga}^3}{E \cdot I \cdot 384} = \frac{38,53 \cdot (650 \cdot 10^{-3})^3}{(200 \cdot 10^9) \cdot (3,8 \cdot 10^{-9}) \cdot 384} = 0,036 \text{ [mm]}$$

De la **Tabla 9**, se tomó el coeficiente correspondiente a precisión moderada para el límite de deflexión en vigas:

$$\Delta_{cf} = 0,0001$$

Aplicando la **Ecuación 23**, se calculó la deflexión permitida:

$$\Delta_{per} = \Delta_{cf} \cdot L_{viga} = 0,0001 \cdot 650 = 0,065 \text{ [mm]}$$

Se verificó la deflexión, de donde se obtuvo:

$$\Delta_{m\acute{a}x}: 0,036 \text{ [mm]} \leq \Delta_{per}: 0,065 \text{ [mm]}$$

Por lo que la viga cumple con las solicitaciones de los esfuerzos en y.

Seguidamente, se consideró el efecto de la componente en x ($P_{E'.x}$). Esta fuerza es aplicada hacia los pernos que unen el soporte con el apoyo, por lo que se estudió el aplastamiento del perfil por los pernos.

Considerando la unión con pernos de diámetro de 5 mm y aplicando la **Ecuación 35**, se obtuvo:

$$\sigma_b = \frac{P_{E'.x}}{d_p \cdot t} = \frac{14,02}{5 \cdot 3} = 0,93 \text{ [MPa]}$$

Utilizando un factor de seguridad de 1,5 (poco riesgo) se calculó el esfuerzo que debería resistir el material:

$$\sigma_{f.perfil.material} = \sigma_b \cdot n_s = 0,93 \cdot 1,5 = 1,395 \text{ [MPa]}$$

Por lo que se comprobó la resistencia al aplastamiento del perfil.

4.2.Elemento AC: correspondió a un elemento tipo columna, sometido a carga axial y a un momento flector, como muestra la **Figura 45**.

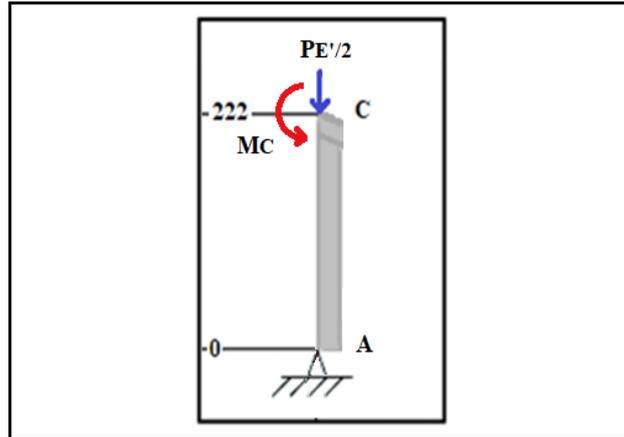


Figura 45. D.C.L. del elemento vertical del apoyo.

Utilizando el método del esfuerzo permisible para el diseño de columnas de acero, presentado por Hibbeler (2011) y descrito en el marco teórico, se calculó como se indica a continuación.

Primero, se seleccionó el factor de longitud efectiva, según la **Figura 16**, donde para el caso de la articulación que es del tipo de extremos fijos el factor correspondiente es $K = 0,5$.

A continuación, se calculó la relación de esbeltez efectiva, utilizando la **Ecuación 24**, de donde se obtuvo:

$$Re_{efec} = \frac{K \cdot L}{r_g} = \frac{0,5 \cdot 222}{7,8} = 14,23$$

Posteriormente, se calculó la relación de esbeltez crítica, según la **Ecuación 25**, de donde se obtuvo:

$$Re_{crit} = \sqrt{\frac{2 \cdot \pi^2 \cdot E}{\sigma_f}} = \sqrt{\frac{2 \cdot \pi^2 \cdot 200 \cdot 10^3}{250}} = 125,66$$

Seguidamente, se identificó el tipo de columna según la comparación:

$$Re_{efec}: 14,23 \text{ [MPa]} < Re_{crit}: 125,66 \text{ [MPa]}$$

Por lo que le se trató de una columna corta a la que le corresponde el esfuerzo permisible según la **Ecuación 26**, de donde se obtuvo:

$$(\sigma_a)_{perm} = \frac{\left[1 - \frac{(Re_{efec})^2}{2 \cdot (Re_{crit})^2} \right] \cdot \sigma_f}{\left[\frac{5}{3} \right] + \left[\frac{3}{8} \cdot \frac{Re_{efec}}{Re_{crit}} \right] - \left[\frac{(Re_{efec})^3}{8 \cdot (Re_{crit})^3} \right]} \text{ [MPa]}$$

$$(\sigma_a)_{perm} = \frac{\left[1 - \frac{(14,23)^2}{2 \cdot (125,66)^2}\right] \cdot 250}{\left[\frac{5}{3}\right] + \left[\frac{3}{8} \cdot \frac{14,23}{125,66}\right] - \left[\frac{(14,23)^3}{8 \cdot (125,66)^3}\right]} = 145,35 \text{ [MPa]}$$

Después, al estar la columna sometida a un momento flexionante, se determina el correspondiente esfuerzo permisible, en base a la **Tabla 6** y utilizando la **Ecuación 15**, de donde se obtuvo:

$$n_s = \prod_{i=1}^3 n_i = 1,5 \cdot 2,0 \cdot 1,5 = 4,5$$

Aplicando la **Ecuación 16**, se obtuvo:

$$(\sigma_b)_{perm} = \frac{\sigma_f}{n_s} = \frac{250}{4,5} = 55,55 \text{ [MPa]}$$

En este punto, se aplicó la fórmula de interacción según la **Ecuación 28**, de donde se obtuvo:

$$\frac{(P_{E'}/2)/A_s}{(\sigma_a)_{perm}} + \frac{M_C \cdot c/I}{(\sigma_b)_{perm}} \leq 1$$

$$\frac{(20,5)/(103 \cdot 10^{-6})}{145,35 \cdot 10^6} + \frac{(2,09) \cdot (6,5 \cdot 10^{-3})/(3,8 \cdot 10^{-9})}{55,55 \cdot 10^6} \leq 1$$

$$0,065 \leq 1$$

Por lo tanto, con esto se comprobó la resistencia al pandeo del perfil.

Los cálculos en esta sección (elementos del bastidor) denotaron que es válido el uso de materiales con menor esfuerzo de fluencia, como por ejemplo plásticos para impresión en 3D.

5.4.4.2.3 Unidad de posicionamiento. Basándose en la geometría del fondo de las tolvas presentada por Carita (2011), donde se indica que su función es dosificar el producto almacenado con la cadencia requerida, y para esto la inclinación de las paredes y abertura de salida se disponen de manera que evita el apilamiento, se idealizaron los encarriladores presentados en la **Figura 46**, que tienen la función de controlar el flujo hacia la cadena de rodillos.

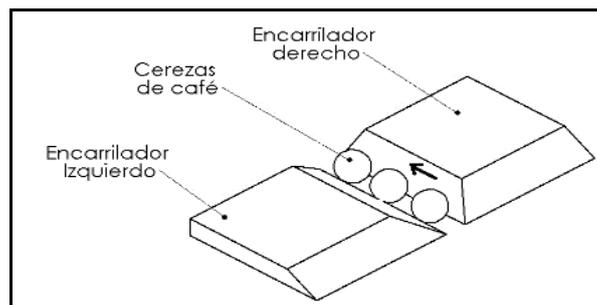


Figura 46. Bosquejo unidad de posicionamiento.

Los encarriladores, en concordancia con la unidad de enlace pulmón, se planteó su ubicación sobre el bastidor antes del ingreso a la subunidad de censado en un par, es decir, uno frente a otro (derecho e izquierdo), y con regulación de manera que permitan que se estreche o se ensanche el espacio entre ellos de acuerdo al diámetro del fruto. Esta configuración permite posicionar un fruto a la vez sobre la cadena de rodillos.

La dimensión crucial para este elemento correspondió al bisel, este debe tener un ángulo mayor o igual que el ángulo de reposo de los frutos del cafeto (20°), de esta manera permite que se ubiquen y pasen solo en el sector de enfrentamiento de los encarriladores.

Se consideró también que, si el ángulo del bisel es muy grande, el movimiento de los frutos al tratar de ingresar podría aplastarlos, por lo que se prefirió un ángulo no mayor a 75° .

Con estos criterios el rango del ángulo del bisel es de:

$$\theta_{min}: 20 [^\circ] \leq \theta_{bisel} < \theta_{máx}: 75 [^\circ]$$

De donde, el ángulo seleccionado para el bisel fue de:

$$\theta_{bisel}: 45 [^\circ]$$

El material para su fabricación se propuso el grilón, por su mayor rigidez que el caucho y mayor resistencia a la humedad que la madera.

5.4.4.2.4 Unidad de autonomía. Con la referencia de la tolva de alimentación usada por el clasificador WYCS8-512 presentado por WENYAO (2021a), que tiene una forma prismática, y considerando los criterios de tolvas presentados para el diseño de la unidad de posicionamiento, en este caso se idealizó un componente que con su geometría ubique los frutos a disposición de la cadena de rodillos y los encarriladores. Además, que prevenga posibles aplastamientos por sobrecarga en el ingreso de los mismos.

Por consiguiente, se propuso un contenedor de paredes internas en forma de pirámide invertida, con uno de sus laterales abierto, como se presenta en la **Figura 47**.

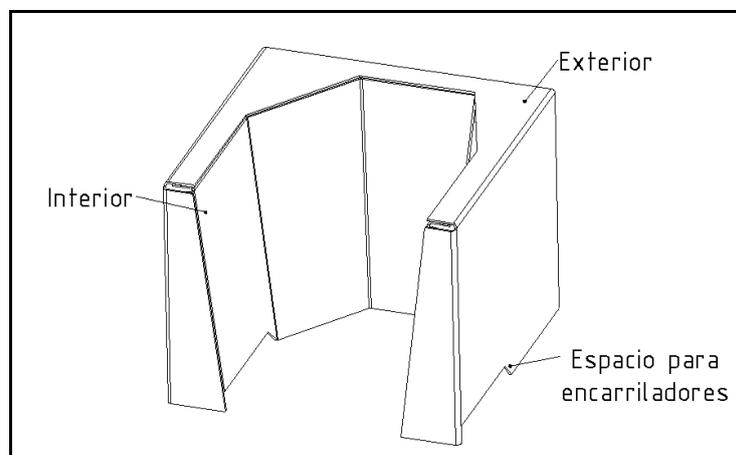


Figura 47. Bosquejo de la unidad de autonomía.

Este contenedor abarca un volumen correspondiente a 1/2 libra de frutos, con el fin de evitar la sobrecargar en la cadena. Además, tiene un ángulo de las paredes con respecto a la horizontal de 80°, que montado sobre el bastidor genera un ángulo de 60°, superando así el ángulo de apilamiento de los frutos del cafeto (20°) y favoreciendo el movimiento hacia el fondo del contenedor.

Para el análisis, se planteó que la placa del fondo del contenedor cargará la mayor cantidad de producto, por lo tanto, se consideró como si fuera una placa doblemente empotrada y se analizó la flexión que produce la carga.

Las dimensiones aproximadas de la placa del fondo correspondieron a 80 mm de alto y 40 mm de ancho. Además, se propuso el uso de acero galvanizado de 0,70 mm de espesor.

Los datos que se recopilaron en este punto son:

- Carga: $P = 0,5 \text{ [lbf]} = 2,23 \text{ [N]}$
- Material: Lámina de acero galvanizado
 - Espesor: $h = 0,70 \text{ mm}$
 - Esfuerzo de fluencia: $\sigma_f = 179 \text{ MPa}$
 - Módulo de elasticidad: $E = 200 \text{ GPa}$
 - Lado menor: $a = 40 \text{ [mm]}$
 - Lado mayor: $b = 80 \text{ [mm]}$

Siguiendo la metodología para placas detallada en el marco teórico, presentada por Gilda Fernández (1983), se inició calculando la carga distribuida, que correspondió a:

$$q = \frac{P}{a \cdot b} = \frac{2,23}{40 \cdot 80} = 696,8 \cdot 10^{-6} \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

Según el **Anexo 4**, el esquema que se consideró es el caso 21, este considera una placa rectangular empotrada en las aristas mayores, de donde el coeficiente seleccionado correspondió a:

$$\frac{b}{a} = \frac{80}{40} = 2 \rightarrow K_1 = 0,0284$$

Se calculó la deflexión utilizando la **Ecuación 30**, y se obtuvo:

$$\Delta w_{m\acute{a}x} = K_1 \cdot \frac{q \cdot b^4}{E \cdot h^3} = 0,0284 \cdot \frac{(696,8 \cdot 10^{-6}) \cdot (80)^4}{(200 \cdot 10^3) \cdot 0,70^3} = 0,0118 \text{ [mm]}$$

De la **Tabla 9**, se tomó el coeficiente de precisión moderada para el límite de deflexión:

$$\Delta_{cf} = 0,000255$$

Aplicando la **Ecuación 23**, se calculó la deflexión permitida:

$$\Delta_{per} = \Delta_{cf} \cdot b = 0,000255 \cdot 80 = 0,0204 \text{ [mm]}$$

Se verificó la deflexión, de donde se obtuvo:

$$\Delta w_{m\acute{a}x}: 0,0118 \text{ [mm]} \leq \Delta_{per}: 0,0204 \text{ [mm]}$$

Por lo que la placa cumpli3 con el rango de flexi3n moderada.

5.4.4.2.5 Subunidad de eyecci3n. Considerando el prototipo presentado por Herrera & Medina (2015), donde para la separaci3n de los frutos se hace uso de un sistema basado en un servomotor que cambia entre tres posiciones, y el sistema de clasificaci3n por medio de rodillos de la Corporaci3n Industrial Urapan (2015b), donde cada rodillo tiene un sistema especializado que se activa al llegar a la posici3n necesaria para separar los frutos, se propuso el uso de impulsores mecánicos que se ubican a lo largo de la cadena de rodillos despu3s de la subunidad de censado.

A continuaci3n, se muestra el bosquejo de la propuesta en la **Figura 48a** y el detalle del planteamiento de la ubicaci3n de los componentes en la **Figura 48b**.

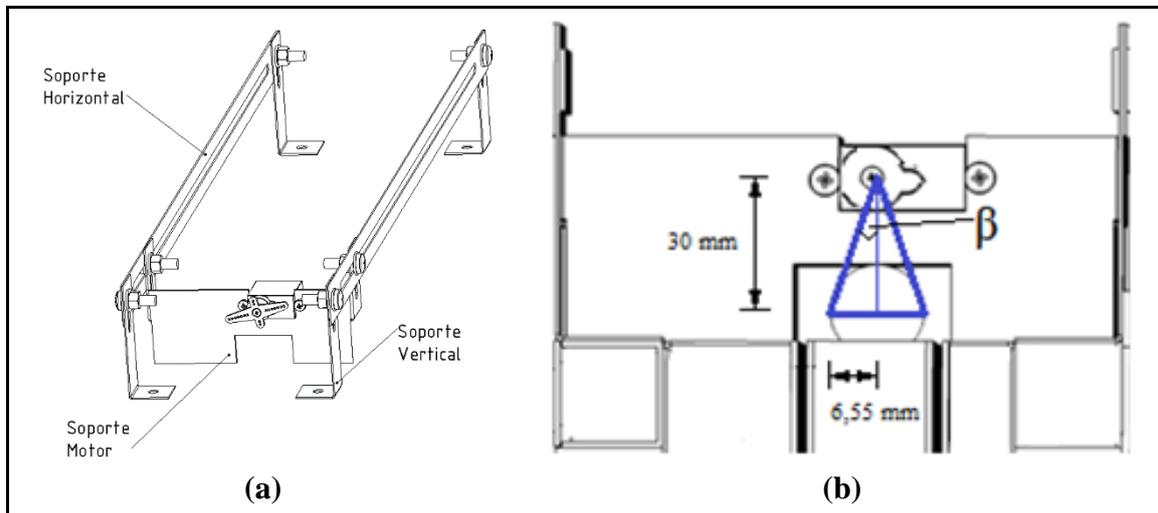


Figura 48. Bosquejo subunidad de eyecci3n.

Se pretendi3 el impulso para la salida de los frutos de la cadena transportadora por medio de servomotores, por lo que se evalu3 el uso del modelo SG-90, cuyos detalles se muestran en el **Anexo 21**.

Los datos que se recopilaron en este punto:

- Peso fresco promedio de los frutos de caf3: $m_{prom} = 1,54 \text{ g} = 1,54 \cdot 10^{-3} \text{ kg}$
- Motor: Tower Pro SG-90
 - Torque: $M_t = 1,8 \text{ [kgf. cm]} = 0,18 \text{ [N. m]}$
 - Velocidad de operaci3n: $\omega = 60/0,1 \text{ [}^\circ/\text{s]} = 600 \text{ [}^\circ/\text{s]}$

La máxima fuerza que puede desarrollar el servomotor en el fruto corresponde a:

$$F = \frac{M_t}{d} = \frac{0,18}{0,03} = 6 \text{ [N]}$$

El ángulo de contacto entre el aspa y el fruto corresponde a:

$$\beta = \text{tg}^{-1} \left(\frac{\text{Cateto}_{\text{opuesto}}}{\text{Cateto}_{\text{adyacente}}} \right) = \text{tg}^{-1} \left(\frac{6,55}{30} \right) = 12,31 \text{ [}^\circ\text{]}$$

Al moverse el fruto, el ángulo efectivo de contacto corresponde a:

$$\beta_{\text{efec}} = \frac{\beta}{2} = \frac{12,31}{2} = 6,16 \text{ [}^\circ\text{]}$$

El tiempo de contacto del aspa con el fruto corresponde a:

$$t_{\text{cont}} = \frac{1}{\omega} \cdot \beta_{\text{efec}} = \frac{0,1}{60} \cdot 6,16 = 0,01 \text{ [s]}$$

De donde la velocidad a la que puede ser expulsado el fruto corresponde a:

$$v_{\text{exp}} = \frac{F \cdot t_{\text{cont}}}{m_{\text{prom}}} = \frac{6 \cdot 0,01}{1,54 \cdot 10^{-3}} = 38,96 \text{ [m/s]}$$

Por lo tanto, el torque desarrollado por el servomotor es suficiente para desplazar los frutos individuales.

5.4.4.3 Propuesta de diseño mecánico. Se planteó el bosquejo del funcionamiento mecánico integrado de los componentes diseñados para el prototipo, esto se muestra en la **Figura 49** y a continuación se detalla.

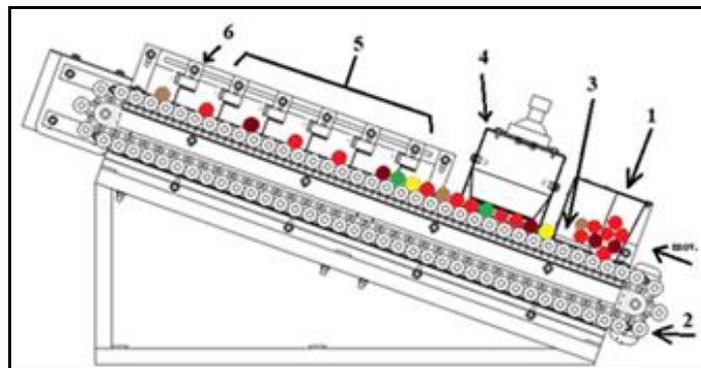


Figura 49. Funcionamiento de elementos mecánicos.

1. El contenedor receipta los frutos del caféto.
2. La cadena de rodillos conduce los frutos hacia arriba al activarse el motor.
3. Los encarriladores se encargan de que en cada intermedio entre rodillos solamente se ubique un fruto.
4. En la estructura prismática rectangular pasan individualmente los frutos frente a la cámara.
5. Los servomotores expulsan los frutos del café de la cadena de rodillos según corresponda.
6. Un motor en movimiento continuo al final de la cadena expulsa frutos no clasificados o partículas extrañas.

5.4.5 Implementación del prototipo

Manteniendo el orden de diseño planteado en el estudio general de componentes, a continuación se presenta la secuencia general de fabricación de los elementos de las correspondientes unidades y subunidades. Para esto se basó en las directrices de las técnicas de fabricación descritas por Groover (2007) y Fenoll et al. (2011).

5.4.5.1 Subunidad de censado. Esta unidad se conforma de los siguientes elementos: una cabina, una tapa superior, dos tapas laterales y dos soportes; los cuales se construyeron según las siguientes operaciones tecnológicas:

1. Trazado y punzonado de los elementos en la chapa de acero galvanizado de 0,7 mm de espesor según los planos diseñados, usando las herramientas de medición y marcado pertinentes.
2. Corte de los elementos trazados en la chapa mediante amoladora con disco de corte y tijera para metal.
3. Perforación de agujeros y ranuras en los elementos mediante taladrado con brocas para metal y limas.
4. Desbarbado de los fillos de los elementos mediante amoladora con disco de desbaste.
5. Doblado de las chapas correspondientes a la cabina, la tapa y los soportes mediante dobladora manual de lámina y prensa de banco.
6. Pintado de la parte interna de la cabina y la tapa, utilizando pintura en aerosol del tipo esmalte acrílico en color blanco.

El ensamble de esta unidad se realizó posteriormente a la construcción del bastidor. Para ello, se montaron los soportes en el bastidor utilizando pernos atornillados en el mismo. Luego, se ubicó la cabina y las tapas laterales mediante pernos y tuercas. Posteriormente, se colocaron los elementos electrónicos en la tapa superior, y esta a su vez se ubicó en la cabina.

En la **Figura 50a** se muestra el exterior de la subunidad y en la **Figura 50b** el interior.

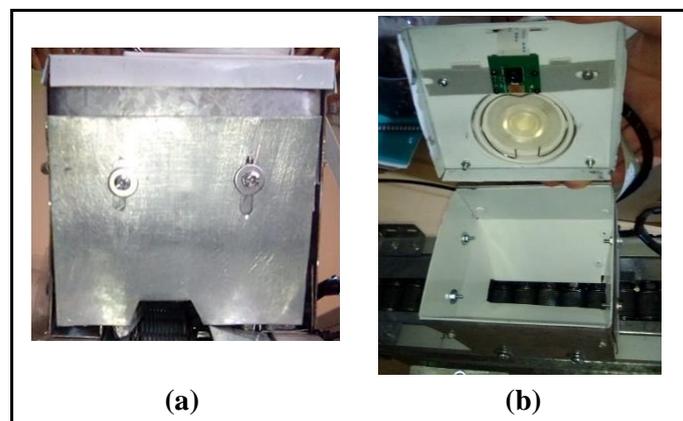


Figura 50. Subunidad de censado fabricada.

5.4.5.2 Unidad de enlace pulmón. Esta unidad se conforma de los elementos correspondientes al mecanismo transportador mediante cadena de rodillos, de los cuales, los elementos adaptados o fabricados son los que se mencionan a continuación, junto a las operaciones tecnológicas aplicadas para su obtención:

1. Cadenas de aleta redonda vertical:

1.1. Separar la cadena de transmisión ANSI 35 en dos, cada una constando de 156 eslabones, utilizando un cortacadenas.

1.2. Unión de las arandelas planas de 5/16" a las cadenas, pasando un eslabón, mediante soldadura eléctrica.

2. Rodillos:

De la siguiente manera se realizaron la cantidad de 78.

2.1. Roscado del tubo PVC de 1/2" en una longitud de 25 mm usando una tarraja con dado NPT (por disponibilidad).

2.2. Corte del tubo PVC roscado en una longitud de 20mm mediante una cortadora manual de tubo plástico. El resultado es un neplo.

2.3. Remover la rosca de dos tuercas M8 usando un taladro con broca de 5/16".

2.4. Colocación de las tuercas sin rosca en los extremos a tope del tubo, usando un martillo.

3. Cuerpo de chumaceras:

Para el cuerpo de las tres pequeñas se utilizó una placa de 1,5 mm de espesor, mientras que para la grande se utilizó una porción tubo cuadrado de 10x2 mm, todos de acero AISI 1008.

3.1. Trazado y punzonado de los elementos en la placa y tubo de acero según los planos diseñados, usando las herramientas de medición y marcado pertinentes.

3.2. Corte de los elementos trazados en la placa y tubo mediante amoladora con disco de corte.

3.3. Perforación de agujeros y ranuras en las piezas mediante taladrado con brocas para metal y limas.

3.4. Desbarbado de los filos en las piezas mediante amoladora con disco de desbaste.

3.5. Maquinado de un eje de acero para conformar los cilindros de las chumaceras, utilizando un torno.

3.6. Unión mediante suelda eléctrica de las bases y cilindros.

3.7. Limpieza y pintado mediante pintura en aerosol del tipo esmalte acrílico en color plata brillante.

4. Soporte del motor:

Se utilizó la porción restante del tubo cuadrado de 10x2 mm, de acero AISI 1008.

4.1. Trazado y punzonado en el tubo de acero según los planos diseñados, usando las herramientas de medición y marcado pertinentes.

4.2. Corte del elemento trazado en el tubo mediante amoladora con disco de corte.

4.3. Perforación de agujeros y ranuras en la pieza mediante taladrado con brocas para metal y limas.

4.4. Desbarbado de los filos en la pieza mediante amoladora con disco de desbaste.

4.5. Limpieza y pintado mediante pintura en aerosol del tipo esmalte acrílico en color plata brillante.

A esta unidad también le corresponde el subconjunto del bastidor, el cual está conformado por los elementos que se mencionan a continuación, junto con su cantidad entre paréntesis y las operaciones tecnológicas aplicadas para su obtención:

1. Apoyo base (1):

1.1. Medición y corte de los elementos en el perfil "L" de 20x20x3mm de acero ASTM A36, según las medidas de los planos diseñados, usando las herramientas de medición y marcado pertinentes además de una amoladora con disco de corte.

1.2. Marcado y perforación de los agujeros en los elementos utilizando un flexómetro, un rayador y un granete además de un taladro con brocas para metal.

1.3. Medición y corte de los elementos en la pletina de 19x3mm de acero ASTM A36, según las medidas de los planos diseñados, usando las herramientas de medición y marcado pertinentes además de una amoladora con disco de corte.

1.4. Desbarbado de los filos en los elementos mediante amoladora con disco de desbaste.

1.5. Unión mediante suelda eléctrica de los elementos.

1.6. Limpieza y pintado con aerosol del tipo esmalte acrílico en color plata brillante.

2. Largueros (4) y verticales (12):

2.1. Medición y corte de los elementos en el tubo cuadrado de 19x3mm de aluminio, según las medidas de los planos diseñados, usando las herramientas de medición y marcado pertinentes además de una sierra manual.

2.2. Marcado y perforación de los agujeros y ranuras en los elementos utilizando un flexómetro, un lápiz y un granete además de un taladro con brocas para metal y limas.

2.3. Roscado de los elementos mediante machuelos y su llave correspondiente.

3. Cubiertas laterales (8), soportes (2), bordes (2), embudos de salida (6):
 - 3.1. Trazado y punzonado de los elementos en la chapa de acero galvanizado de 0,7 mm de espesor según los planos diseñados, usando las herramientas de medición y marcado pertinentes.
 - 3.2. Corte de los elementos trazados en la chapa mediante amoladora con disco de corte y tijera para metal.
 - 3.3. Perforación de agujeros y ranuras en los elementos mediante taladrado con brocas para metal y limas.
 - 3.4. Desbarbado de los filos de los elementos mediante amoladora con disco de desbaste.
 - 3.5. Doblado de las chapas mediante dobladora manual de lámina y prensa de banco.

En este punto se llevó a cabo el ensamblaje tanto de los elementos del mecanismo transportador, así como el del subconjunto del bastidor en el orden que se describe:

1. Unión de los largueros y verticales a las cubiertas laterales mediante remaches.
2. Unión del soporte inferior a las cubiertas verticales armadas con pernos y tuercas.
3. Unión del soporte superior y bordes derecho e izquierdo a las cubiertas verticales armadas por medio de pernos y tuercas. El resultado es el soporte de los elementos del transportador.
4. Se armaron las chumaceras ingresando los rodamientos en los cilindros correspondientes y asegurándolos mediante un anillo de retención para interiores.
5. Se montaron las chumaceras en los extremos del bastidor mediante pernos y tuercas.
6. Se montaron en los ejes las catalinas con sus tuercas de apriete.
7. Se montaron los ejes en las chumaceras y se fijaron con tuercas de seguridad.
8. Se alinearon los rodillos con un par de arandelas libres por sus extremos y una arandela por lado correspondiente a las soldadas en las cadenas. Todos estos se atravesaron con un perno y se fijaron con una tuerca de seguridad, formando de esta manera la cadena de rodillos.
9. Se montó la cadena de rodillos sobre el soporte superior, debajo de los bordes, alrededor de las catalinas y sobre el soporte inferior. Se unió los extremos de la cadena mediante un eslabón con seguro para cadenas removible manualmente.
10. Se ajustó la posición de las catalinas mediante los pernos de seguridad en el eje y la tensión de la cadena mediante la posición de las chumaceras en el lado conducido.
11. Se ajustó los soportes superior e inferior a la altura de las catalinas y los bordes derecho e izquierdo a la altura de los rodillos de PVC.

12. Se montó el acople en el eje conductor.
13. Se montó el motor PAP en el soporte, el cual, a su vez, se colocó sobre la chumacera grande. Luego se alineó y montó en el acople, ajustando los pernos que une el soporte con el cuerpo de la chumacera.
14. Se montó el soporte de los elementos del transportador sobre el apoyo base y se ajustó mediante pernos y tuercas.
15. Se montaron los embudos de salida.

En la **Figura 51a** se muestra el soporte de los elementos del transportador, el cual se colocó sobre la base de la **Figura 51b**. En estos se ubicó el eje conductor, que se muestra en la **Figura 52a** y el eje conducido mostrado en la **Figura 52b**.



Figura 51. Elementos del bastidor fabricado.

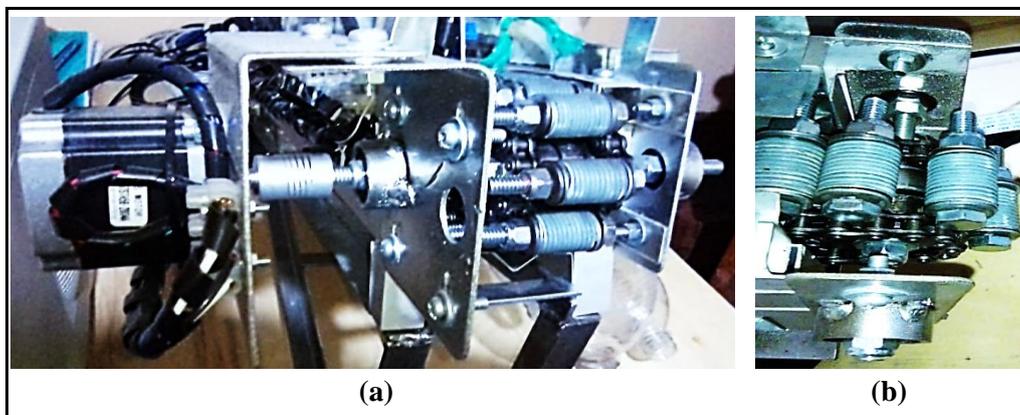


Figura 52. Unidad de enlace pulmón fabricada.

5.4.5.3 Unidad de posicionamiento. Esta unidad que lo conforman dos encarriladores se elaboraron según las siguientes operaciones tecnológicas:

1. Trazado de los elementos en la plancha de grilón de 1/4" de espesor según los planos diseñados, usando las herramientas de medición y marcado pertinentes.
2. Corte de los elementos trazados en la plancha mediante sierra manual.
3. Biselado de los elementos mediante amoladora con disco de desbaste y lima.
4. Ranurado de los elementos mediante taladrado con brocas para metal y lima.

Estos elementos se montaron sobre el bastidor con pernos atornillados en el mismo.

En la **Figura 53** se muestra los encarriladores derecho e izquierdo correspondientes al alimentador estático.



Figura 53. Unidad de posicionamiento fabricada.

5.4.5.4 Unidad de autonomía. Esta unidad se conforma de los siguientes elementos: exterior del contenedor, interior del contenedor y dos soportes; los cuales se construyeron según las siguientes operaciones tecnológicas:

1. Trazado y punzonado de los elementos en la chapa de acero galvanizado de 0,7 mm de espesor según los planos diseñados, usando las herramientas de medición y marcado pertinentes.
2. Corte de los elementos trazados en la chapa mediante amoladora con disco de corte y tijera para metal.
3. Perforación de agujeros en los elementos mediante taladrado con brocas para metal.
4. Desbarbado de los fillos de los elementos mediante amoladora con disco de desbaste.
5. Doblado de las chapas mediante dobladora manual de lámina y prensa de banco.
6. Unión de los elementos exterior e interior del contenedor mediante remaches.

Para el ensamblaje, se montaron los soportes en el bastidor, con pernos atornillados en el mismo, y luego se ajustó el contenedor sobre los soportes utilizando pernos y tuercas.

En la **Figura 54a** se muestra la vista frontal del contenedor armado y en la **Figura 54b** la vista posterior.

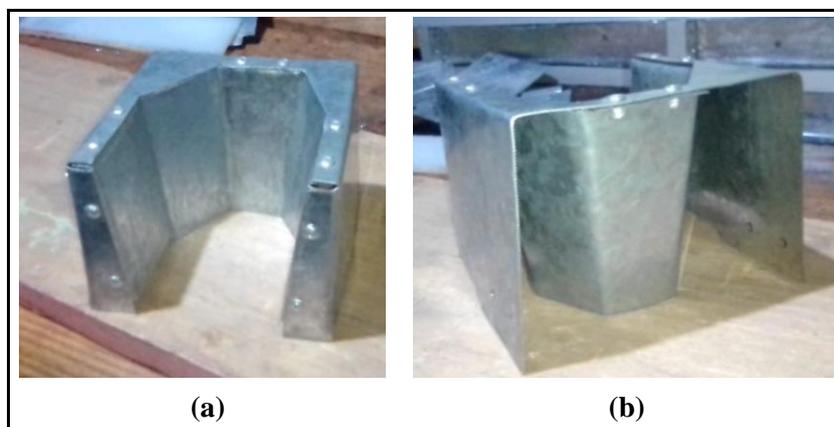


Figura 54. Unidad de autonomía fabricada.

5.4.5.5 Subunidad de eyección. Esta unidad se conforma de los elementos correspondientes al mecanismo de eyección, de los cuales, los elementos fabricados fueron: seis bases de servomotores, dos soportes horizontales y cuatro soportes verticales; los cuales se construyeron según las siguientes operaciones tecnológicas:

1. Trazado y punzonado de los elementos en la chapa de acero galvanizado de 0,7 mm de espesor según los planos diseñados, usando las herramientas de medición y marcado pertinentes.
2. Corte de los elementos trazados en la chapa mediante amoladora con disco de corte y tijera para metal.
3. Perforación de agujeros y ranuras en los elementos mediante taladrado con brocas para metal y limas.
4. Desbarbado de los filos de los elementos mediante amoladora con disco de desbaste.
5. Doblado de las chapas correspondientes a las bases de servomotores y los soportes verticales mediante dobladora manual de lámina y prensa de banco.
6. Unión de los elementos exterior e interior del contenedor mediante remaches.

El ensamble de esta subunidad se realizó como se describe a continuación:

1. Se montaron los soportes verticales en el bastidor con pernos atornillados en el mismo.
2. Se montaron los soportes horizontales en los soportes verticales mediante pernos y tuercas.
3. Se colocaron los servomotores en sus respectivas bases mediante pernos y tuercas.
4. Se montó las bases en los soportes horizontales por medio de pernos y tuercas.

En la **Figura 55a** se muestra la posición de los servomotores a lo largo del soporte horizontal y en la **Figura 55b** el detalle del motor DC sobre su base.

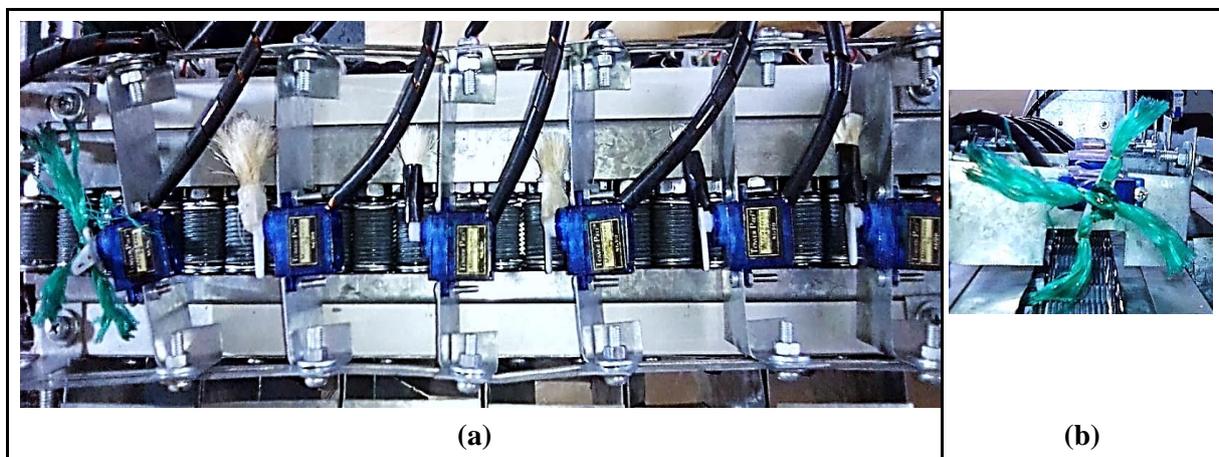


Figura 55. Subunidad de eyección fabricada.

5.4.5.6 Unidad de control y automatización. Esta unidad se conforma de los elementos correspondientes a la electrónica y su estructura contenedora, de los cuales, los que se adaptaron o fabricaron se mencionan a continuación, junto con las operaciones tecnológicas utilizadas aplicadas para su obtención:

1. Tablero:

1.1. Trazado y punzonado del espacio para el montaje de los elementos de control en la tapa del tablero (frente) y las fuentes (lateral), usando las herramientas de medición y marcado pertinentes.

1.2. Corte del espacio trazado para la pantalla y las fuentes en el tablero mediante amoladora con disco de corte.

1.3. Perforación de los agujeros señalados para las botoneras y luces indicadoras mediante taladrado con sacabocados.

1.4. Desbarbado de los bordes, mediante limas.

2. Módulo A:

Para la suelda de elementos electrónicos se ocupó: un cautín de 40W y estaño 60/40.

2.1. Fabricación de pistas según el plano diseñado, mediante puentes soldados en una baquelita perforada.

2.2. Unión de los elementos electrónicos en la baquelita perforada mediante suelda.

Para el ensamble de los elementos se procedió como se indica a continuación:

1. Colocación del riel DIN y la canaleta ranurada en la lámina de doble fondo.
2. Anclaje y cableado de los dispositivos electrónicos en la lámina doble fondo.
3. Montaje de la lámina doble fondo en el tablero.
4. Conexión de los sensores y actuadores.
5. Montaje y cableado de los elementos de control en la tapa del tablero y las fuentes.

La instalación de los elementos electrónicos en el tablero de control se muestra en la **Figura 56a** y la configuración de los mismos en la **Figura 56b**.

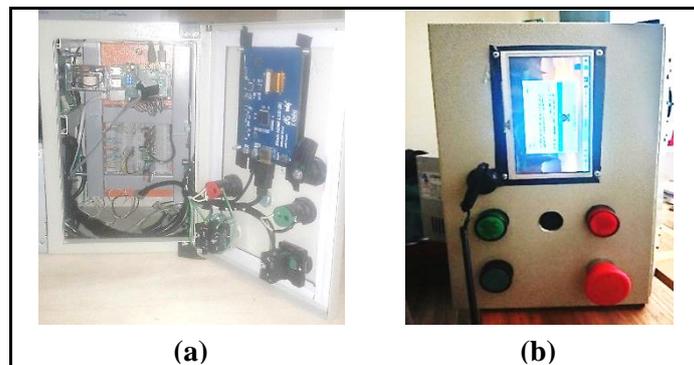


Figura 56. Unidad de control y automatización instalada.

En el **Anexo 20** se presentan los costos de cada uno de los elementos utilizados para la construcción de las unidades y subunidades del prototipo, divididos en los rubros de automatización, Módulo A y mecánica. En base a estos, se calcularon los totales de los componentes electrónicos y mecánicos, así como el costo total de los materiales utilizados.

5.4.6 Validación del prototipo

Utilizando el método de la matriz de confusión, presentada por Pérez & Gegúndez (2021) y detallada en el marco teórico, se evaluó el funcionamiento general del conjunto de los componentes que conforman el prototipo.

En primer lugar, se registraron los ensayos siguiendo los pasos que se describen a continuación:

1. Se consignó el número de ensayo.
2. Se verificó la ubicación de los encarriladores a 15 mm de separación.
3. Se cargó la tolva con media libra de frutos.
4. Se tomó el tiempo desde el arranque del proceso hasta la salida total del producto del sistema.
5. Se registró los datos en la matriz de confusión de la siguiente manera: primero, se eligió el contenedor del producto de una categoría (por ejemplo, verde); segundo, se contó los frutos presentes y su cantidad se ubicó en la categoría vertical correspondiente, esto se muestra en la **Figura 57a**. Posteriormente se seleccionó otro contenedor y se repitió este proceso, como se muestra en la **Figura 57b**.

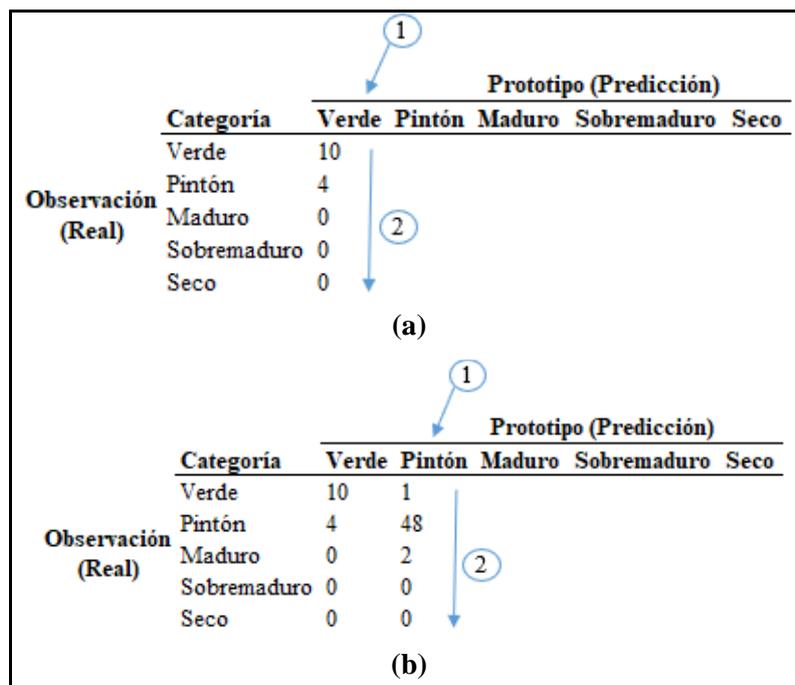


Figura 57. Ejemplo de registro de datos por contenedor.

6. Se registró el número de cerezas clasificadas, no clasificadas y de cerezas totales.

En la **Tabla 21**, se presenta el registro del primer ensayo de la prueba de funcionamiento general.

Tabla 21.

Registro del primer ensayo

Número de ensayo: 1						
Tiempo[<i>min:seg</i>]: 09:44						
Frutos clasificados: 110						
Frutos no clasificados: 39						
Frutos totales: 149						
		Prototipo (Predicción)				
	Categoría	Verde	Pintón	Maduro	Sobremaduro	Seco
Observación (Real)	Verde	9	6	4	2	0
	Pintón	4	6	8	10	0
	Maduro	3	1	18	6	0
	Sobremaduro	2	0	8	20	0
	Seco	0	0	0	2	1

En segundo lugar, se calculó para cada ensayo: el rendimiento bruto, que correspondió a la relación de frutos clasificados entre totales; la precisión, utilizando la **Ecuación 37**; y la exactitud, utilizando la **Ecuación 38**.

En la **Tabla 22**, se muestra los valores calculados para el primer ensayo.

Tabla 22.

Valores calculados para el primer ensayo

Rendimiento bruto: 0,74		
	Precisión	Exactitud
Categoría	[%]	[%]
Verde	36,91	31,64
Pintón	34,07	15,82
Maduro	34,97	47,46
Sobremaduro	36,91	49,22
Seco	73,83	24,61

El registro completo de los ensayos realizados junto a los valores calculados del rendimiento bruto, precisión y exactitud para cada ensayo se encuentran en el **Anexo 21**.

Finalmente, se calcularon los promedios de precisión y exactitud de los ensayos realizados, con estos se calculó para cada categoría el valor F1, usando la **Ecuación 39**, y los valores macro promedio del modelo.

6. Resultados

6.1 Propuesta general de diseño

Una vez analizadas las características de los frutos del cafeto y realizado el estudio general de los componentes de máquinas industriales clasificadoras de alimentos por color, se elaboró la propuesta conceptual del prototipo en donde se buscó que ejecute principalmente la identificación y separación de frutos del cafeto según las siguientes cinco categorías de color: verde, pintón, maduro, sobremaduro y seco.

Las matrices planteadas en el estudio general de componentes indicaron como mejor opción un modelo del tipo “sistema clasificador por medio de rodillos”. De ahí que la propuesta, adaptada a las unidades y subunidades conforme la alternativa factible y al criterio de selección para la construcción viable, se muestra en la **Tabla 23**. Además, se indica el orden de prioridad de diseño, enfocado en la unidad de producción del sistema.

Tabla 23.

Propuesta de componentes del clasificador y prioridad de diseño

Unidad	Subunidad	Componentes propuestos	Prioridad
Autonomía	---	Contenedor	4
Posicionamiento	---	Alimentador estático	3
Enlace pulmón	---	Cadena transportadora de rodillos	2
Selección	Censado	Estructura prismática con sensores de visión	1
	Eyección	Impulsores mecánicos	5

A continuación, se presenta una reseña de las funciones que cada componente cumple en correspondencia a su unidad de procesamiento.

- *Unidad de autonomía:* contenedor, se encarga de recibir y abastecer la carga a granel del café cereza de manera suave y regular.
- *Unidad de posicionamiento:* alimentador estático, se encarga de posicionar las cerezas de café recibidas a granel de manera que se desalojen individualmente y de manera ordenada.
- *Unidad enlace pulmón:* cadena transportadora de rodillos, se encarga del desplazamiento de las cerezas de café a lo largo de las unidades de procesamiento.
- *Unidad de selección:*
 - *Subunidad de censado:* estructura prismática rectangular con sensores de visión, se encarga de la identificación de las cerezas de café de acuerdo a los parámetros de color establecidos.

- *Subunidad de eyección*: impulsores mecánicos, se encargan de la exclusión del producto según la categoría reconocida por medio de un movimiento mecánico.
- *Unidad de control y automatización*: tablero de control, se encarga de integrar el funcionamiento electromecánico del prototipo.

En la **Figura 58** se presenta el diseño conceptual de la propuesta del prototipo, basado en las definiciones del diagrama de proceso de clasificadoras por color.

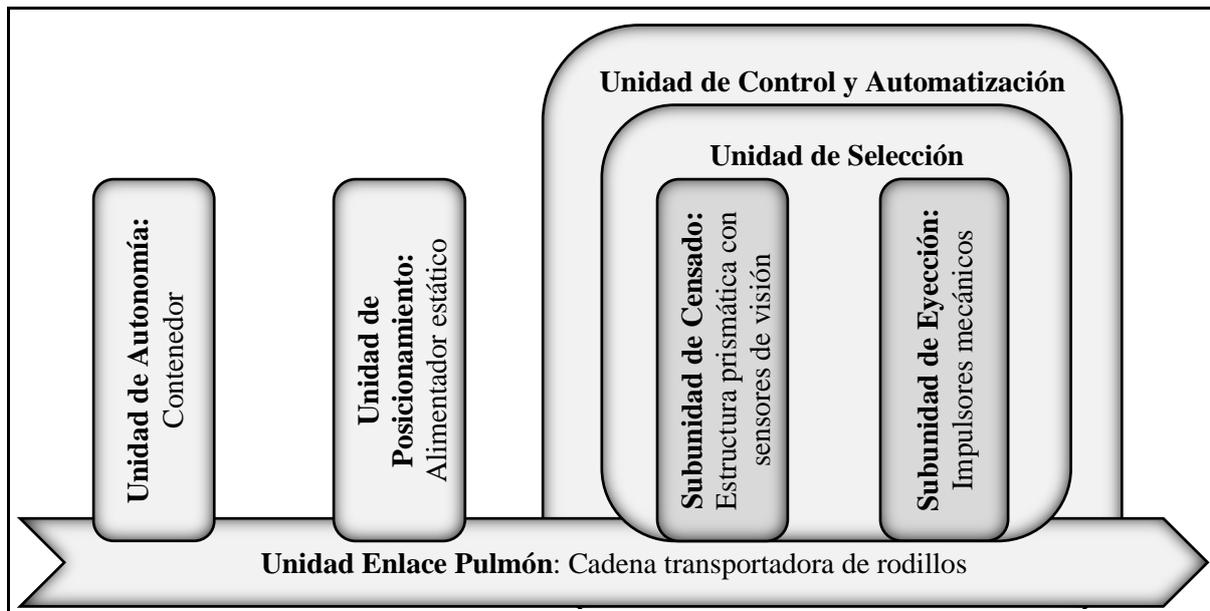


Figura 58. Diseño conceptual del prototipo.

6.2 Descripción del sistema electrónico

Los recursos seleccionados para cubrir los requerimientos electrónicos, bajo los criterios de: compatibilidad de características eléctricas, disponibilidad en el mercado, tipo y precio, se muestran en la **Tabla 24**.

Tabla 24.

Recursos seleccionados para cubrir los requerimientos electrónicos

Requerimientos electrónicos		Recursos seleccionados	Componente
Principales	Secundarios		
Reconocimiento de color	---	Sensor de visión	Raspberry Pi-Cámara
	Iluminación de objetos	Bombilla	Maviju-FocoLED-Dicroico
	Activación de cargas	Relé	Módulo Relé-2 Canales-(Canal 1)
Visualización de datos	---	Pantalla	Waveshare-HDMI LCD(B)-5inch
Control del desplazamiento de objetos	---	Drivers de control	Módulo Relé-2 Canales-(Canal 2)
			PCA9685
			TB6560
	Registro de movimiento	Sensor de objetos	LM393
Control general del sistema	---	Tarjeta de desarrollo	Raspberry Pi-4-Model B
Alimentación de cargas	---	Fuentes	Regleta Cortapicos
			ATX 450W
			Fuente 24V/5A

La integración de los componentes electrónicos se realizó a través del circuito de control, que como primera tarea tuvo el manejo de la alimentación de las diferentes fuentes, como se muestra en la **Figura 59a**, y seguido a esto la interrelación de la tarjeta de desarrollo con los drivers controladores y actuadores, como se muestra en la **Figura 59b**.

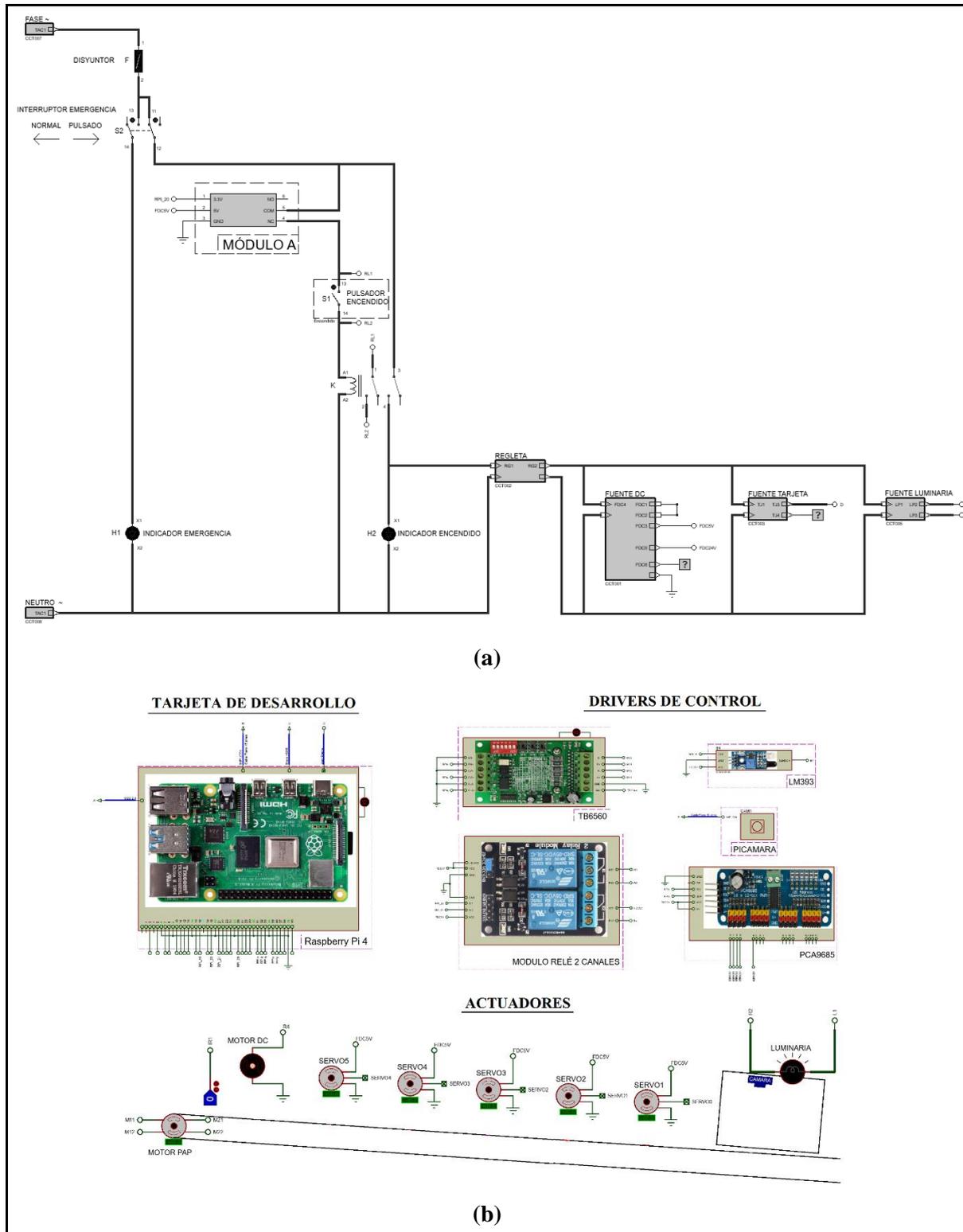


Figura 59. Circuito de control electrónico.

El apagado automático se realizó a través del circuito nombrado Módulo A, cuyo objetivo fue encargarse de enviar la señal correspondiente a la tarjeta de desarrollo para su debido apagado. El circuito correspondiente se muestra en la **Figura 60a**, y la ubicación de los elementos en la placa de circuito impreso en la **Figura 60b** y el modelo 3D en la **Figura 60c**.

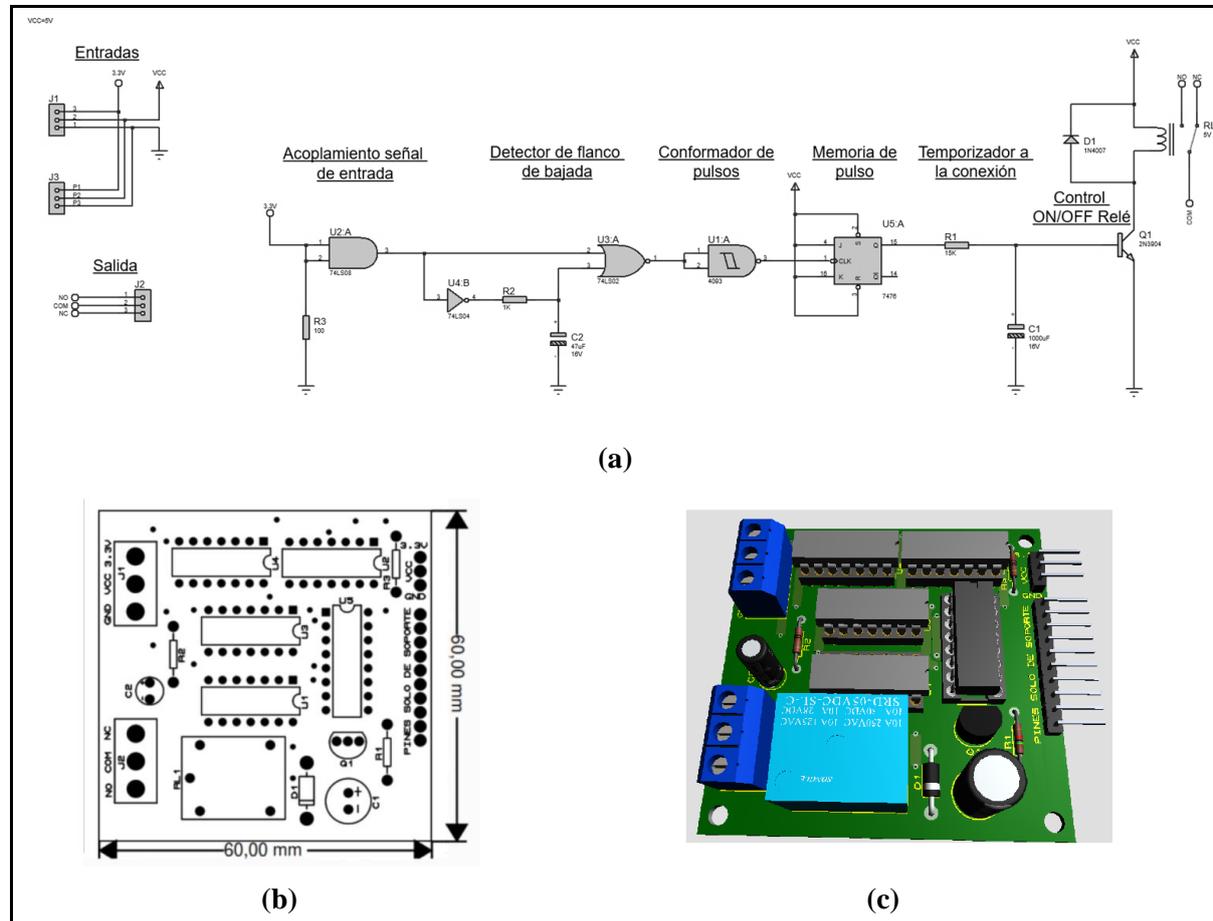


Figura 60. Circuito del Módulo A.

La programación realizada mediante el lenguaje de programación Python se presenta en el **Anexo 22**, y los planos electrónicos correspondientes se muestran en el **Anexo 23**.

6.3 Descripción del sistema mecánico

Las características de los componentes mecánicos que cubrieron los respectivos requerimientos se presentan a continuación, en el mismo orden en que fueron diseñados.

6.3.1 Subunidad de censado

Se implementó un cuarto de reconocimiento conformado en base a una estructura de forma de prisma cuadrangular que evita la interferencia de luz exterior. En su parte superior, soporta los elementos electrónicos de reconocimiento, como son la Raspberry Pi-Cámara y el soporte del foco LED dicroico. Además, su parte interna se pintó de color blanco para iluminar en su totalidad el objeto a reconocer.

La **Figura 61a** muestra el componente armado y la **Figura 61b** una vista explosionada.

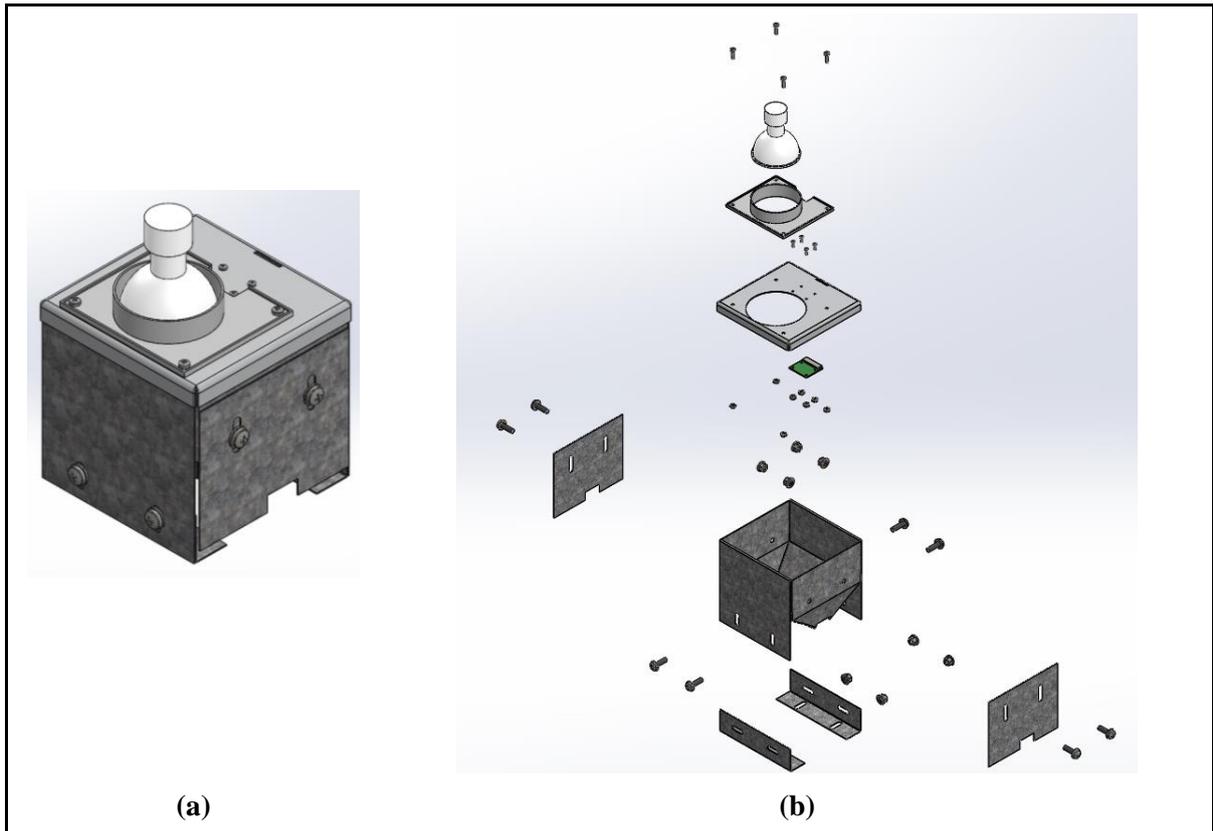


Figura 61. Subunidad de censado diseñada.

6.3.2 Unidad enlace pulmón

Se conformó de una cadena de rodillos con un motor PAP ubicado en el extremo motriz de la unidad. Estos se soportaron en un bastidor que permite disponer del ángulo de inclinación adecuado para el desplazamiento lineal de los frutos y con la geometría acorde a la subunidad de censado.

La **Figura 62** muestra el bastidor diseñado, mientras que la **Figura 63a** muestra el componente de transporte armado y la **Figura 63b** muestra una vista explosionada del mismo.

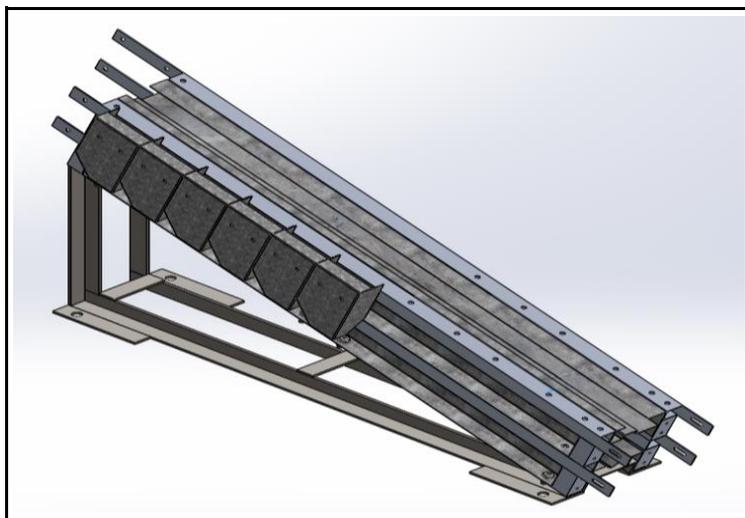


Figura 62. Bastidor diseñado.

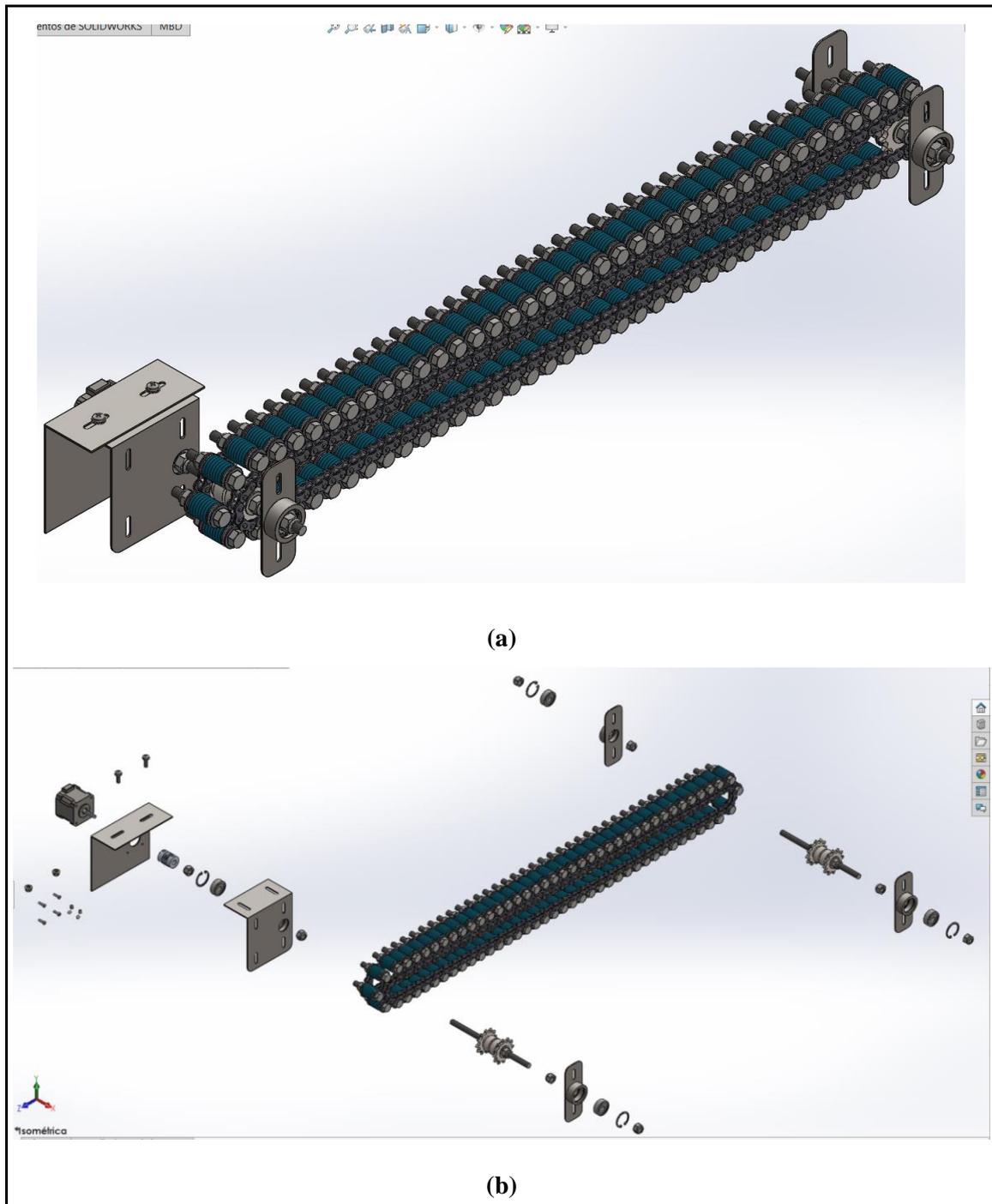


Figura 63. Unidad enlace pulmón diseñada.

6.3.3 Unidad de posicionamiento

Este componente se constituyó en forma de un par de encarriladores con dos servicios, el primero individualizar los frutos y el segundo alinearlos para ser transportados por la unidad de enlace pulmón. Esta unidad al ubicarse sobre el bastidor, se diseñó en concordancia con el mismo.

En la **Figura 64a** se muestra los elementos diseñados y en la **Figura 64b** la ubicación sobre el bastidor.

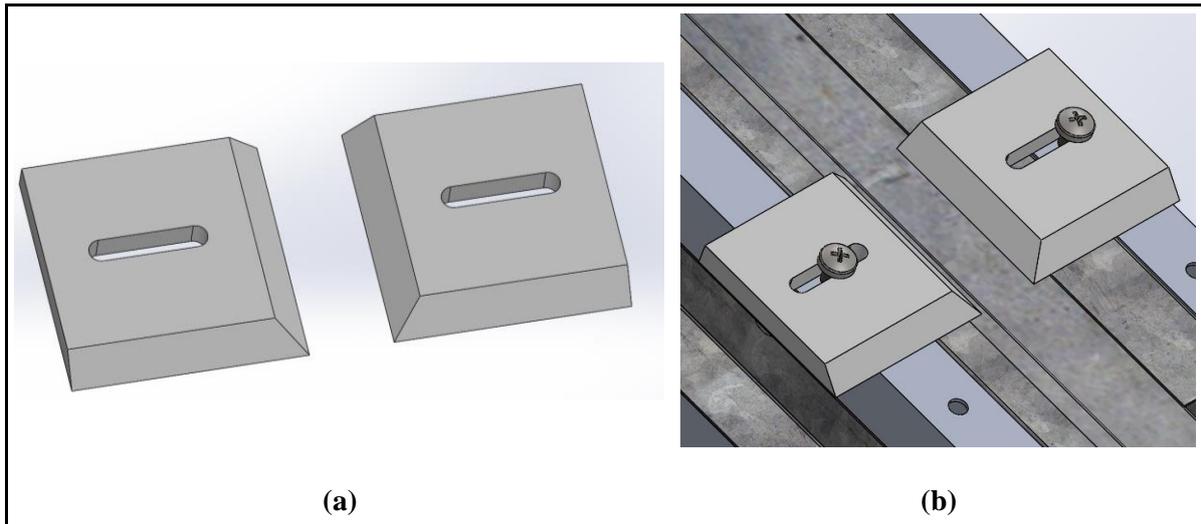


Figura 64. Unidad de posicionamiento diseñada.

6.3.4 *Unidad de autonomía*

Se diseñó en forma de un contenedor abierto, con sus paredes internas inclinadas para favorecer el desplazamiento hacia el fondo de los frutos, además en la base se dispuso de dos espacios para acoplarse sobre los encarriladores y piezas para anclarse al bastidor.

En la **Figura 65a** se muestra el componente armado y en la **Figura 65b** una vista explosionada.

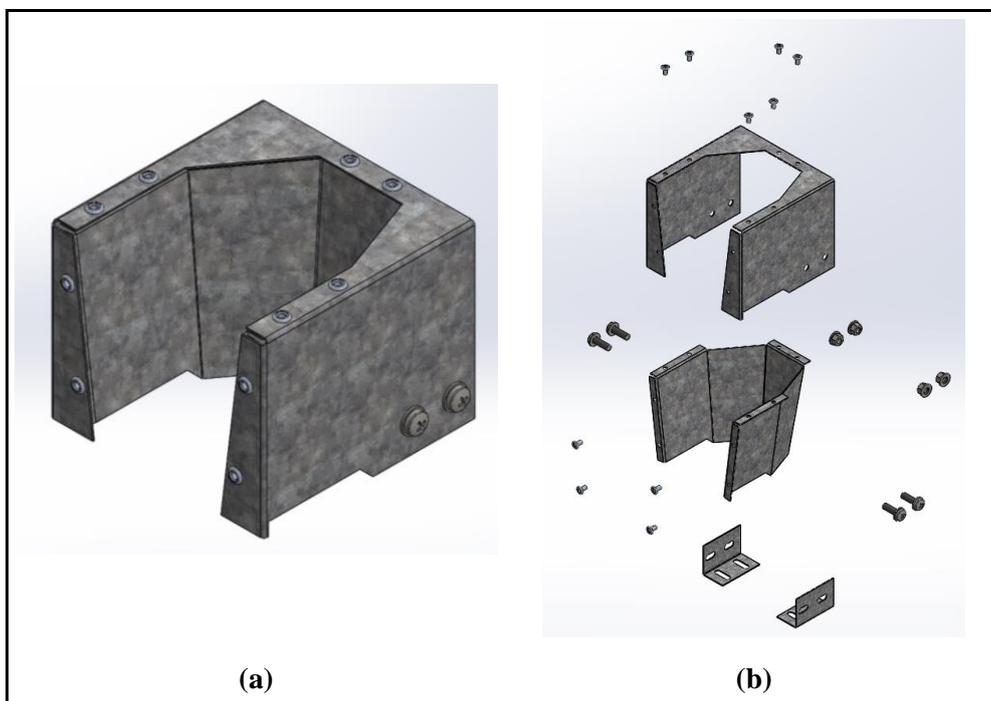


Figura 65. Unidad de autonomía diseñada.

6.3.5 *Subunidad de eyección*

Esta subunidad se adaptó para ubicar los servomotores que se encargan de impulsar los frutos de la cadena transportadora.

En la **Figura 66a** se muestra el componente armado y en la **Figura 66b** una vista explosionada.

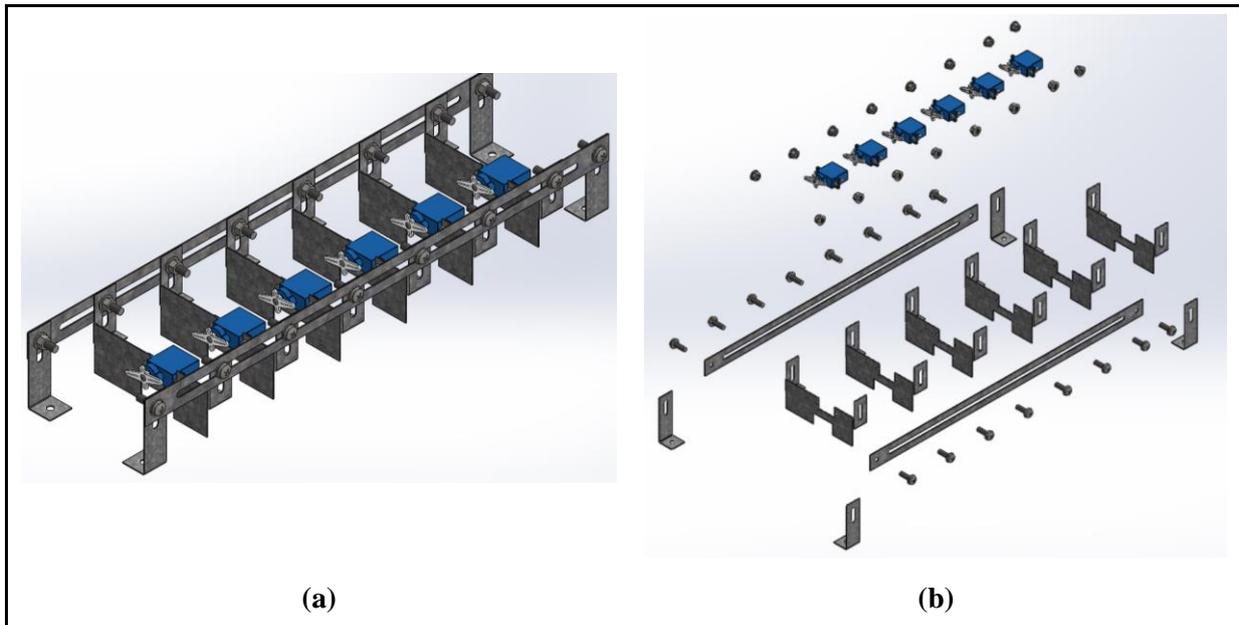


Figura 66. Subunidad de eyección diseñada.

6.3.6 Conjunto

En la **Figura 67a** se muestra una vista del lado derecho y la **Figura 67b** una vista del lado izquierdo.

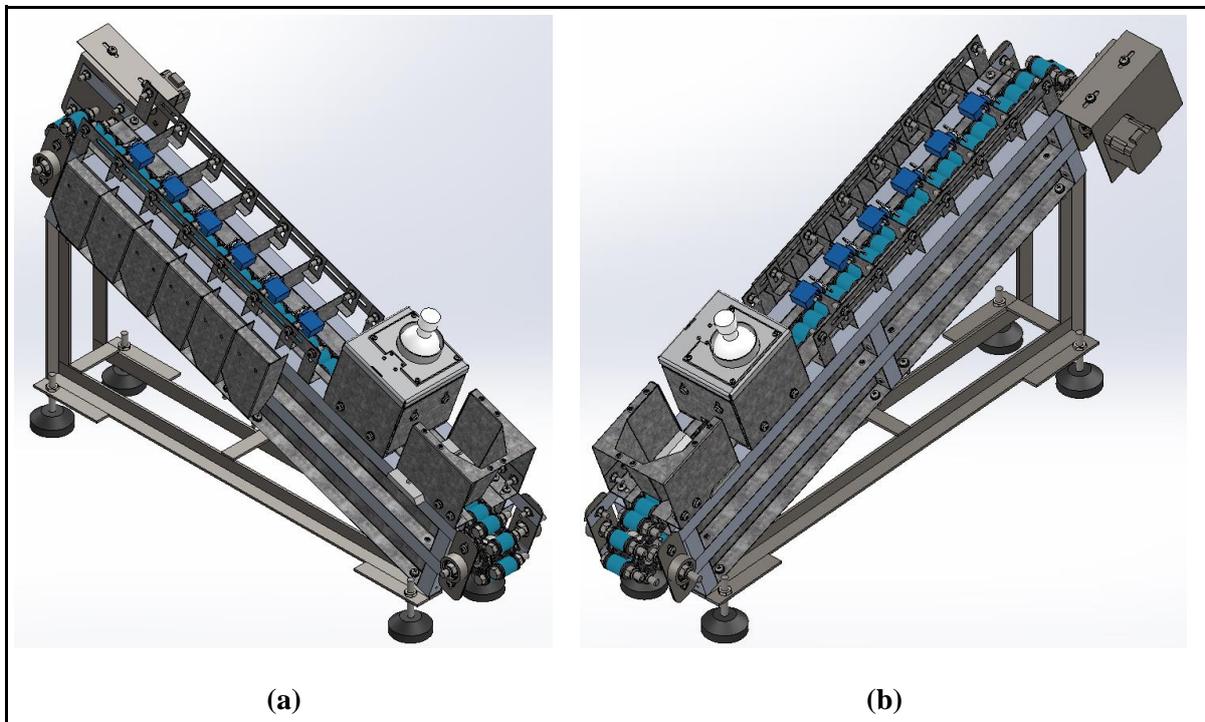


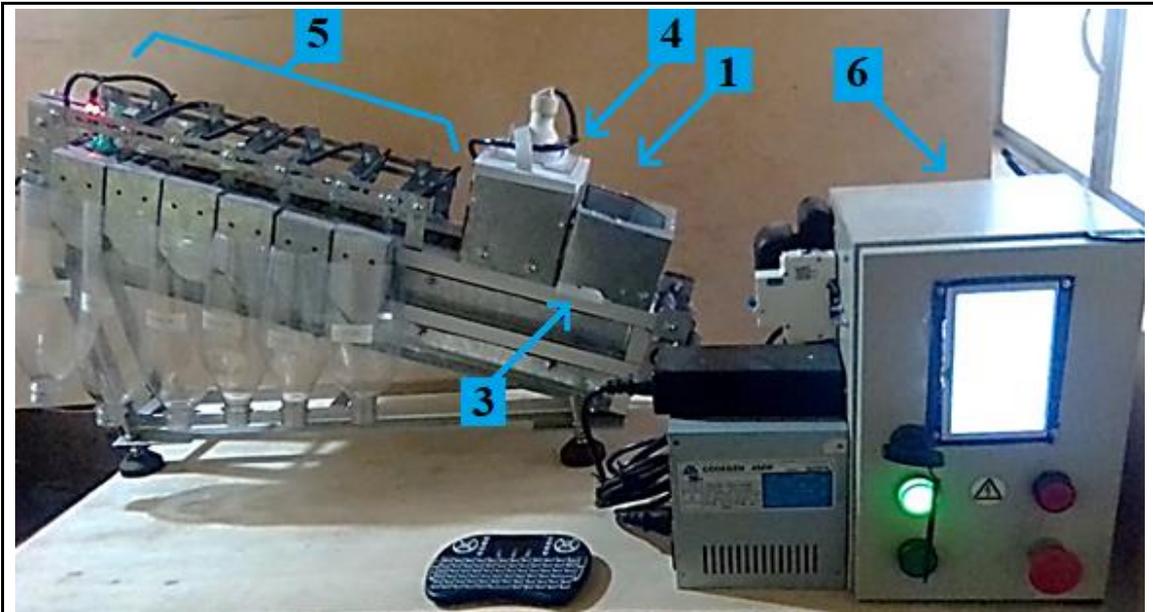
Figura 67. Conjunto diseñado.

Los planos a detalle del modelo mecánico diseñado por software se presentan en el **Anexo 24**.

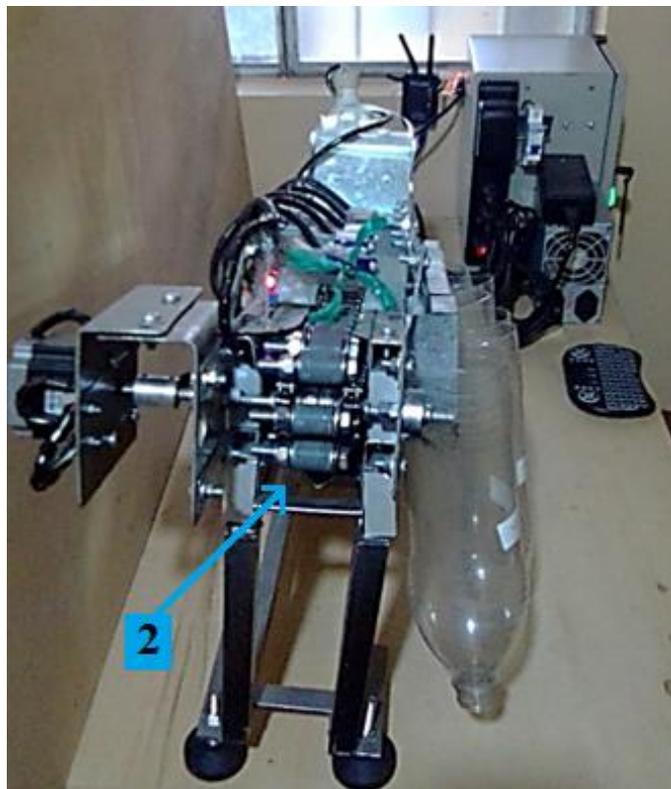
6.4 Modelo electromecánico construido

6.4.1 Características

El prototipo se constituyó de las unidades y subunidades presentadas en la **Figura 68a** (vista frontal) y **Figura 68b** (vista lateral); sus características de trabajo se detallan a continuación.



(a)



(b)

Figura 68. Prototipo implementado.

1. *Unidad de autonomía*: contenedor con capacidad de carga máxima de ½ libra de frutos de cafeto.
2. *Unidad de enlace pulmón*: cadena de rodillos con movimiento horizontal ascendente, la velocidad máxima de desplazamiento es de 1 m/min, controlada por software.
3. *Unidad de posicionamiento*: encarriladores de separación regulable máxima de 20 mm entre ellos, conforman el alimentador estático.
4. *Subunidad de censado*: estructura prismática en su interior con una cámara de 5 megapíxeles a 10 cm sobre el objetivo a identificar y con iluminación artificial del tipo luz blanca.
5. *Subunidad de eyección*: impulsores mecánicos basados en 5 servomotores y un motor DC ubicados aproximadamente a 5 cm de separación entre ellos y con una fuerza máxima a desarrollar de 6 N, controlados por software.
6. *Unidad de control y automatización*: tablero de control, que en el interior se ubicó la tarjeta de desarrollo, drivers y sus conexiones, mientras que en el exterior se anclaron las fuentes de alimentación.

En la parte frontal, se ubicaron dos botoneras y dos luces indicadoras: una verde para el encendido y una roja para el apagado de emergencia. Además, se encuentra la pantalla LCD que al encenderse el sistema mostrará la pantalla de arranque, como se aprecia en la **Figura 69a**, la pantalla al presionar la opción para iniciar el proceso, como se aprecia en la **Figura 69b**, y la pantalla durante el proceso, como se aprecia en la **Figura 69c**.

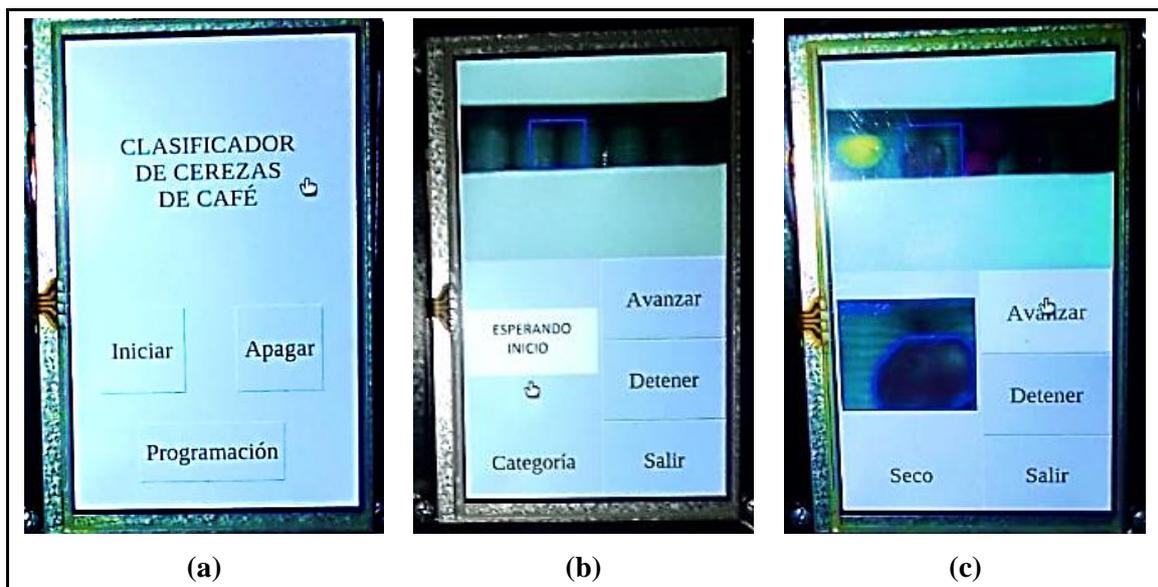


Figura 69. Pantallas de funcionamiento.

6.4.2 Manual de seguridad

Las siguientes directrices tratan de evitar riesgos y prevenir daños; además, ayudarán a realizar el uso correcto y seguro del prototipo.

6.4.2.1 Para la instalación del prototipo.

- El entorno de operación deberá contar con condiciones ambientales de temperatura entre 10 y 40 °C, con una humedad relativa del aire menor al 90 % sin condensación, para evitar fallos en los componentes electrónicos.
- El ambiente de operación debe estar exento de elementos contaminantes y sustancias corrosivas que puedan causar daños a las partes mecánicas y electrónicas del prototipo.
- El lugar de ubicación del prototipo debe encontrarse alejado de fuentes de calor, como hornos, o de la exposición de rayos solares que puedan producir deformaciones en la estructura o elementos debido a efectos térmicos.
- El lugar donde se ubique el prototipo debe estar distante de fuentes de vibración, como zarandas, que puedan afectar al funcionamiento del prototipo.
- El prototipo se deberá instalar sobre una mesa o espacio de trabajo con las medidas mínimas de largo, ancho y alto de 1,20 x 0,40 x 0,75 m.
- El espacio de trabajo deberá disponer de un tomacorriente de 110 V. Se evitará compartirlo con equipos que produzcan intensas perturbaciones electromagnéticas, como soldadoras.
- Previo a la instalación, se confirmará la presencia de los siguientes elementos: el módulo mecánico conectado con el tablero eléctrico y su respectiva llave, además de un lápiz táctil y un teclado inalámbrico, junto con su cargador y cable de carga.
- El traslado y montaje del prototipo se lo debe realizar entre dos personas, de manera que la manipulación simultánea del módulo mecánico y el tablero eléctrico evite forzar el cableado existente entre los dos.
- Tanto el tablero eléctrico y el módulo mecánico deberán manipularse desde la base de los mismos. Se advierte que la omisión de esta instrucción puede causar lesiones graves y/o daños en el equipo.
- La disposición del prototipo en referencia al frente del espacio de trabajo será la siguiente: a la izquierda estará el módulo mecánico, a la derecha estará el tablero eléctrico y en la parte posterior se ubicará el cableado.
- Se deberá verificar que el cableado no se encuentre en exceso doblado ni aplastado.

6.4.2.2 Previo al uso del prototipo.

- Revisar que el espacio de trabajo y el prototipo se encuentren en un estado general de limpieza y de manera firme. Si se requiere se puede ajustar las patas niveladoras.
- Verificar visualmente que a lo largo de la cadena de rodillos no se encuentren partículas extrañas como frutos secos, piedras, u otros objetos.
- Ajustar la distancia entre encarriladores. Para ello, se desmontará el contenedor retirando sus cuatro pernos laterales y aflojando los pernos que sujetan los encarriladores. Se sugiere una distancia de 15 mm centrada con el ingreso a la subunidad de censado. Terminado este proceso se monta el contenedor.
- Revisar que el contenedor se encuentre vacío y asegurado con un ligero movimiento lateral.
- Revisar la limpieza interior de la subunidad de censado. Para ello, se levantará la tapa suavemente cuidando del cableado respectivo. Si se encontraran partículas de polvo, se recomienda la limpieza con una brocha de cerdas finas, tanto del interior como de la cámara. Terminado este proceso se ubicará la tapa en la posición inicial y se cierra con un poco de presión.
- Revisar en la subunidad de eyección que los servomotores tengan sus aspas aseguradas y apuntando hacia el lado izquierdo, en referencia al frente de los servomotores. Si alguno requiere ajuste, para ganar espacio para la herramienta, se sugiere aflojar los pernos laterales del soporte del servomotor y girarlo hacia arriba con cuidado del cableado. Después de realizar el ajuste, volverlo a su posición inicial.
- Verificar el nivel de carga del teclado inalámbrico en caso de que sea necesario utilizarlo.
- Para tareas de programación de la tarjeta de desarrollo Raspberry Pi 4, se sugiere conectar el cable de red (azul) a un router, para permitir el acceso al software desde un equipo remoto. Para esto, el equipo remoto requiere disponer de los programas: IP Scanner, para localizar la dirección IP asignada a la tarjeta por el router; y VNC Viewer, para acceder a la tarjeta como administrador. Este proceso no requerirá necesariamente de conexión a internet.
- Para energizar el prototipo, asegurarse que el disyuntor (blanco) está en la posición de apagado (pestaña hacia abajo) y conectar al tomacorriente previamente dispuesto.

6.4.2.3 Durante el uso del prototipo.

- Se sugiere que el operador haga uso del equipo de protección personal básico en la industria de alimentos: mandil blanco, guantes de nitrilo, mascarilla, gafas y cofia.
- El operador deberá ubicarse en el sector frente al tablero de control, para monitorear continuamente el proceso.
- Para el encendido, primero se activará el disyuntor (blanco) moviendo su pestaña hacia arriba; luego, se pulsará la botonera verde, la cual a su vez encenderá la luz indicadora del mismo color.
- Una vez encendido el prototipo, está prohibido manipular las fuentes de alimentación. Se advierte que la omisión de esta instrucción puede causar lesiones graves y/o daños en el equipo.
- La pantalla táctil presenta opciones que pueden seleccionarse de manera manual, con el puntero táctil o en base al teclado inalámbrico. Se deberá evitar ejercer demasiada presión sobre la pantalla al realizar este movimiento.
- Al ubicar los frutos en el contenedor, se deberá evitar la sobrecarga y el aplastamiento de los mismos.
- Seleccionada la opción de avance, comenzará el movimiento de los mecanismos del prototipo, en este punto está prohibido manipular las partes móviles y por ningún motivo se deberá ingresar los dedos o herramientas. Se advierte que la omisión de esta instrucción puede causar lesiones graves y/o daños en el equipo.
- Se deberá tener precaución en el sector de los eyectores ya que algunos frutos podrían salir expulsados o caer fuera de los límites del prototipo por gravedad.
- Ante cualquier situación imprevista se deberá pulsar el paro de emergencia, que corresponde la botonera de color rojo, la cual a su vez encenderá la luz indicadora del mismo color. Esta acción suspende la parte eléctrica y libera parte mecánica, si se requiere se podrá mover la cadena de rodillos manualmente.
- Para la reactivación, se deberá liberar la botonera roja realizando un giro de 1/4 de vuelta, esto apaga la luz indicadora roja; luego, se pulsará la botonera verde para encender el equipo de nuevo.
- Para el apagado, primero se escoge la opción correspondiente en la pantalla táctil y se confirma con el apagado de la luz verde; luego, se desactivará el disyuntor (blanco) moviendo su pestaña hacia abajo; finalmente se desconecta del tomacorriente dispuesto para el prototipo.

6.4.2.4 Posterior al uso del prototipo.

- Se deberá realizar una limpieza general tanto del prototipo como del espacio de trabajo. Para esto, se recomienda que se haga de manera manual con una brocha pequeña de cerdas finas y si se requiere de un trapo húmedo, evitando el uso de aire comprimido.
- Para mantener la cadena en buen estado, es recomendable realizar lubricaciones manuales y periódicas utilizando aceite industrial tres en uno, que limpia, lubrica y previene el óxido.
- Otros elementos como el foco dicroico, los servomotores o sus escobillas, si llegan al fin de su vida útil o sufrir algún desperfecto se los deberá cambiar previo a un uso nuevo del prototipo.
- Para el almacenamiento del prototipo y con el fin de evitar la acumulación de polvo, se recomienda cubrirlo con una caja de cartón que abarque todo el prototipo y se coloque de manera vertical desde la parte superior; indicando en su parte externa lo que contiene y la manera de retirarlo.
- En el caso de requerir acceso al software, al encender el prototipo se elegirá la opción de programación en la pantalla táctil; luego, se digitará la clave de acceso (1234) mediante el teclado inalámbrico; a continuación, se mostrará la pantalla del escritorio de la tarjeta de desarrollo. En este punto, mediante un equipo remoto se ingresará en modo administrador.

Para ingresar desde un equipo remoto, se deberá seguir los siguientes pasos:

1. En el equipo remoto, ubicar la dirección IP de la tarjeta de desarrollo.
2. En el equipo remoto, abrir el programa VNC Viewer, crear una nueva conexión, ingresar la dirección IP de la tarjeta y un nombre (RaspberryAdmin).
3. Al dar doble clic en la conexión creada, se conecta automáticamente a la tarjeta de desarrollo. En este punto se puede ver ya la pantalla del prototipo, si mueve el mouse en el equipo remoto también lo hará en la pantalla del prototipo.
4. En la tarjeta de desarrollo, abrir una pantalla de consola e ingresar el siguiente comando “vncserver”, se creará un usuario a partir de la IP de la tarjeta.
5. En el equipo remoto, crear una nueva conexión, digitar la dirección IP creada y un nombre (RaspberryUser).
6. Al dar doble clic en la conexión creada, se notifica que se ha ingresado como usuario y se podrá modificar el tamaño de la ventana para la programación.

6.4.3 Instrucciones de operación

Las operaciones que se ejecutan para el funcionamiento del prototipo son las siguientes:

1. Se enciende el sistema pulsando la botonera verde en el tablero de control.
 2. En la pantalla táctil, al iniciar, el sistema muestra una ventana con las opciones:
 - Iniciar: lleva a la pantalla del proceso de clasificación.
 - Apagar: apaga el sistema automáticamente.
 - Programación: lleva a la ventana de verificación de usuario.
 3. Si se pulsó “Iniciar”, la ventana del proceso de clasificación muestra:
 - En la parte superior: el video en tiempo real de la cadena, en un recuadro de color azul la imagen que se va a reconocer.
 - A la izquierda: el recuadro “Esperando Inicio”, donde se ubicarán las imágenes capturadas, y debajo del mismo se mostrará la categoría reconocida a la que corresponde la cereza.
 - A la derecha las opciones: “Avanzar”, “Detener” y “Salir”.
 4. En este punto, se debe cargar los frutos de café en el contenedor.
 5. Al pulsar “Avanzar” arranca el proceso de clasificación de la siguiente manera:
 - 5.1.El motor PAP inicia el desplazamiento de los frutos, desde el contenedor por medio de la cadena.
 - 5.2.En la base del contenedor los encarriladores individualizan los frutos.
 - 5.3.A continuación, los frutos ordenados en fila ingresan a la subunidad de censado para su reconocimiento.
 - 5.4.La cámara captura y reconoce la categoría a la que pertenece el fruto de café y lo muestra en la pantalla.
 - 5.5. Los frutos avanzan a la siguiente etapa, en donde, si alcanzan la posición del eyector correspondiente a su categoría, serán desplazados por el mismo hacia el ducto de salida correspondiente.
 - 5.6.Si existiera algún fruto o partícula que no se haya reconocido, en la última posición de los eyectores serán desplazados por un motor DC que se mantiene activo a manera de limpiador de la cadena.
 6. Al pulsar “Detener”, se para en el motor PAP y el motor DC.
 7. Al pulsar “Salir”, lleva a la ventana de inicio del sistema.
 8. En caso de algún tipo de imprevisto pulsar la botonera roja de paro de emergencia.
- En el **Anexo 25** se presenta un video del funcionamiento con las operaciones descritas.

6.4.4 Costos de implementación

En la **Tabla 25** se presenta la suma del costo de los elementos que conforman los componentes electrónicos y mecánicos, así como el costo total del prototipo.

Tabla 25.

Costo de materiales del prototipo

Componentes del prototipo	Subtotal
Electrónicos	544,18
Mecánicos	214,33
Total:	758,51

6.5 Desempeño del sistema

En la **Figura 70** se muestra el resultado de un ensayo realizado.



Figura 70. Prueba del funcionamiento del prototipo.

En la se presentan los resultados promedios del rendimiento bruto, tiempo y velocidad de procesamiento. Además, la precisión, exactitud y rendimiento global (F1) para cada categoría y macro promedio del modelo.

Tabla 26.

Resultados finales de ensayos

Promedio		Promedios			
Rendimiento bruto [%]:	78	Precisión	Exactitud	F1	
Tiempo [min:seg]:	09:51	[%]	[%]	[%]	
Velocidad [frutos/min]-[g/min]:	15,2 - 23,07	Categoría			
		Verde	40,24	44,26	42,15
		Pintón	41,59	18,38	25,49
		Maduro	41,73	58,76	48,80
		Sobremaduro	44,65	47,81	46,18
		Seco	78,39	53,04	63,27
		Macro Promedios	49,32	44,45	46,76

7. Discusión

De acuerdo al primer objetivo específico, se obtuvo un proceso de clasificación de frutos por color, donde se incorporan las unidades de procesamiento modulares e independientes de: autonomía, posicionamiento, selección y automatización; sobre la unidad de enlace pulmón, que las vincula secuencialmente por medio de un transportador de cadena.

Esta propuesta se asemeja al sistema presentado por Herrera & Medina (2015), donde los componentes de los procesos independientes de reconocimiento y separación son acoplados por un transportador de banda de semi rodillos. Sin embargo, difiere de los sistemas de Castaño & Zuluaga (2016) y Ramos et al. (2010), donde los procesos de autonomía, reconocimiento y separación están ligados a una estructura y se vinculan mediante desplazamiento gravitatorio en el primer caso y un disco rotatorio en el segundo caso.

Además, según la teoría consultada, en el medio internacional se encuentran clasificadores de alimentos por color que utilizan los siguientes procesos de selección: por gravedad, como el modelo WYCS8-512 (WENYAO, 2021a); por transportador de banda o cadena, como el Sistema clasificador por medio de rodillos (Corporación Industrial Urapan, 2015); y la combinación de ambos, como los modelos Blizzard (TOMRA, 2021b), Halo (TOMRA, 2021a) y WYB1 (WENYAO, 2021b). Por lo tanto, se corrobora que el proceso de clasificación propuesto es acorde al método de selección por transportador de cadena.

En tanto a la calidad de la metodología de estudio utilizada en este punto, aunque se basa en la evaluación de criterios según la experiencia del investigador, ofrece una aproximación confiable de la forma y el desempeño que se requiere para los componentes en general de una máquina. El uso de esta metodología es evidente en los trabajos realizados por Rosales (2022) y Reyes (2017).

En respuesta al primer problema específico, planteado como: “¿Qué información bibliográfica se requiere consultar y cuál será el análisis bibliográfico a realizar, sobre las características de los frutos del cafeto y máquinas de alimentos que identifiquen por la tonalidad de la epidermis?”; se necesita obtener información relacionada con: las propiedades físicas de los frutos, los modelos industriales y de trabajos experimentales de máquinas selectoras por color; a partir de esto, se identifican las propiedades relevantes del cafeto, así como de los tipos de procesos y componentes utilizados en las máquinas mencionadas.

Por lo expuesto previamente, se verifica la hipótesis planteada para el primer objetivo: “La recopilación de información sobre las características colorimétricas y mecánicas de los frutos del cafeto, así como la discriminación de posibles alternativas de métodos mecánicos usados para la selección por color, permitirán reconocer los componentes del dispositivo”.

Entorno a las limitaciones en este punto, no existe estudios sobre las características colorimétricas de los frutos café en el Ecuador, por lo que se usó los estudios de Colombia.

En torno a las proyecciones, en base a este método se pueden plantear alternativas de clasificación basados en otras características, como la detección de la broca o el tamaño.

De acuerdo al segundo objetivo específico, los sistemas mecánico y electrónico resultantes conforman un sistema automático que se ajusta a un transportador inclinado de cadena de rodillos, cuyas características relevantes son: una cabina de reconocimiento equipado con una cámara de 5 MP e iluminación LED y un control del sistema mediante la tarjeta de desarrollo Raspberry Pi, programada en el lenguaje Python.

Este diseño se asemeja al sistema presentado por Herrera & Medina (2015), donde se ha configurado un transportador horizontal, cuyos elementos utilizados para el reconocimiento son dos cámaras de 5 MP con iluminación artificial en un entorno cerrado, todo controlado mediante la programación en el lenguaje Python.

En contraste, este diseño difiere de los trabajos presentados por Castaño & Zuluaga (2016) y Ramos et al. (2010), donde se dispone de una estructura cilíndrica y una de tipo disco, respectivamente. Además, los elementos utilizados para el reconocimiento son sensores de color y se controlan mediante una tarjeta Arduino Uno y lenguaje C++ en el primer caso; y mediante una PC y lenguaje gráfico en Labview en el segundo caso.

De acuerdo con la teoría revisada, los clasificadores por color de alimentos industriales utilizan sensores de visión, de color, de tecnología láser y de rayos X, como lo indica Couceiro et al., (2013). Estos sensores se confinan para evitar interferencias en la recopilación de información. Por otro lado, trabajos como el de Viera (2017) y Fuster (2017) muestran que el uso de una tarjeta Raspberry Pi junto a la librería Open CV para aplicaciones de visión artificial es una alternativa preferible frente a otros sistemas de reconocimiento. Por lo tanto, se nota que los componentes del presente proyecto encajan con estas definiciones.

En cuanto a la calidad de la metodología de estudio utilizada en este punto, tanto para el diseño mecánico como el electrónico, la aplicación del ciclo básico de diseño expuesto por Riba (2002) o el modelo descriptivo lineal de diseño indicado en el trabajo de Chaur (2005) ha reportado resultados satisfactorios del detalle de los componentes y elementos.

En respuesta al segundo problema específico, planteado así: “¿Cómo debe realizarse la proyección, selección y cálculo de los componentes electromecánicos de un dispositivo que permita la identificación y separación de frutos del cafeto por la tonalidad de la epidermis?; se parte de los requerimientos para cada componente, luego se verifica la existencia comercial de elementos que podrían cubrirlos y posteriormente se diseña y calcula los componentes restantes

para obtener una propuesta de diseño que permita la clasificación de los frutos por su color.

Por lo expuesto previamente, se verifica la hipótesis planteada para el segundo objetivo: “Mediante el análisis de elementos electrónicos disponibles en el mercado y el cálculo de componentes mecánicos basado en catálogos y libros de diseño se podrá plantear la propuesta del dispositivo de identificación”.

En razón a las limitaciones en este punto, la tarjeta de control al realizar el proceso de clasificación satura sus capacidades y experimenta salidas abruptas del programa deteniendo todo el sistema.

Como proyección se puede realizar una programación más eficiente y/o la utilización de un distinto dispositivo de control.

De acuerdo al tercer objetivo específico, el modelo construido resultante es un prototipo de tamaño 120x30x50 cm (largo, ancho y alto), con un costo de \$758,51 dólares, y un rendimiento global (F1) del 46,76%, realizando una clasificación en cinco categorías.

Al comparar el tamaño y el costo del modelo construido con los sistemas presentados por Castaño & Zuluaga (2016), Herrera & Medina (2015) y Ramos et al. (2010), que tienen las dimensiones de 25x25x50 cm, 50x25x20 cm y 25x20x15 cm, respectivamente, y los costos de \$849,76 y \$285,13 para los dos primeros, se nota que la propuesta diseñada es la de mayor tamaño, y el costo es menor en \$91,25 que la propuesta más costosa. Por lo tanto, se podría inferir que el costo está relacionado con el tamaño.

Si se considera los rendimientos se tiene que: Castaño & Zuluaga (2016), indican un 90% de aciertos clasificando entre dos categorías; Herrera & Medina (2015) presentan un 87% de efectividad en la clasificación en dos categorías que incluyen la detección de la broca y; Ramos et al. (2010), expone una eficacia global del 97,5% clasificando en cuatro categorías. Por lo tanto, el sistema propuesto tiene un menor rendimiento global frente a las otras propuestas, sin embargo, tiene el mayor número en cuanto a categorías de clasificación.

Las afirmaciones planteadas se ratifican con la información proporcionada por los fabricantes industriales en la plataforma Made-in-China (2023), donde son más comunes los clasificadores por dos categorías, en esta se encuentra el modelo compacto Blizzard (TOMRA, 2021b) con un tamaño de 290x210x199 cm, y sus precios van desde los \$3500. En cuanto al rendimiento global, para considerarlo bueno debe ser de al menos de un 95%, como lo sustentan Herrera et al. (2016).

Con lo que respecta al método de evaluación utilizado, Silva (2021), recomienda el uso de la matriz de confusión para clasificadores multivariable o multi-etiqueta, siendo este método

el que proporciona información detallada sobre cómo un clasificador está pronosticando las diferentes clases y como se están cometiendo los errores de clasificación.

En respuesta al tercer problema específico, planteado como: “¿Qué resultados tendrá la evaluación del dispositivo de identificación diseñado?; se obtiene los resultados sobre el costo de fabricación y rendimiento en términos de exactitud y precisión sobre el modelo de clasificación construido del prototipo.

Por lo expuesto previamente, se verifica la hipótesis planteada para el tercer objetivo: “La aplicación de la matriz de confusión para multivariantes a un dispositivo para identificación por tonalidades de la epidermis fabricado permitirá la evaluación del mismo”.

Cabe reconocer que las limitaciones en este punto se encontraron en torno a las muestras a evaluar, ya que al no ser un fruto climatérico una vez cosechado es muy sensible a la humedad y al ataque de hongos, deteriorándose rápidamente sobre todo su piel, por lo que se debió coordinar para la obtención de muestras una vez hecha la cosecha y en consecuencia se realizaron pocas pruebas efectivas del prototipo.

Como proyección, se puede plantear un modelo con más cadenas de rodillos para aumentar las líneas de producción y que se adapte a los requerimientos de las plantas de beneficiado de café.

8. Conclusiones

- Se logró identificar los componentes para la operación del dispositivo de reconocimiento de los frutos de café por colores, obteniendo un diseño conceptual que integró los elementos propuestos de: contenedor, alimentador estático, cadena transportadora de rodillos, estructura prismática con sensores de visión e impulsores mecánicos. Se verificó que el proceso propuesto es acorde al método de selección por transportador de cadena utilizado en el sector industrial para clasificadores de alimentos.
- Del diseño a detalle de la electrónica y mecánica del dispositivo se obtuvo un sistema automático de reconocimiento comandado por una tarjeta controladora Raspberry Pi programada en Python, recepción de los frutos cosechados en un contenedor de paredes inclinadas, alineación mediante un par de encarriladores, captura de imagen mediante una cámara de 5MP en una cabina de reconocimiento, separación por cinco eyectores mecánicos impulsados por servomotores SG90 y un transporte portante inclinado de cadena de rodillos de PVC. Estos componentes son equiparables en forma y tecnología a los utilizados en trabajos previos de clasificación.
- Se evaluó el dispositivo para reconocimiento diseñado mediante su fabricación, de donde se obtuvo los siguientes valores macro promedios: 49.32% de precisión, 44,45% de exactitud y 46,76% de rendimiento global. Las categorías de clasificación incluyeron: verde, pintón, maduro, sobremaduro y seco. Al compararlo con trabajos previos, se observó que el bajo rendimiento está asociado con una mayor cantidad de categorías clasificadas.

9. Recomendaciones

- En el caso de la electrónica, para el tablero de control se recomienda considerar las dimensiones de las fuentes para su ubicación dentro del mismo y tener en cuenta la generación de interferencias (ruido) en las tarjetas de control.
- Para evitar la saturación de la tarjeta de control, se recomienda el uso de un microcontrolador dedicado para los procesos de ordenamiento y activación del sistema de eyectores.
- En el caso de la mecánica, se recomienda el uso de materiales de grado alimenticio, una cubierta para el conjunto, un modelo de eyectores que permita una separación más suave de los frutos y optar por materiales plásticos de impresión 3D para los elementos del bastidor.

10. Bibliografía

- Aguirre, C. (2020). *¿Cuál tarjeta de desarrollo elegir?* <https://uelectronics.com/cual-tarjeta-de-desarrollo-elegir/>
- Camacho, M., Martínez, N., Chiralt, A., & González, C. (2011). *Experimentos de fisicoquímica de alimentos* (1a ed.). Universidad Politécnica de Valencia.
- Caraballo, M. (2020). *Árboles y ejes en solicitaciones compuestas, apuntes de clase*. Universidad Nacional de Loja.
- Carita, F. (2011). *Diseño estructural de silos*.
- Carvajal, J., Aristizábal, I., & Oliveros, C. (2012). Evaluación de propiedades físicas y mecánicas del fruto de café (*Coffea arabica* L. var. Colombia) durante su desarrollo y maduración. *DYNA*, 173, 166–124.
- Carvajal, J., Aristizábal, I., Oliveros, C., & Mejía, J. (2011). Colorimetría del fruto de café (*Coffea arabica* L.) durante su desarrollo y maduración. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 64(2), 6229–6240.
http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0304-28472011000200020
- Castaño, P., & Zuluaga, F. (2016). *Diseño de un sistema electrónico de sensor cromático para la selección de grano de café*. Universidad Tecnológica de Pereira.
- Cedal. (2008). *Catálogo de perfiles*.
- Chaur, J. (2005). *Diseño conceptual de productoa asistido por ordenador: un estudio analítico sobre aplicaciones y definición de la estructura básica de un nuevo programa* [Universidad Politécnica de Catalunya]. <https://www.tdx.cat/handle/10803/6837#page=1>
- Corona, L., Abarca, G., & Mares, J. (2014). *Sensores y actuadores, aplicaciones con Arduino*.
- Corporación Industrial Urapan. (2015). *Sistema de clasificación por medio de rodillos*.
<http://www.ciumx.com/>
- Couceiro, J., Guerrero, J., Gijón, M., Moriana, A., Pérez, D., & Rodríguez, M. (2013). *El cultivo del pistacho*.
- Dávila, R. (2020). *Plan de desarrollo de ordenamiento territorial de la provincia de Loja 2015-2025*. <https://prefecturaloja.gob.ec/documentos/lotaip/2020/PDOT-2020.pdf>
- Deutschman, A. D., Michels, W. J., & Wilson, C. E. (1987). *Diseño de máquinas, teoría y práctica*.
- DEXTER. (2019). *Fijaciones, apartado técnico*.
- DIPAC. (2020). *Catálogo general de productos*.

- DISAI. (2012). *Acoplamientos flexibles*.
- FAG. (2000). *Catálogo de Rodamientos*.
- Faires, V. M. (1999). *Diseño de elementos de maquinas* (Cuarta).
<https://doi.org/10.1111/j.2007.0906-7590.05231.x>
- Fenoll, J., Borja, J. C., & Seco de Herrera, J. (2011). *Mecanizado básico*. Macmillan Profesional.
- Fernández, F. (2017). *Guía para facilitar el aprendizaje en el manejo del cultivo de café robusta (Coffea canephora P.)*. *Guía de aprendizaje No. 008* (I. N. de I. A. INIAP (ed.)).
- Fernández, G. (1983). *Resistencia de materiales-Tomo II*.
- Fisgativa, D. (2021). “Una enfermedad silenciosa”: ¿qué es la antracnosis del café?
<https://perfectdailygrind.com/es/2021/04/27/una-enfermedad-silenciosa-que-es-la-antracnosis-del-cafe/>
- Fuentes, R. (2021). *Prototipo de clasificador multiclase para relatos médicos*. Universidad de Chile.
- Fuster, A. (2017). *Navegación autónoma mediante raspberry PI y la plataforma OpenCV*. Universidad Politécnica de Valencia.
- González, G., & Silva, F. (2013). Diseño e implementación de una tarjeta de desarrollo con profundización en desarrollo de aplicación de touch sensing. *Innovation in Engineering, Technology and Education for Competitiveness and Prosperity*.
- Gonzalez, O. (2020). *Curso de diseño de máquinas*.
<https://www.youtube.com/watch?v=YDdHEEAVeHY>
- Groover, M. (2007). *Fundamentos de manufactura moderna* (Tercera). McGraw-Hill.
- Guzmán, J. (2023). *Introducción a Python*. <https://github.com/josejesusguzman/bootcamp-programacion-brujeriatech>
- Hamrock, B. J., Jacobson, B. O., & Schmid, S. R. (2000). *Elementos de máquinas*.
- Heras, J. (2020). *Precisión, recall, F1, accuracy en clasificación*.
<https://www.iartificial.net/precision-recall-f1-accuracy-en-clasificacion/#:~:text=El valor F1 se utiliza,la exhaustividad entre varias soluciones.&text=El valor F1 asume que,la precisión y la exhaustividad.>
- Herrera, J., & Medina, S. (2015). *Diseño de un sistema automático de selección de frutos de café mediante técnicas de visión artificial*.
- Herrera, J., Medina, S., Martínez, G., Beleño, K., & Julie, B. (2016). Clasificación de frutos de café según se estado de maduración y detección de la broca mediante técnicas de procesamiento de imágenes. *Prospect*, 14(1), 15–22.

- Hibbeler, R. C. (2011). *Mecánica de materiales* (octava).
 IMECA. (2008). *Católogo técnico*.
 INEN, S. E. de N. (2006). *Café verde en grano, clasificación y requisitos*(INEN 805).
<https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/285-1.pdf>
 Juárez, A., Debernardi, H., Quevedo, A., Malagón, F., & Morales, V. (2018). Características físicas del fruto de café (*Coffea arabica* L.) en híbridos de timor. *Agro Productividad*, 11(3), 115–120.
 Juter's Tools. (2023). *Catálogo de productos*.
<https://juterstools.com.mx/ecommerce/inicio/270-tornillo-cabeza-fijadora-metrico-m5-08.html>
 Kerguignas, M., & Caignaert, G. (1980). *Resistencia de materiales*.
 Khalajabadi, S. (2017). Síntomas visuales de deficiencias nutricionales en el café. *Cenicafé*, 478. <https://www.cenicafe.org/es/publications/avt0478.pdf>
 Liarte, D. (2009). *Sensores con tecnología CCD vs CMOS*.
<https://www.xatakafoto.com/camaras/sensores-con-tecnologia-ccd-vs-cmos#:~:text=Se trata de los CCD,las celdas de esta matriz.>
 López, J. (2015). Café de calidad. *Perspectivas de Investigación*, 2(13), 8.
<https://perspectivas.utpl.edu.ec/sites/default/files/junio15/revista-perspectivas-junio-2015.pdf>
 López, J. (2021). *Definiciones y especificaciones de modelos de clasificación*.
 Made-in-China. (2023). *Clasificadores de frutas*. <https://es.made-in-china.com/productSearch?inputkeyword=tomra¤tTab=¤tPage=¤tCat=¤tRegion=¤tProp=&submitPageUrl=&parentCat=&otherSearch=¤tAllCatalogCodes=&sgsMembership=&memberLevel=&topOrder=&size=&more=más&less=less&st>
 Maney, G. (1947). *Predicting bolt tension*.
 Marín, S., Arcilla, J., Montoya, E., & Oliveros, C. (2003a). Cambios físicos y químicos durante a maduración del fruto de café(*Coffea arabica* L. var Colombia). *Cenicafé*, 54(3), 208–225.
 Marín, S., Arcilla, J., Montoya, E., & Oliveros, C. (2003b). Escala de maduración para los frutos del cafeto(*Coffea arabica* L.). *Cenicafé*, 315.
 Martin Sprocket & Gear. (2013). Sección E - Sprockets. In *El gran catálogo 4000*.
 Matos, N. (2011). *Transportadores industriales (conveyors)*. Universidad de Camagüey.
 Mecatrónica LATAM. (2021). *Motor paso a paso*.

- <https://www.mecatronicalatam.com/es/tutoriales/motor/motores-electricos/motor-de-corriente-continua/motor-paso-a-paso/>
- Montilla, J., Arcila, J., Aristizábal, M., Montoya, E., Puerta, G., Oliveros, C., & Cadena, G. (2008). Propiedades físicas y factores de conversión del café en el proceso de beneficio. *Cenicafé*, 370.
- Mott, R. L. (2006). *Diseño de elementos de maquinas* (4ta ed.). PEARSON EDUCACIÓN.
- Nextion. (2022). *NX8048T050*. <https://nextion.tech/datasheets/nx8048t050/>
- Parker, H., & Ambrose, J. (2000). *Diseño simplificado de estructuras de madera*.
http://recursosbiblio.url.edu.gt/publicjlg/biblio_sin_paredes/fac_arqui/dis_simpli_estruc/05.pdf
- Pérez, I., & Gegúndez, M. (2021). *Deep learning: fundamentos, teoría y aplicación* (Primera). uhu.es.
<https://play.google.com/books/reader?id=kzsvEAAAQBAJ&pg=GBS.PA1&hl=es&printsec=frontcover>
- Pololu Corporation. (2023). *High torque hybrid stepping motor specifications*.
<https://www.pololu.com/file/0J674/SY57STH56-2804A.pdf>
- Prat, L. (2013). *Dispositivos optoelectrónicos*.
- PROMESA. (2018). *Pernería y fijación*.
- PROYESA. (2018). *Manual técnico de pernos*.
- Pytel, A., & Singer, F. L. (2008). *Resistencia de materiales* (Cuarta Ed).
- RAE. (2014). *Diccionario de la lengua española*. <https://dle.rae.es/color>
- Ramos, P., Sanz, J., & Oliveros, C. (2010). Identificación y clasificación de frutos de café en tiempo real, a través de la medición de color. *Cenicafé*.
- Real Academia de Ingeniería. (n.d.). *Diccionario español de ingeniería*. Retrieved May 9, 2021, from <https://diccionario.raing.es/es/lema/peso-fresco-0>
- Reyes, A. (2017). *Diseño de un sistema semiautomático para lavado de botellas de vidrio tipo III, de 750ml de capacidad*. Universidad Nacional de Loja.
- Riba, C. (2002). *Diseño concurrente* (Universidad Politécnica de Cataluña (ed.)).
<https://books.google.com.ec/books?id=IeaPng4UWdgC&printsec=frontcover&hl=es#v=onepage&q&f=false>
- Rodríguez, Á. (2019). *Catálogo de productos ZMC*.
- Rodríguez, H. (2020). *El bastidor de los vehículos automóviles*.
<https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn69.html>
- Rosales, G. (2022). *Diseño y construcción de un prototipo de máquina clasicadora de café*

- seco y trillado*. Universidad Nacional de Loja.
- Salager, J. (2007). *Granulometría teoría*.
- Silva, D. (2021). *Clasificación jerárquica multiclase*. Universidad Politécnica de Valencia.
- SKF. (2023). 628-2Z. <https://www.skf.com/pe/products/rolling-bearings/ball-bearings/deep-groove-ball-bearings/productid-628-2Z>
- Suminsa Industrial. (2021). *Soluciones integrales de las clasificadoras de colores*.
<https://suminsaindustria.com/soluciones-integrales-de-las-clasificadoras-de-colores/>
- Timoshenko, S., & Woinowsky-Krieger, S. (1970). *Teoría de láminas y placas*.
- TOMRA. (2021a). *Clasificación óptica de alimentos por sensores-Halo*.
<https://www.tomra.com/es-es/sorting/alimentacion/equipamiento-de-clasificacion/halo>
- TOMRA. (2021b). *Máquinas para clasificación de vegetales y frutas-Blizzard*.
<https://www.tomra.com/es-es/sorting/alimentacion/equipamiento-de-clasificacion/blizzard>
- Translink. (2005). *Cadena de rodillos de acero y inox (Quinta)*.
- Unidad de Vigilancia Tecnológica e Inteligencia Competitiva. (2018). *Etapas clave en el beneficiado húmedo del café*. https://issuu.com/citeagroindustrialica/docs/bo-18-006_bolet_n_etapas_clave_en_el_beneficiado_h/1
- Viera, G. (2017). *Procesamiento de imágenes usando OpenCV aplicado en Raspberry Pi para la clasificación de cacao*. Universidad de Piura.
- WENYAO. (2021a). *5t/H Chickpea Separator Machine Stainless 304 food grade Hopper*.
<https://www.wenyaocolorsorter.com/sale-13940558-5t-h-chickpea-separator-machine-stainless-304-food-grade-hopper.html>
- WENYAO. (2021b). *High Sorting Accuracy Belt Type Multifunction Color Sorter With The Best Price*. <https://www.wenyaocolorsorter.com/sale-13931745-high-sorting-accuracy-belt-type-multifunction-color-sorter-with-the-best-price.html>
- Westreicher, G. (2020, July 25). *Unidad de producción*.
<https://economipedia.com/definiciones/unidad-de-produccion.html>

11. Anexos

Anexo 1. Estados de maduración y propiedades físico-químicas del café cereza.

Estado	Edad y Color del fruto	Propiedades Físicas promedias para el fruto				Peso y Humedad promedio de los frutos				Propiedades Químicas (Promedio)																	
		Díámetro característico (mm)	Fuerza de tracción (N)**	Firmeza ecuatorial (N)	Firmeza polar (N)	Peso fresco (g)	Peso seco (g)	Relación peso fresco/seco	Humedad (%)	Acidez titulable	Sólidos solubles totales	pH	Clorofilas totales (lg/g)														
 Verde 1	182 días después de la floración Color verde oscuro Pantone (Proceso Color Guide)* C(35) M(0) Y(100) K(40)	11,54	+/- 0,14	12,31	+/- 0,54	50,33	+/- 0,79	49,48	+/- 0,74	1,33	+/- 0,03	0,45	+/- 0,03	2,98	+/- 0,16	66,43	+/- 4,72	9,4	+/- 0,20	2,69	+/- 0,27	5,17	+/- 0,06	16,02	+/- 1,52		
 Verde 2	189 ddL. Color verde oscuro Tamaño mayor al estado verde 1 Pantone C(35) M(0) Y(100) K(20)	13,21	+/- 0,11	13,07	+/- 0,43	49,89	+/- 2,64	48,18	+/- 0,52	1,33	+/- 0,07	0,45	+/- 0,03	2,98	+/- 0,20	66,36	+/- 2,31	6,0	+/- 0,30	3,22	+/- 0,20	5,18	+/- 0,02	12,99	+/- 0,85		
 Verde 3	196 ddL. Coloración verde oscura brillante Pantone C(40) M(20) Y(100) K(15)	13,92	+/- 0,14	13,08	+/- 0,42	48,56	+/- 0,65	48,16	+/- 0,51	1,74	+/- 0,07	0,53	+/- 0,04	3,24	+/- 0,11	69,40	+/- 1,01	5,7	+/- 0,27	7,12	+/- 0,59	5,22	+/- 0,01	16,74	+/- 1,27		
 Verde amarillito	203 ddL. Cerezas con color amarillento Pantone C(20) M(0) Y(100) K(40)	13,85	+/- 0,14	12,62	+/- 0,49	40,36	+/- 1,17	41,13	+/- 1,23	1,62	+/- 0,09	0,50	+/- 0,03	3,26	+/- 0,04	69,35	+/- 0,40	5,1	+/- 0,42	8,63	+/- 0,42	5,20	+/- 0,05	7,96	+/- 0,85		
 Pintón	210 ddL. Colorado predominante Pantone C(20) M(0) Y(100) K(40) C(10) M(75) Y(80) K(0)	13,38	+/- 0,14	12,56	+/- 0,40	23,32	+/- 0,45	23,63	+/- 0,69	1,75	+/- 0,07	0,52	+/- 0,12	3,47	+/- 0,69	70,59	+/- 3,74	6,7	+/- 0,87	12,03	+/- 0,27	5,04	+/- 0,11	3,91	+/- 0,07	1,52	+/- 0,04
 Maduro	217 ddL. Rojo brillante a rojo opaco Pantone C(0) M(100) Y(90) K(10) C(10) M(80) Y(70) K(15)	14,22	+/- 0,11	9,66	+/- 0,26	12,37	+/- 0,45	12,17	+/- 0,45	1,99	+/- 0,06	0,60	+/- 0,02	3,30	+/- 0,08	69,70	+/- 0,76	11,4	+/- 0,60	17,53	+/- 2,34	4,95	+/- 0,07	2,22	+/- 1,11	8,26	+/- 0,77
 Sobremaduro	224 ddL. Morado brillante a morado oscuro opaco Pantone C(10) M(100) Y(50) K(30) C(0) M(35) Y(0) K(100)	14,09	+/- 0,14	5,63	+/- 0,30	6,93	+/- 0,35	8,78	+/- 0,42	1,88	+/- 0,06	0,63	+/- 0,03	3,00	+/- 0,14	66,59	+/- 1,53	21,5	+/- 1,14	23,83	+/- 0,92	4,76	+/- 0,08	3,12	+/- 0,16	47,15	+/- 16,53
 Seco	231 ddL. Color café oscuro, cereza arrugada a seca. Pantone C(0) M(0) Y(35) K(100) C(0) M(0) Y(25) K(80)	10,57	+/- 0,11	0,89	+/- 0,13	3,49	+/- 0,58	5,05	+/- 0,77	0,66	+/- 0,13	0,45	+/- 0,05	1,45	+/- 0,14	29,90	+/- 6,61	38,9	+/- 4,13	20,05	+/- 2,94	4,56	+/- 0,08	-	-	-	-

Fuente: (Marín et al., 2003b)

Estado	Calidad del café beneficiado			Calidad del café pergamino seco (promedio)			Calidad de la Almendra			Granulometría (promedio)			Calidad de bebida* (promedio)		
	Pergamino Almendra pelada Defectos Broca Pulpa Café sin desgalpar	17,78% 0,80 % 17,30% 0,77% 4,50% 8,90%	+/- 1,44 +/- 21,53 +/- 15,35 +/- 3,3 +/- 3,26 +/- 7,44	Relación cc/cps Pergamino seco Almendra pelada Defectos Broca Guayaba Impurezas	43:1 40,00% 31,97% 17,27% 1,30% 5,83% 3,63%	+/- 12,29 +/- 3,98 +/- 9,49 +/- 1,94 +/- 3,20 +/- 0,62	Rendimiento en trilla Merma Almendra sana Almendra con defectos Almendra sobre Malla 14 Almendra sobre Malla 12	173,4 9,33% 45,32% 50,03% 90,99% 1,01%	Malla 12 Malla 14 Malla 15 Malla 16 Malla 17	1,01% 4,52% 21,46% 8,96% 64,05%	Intensidad del aroma Aroma de la bebida Acidez Amargor Cuerpo Impresión global	3,92 4,17 2,92 2,92 2,92 2,92	+/- 0,65 +/- 0,56 +/- 0,25 +/- 0,63 +/- 0,25 +/- 0,25		
Verde 1	Pergamino Almendra pelada Defectos Broca Pulpa Café sin desgalpar	30,56% 44,91% 12,33% 1,26% 3,51% 7,98%	+/- 6,62 +/- 0,98 +/- 6,13 +/- 1,43 +/- 1,77 +/- 3,90	Relación cc/cps Pergamino seco Almendra pelada Defectos Broca Guayaba Impurezas	11:47 41,90% 29,23% 17,40% 7,20% 2,80%	+/- 10,27 +/- 8,57 +/- 2,82 +/- 0,89 +/- 3,86 +/- 0,25	Rendimiento en trilla Merma Almendra sana Almendra con defectos Almendra sobre Malla 14 Almendra sobre Malla 12	175,8 9,98% 44,95% 50,41% 90,41% 1,59%	Malla 12 Malla 14 Malla 15 Malla 16 Malla 17	1,59% 6,45% 15,39% 35,87% 40,96%	3,00 3,00 2,50 2,33 2,33 2,33	+/- 0 +/- 0 +/- 0,63 +/- 0,63 +/- 0,63 +/- 0,63			
Verde 2	Pergamino Almendra pelada Defectos Broca Pulpa Café sin desgalpar	17,60% 41,82% 28,49% 0,91% 5,34 % 5,86%	+/- 13,81 +/- 25,49 +/- 9,53 +/- 1,2 +/- 5,95 +/- 0,93	Relación cc/cps Pergamino seco Almendra pelada Defectos Broca Guayaba Impurezas	25:34 22,53% 49,17% 20,33% 0,43% 4,60% 3,07%	+/- 11,98 +/- 13,48 +/- 6,34 +/- 1,28 +/- 1,74 +/- 1,50	Rendimiento en trilla Merma Almendra sana Almendra con defectos Almendra sobre Malla 14 Almendra sobre Malla 12	170,7 6,13% 42,33% 57,67% 99,09% 0,91%	Malla 12 Malla 14 Malla 15 Malla 16 Malla 17	0,91% 3,93% 10,93% 20,91% 63,33%	3,00 3,00 3,00 3,00 3,00	+/- 0,63 +/- 0,42 +/- 0,55 +/- 0,55 +/- 0,35 +/- 0,55			
Verde 3	Pergamino Almendra pelada Defectos Broca Pulpa Café sin desgalpar	43,51% 27,66% 16,03% 1,93% 4,92% 6,11%	+/- 11,88 +/- 3,95 +/- 7,34 +/- 1,19 +/- 4,89 +/- 1,92	Relación cc/cps Pergamino seco Almendra pelada Defectos Broca Guayaba Impurezas	9:07 48,86% 27,85% 15,68% 0,48% 4,49% 2,73%	+/- 13,31 +/- 9,98 +/- 4,20 +/- 0,45 +/- 1,67 +/- 1,33	Rendimiento en trilla Merma Almendra sana Almendra con defectos Almendra sobre Malla 14 Almendra sobre Malla 12	120,1 8,94% 64,48% 35,52% 99,74% 0,26%	Malla 12 Malla 14 Malla 15 Malla 16 Malla 17	0,26% 1,86% 7,77% 25,93% 64,18%	3,00 3,00 2,92 2,92 2,92	+/- 0,83 +/- 0,51 +/- 0,61 +/- 0,55 +/- 0,59 +/- 0,59			
Verde amarillo	Pergamino Almendra pelada Defectos Broca Pulpa Café sin desgalpar	74,53% 7,62% 6,83% 7,12% 2,58 % 1,42%	+/- 8,65 +/- 4,22 +/- 5,60 +/- 8,97 +/- 2,84 +/- 2,06	Relación cc/cps Pergamino seco Almendra pelada Defectos Broca Guayaba Impurezas	6:27 76,99% 8,42% 8,95% 1,91% 2,14% 1,65%	+/- 6,90 +/- 4,40 +/- 1,84 +/- 1,68 +/- 1,38 +/- 0,41	Rendimiento en trilla Merma Almendra sana Almendra con defectos Almendra sobre Malla 14 Almendra sobre Malla 12	100,2 16,28% 83,79% 16,22% 99,50% 0,87%	Malla 12 Malla 14 Malla 15 Malla 16 Malla 17	0,50% 2,54% 8,00% 19,43% 69,53%	6,58 6,50 7,00 7,00 7,00	+/- 0,99 +/- 1,06 +/- 0,54 +/- 0,69 +/- 0,87 +/- 0,87			
Pintón	Pergamino Almendra pelada Defectos Broca Pulpa Café sin desgalpar	90,94% 0,22% 1,15% 7,67% 0,27% 0,00%	+/- 5,08 +/- 0,36 +/- 0,36 +/- 4,19 +/- 0,39 +/- 0	Relación cc/cps Pergamino seco Almendra pelada Defectos Broca Guayaba Impurezas	5:04 94,59% 1,21% 1,16% 2,82% 0,28% 0,30%	+/- 0,53 +/- 0,54 +/- 0,43 +/- 1,08 +/- 0,17 +/- 0,03	Rendimiento en trilla Merma Almendra sana Almendra con defectos Almendra sobre Malla 14 Almendra sobre Malla 12	92,4 18,05% 93,06% 6,94% 99,31% 0,69%	Malla 12 Malla 14 Malla 15 Malla 16 Malla 17	0,68% 3,16% 13,72% 27,10% 55,35%	6,92 6,83 7,25 7,42 7,17	+/- 0,42 +/- 0,18 +/- 0,33 +/- 0 +/- 0 +/- 0			
Maduro	Pergamino Almendra pelada Defectos Broca Pulpa Café sin desgalpar	84,35% 0,73% 0,75% 13,81% 0,65% 0,08%	+/- 5,39 +/- 0,36 +/- 0,40 +/- 5,32 +/- 0,39 +/- 0,21	Relación cc/cps Pergamino seco Almendra pelada Defectos Broca Guayaba Impurezas	5:25 88,64% 1,25% 1,86% 6,38% 1,45% 0,61%	+/- 3,57 +/- 0,51 +/- 0,80 +/- 2,61 +/- 0,61 +/- 0,25	Rendimiento en trilla Merma Almendra sana Almendra con defectos Almendra sobre Malla 14 Almendra sobre Malla 12	101,4 18,22% 85,47% 14,53% 99,07% 0,93%	Malla 12 Malla 14 Malla 15 Malla 16 Malla 17	0,76% 3,41% 13,79% 82,04%	6,75 7,00 7,00 6,92 6,92	+/- 0,32 +/- 0,32 +/- 0,33 +/- 0,18 +/- 0,25 +/- 0,25			
Sobremaduro	Pergamino Almendra pelada Defectos Broca Pulpa Café sin desgalpar	6,27% 56,06% 3,91% 30,80% 2,12% 1,44%	+/- 2,98 +/- 8,53 +/- 0,49 +/- 9,38 +/- 0,69 +/- 2,07	Relación cc/cps Pergamino seco Almendra pelada Defectos Broca Guayaba Impurezas	68:41 4,76% 47,30% 9,45% 35,97% 1,84% 0,79%	+/- 3,11 +/- 10,14 +/- 2,14 +/- 13,27 +/- 1,84% +/- 0,24	Rendimiento en trilla Merma Almendra sana Almendra con defectos Almendra sobre Malla 14 Almendra sobre Malla 12	158,7 2,22% 45,27% 54,73% 99,67% 0,33%	Malla 12 Malla 14 Malla 15 Malla 16 Malla 17	0,33% 2,63% 6,37% 25,97% 64,70%	5,83 5,33 2,92 2,83 2,83	+/- 1,09 +/- 0,56 +/- 0,19 +/- 0,19 +/- 0,19 +/- 0,19			

Fuente: (Marín et al., 2003b)



ENTREVISTA

Reciba un cordial saludo de parte del estudiante Cristian Fernando Pupiales Ordóñez, y con el motivo de elaboración de mi trabajo de titulación le solicito muy comedidamente y agradeciendo su colaboración me ayude contestando las siguientes preguntas:

Nombre del entrevistado/a: José Miguel Fernández Ariza
Empresa Establecimiento: Laboratorio de la carrera de alimentos UTPL
Cargo/Labor: Docente Investigador

Desde la actividad que desempeña:

1) ¿Por qué es importante la selección por color de cerezas de café?

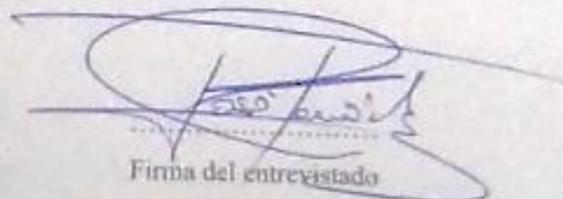
El color en una fruta permite determinar el estado de maduración de la misma y es un indicador de las cualidades sensoriales, por lo que la cereza de café debe estar en un estado óptimo de color para que garantice las cualidades sensoriales.

2) ¿Cómo se realiza el proceso de selección?

Por algunos métodos que buscan identificar el grado de madurez, una muestra por medio de los gustos brix que corresponde al dulzor que contiene la fruta y otros en el porcentaje del color, estos son complementarios e indican el momento de realizar la cosecha, idealmente fruta por fruta o pipetas.

3) ¿Cómo se podría mejorar el proceso de selección?

Cuando se trabaja en valmicos se busca el ahorro de recursos, entre ellos la mano de obra, por lo que se puede optar por mecanismos que incluyen fotómetros, determinadores de color y que permitan un proceso automatizado de la separación.


Firma del entrevistado

Fecha: 28/04/23

Anexo 3. Propiedades de las secciones transversales comunes.

<p style="text-align: center;">$c = d/2$</p>	$A = b d$ $I_x = \frac{b d^3}{12}$ $S_x = \frac{b d^2}{6}$ $r_x = \sqrt{\frac{d}{12}}$	<p style="text-align: center;">$c = b$</p>	$A = b d$ $I_x = \frac{b d^3}{3}$ $S_x = \frac{b d^2}{3}$ $r_x = \frac{d}{\sqrt{3}}$
<p style="text-align: center;">$c = \frac{d}{2}$</p>	$A = \frac{\pi d^2}{4}$ $I_x = \frac{\pi d^4}{64}$ $S_x = \frac{\pi d^3}{32}$ $r_x = \frac{d}{4}$	<p style="text-align: center;">$c = \frac{2d}{3}$</p>	$A = \frac{b d}{2}$ $I_x = \frac{b d^3}{36}$ $S_x = \frac{b d^2}{24}$ $r_x = \frac{d}{\sqrt{18}}$
<p style="text-align: center;">$c = \frac{d}{2}$</p>	$A = b d - b_i d_i$ $I_x = \frac{b d^3 - b_i d_i^3}{12}$ $S_x = \frac{b d^3 - b_i d_i^3}{6 d}$ $r_x = \sqrt{\frac{b d^3 - b_i d_i^3}{12 A}}$	<p style="text-align: center;">$c = \frac{d}{2}$</p>	$A = \frac{\pi (d^2 - d_i^2)}{4}$ $I_x = \frac{\pi (d^4 - d_i^4)}{64}$ $S_x = \frac{\pi (d^4 - d_i^4)}{32 d}$ $r_x = \frac{\sqrt{d^2 - d_i^2}}{4}$
<p>$A = \text{área}$ $I = \text{momento de inercia}$ $S = \text{módulo de la sección} = \frac{I}{c}$ $r = \text{radio de giro} = \sqrt{\frac{I}{A}}$</p>			

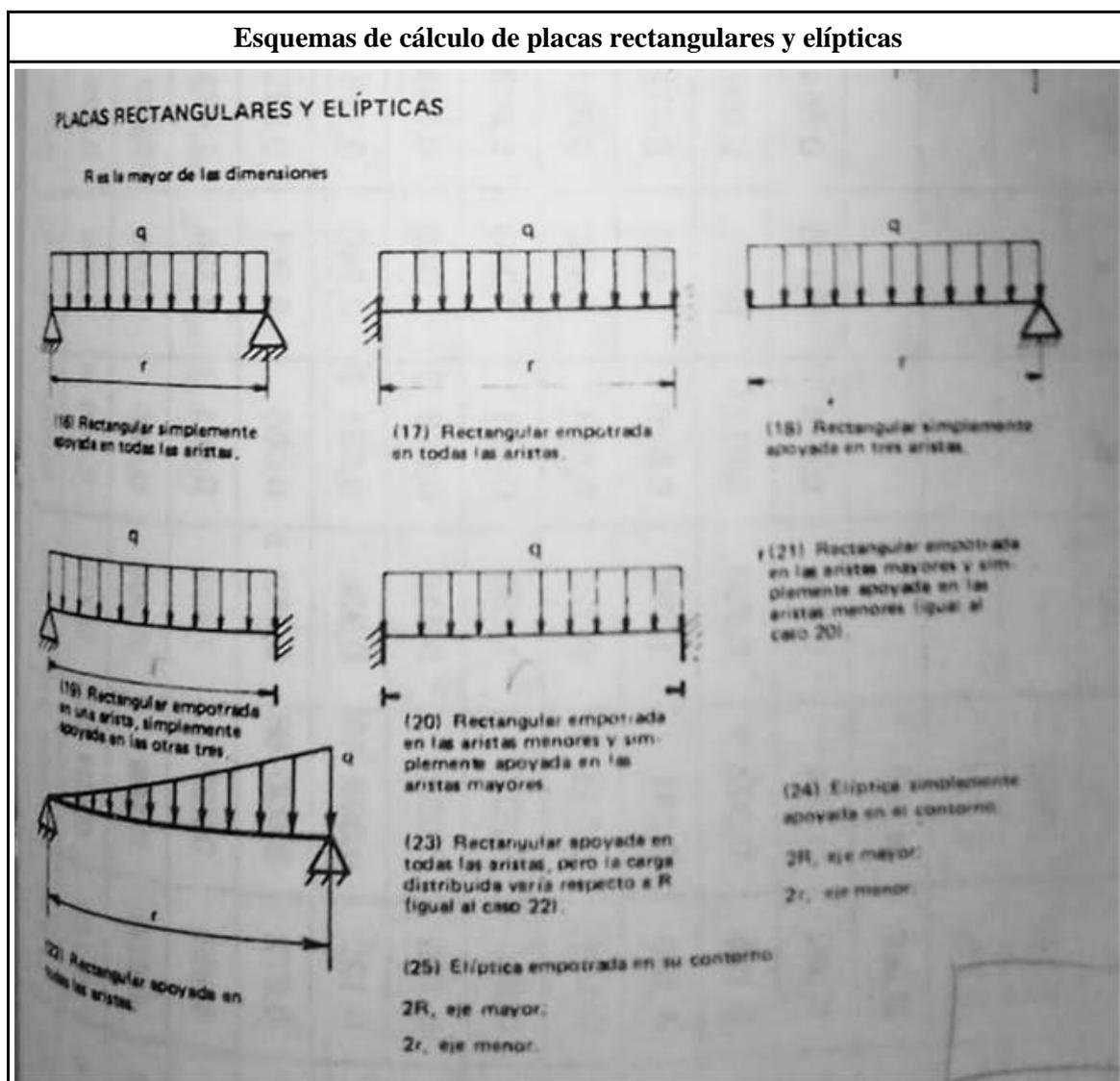
Fuente: (Parker & Ambrose, 2000)

Anexo 4. Tablas para el cálculo de placas rectangulares y elípticas.

Fórmulas para calcular la tensión y la deflexión en placas (Coeficiente de Poisson:0,3)		
Carga distribuida	Carga concentrada	Momento distribuido
$\sigma_{m\acute{a}x} = K \cdot q \cdot \frac{R^2}{h^2}$	$\sigma_{m\acute{a}x} = K \cdot \frac{P}{h^2}$	$\sigma_{m\acute{a}x} = K \cdot \frac{M}{h^2}$
$\omega_{m\acute{a}x} = K_1 \cdot \frac{q \cdot R^4}{E \cdot h^3}$	$\omega_{m\acute{a}x} = K_1 \cdot \frac{P \cdot r^2}{E \cdot h^3}$	$\omega_{m\acute{a}x} = K_1 \cdot \frac{M \cdot R^2}{E \cdot h^3}$

Donde: R , radio exterior de la placa; r , radio interior de la placa; h : espesor de la placa; q , carga distribuida uniformemente; P , carga concentrada; M , momento distribuido.

Fuente: (G. Fernández, 1983)



Fuente: (G. Fernández, 1983)

Coefficientes K y K_I para placas rectangulares y elípticas

R r	1,0		1,5		2,0		3,0		4,0	
	K	K _I								
Caso										
16	0,250	0,044 3	0,346	0,084 3	0,400	0,110 6	0,450	0,133 6	0,471	0,140 0
17	0,308	0,013 8	0,454	0,024 0	0,497	0,027 7	0,500	0,028	0,500	0,028
18	0,672	0,140	0,768	0,160	0,792	0,165	0,798	0,166	0,800	0,166
19	-	0,030	-	0,070	-	0,101	-	-	-	-
20	-	0,020 9	-	0,058 2	-	0,098 7	-	0,127 6	-	-
21	-	0,021 6	-	0,027 0	-	0,028 4	-	0,028 4	-	0,028 4
22	-	0,022 1	-	0,042 1	-	0,055 3	-	0,066 8	-	0,070 0
23	-	0,022 0	-	0,043 6	-	0,059 2	-	0,077 2	-	0,090 8
24	1,240	0,700	1,920	1,260	2,260	1,580	2,600	1,880	2,780	2,020
25	0,750	0,171	1,340	0,304	1,630	0,379	1,840	0,419	1,900	0,431

Fuente: (G. Fernández, 1983)

Anexo 5. Detalle de características de elementos usados en automatización.

Sensores de color			
Tipo	Basados en filtros		
Componente	TCS3472		
Características		Precio	Observaciones
Voltaje de entrada:	3 - 5 [Vcc]	\$9	Módulo sensor de color Requiere tarjeta de desarrollo
Corriente de entrada:	max. 20 [mA]		
Potencia:	60 - 100 [mW]		
Interfaz:	I2C		
Conexión:	7 cables		
Tamaño:	20 x 24 [mm]		
Peso:	3.23 [g]		
Tipo	Basados en la irradiación de una fuente de color fija		
Componente	TCS3200		
Características		Precio	Observaciones
Voltaje de entrada:	2.7 - 5 [Vcc]	\$5	Módulo sensor de color Pines de configuración de filtros Pines de configuración de frecuencias de salida Requiere tarjeta de desarrollo
Corriente de entrada:	aprox. 2 - 3 [mA]		
Potencia:	aprox. 10 - 15 [mW]		
Interfaz:	TTL		
Conexión:	8 cables		
Tamaño:	aprox. 30 x 30 x 2 [mm]		
Peso:	aprox. 20 [g]		

Bombillas			
Tipo	LED		
Componente	Maviju – Foco LED-Dicroico		
Características		Precio	Observaciones
Potencia:	6 [W]	\$2	Requiere soporte (carcasa tipo ojo de buey)
Flujo luminoso	480 [lm]		
Casquillo / Soquet / Conector:	GU5.3		
Temp. color	6500 [K]		
Tamaño:	50 x 50 x 47 [mm]		
Peso:	2 [g]		
Componente	Ledvance - Slim Plafon-Cuadrado		
Características		Precio	Observaciones
Potencia:	15 [W]	\$5	Lámpara Dispone de transformador externo
Flujo luminoso	1125 [lm]		
Casquillo / Soquet / Conector:	Jumper a transformador		
Temp. color	5000 [K]		
Tamaño:	190 x 190 x 45 [mm]		
Peso:	548.5 [g]		

Sensores de visión (cámaras)			
Tipo	CCD		
Componente	ReadytoSky - 1000TVL-CCD		
Características		Precio	Observaciones
Resolución:	HD 1000 TVL	\$30	Módulo de cámara Utilizado en drones para FPV (First Person View) Para cámaras analógicas TVL (Líneas de Televisión) Requiere pantalla para FPV
Formato:	NTSC PAL		
Interfaz:	Transmisor FPV		
Conexión:	3 cables		
Tamaño:	28 x 24.5 x 17.5 [mm]		
Peso:	10 [g]		
Tipo	CMOS		
Componente	Raspberry Pi - Cámara		
Características		Precio	Observaciones
Resolución:	5MP, 2592x1944p	\$23	Módulo de cámara Requiere tarjeta de desarrollo
Video:	1080p@30fps 720p@60fps 640x480p@60/90		
Interfaz:	MIPI (CSI)		
Conexión:	Cable plano 15 pines		
Tamaño:	20 x 25 x 9 [mm]		
Peso:	10 [g]		
Componente	Espressif - ESP32-CAM (Cámara)		
Características		Precio	Observaciones
Resolución:	2MP, 1600x1200p	\$15	Tarjeta de desarrollo con cámara
Video:	1800p@30fps 760p@60fps 640x480p@90fps		
Interfaz:	MIPI (CSI)		
Conexión:	Cable plano		
Tamaño:	27 x 40.5 x 6 [mm]		
Peso:	20 [g]		
Componente	PIXY2 - CAM		
Características		Precio	Observaciones
Resolución:	1280 x 800p	\$140	Módulo de cámara Requiere tarjeta de desarrollo
Video:	800p@50fps		
Interfaz:	UART/ SPI/ I2C/ USB/ Digital		
Conexión:	2 / 4 / 2 / Multipar cables		
Tamaño:	36 x 50 x 53 [mm]		
Peso:	27 [g]		

Relé			
Tipo	Simple		
Componente	Módulo Relé - 1 Canal		
Características		Precio	Observaciones
Voltaje de la bobina:	5 [V]	\$2	Requiere soporte Requiere tarjeta de desarrollo
Voltaje de operación:	230 [Vac] / 30 [Vdc]		
Corriente de operación:	10 [A]		
Interfaz:	TTL		
Tamaño:	40 x 20 x 16 [mm]		
Peso:	16 [g]		
Tipo	Doble		
Componente	Módulo Relé - 2 Canales		
Características		Precio	Observaciones
Voltaje de las bobinas:	5 [V]	\$2,50	Requiere soporte Requiere tarjeta de desarrollo
Voltaje de operación:	230 [Vac] / 30 [Vdc]		
Corriente de operación:	10 [A]		
Interfaz:	TTL		
Tamaño:	140 x 60 x 19[mm]		
Peso:	150 [g]		

Pantallas			
Tipo	LCD		
Componente	Waveshare - HDMI LCD(B)-5inch		
Características		Precio	Observaciones
Resolución:	800 x 480 p	\$25	Requiere soporte Touchscreen Disponible en versiones 3.5, 5 y 7 [in] HMDI(High Definition Multimedia Interface)
Interfaz:	HDMI		
Alimentación:	5 [V], 1[A] Cable USB-C		
Tamaño:	5 [in]		
Peso:	140 [g]		
Componente	Nextion - NX8048T050		
Características		Precio	Observaciones
Resolución:	800 x 480 p	\$110	Requiere soporte Touchscreen Incluye conector de USB a 2 pines (alimentación)
Interfaz:	UART		
Alimentación:	5 [V], 1[A] Cable USB-C		
Tamaño:	118.5 x 77.5 [mm]		
Peso:	128 [g]		

Drivers de control			
Tipo	Para Motores DC		
Componente	L298N		
Características		Precio	Observaciones
Voltaje del motor:	5 - 35 [V]	\$9	Módulo de control Requiere tarjeta de desarrollo Requiere carcaza
Corriente del motor:	2 [A]		
Interfaz:	TTL		
Alimentación:	5 [V]		
Tamaño:	43 x 43 x 27 [mm]		
Peso:	33 [g]		
Tipo	Para Servomotores		
Componente	PCA9685		
Características		Precio	Observaciones
Voltaje del motor:	6 [V _{máx}]	\$7	Módulo de control Requiere tarjeta de desarrollo Requiere carcaza
Canales de control:	16		
Interfaz:	I2C		
Alimentación:	3 - 5 [V]		
Tamaño:	60 x 25 [mm]		
Peso:	10 [g]		
Tipo	Para motores PAP		
Componente	DVR8825		
Características		Precio	Observaciones
Voltaje del motor:	12 - 24 [V]	\$3,50	Módulo de control Requiere tarjeta de desarrollo Requiere carcaza Incluye disipador de calor Se los llama 'Pololu'(A4988)
Corriente del motor:	2.2 [A]		
Subdivisión/Pasos:	1, 1/2, 1/4, 1/8, 1/16, 1/32		
Intefaz:	TTL		
Tamaño:	20.4 x 15.6 [mm]		
Peso:	1.6 [g]		
Componente	TB6560		
Características		Precio	Observaciones
Voltaje del motor:	10 - 35 [V]	\$13	Módulo de control Requiere tarjeta de desarrollo Requiere carcaza
Corriente del motor:	3.0 [A]		
Subdivisión/Pasos:	1, 1/2, 1/8, 1/16		
Interfaz:	TTL		
Tamaño:	50 x 75 x 35 [mm]		
Peso:	83 [g]		
Componente	TB6600		
Características		Precio	Observaciones
Voltaje del motor:	9 - 40 [V]	\$25	Módulo de control Requiere tarjeta de desarrollo
Corriente del motor:	0.5 - 4.0 [A]		
Subdivisión/Pasos:	1, 1/2, 1/4, 1/8, 1/16, 1/32		
Interfaz:	TTL		
Tamaño:	96 x 56 x 33 [mm]		
Peso:	180 [g]		

Sensores de objetos			
Tipo	Fotoeléctrico		
Componente	LM393		
Características		Precio	Observaciones
Ángulo/Distancia de cobertura:	35 [grados]	\$2.50	Módulo de sensor infrarrojo
Voltaje de funcionamiento:	3 - 6 [V]		Requiere tarjeta de desarrollo
Corriente de funcionamiento:	23 - 43 [mA]		Requiere carcasa
Interfaz:	TTL		
Tamaño:	45 x 14 x 7 [mm]		
Peso:	15 [g]		
Tipo	Inductivo		
Componente	LJ12A3-4-Z/BX		
Características		Precio	Observaciones
Ángulo/Distancia de cobertura:	4 [mm]	\$10	Módulo de sensor
Voltaje de funcionamiento:	3 - 36 [V]		Requiere tarjeta de desarrollo
Corriente de funcionamiento:	300 [mA]		
Interfaz:	TTL		
Tamaño:	12 x 64 [mm]		
Peso:	45 [g]		

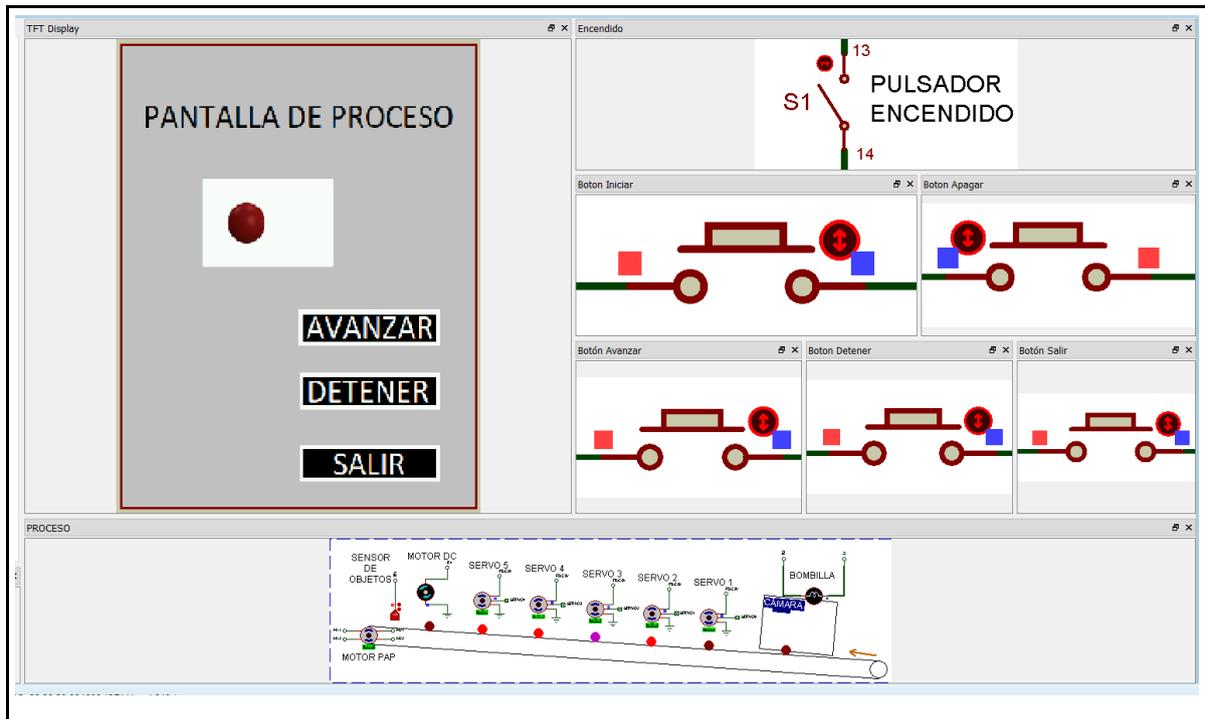
Fuentes			
Tipo	AC		
Componente	Regleta Cortapicos		
Características		Precio	Observaciones
Voltaje de operación:	110 / 220 [V]	\$8	Incluye fusible
Amperes:	15 [A]		
Tomas:	6		
Tamaño:			
Peso:	200 [g]		
Tipo	DC		
Componente	ATX 450W		
Características		Precio	Observaciones
Entrada AC:	120/240 [V]	\$17	Incluye fusible
Salida DC:	12 [V]-5[A] / 5[V]-18[A] / 3.3[V]-18[A]		
Potencia:	450 [W]		
Tamaño:	150 x 86 x 140 [mm]		
Peso:	1450 [g]		
Componente	Transformador Fuente - JC-60-12		
Características		Precio	Observaciones
Entrada AC:	110/220[V]	\$5,50	
Salida DC:	12 [V] - 5 [A]		
Potencia:	60 [W]		
Tamaño:	100 x 160 X 43 [mm]		
Peso:	700 [g]		
Componente	Fuente 24V/5A para PAP		
Características		Precio	Observaciones
Entrada AC:	110[V]	\$10	
Salida DC:	24 [V] - 5 [A]		
Potencia:	120 [W]		
Tamaño:	155 x 65 X 40 [mm]		
Peso:	700 [g]		

Tarjetas de desarrollo			
Tipo	Microcontrolador		
Componente	Arduino - UNO		
Características	Precio	Observaciones	
Puertos: Pines de salida (Resumen): Voltaje Nivel Lógico: Corriente por GPIO: Fuente Alimentación: Frecuencia de Trabajo: Lenguaje de Programación: IDE: Tamaño: Peso:	USB B conector Jack 2.1x5.5mm (alimentación) 2 x ICSP 32 4 análogos/GPIO 10 digitales/GPIO (6 con PWM) 2 entradas Análogas/I2C 2 entradas Análogas/I2C(duplicadas) 4 para SPI 1 voltaje de referencia análogo 1 voltaje de referencia digital 1 voltaje de alimentación 1 voltaje de salida +3.3[V] 1 voltaje de salida +5[V] 3 voltaje GND 1 Reset 1 No Conectado 2.7 - 5.5 [V] 20 [mA] 12 [Vdc], 0.75 [A] 16 [Mhz] C++ Arduino 68.5 x 53.4 [mm] 25 [g]	\$30	Requiere carcasa

Componente		Raspberry Pi - 4-Model B	
Características		Precio	Observaciones
Puertos:	1 x USB-C (alimentación) 1 x PoE (Power over Ethernet) Wireless LAN Bluetooth 5.0 1 x MicroSD slot para tarjeta 2 x micro-HDMI 2 x USB2 2 x USB3 1 x Gigabit Ethernet (RJ-45) 1 x 2-lane MIPI CSI (Cámara) 1 x 2-lane MIPI DSI (Display) 1 x Salida de auriculares	\$110	Requiere tarjeta MicroSD (2, 4 ó 8GB) Requiere carcasa
Pines de salida (Resumen):	40 (28 GPIO / interfaces) 6 x UART 6 x I2C 5 x SPI 1 x SDIO interface 1 x DPI (Parallel RGB Display) 1 x PCM 2 x PWM channels 3 x GPCLK outputs		
Voltaje Nivel Lógico:	3.3 [V]		
Corriente por GPIO:	2 [mA]		
Fuente Alimentación:	5 [Vdc], 3 [A]		
Frecuencia de Trabajo:	1.5 [Ghz]		
Lenguaje de Programación:	Python		
IDE:	Thonny (Python)		
Tamaño:	95 x 70 x 30 [mm]		
Peso:	22.7 [g]		

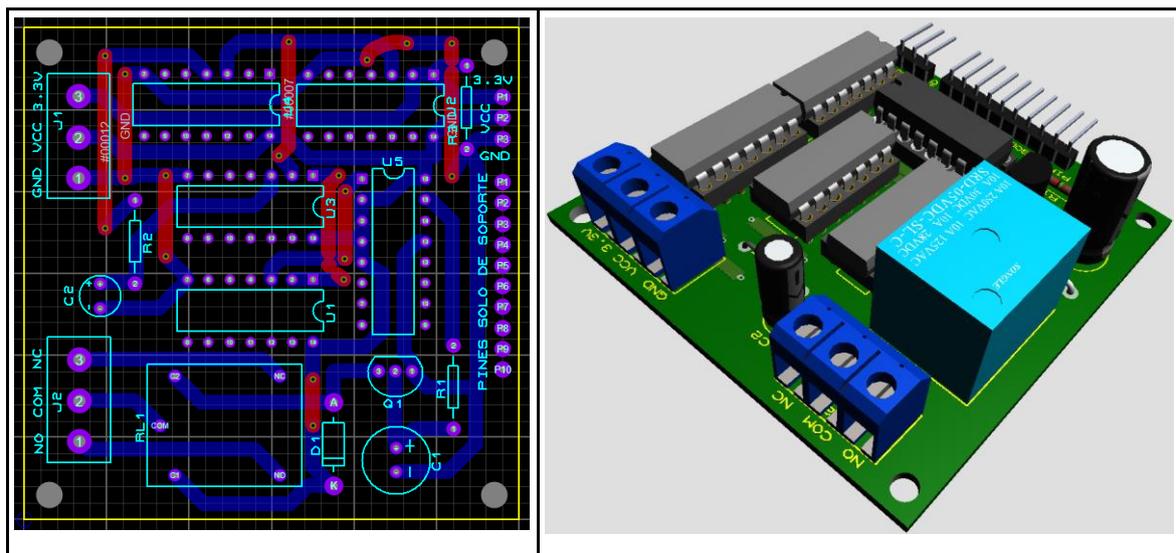
Componente		Espressif - ESP32-CAM (Tarjeta)	
Características		Precio	Observaciones
Puertos:	1 x 2-lane MIPI CSI (Cámara)	\$15	Tarjeta de desarrollo con cámara Convertidor de USB a TTL (programación y fuente) Requiere carcasa
	1 x MicroSD slot para tarjeta		
	Wi-Fi: 802.11b/g/n/e/i		
	Bluetooth 4.2		
Pines de salida (Resumen):	16		
	5 GPIO / SPI		
	2 GPIO / I2C		
	2 GPIO / UART		
	1 voltaje de salida +3.3 / +5 [V]		
	1 voltaje de alimentación +3.3[V]		
	1 voltaje de alimentación +5[V]		
	3 voltaje GND		
Voltaje Nivel Lógico:	3.3 [V]		
Corriente por GPIO:	20 [mA]		
Fuente Alimentación:	5 [Vdc], 2 [A]		
Frecuencia de Trabajo:	160 [Mhz]		
Lenguaje de Programación:	C++, Javascript		
IDE:	Arduino		
Tamaño:	27 x 40.5 x 4.5 [mm]		
Peso:	10 [g]		
Componente		Digispark - ATTINY85	
Características		Precio	Observaciones
Puertos:	1 x USB	\$6	Tarjeta de desarrollo Requiere carcasa
Pines de salida (Resumen):	9		
	1 voltaje de alimentación		
	1 voltaje GND		
	1 voltaje de salida +5 [V]		
	6 GPIO (4 ADC, 3 PWM, I2C, SPI)		
Voltaje Nivel Lógico:	5 [V]		
Corriente por GPIO:	40 [mA]		
Fuente Alimentación:	5 [Vdc], 2 [A]		
Frecuencia de Trabajo:	20 [Mhz]		
Lenguaje de Programación:	C++, Javascript		
IDE:	Arduino		
Tamaño:	28 x 15 x 5 [mm]		
Peso:	8 [g]		

Anexo 6. Detalles del archivo de simulación del circuito de control general.



Archivo original en Proteus 8 y video de funcionamiento adjuntos al documento.

Anexo 7. Detalles del archivo de simulación del Módulo A.

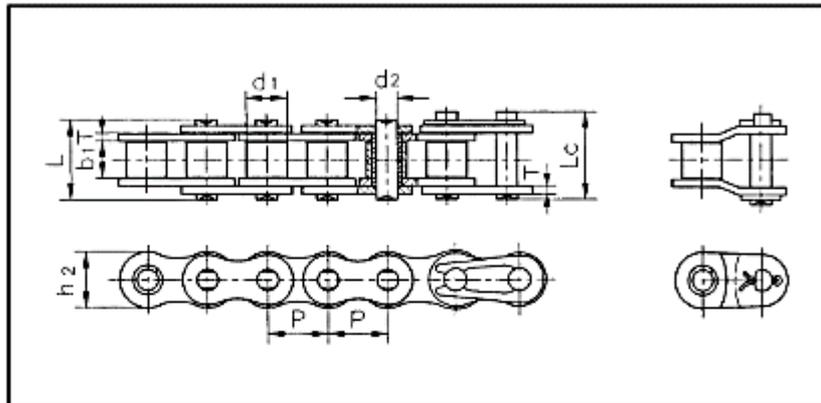


Archivo original en Proteus 8 y video de funcionamiento adjuntos al documento.

Anexo 8. Detalles de la cadena seleccionada.

CADENAS CON RODILLOS DE PRECISI3N PARA TRANSMISIONES CON PASOS CORTOS (SERIE ASA)
SHORT PITCH TRANSMISSION PRECISION ROLLER CHAINS (ASA SERIES)
CHAÎNES À ROULEAUX DE PRÉCISION POUR TRANSMISSION À PAS COURTS (SÉRIE ASA)

Cadena con rodillos simples y cadenas con casquillos
 Single strand roller chains & bushing chains
 Chaînes à rouleaux simples et chaînes à douilles



DIN ISO No Cadena	ANSI No Cadena	Paso	Diámetro del rodillo	Longitud entre placas interiores	Diámetro del pasador	Longitud del pasador		Profundidad de la placa interior	Resistencia máx. a la tracción	Resistencia media a la tracción	Peso por metro
		P	d1 máx	b1 mín	d2 máx	Lmáx	Lc máx	h2 máx	Qmin	Qo	q
		mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	kN	kN	kg/m
*04C-1	*25	6,35	3,30	3,18	2,31	7,90	8,40	6,00	3,50	4,40	0,15
*06C-1	*35	9,525	5,08	4,77	3,58	12,40	13,17	9,00	7,90	8,80	0,33
85-1	41	12,70	7,77	6,25	3,58	13,75	15,00	9,91	6,67	11,80	0,41
08A-1	40	12,70	7,95	7,65	3,96	16,60	17,80	12,00	14,10	17,00	0,62
10A-1	50	15,875	10,16	9,40	5,08	20,70	22,20	15,09	22,20	26,40	1,02
12A-1	60	19,05	11,91	12,57	5,94	25,90	27,70	18,00	31,80	38,80	1,50
16A-1	80	25,40	15,88	15,75	7,92	32,70	35,00	24,00	56,70	64,90	2,60
20A-1	100	31,75	19,05	18,90	9,53	40,40	44,70	30,00	88,50	101,80	3,91
24A-1	120	38,10	22,23	25,22	11,10	50,30	54,30	35,70	127,00	147,00	5,62
28A-1	140	44,45	25,40	25,22	12,70	64,40	69,00	41,00	172,40	197,70	7,50
32A-1	160	50,80	28,58	31,55	14,27	64,80	69,60	47,80	226,80	260,20	10,10
36A-1	180	57,15	35,71	35,48	17,46	72,80	78,60	53,60	260,20	327,80	13,45
40A-1	200	63,50	39,68	37,85	19,85	80,30	87,20	60,00	353,80	405,00	16,15
48A-1	240	76,20	47,63	47,35	23,81	95,50	103,00	72,39	510,30	585,40	23,20

* Cadena con casquillos: d1 en la tabla indica el diámetro exterior del casquillo
 * Bushing chain: d1 in the table indicate the external diameter of the bushing
 * Chaîne à douilles: d1 dans le tableau indique le diamètre externe de la douille

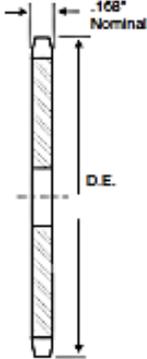
Anexo 9. Detalles de la catalina seleccionada.



Sprockets de Acero en Existencia

No. 35

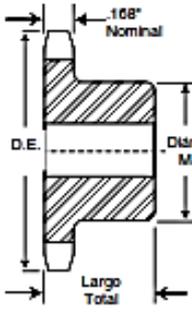
Paso 3/8"



TIPO A



TIPO A



TIPO B



TIPO B

Para Conocer Cargos por Alteración llame a **Martin**

Sencillo - Tipo B

No. de Dientes	Número de Parte	Diámetro Exterior	Tipo	Barrena (Pulg.)		Maza (Pulg.)		Peso Aprox. (lb)	Tipo	Número de Parte	Barrena Piloto	Peso Aprox. (lb)
				Piloto	Máz.	Diámetro	Largo Total					
8	35B8	1.130	B	3/8	3/8	3/8	3/8	.07				
9	35B9	1.260	B	3/8	3/8	7/16	3/8	.09				
10	35B10	1.380	B	3/8	3/8	7/16	3/8	.14				
11	35B11	1.500	B	3/8	3/8	1 1/16	3/8	.17				
12	35B12	1.630	B	1/2	9/16	1 7/32	3/4	.20				
13	35B13	1.750	B	3/8	3/8	1 1/8	3/8	.23				
14	35B14	1.870	B	3/8	3/8	1 1/8	3/8	.25				
15	35B15	1.990	B	3/8	3/8	1 1/8	3/8	.29	A	35A15	3/8	.10
16	35B16	2.110	B	3/8	3/8	1 1/8	3/8	.35	A	35A16	3/8	.12
17	35B17	2.230	B	3/8	1 1/8	1 1/8	3/8	.42	A	35A17	3/8	.12
18	35B18	2.350	B	3/8	1 1/8	1 1/8	3/8	.48	A	35A18	3/8	.14
19	35B19	2.470	B	3/8	1 1/8	1 1/8	3/8	.54	A	35A19	3/8	.16
20	35B20	2.590	B	3/8	1 1/8	1 1/8	3/8	.59	A	35A20	3/8	.20
21	35B21	2.710	B	3/8	1 1/8	2	3/8	.80	A	35A21	3/8	.20
22	35B22	2.830	B	3/8	1 1/8	2	3/8	.80	A	35A22	3/8	.22
23	35B23	2.950	B	3/8	1 1/8	2	3/8	.82	A	35A23	3/8	.24
24	35B24	3.070	B	3/8	1 1/8	2	3/8	.88	A	35A24	3/8	.26
25	35B25	3.190	B	3/8	1 1/8	2	3/8	.88	A	35A25	3/8	.28
26	35B26	3.310	B	3/8	1 1/8	2	3/8	.90	A	35A26	3/8	.28
27	35B27	3.430	B	3/8	1 1/8	2	3/8	.94	A	35A27	3/8	.34
28	35B28	3.550	B	3/8	1 1/8	2	3/8	.94	A	35A28	3/8	.34
30	35B30	3.790	B	3/8	1 1/8	2	3/8	1.02	A	35A30	3/8	.46
32	35B32	4.030	B	3/8	1 1/8	2	3/8	1.24	A	35A32	3/8	.46
35	35B35	4.390	B	3/8	1 1/8	2 1/8	3/8	1.50	A	35A35	3/8	.60
36	35B36	4.510	B	3/8	1 1/8	2 1/8	3/8	1.56	A	35A36	3/8	.62
40	35B40	4.990	B	3/8	1 1/8	2 1/8	1	1.62	A	35A40	3/8	.70
42	35B42	5.230	B	3/8	1 1/8	2 1/8	1	1.68	A	35A42	3/8	.78
45	35B45	5.590	B	3/8	1 1/8	2 1/8	1	1.78	A	35A45	3/8	.88
48	35B48	5.950	B	3/8	1 1/8	2 1/8	1	1.88	A	35A48	3/8	1.21
54	35B54	6.660	B	3/8	1 1/8	2 1/8	1	2.20	A	35A54	3/8	1.32
60	35B60	7.380	B	3/8	1 1/8	2 1/8	1	2.48	A	35A60	3/8	1.66
70	35B70	8.580	B	3/8	1 1/8	2 1/8	1	3.12	A	35A70	3/8	2.30
72	35B72	8.810	B	3/8	1 1/8	2 1/8	1	3.42	A	35A72	3/8	2.56
80	35B80	9.770	B	3/8	1 1/8	2 1/8	1	3.82	A	35A80	3/8	3.16
84	35B84	10.250	B	3/8	1 1/8	2 1/8	1	4.24	A	35A84	3/8	3.26
96	35B96	11.680	B	3/8	1 1/8	2 1/8	1	5.16	A	35A96	3/8	4.64
112	35B112	13.590	B	3/8	1 1/8	2 1/8	1	6.70	A	35A112	3/8	5.05

Sencillo - Tipo A

* Cuenta con una ranura en la maza para que libre la cadena.

Los barrenos máximos indicados permiten que el cuñero sea de dimensiones estándar con el opresor sobre el cuñero.

Se pueden obtener barrenos ligeramente mayores sin cuñero, con cuñero plano o con el opresor formando ángulo con el cuñero.

F-21

Fuente: (Martin Sprocket & Gear, 2013)

143

Anexo 10. Detalles del eje seleccionado.



**BARRA ROSCADA GALVANIZADA
GRADO 2**

Características:

- Grado 2.
- Acabado galvanizado.
- Rosca gruesa UNC.

Código Promesa	Medidas	Embalaje
35410	1/4 x 3 m	Unid.
35411	5/16 x 3 m	Unid.
35412	3/8 x 3 m	Unid.
35413	7/16 x 3 m	Unid.
35414	1/2 x 3 m	Unid.

Nota: peso 319 kg/1000 piezas, la longitud comercial es de 3 m.

Fuente: (PROMESA, 2018).

SAE: Society of Automotive Engineers				Pares de apriete – Rosca Métrica ISO – Tornillos normalizados					
NUMERO DE GRADO	MATERIAL	CARGA DE PRUEBA (KPSI)	ESFUERZO DE RUPTURA (KPSI)	DIAMETRO NOMINAL	PASO NOMINAL DIAMETER	5.8		6.8	
						Rm: 500 N/mm2 Re: 420 N/mm2	Cs Nm	F MAX N	Rm: 600 N/mm2 Re: 480 N/mm2
2	ACERO DE BAJO CARBONO O ACERO AL CARBONO	55 - 33	74 - 60	M-6	1	6.4	5448	7.3	6226
5	ACERO AL CARBONO TEMPLADO Y REVENIDO	85 - 74	120 - 105	M-8	1.25	16.1	10003	18.3	11432
8	ACERO AL CARBON, ALEADO TEMPLADO Y REVENIDO	120	150	M-10	1.5	31.8	15930	36.3	18206

Nota: el grado SAE 2 es equivalente con la clase ISO 5.8

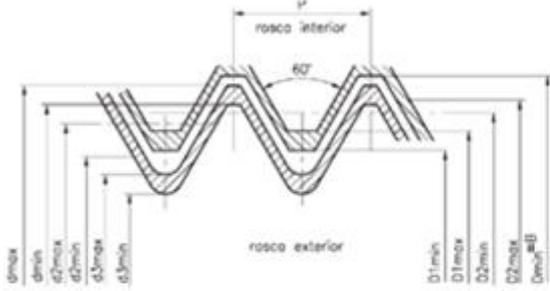
Fuente: (PROYESA, 2018).

Fuente: (IMECA, 2008)

Rosca en pulgadas (ISO) - UNC, UNF y 8UN -

NORMA
DIN:
ISO: 5864
NF:

Perfil de base y perfil de los límites



Las líneas de trazo fuerte son las de los perfiles máximos de material. El perfil máximo de material del roscado interior es el perfil de base.

B = diámetro exterior = diámetro nominal
P = paso
n = número de hilos por pulgada

d = diámetro exterior
d₂ = diámetro sobre flancos
d₃ = diámetro interior

D = diámetro exterior
D₂ = diámetro sobre flancos
D₃ = diámetro interior

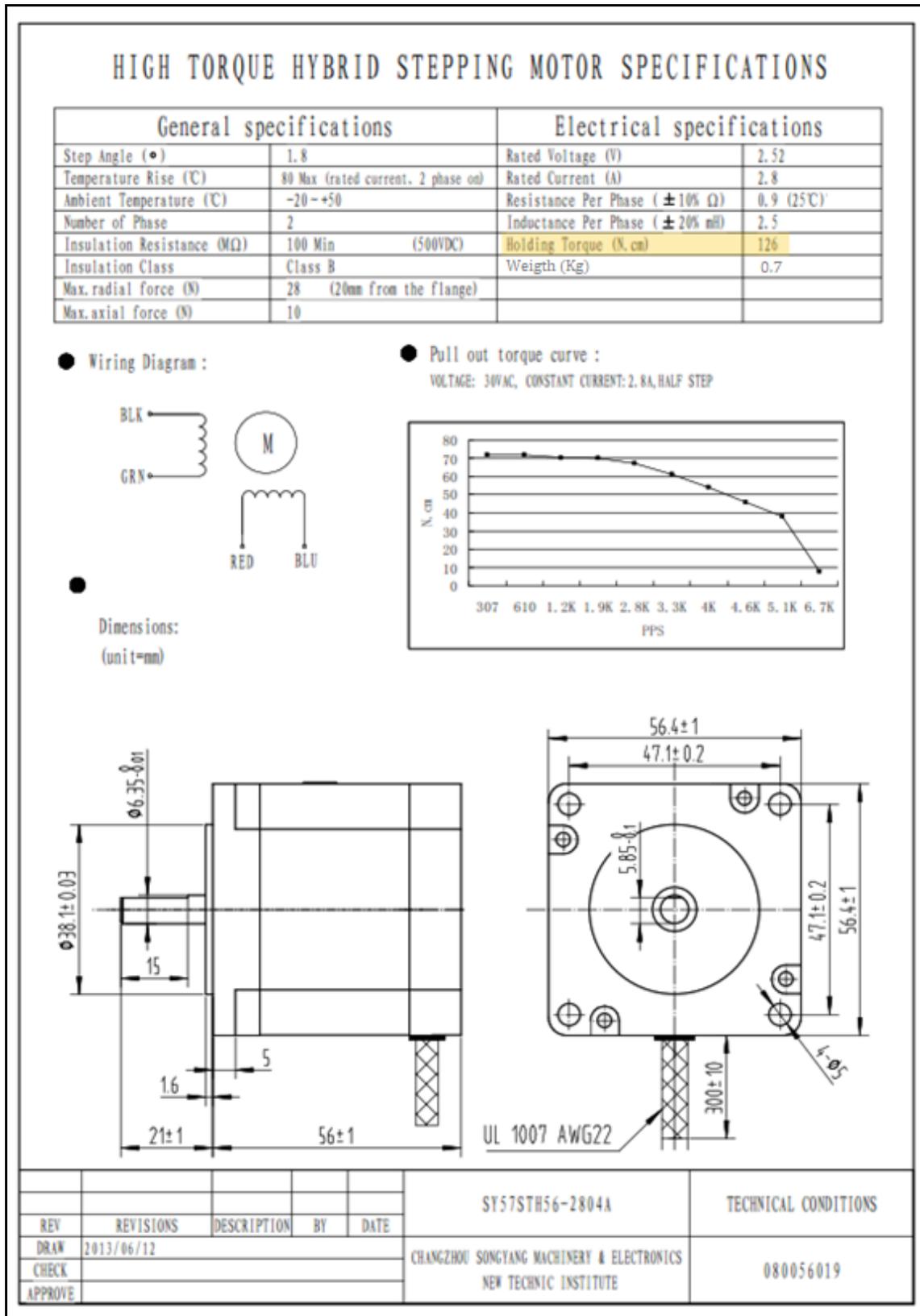
Límites de las dimensiones de la rosca en pulgadas (ISO) - UNC, UNF y 8UN -

Diámetro nominal B pulgadas	N° de hilos por pulgada n	Paso P	Rosca exterior, clase de tolerancia 2A. Bulones y tornillos						Rosca interior, clase de tolerancia 2B. Tuercas						Secc. del Ø int. π/4 d ₂ ² A ₂ mm ²	Secc. del Ø int. π/4 (D-d ₂) ² A ₁ mm ²
			Diámetro exterior		Diámetro sobre flancos		Diámetro interior		Diámetro exterior		Diámetro sobre flancos		Diámetro interior			
			d _{máx.}	d _{mín.}	d _{2máx.}	d _{2mín.}	d _{3máx.}	d _{3mín.}	D _{mín.}	D _{2mín.}	D _{2máx.}	D _{3mín.}	D _{3máx.}			
1/4	20	1,2700	6,322	6,117	5,496	5,403	4,765	4,580	6,350	5,525	5,646	4,979	5,257	17,4	20,5	
5/16	18	1,4111	7,907	7,687	6,990	6,889	6,174	5,972	7,938	7,021	7,155	6,401	6,731	29,3	33,8	
5/8	16	1,5875	9,491	9,254	8,460	8,349	7,543	7,318	9,525	8,494	8,638	7,798	8,153	43,7	50	

Límites de las dimensiones de la rosca en pulgadas, de paso gruesa UNC, clases de tolerancia 2A y 2B

Fuente: (DEXTER, 2019).

Anexo 11. Detalles del motor seleccionado.



Fuente: (Pololu Corporation, 2023).

Anexo 12. Detalles del rodamiento seleccionado.





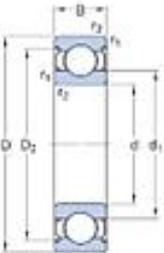
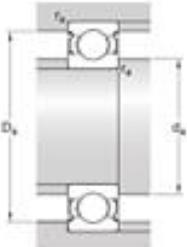
628-2Z

Rodamiento rígido de bolas con sellos o placas de protección

Los rodamientos rígidos de una hilera de bolas con sellos o placas de protección son especialmente versátiles, tienen baja fricción y están optimizados para un bajo nivel de ruido y vibraciones, lo que permite alcanzar altas velocidades de giro. Soportan cargas radiales y axiales en ambos sentidos, son fáciles de montar y requieren menos mantenimiento que muchos otros tipos de rodamientos. El sellado integral puede prolongar significativamente la vida útil del rodamiento porque mantiene el lubricante en los rodamientos y los contaminantes fuera.

- El sellado integral prolonga la vida útil del rodamiento
- Diseño sencillo, versátil y robusto
- Baja fricción y capacidad de alta velocidad
- Soportan cargas radiales y axiales en ambos sentidos
- Requieren poco mantenimiento

Overview

Dimensiones

d	8 mm	Diámetro interno
D	24 mm	Diámetro exterior
B	8 mm	Ancho
d ₁	+ 14.45 mm	Diámetro del resalte
D ₂	+ 21.2 mm	Diámetro del rebaje
r _{1,2}	min. 0.3 mm	Dimensión del chaflán

Dimensiones de los resaltes

d _a min.	10.4 mm	Diámetro del resalte del eje
d _a max.	14.4 mm	Diámetro del resalte del eje
D _s max.	21.6 mm	Diámetro del resalte del soporte
r _a max.	0.3 mm	Radio del eje o acuerdo del soporte

Datos del cálculo

Capacidad de carga dinámica básica	C	3.9 kN
Capacidad de carga estática básica	C ₀	1.66 kN
Carga límite de fatiga	P ₀	0.071 kN
Velocidad de referencia		63 000 r/min
Velocidad límite		32 000 r/min
Factor de carga mínima	k _r	0.025
Factor de cálculo	f ₀	13

Masa

Masa de rodamiento		0.018 kg
--------------------	--	----------

Fuente:(SKF, 2023).

Anexo 13. Detalles del acoplamiento seleccionado.

ACOPLAMIENTOS **ALU-FLEX**

ACOPLAMIENTOS FLEXIBLES RANURADOS DE ALUMINIO

- Sin juego. No producen variaciones de velocidad en la transmisión
- Elevada rigidez torsional
- Disponibles con prisionero y con abrazadera
- Resistentes a aceites y productos químicos
- Protección mecánica ante pares excesivos

Los ALU-FLEX son acoplamientos flexibles simples, de una sola pieza, mecanizados en aleación de aluminio endurecido.

Estos acoplamientos resultan apropiados en sistemas de medición y control, así como accionamientos de par reducido. Permiten una transmisión del movimiento de gran precisión cinemática, sin juego y con una baja elasticidad torsional. Se recomiendan para máquinas auxiliares, generadores tacométricos, potenciómetros, encoders, etc. El acoplamiento absorberá los errores de alineación o de montaje de los ejes.

Son aptos para transmisiones que requieran pares moderados y cuando la desalineación en los ejes no sea muy grande. Actúan de fusible mecánico ante pares excesivos.

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS

Modelo	Par	Par	Velocidad máxima	Desalineamientos máximos admisibles			Constantes elástica torsional Ncm/rad	Constantes elástica radial N/mm	Masa gr	Inercia gcm ²
	Ncm	Ncm		Angular grad.	Axial mm	Radial mm				
AFP 6508	2	8	8.000	±2	±0,15	±0,1	0,55	24	0,5	0,02
AFP 1015	15	15	8.000	±2	±0,2	±0,15	2,2	22	2,4	0,34
AFP 1218	25	35	8.000	±2,5	±0,25	±0,15	2,8	28	4	0,83
AFP 1622	40	50	8.000	±3	±0,3	±0,2	5	34	9,5	3,2
AFP 1922	60	50	8.000	±3,5	±0,4	±0,25	9	40	13	6,7
AFP 2524	100	120	8.000	±4	±0,5	±0,3	20	60	26	22,2
AFP 2532	100	120	8.000	±4	±0,5	±0,3	18	50	35	30
AFP 3030	150	120	8.000	±4	±0,5	±0,3	21	60	45	57
AFP 3038	150	120	8.000	±4	±0,5	±0,3	21	60	60	76
AFA 1421	50	50	6.000	±3	±0,25	±0,2	4,5	22	6,5	1,9

MODELO AFP 3030

Ø int. d1/d2

- 06/06
- 06/08
- 06/10
- 08/08
- 10/10
- 12/12

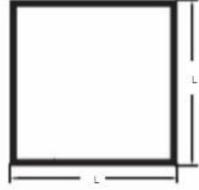
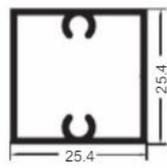
Ejemplo de referencia: AFP 3030 10/10

Fuente: (DISAI, 2012).

Anexo 14. Detalles de tubos de aluminio.



Tubos cuadrados

1855
Peso: 0.412 kg/m
e=1.30

Referencia	Lado		Espesor mm	Peso kg/m
	Milímetros	Pulgadas		
1014	44.45	1 3/4	1.90	0.875
1015	50.80	2	2.00	1.058
1286	25.40	1	1.80	0.461
1386	38.10	1 1/2	1.80	0.708
1466	22.20	7/8	1.00	0.231
1583	38.10	1 1/2	1.20	0.480
1714	25.40	1	1.30	0.340
1852	50.80	2	1.40	0.750
1854	31.75	1 1/4	1.10	0.366
1855*	25.40	1	1.30	0.412
1902	101.60	4	3.20	3.395
1903	101.60	4	2.30	2.457
1906	76.20	3	2.00	1.590
1981	17.00	2/3	1.00	0.162
2036	25.40	1	1.10	0.290
2439	19.00	3/4	1.10	0.214
2856	19.00	3/4	1.00	0.195

Dureza y resistencia

Aleación A.A.	Espesor pulgadas	Dureza (HWB) mín.	Webster B normal	Resist. a Fluencia (Kg /mm ²)		Rest. a tensión (Kg /mm ²)		Elongación (% en 5 cm)
				mínimo	normal	mínimo	normal	
6063-T1 T4 T5% ⁽¹⁾ T5 T6	Todos	4	6	5.6	8.5	11.2	16	14
	<0.5"	5	7	6.2	8.8	12.9	16.7	14
	<0.5" o más	4	6	6	8.5	12.5	16.1	14
	Todos	7	8	9.5	12.3	13.9	17.6	12
	<0.5"	8	10	11.2	16.2	15.5	19.7	8
	<0.5" o más	7	9	10.7	14.4	14.8	18.6	8
6061-T1 T1 T5 T6	Todos	8	11	11	14.1	18	24	15
	Todos	8	11	11.2	14.8	18.3	24.5	14
	Todos	12	14	20.9	26	24.5	30	8
	Todos	14	16	24.5	28.1	26.5	31.6	9
6005-T1 T4 T5 T6	Todos	8	9	8.2	13	16.3	23	15
	Todos	9	10	10.5	14	17.5	24	15
	Todos	10	12	24	27.5	26	29.5	8
	Todos	14	14	24.5	28.5	26.5	30	8

Fuente: (Cedal, 2008).

Anexo 15. Detalles de pernos.

**TORNILLO CABEZA FIJADORA
ROSCA MILIMETRICA**

Diámetro
M5
paso
0.8

TCFM5




∅ M5-0.8




Cabeza alomada
Métrica

Acero clase 4.8 UNE EN ISO 898-1. Recubrimiento: Zincado $\geq 5 \mu\text{m s/ISO 4042}$

Fuente: (Juter's Tools, 2023)

Características mecánicas y físicas en función de la clase de calidad para pernos, tornillos y bulones – S/N UNE-EN ISO 898-1

CARACTERÍSTICA MECÁNICA Y FÍSICA	4.8	5.6	5.8	6.8	8.8 d<16 mm	8.8 d>16 mm	9.8	10.9	12.9	
RESISTENCIA NOMINAL A LA TRACCIÓN N/mm ²	400	500		600	800		900	1000	1200	
RESISTENCIA MÍNIMA A LA TRACCIÓN N/mm ²	420	500	520	600	800	830	900	1040	1220	
LÍMITE ELÁSTICO INFERIOR N/mm ²	NOM	320	300	400	480	-	-	-	-	
	MIN	340	300	420	480	-	-	-	-	
LÍMITE ELÁSTICO CONVENCIONAL AL 0.2% N/mm ²	NOM	-				640	640	720	900	1080
	MIN	-				640	660	720	940	1100
TENSIÓN A LA CARGA DE PRUEBA N/mm ²	310	280	380	440	580	600	650	830	970	

Fuente: (IMECA, 2008)

Anexo 16. Detalles de la placa de soporte del motor.

PLANCHAS LAMINADAS AL CALIENTE

Especificaciones Generales:

Norma:	NTE INEN 115
Espesores:	ASTM A36 - SAE J 403 1008
Espesores:	2mm a 12mm
Acabado:	Acero Negro



Calidad Estructural

Norma	Composición Química							Propiedades Mecánicas				
	% C	%MN	%P	%S	%SI	%CU	OTROS	Fluencia (Mpa)	Esfuerzo Máximo (Mpa)	Alargamiento %	Doblado 180°	Norma Equivalente
A 36	0,25 0,29	0,80 1,2	0,04 max	0,05 max	0,4 max	0,20 max		250 min	400 min 550 max	20 min		

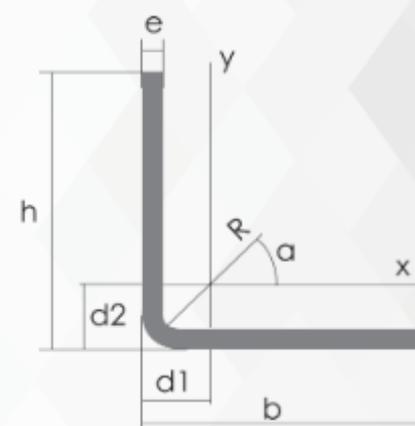
Fuente: (DIPAC, 2020).

Anexo 17. Detalles de perfiles angulares.

PERFILES ESTRUCTURALES ÁNGULOS "L" DOBLADO

Especificaciones Generales:

Norma:	NTE INEN 1623
Calidad:	ASTM A36
Largo Normal:	6.00m y medidas especiales
Espesores:	Desde 2.00mm - 12mm
Acabado:	Acero Negro

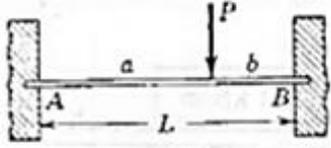
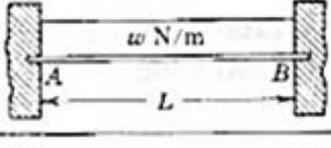
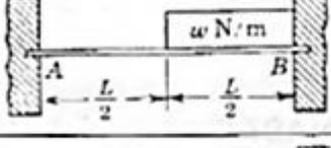
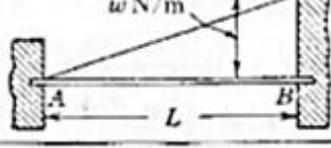
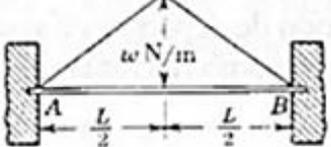
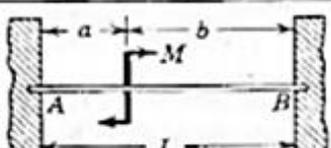
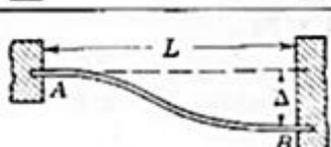


Ángulos de alas iguales

Descripción	b	h	e	Masa	Área	d1	d2	Ángulo a	Eje X - X			Eje Y - Y			Eje U - U			Eje V - V		
									ix	Wx	rx	Iy	Wy	ry	Iu	Wu	ru	Iv	Wv	rv
									cm4	cm3	cm									
L 20x 2	20	20	2	0,57	0,73	0,60	0,60	45,00	0,28	0,20	0,62	0,28	0,20	0,62	0,46	0,32	0,79	0,10	0,14	0,37
L 20 x 3	20	20	3	0,81	1,03	0,65	0,65	45,00	0,38	0,28	0,60	0,38	0,28	0,60	0,63	0,45	0,78	0,12	0,17	0,34
L 25x 2	25	25	2	0,73	0,93	0,72	0,72	45,00	0,56	0,32	0,78	0,56	0,32	0,78	0,92	0,52	1,00	0,20	0,23	0,47
L 25x 3	25	25	3	1,05	1,33	0,78	0,78	45,00	0,78	0,45	0,77	0,78	0,45	0,77	1,30	0,74	0,99	0,26	0,30	0,45
L 30 x 2	30	30	2	0,88	1,13	0,85	0,85	45,00	1,00	0,46	0,94	1,00	0,46	0,94	1,63	0,77	1,20	0,37	0,35	0,57
L 30x 3	30	30	3	1,28	1,63	0,90	0,90	45,00	1,40	0,67	0,93	1,40	0,67	0,93	2,32	1,09	1,19	0,49	0,46	0,55
L 30x 4	30	30	4	1,65	2,10	0,95	0,95	45,00	1,76	0,86	0,91	1,76	0,86	0,91	2,93	1,38	1,18	0,58	0,55	0,52
L 40x 2	40	40	2	1,20	1,33	1,10	1,10	45,00	2,44	0,84	1,26	2,44	0,84	1,26	3,96	1,40	1,61	0,92	0,65	0,78
L 40x 3	40	40	3	1,75	2,23	1,15	1,15	45,00	3,49	1,22	1,25	3,49	1,22	1,25	5,71	2,02	1,60	1,27	0,90	0,75
L 40x 4	40	40	4	2,28	2,90	1,20	1,20	45,00	4,44	1,59	1,24	4,44	1,59	1,24	7,23	2,59	1,59	1,55	1,10	0,73
L 40x 5	40	40	5	2,77	3,54	1,25	1,25	45,00	5,29	1,92	1,22	5,29	1,92	1,22	8,80	3,11	1,58	1,77	1,25	0,71
L 50x 2	50	50	2	1,51	1,93	1,35	1,35	45,00	4,85	1,33	1,59	4,85	1,33	1,59	7,85	2,22	2,02	1,85	1,05	0,98
L 50x 3	50	50	3	2,22	2,83	1,40	1,40	45,00	7,01	1,95	1,57	7,01	1,95	1,57	11,42	3,23	2,01	2,61	1,47	0,96
L 50x 4	50	50	4	2,90	3,70	1,45	1,45	45,00	9,01	2,54	1,58	9,01	2,54	1,58	14,76	4,18	2,00	3,25	1,84	0,94
L 50x 5	50	50	5	3,56	4,54	1,50	1,50	45,00	10,84	3,10	1,55	10,84	3,10	1,55	17,89	5,06	1,99	3,79	2,14	0,91
L 60x 3	60	60	3	2,89	3,43	1,65	1,65	45,00	12,34	2,84	1,90	12,34	2,84	1,90	20,03	4,72	2,42	4,65	2,19	1,16
L 60x 4	60	60	4	3,53	4,50	1,70	1,70	45,00	15,96	3,71	1,70	15,96	3,71	1,70	26,04	6,14	2,40	5,88	2,77	1,14
L 60x 5	60	60	5	4,34	5,54	1,75	1,75	45,00	19,33	4,55	1,87	19,33	4,55	1,87	31,72	7,48	2,39	6,95	3,27	1,12
L 75x 3	75	75	3	3,40	4,33	2,02	2,02	45,00	24,55	4,48	2,38	24,55	4,48	2,38	39,72	7,49	3,03	9,38	3,53	1,47
L 75x 4	75	75	4	4,47	5,70	2,07	2,07	45,00	31,94	5,88	2,37	31,94	5,88	2,37	51,90	9,79	3,02	11,99	4,51	1,45
L 75x 5	75	75	5	5,52	7,04	2,12	2,12	45,00	38,96	7,24	2,35	38,96	7,24	2,35	63,56	11,99	3,01	14,35	5,40	1,43
L 75x 6	75	75	6	6,53	8,33	2,17	2,17	45,00	45,60	8,56	2,34	45,60	8,56	2,34	74,73	14,09	2,99	16,46	6,20	1,41
L 80x 4	80	80	4	4,79	6,10	2,20	2,20	45,00	39,00	6,72	2,53	39,00	6,72	2,53	63,30	11,19	3,22	14,70	5,19	1,55
L 80x 5	80	80	5	5,91	7,54	2,25	2,25	45,00	47,65	8,28	2,51	47,65	8,28	2,51	77,64	13,72	3,21	17,65	6,23	1,53
L 80x 6	80	80	6	7,00	8,93	2,30	2,30	45,00	55,86	9,79	2,50	55,86	9,79	2,50	91,39	16,16	3,20	20,32	7,17	1,51
L 80x 8	80	80	8	9,11	11,61	2,40	2,40	45,00	71,03	12,68	2,47	71,03	12,68	2,47	117,22	20,72	3,18	24,85	8,78	1,46
L 80x 10	80	80	10	11,09	14,14	2,50	2,50	45,00	94,59	15,39	2,45	94,59	15,39	2,45	140,84	24,90	3,16	28,34	10,04	1,42
L100x 5	100	100	5	7,48	9,54	2,75	2,75	45,00	95,23	13,13	3,16	95,23	13,13	3,16	154,55	21,86	4,03	35,90	10,13	1,94

Fuente: (Cedal, 2008).

Anexo 18. Fórmulas para vigas doblemente empotradas.

CASO No.	TIPO DE CARGA	MOMENTOS EN LOS EXTREMOS	VALOR DE $EI\delta$ (y es positiva hacia abajo)
1		$M_A = -\frac{Pab^2}{L^2}$ $M_B = -\frac{Pa^2b}{L^2}$	$EI\delta$ en el centro = $\frac{Pb^2}{48}(3L-4b)$ Nota: sólo para $a > b$
2		$M_A = M_B = -\frac{PL}{8}$	$EI\delta$ máximo = $\frac{PL^3}{192}$
3		$M_A = M_B = -\frac{wL^2}{12} = -\frac{WL}{12}$	$EI\delta$ máximo = $\frac{wL^4}{384} = \frac{WL^3}{384}$
4		$M_A = -\frac{5}{192}wL^2 = -\frac{5}{96}WL$ $M_B = -\frac{11}{192}wL^2 = -\frac{11}{96}WL$	$EI\delta$ en el centro = $\frac{wL^4}{768} = \frac{WL^3}{384}$
5		$M_A = -\frac{wL^2}{30} = -\frac{WL}{15}$ $M_B = -\frac{wL^2}{20} = -\frac{WL}{10}$	$EI\delta$ en el centro = $\frac{wL^4}{768} = \frac{WL^3}{384}$
6		$M_A = M_B = -\frac{5wL^2}{96} = -\frac{5WL}{48}$	$EI\delta$ máximo = $\frac{7wL^4}{3840} = \frac{7WL^3}{1920}$
7		$M_A = \frac{Mb}{L}\left(\frac{3a}{L}-1\right)$ $M_B = -\frac{Ma}{L}\left(\frac{3b}{L}-1\right)$	
8		$M_A = -\frac{6EI\delta}{L^2}$ $M_B = \frac{6EI\delta}{L^2}$	

Fuente: (Pytel & Singer, 2008).

Anexo 19. Detalles del servomotor.

TowerPro SG90 - Micro Servo



Basic Information

Modulation: Analog

Torque: **4.8V:** 25.0 oz-in (1.80 kg-cm)

Speed: **4.8V:** 0.10 sec/60°

Weight: 0.32 oz (9.0 g)

Dimensions:

Length: 0.91 in (23.1 mm)

Width: 0.48 in (12.2 mm)

Height: 1.14 in (29.0 mm)

Motor Type: 3-pole

Gear Type: Plastic

Rotation/Support: Bushing

Additional Specifications

Rotational Range: 180°

Pulse Cycle: ca. 20 ms

Pulse Width: 500-2400 μ s

Fuente: (Pytel & Singer, 2008).

Anexo 20. Costo detallado de los elementos utilizados.

Automatización					
No.	Descripción	Cantidad	Unidad	Valor Unitario	Valor Venta
1	Raspberry Pi-Cámara, 5MP	1	u	10,00	10,00
2	Cable FCP, plano, para cámara raspberry (2m)	1	u	5,00	5,00
3	Foco led dicroico, 6W, 6500K, Maviju	1	u	2,00	2,00
4	Carcasa cuadrada, ojo de buey para led dicroico	1	u	5,00	5,00
5	Pantalla táctil Waveshare-HDMI LCD(B)-5inch	1	u	65,00	65,00
6	Cable Micro HDMI macho a HDMI macho (3m)	1	u	12,00	12,00
7	Cable Mini USB-B macho a USB 2.0 macho (1,2m)	1	u	8,00	8,00
8	Módulo relé 5V, 2 canales con optoacoplador	1	u	4,50	4,50
9	Driver para servomotores PCA9685	1	u	8,00	8,00
10	Driver para motor PAP TB6560	1	u	13,00	13,00
11	Sensor infrarrojo LM393	1	u	2,00	2,00
12	Tarjeta Raspberry Pi-4-Model B, 4GB	1	u	220,00	220,00
13	Motor PAP Nema 23, 1,2Nm	1	u	40,00	40,00
14	Servomotor SG90	5	u	2,50	12,50
15	Motor DC (servomotor SG90, movimiento continuo)	1	u	3,50	3,50
16	Capacitor 10nF cerámico, 103	1	u	0,20	0,20
17	Fuente ATX 450W	1	u	17,50	17,50
18	Fuente 24V/5A	1	u	10,00	10,00
19	Regleta cortapicos, 6 servicios	1	u	8,00	8,00
20	Relé 8 pines MK2P-I	1	u	6,00	6,00
21	Base relé 8 pines, para riel DIN	1	u	3,00	3,00
22	Luz piloto	2	u	2,00	4,00
23	Pulsador verde	1	u	3,50	3,50
24	Pulsador tipo hongo	1	u	5,00	5,00
25	Breaker 6A, para riel DIN	1	u	5,00	5,00
26	Riel DIN (2m)	1	u	2,23	2,23
27	Canaleta ranurada, 25x25mm (2m)	1	u	5,00	5,00
28	Tablero doble fondo 30x20x15cm	1	u	25,00	25,00
29	Teclado inalámbrico, mini keyboard-Backlit	1	u	4,20	4,20
30	Cable de red UTP patchcord (1,8m)	1	u	2,50	2,50
31	Cable UTP para conexiones	10	m	0,30	3,00
32	Cable 18 AWG flexible	20	m	0,20	4,00
33	Bornera plástica transparente, 6A	48	u	0,06	2,88
34	Protoboard 400 puntos	1	u	2,50	2,50
35	Espiral para cable, 12mm (10m)	1	u	9,00	9,00
36	Cinta aislante	1	u	1,00	1,00
Subtotal 1:					534,01

Mecánica					
No.	Descripción	Cantidad	Unidad	Valor Unitario	Valor Venta
1	Plancha de acero galvanizado, 0,7mm (1,20x2,40m)	1	u	29,42	29,42
2	Ángulo de acero 20x3mm (6m)	1	u	6,38	6,38
3	Pletina de acero 19x3mm (6m)	1	u	3,44	3,44
4	Tubo de acero rectangular de 100x50x2mm, 20cm	1	u	3,00	3,00
5	Tubo cuadrado de aluminio 3/4" (6m)	1	u	15,70	15,70
6	Tubo PVC 1/2" (6m)	1	u	6,25	6,25
7	Varilla roscada M8 (2m)	1	u	2,50	2,50
8	Plancha de grilón 1/4", 5x30cm	1	u	4,00	4,00
9	Cadena de transmisión ASA 35 (3m)	1	u	22,52	22,52
10	Candado para cadena	2	u	1,00	2,00
11	Buje o bushin 809	4	u	2,00	8,00
12	Rodamiento 628-2Z	4	u	1,50	6,00
13	Anillo de seguridad interior, diámetro nominal 24mm	4	u	0,40	1,60
14	Piñón 35B12	4	u	2,58	10,32
15	Acople flexible de 8 a 8mm	1	u	4,00	4,00
16	Eje de acero 1-1/4", 50mm	1	u	2,50	2,50
17	Pernos M8 x 50mm, cabeza hexagonal	78	u	0,07	5,46
18	Tuercas de seguridad M8, anillo de caucho	86	u	0,06	5,16
19	Tuercas M8	164	u	0,03	4,92
20	Arandelas 5/16" (8,2x18,75x1mm)	312	u	0,03	9,36
21	Pernos M5x15mm, cabeza estrella	84	u	0,04	3,36
22	Tuercas M5	76	u	0,03	2,70
23	Arandelas 1/4" (6,4x15x1mm)	108	u	0,03	1,10
24	Pernos M3 x 10mm, cabeza estrella	44	u	0,04	1,54
25	Tuercas M3	26	u	0,02	0,52
26	Remache pop 1/8x1/2", aluminio	68	u	0,03	2,04
27	Pata niveladora base D50, perno M8x50mm	4	u	2,76	11,04
28	Broca para metal 2,5mm	2	u	1,00	2,00
29	Broca para metal 1/4"	2	u	1,00	2,00
30	Broca para metal 5/16"	2	u	2,00	4,00
31	Disco de corte multiuso 4,5"	1	u	3,00	3,00
32	Suelda E6011, 3/32"	1	Lib.	2,00	2,00
33	Pintura spray blanco	1	u	3,25	3,25
34	Pintura spray plata brillante	1	u	3,25	3,25
35	Torneado de cilindros	4	u	5,00	20,00
36	Dobleces en dobladora	57	u	0,05	2,85
Subtotal 3:					214,33

Módulo A					
No.	Descripción	Cantidad	Unidad	V. Unitario	V. Venta
1	Capacitor 1000uF, 16V	1	u	0,25	0,25
2	Capacitor 47uF, 16V	1	u	0,10	0,10
3	Resistencia 15K Ω , 1/4W	1	u	0,05	0,05
4	Resistencia 1K Ω , 1/4W	1	u	0,05	0,05
5	Resistencia 100 Ω , 1/4W	1	u	0,05	0,05
6	Circuito Integrado 4093	1	u	0,50	0,50
7	Circuito Integrado 74LS08	1	u	0,70	0,70
8	Circuito Integrado 74LS02	1	u	0,50	0,50
9	Circuito Integrado 74LS04	1	u	0,65	0,65
10	Circuito Integrado 7476	1	u	1,25	1,25
11	Transistor 2N3904	1	u	0,10	0,10
12	Diodo 1N4007	1	u	0,06	0,06
13	Relé 5V, 10A, SRD-05VDC-SL-C	1	u	0,75	0,75
14	Bornera 3 vías, 6A, de terminal macho	2	u	1,20	2,40
15	Pin macho cabeza doblada (40u)	1	u	1,00	1,00
16	Baquelita perforada 7x5cm	1	u	0,50	0,50
17	Socket DIP-14	4	u	0,11	0,44
18	Socket DIP-16	1	u	0,32	0,32
19	Suelda de estaño 60/40	1	m	0,50	0,50
Subtotal 2:					10,17

Subtotal 1:	534,01
Subtotal 2:	10,17
Subtotal 3:	214,33
Total:	758,51

Anexo 21. Registro de ensayos de funcionamiento.

Número de ensayo: 1
 Tiempo[**min:seg**]: 09:44
Frutos clasificados: 110
Frutos no clasificados: 39
Frutos totales: 149

	Categoría	Prototipo (Predicción)				
		Verde	Pintón	Maduro	Sobremaduro	Seco
Observación (Real)	Verde	9	6	4	2	0
	Pintón	4	6	8	10	0
	Maduro	3	1	18	6	0
	Sobremaduro	2	0	8	20	0
	Seco	0	0	0	2	1

Rendimiento bruto: 0,74

Categoría	Precisión [%]	Exactitud [%]
Verde	36,91	31,64
Pintón	34,07	15,82
Maduro	34,97	47,46
Sobremaduro	36,91	49,22
Seco	73,83	24,61

Número de ensayo: 2
 Tiempo[**min:seg**]: 10:10
Frutos clasificados: 118
Frutos no clasificados: 31
Frutos totales: 149

	Categoría	Prototipo (Predicción)				
		Verde	Pintón	Maduro	Sobremaduro	Seco
Observación (Real)	Verde	12	5	4	0	0
	Pintón	4	6	7	10	0
	Maduro	3	1	25	6	0
	Sobremaduro	2	0	9	22	0
	Seco	0	0	0	0	2

Rendimiento bruto: 0,79

Categoría	Precisión [%]	Exactitud [%]
Verde	45,25	45,25
Pintón	39,60	17,60
Maduro	44,00	56,57
Sobremaduro	45,85	52,80
Seco	79,19	79,19

Número de ensayo: 3
Tiempo[min:seg]: 09:40
Frutos clasificados: 114
Frutos no clasificados: 35
Frutos totales: 149

	Categoría	Prototipo (Predicción)				
		Verde	Pintón	Maduro	Sobremaduro	Seco
Observación (Real)	Verde	13	6	3	0	0
	Pintón	4	9	8	9	0
	Maduro	0	1	23	4	0
	Sobremaduro	3	0	8	21	0
	Seco	1	0	0	0	1

Rendimiento bruto: 0,77

Categoría	Precisión [%]	Exactitud [%]
Verde	47,36	45,21
Pintón	43,04	22,95
Maduro	41,90	62,85
Sobremaduro	47,26	50,21
Seco	76,51	38,26

Número de ensayo: 4
Tiempo[min:seg]: 09:46
Frutos clasificados: 125
Frutos no clasificados: 24
Frutos totales: 149

	Categoría	Prototipo (Predicción)				
		Verde	Pintón	Maduro	Sobremaduro	Seco
Observación (Real)	Verde	12	4	3	0	0
	Pintón	7	7	8	10	0
	Maduro	2	1	30	4	0
	Sobremaduro	4	0	15	16	0
	Seco	0	0	0	0	2

Rendimiento bruto: 0,84

Categoría	Precisión [%]	Exactitud [%]
Verde	40,27	52,98
Pintón	48,94	18,35
Maduro	44,94	68,02
Sobremaduro	44,74	38,35
Seco	83,89	83,89

Número de ensayo: 5
Tiempo[min:seg]: 09:57
Frutos clasificados: 117
Frutos no clasificados: 32
Frutos totales: 149

		Prototipo (Predicción)				
Categoría		Verde	Pintón	Maduro	Sobremaduro	Seco
Observación (Real)	Verde	10	4	3	0	0
	Pintón	9	7	8	8	0
	Maduro	2	1	24	5	0
	Sobremaduro	3	1	9	21	0
	Seco	1	0	0	0	1

Rendimiento bruto: 0,79

Categoría	Precisión [%]	Exactitud [%]
Verde	31,41	46,19
Pintón	42,28	17,18
Maduro	42,83	58,89
Sobremaduro	48,50	48,50
Seco	78,52	39,26

Anexo 22. Programa de control.

Anexo 23. Planos electrónicos.

Anexo 24. Planos mecánicos.

Anexo 25. Video del funcionamiento del prototipo.

(Ubicados en el CD-R N^{RO.} 1)



Mg. Yanina Quizhpe Espinoza
Licenciada en Ciencias de Educación mención Inglés
Magister en Traducción y mediación cultural

Celular: 0989805087
Email: yaniques@icloud.com
Loja, Ecuador 110104

Loja, 18 de noviembre, 2023

Yo, Lic. Yanina Quizhpe Espinoza, con cédula de identidad 1104337553, docente del Instituto de Idiomas de la Universidad Nacional de Loja, y certificada como traductora e interprete en la Senescyt y en el Ministerio de trabajo del Ecuador con registro MDT-3104-CCL-252640, certifico:

Que tengo el conocimiento y dominio de los idiomas español e inglés y que la traducción del resumen del Trabajo de Titulación denominado **Desarrollo de un dispositivo electromecánico para identificar según la tonalidad de la epidermis los frutos del cafeto cosechados**, cuya autoría del estudiante **Cristian Fernando Pupiales Ordóñez**, con cédula **1722751425**, es verdadero y correcto a mi mejor saber y entender.

Atentamente

YANINA
BELEN
QUIZHPE
ESPINOZA
A

Escuela
DIGITALIZACIÓN
YANINA BELEN
QUIZHPE
ESPINOZA
NOMBRE
2023-11-18
18:00:01 -0500

Yanina Quizhpe Espinoza.

Traductora freelance