



# INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

Unidad Profesional Interdisciplinaria en  
Ingeniería y Tecnologías Avanzadas

upiita

## *Trabajo Terminal*

**“Prototipo de máquina separadora de café fruto maduro e inmaduro  
usando métodos de identificación de color”**

Que para obtener el título de

## *Ingeniero en Mecatrónica*

Presenta:

**Yonatan Hernández Ramírez**  
**Saúl Rodríguez Soto**

Asesores:

M. en C. Miguel Ángel Rodríguez Fuentes

Dr. Helvio Ricardo Mollinedo Ponce de León



*Ciudad de México a 18 de agosto del 2022*



# INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

Unidad Profesional Interdisciplinaria en  
Ingeniería y Tecnologías Avanzadas

upiita

## *Trabajo Terminal*

**“Prototipo de máquina separadora de café fruto maduro e inmaduro  
usando métodos de identificación de color”**

Que para obtener el título de

## *Ingeniero en Mecatrónica*

Presenta:

**Yonatan Hernández Ramírez**

**Saúl Rodríguez Soto**

*Presidente del Jurado*

*Dra. Izlián Yólanda Orea Flores*

*Profesor Titular*

*Dr. Rafael Frayre Landa*

*Suplente*

*Dr. Alberto Luviano Juárez*

*Asesor*

**upiita-ipn**

*M. en C. Miguel Ángel Rodríguez Fuentes*

*Asesor*

*Dr. Helvio Ricardo Mollinedo Ponce de León*

## Autorización de uso de obra

**Instituto Politécnico Nacional**

**P r e s e n t e**

Bajo protesta de decir verdad el que suscribe Yonatan Hernandez Ramirez (se anexa copia simple de identificación oficial), manifiesto ser autor (a) y titular de los derechos morales y patrimoniales de la obra titulada “Prototipo de máquina separadora de café fruto maduro e inmaduro usando métodos de identificación de color”, en adelante “La Tesis” y de la cual se adjunta copia, por lo que por medio del presente y con fundamento en el artículo 27 fracción II, inciso b) de la Ley Federal del Derecho de Autor, otorgo a el Instituto Politécnico Nacional, en adelante El IPN, autorización no exclusiva para comunicar y exhibir públicamente total o parcialmente en medios digitales, Plataforma de la Dirección de Bibliotecas del IPN y/o consulta directa en la Coordinación de Biblioteca de la UPIITA “La Tesis” por un periodo de 5 años contado a partir de la fecha de la presente autorización, dicho periodo se renovará automáticamente en caso de no dar aviso expreso a “El IPN” de su terminación.

En virtud de lo anterior, “El IPN” deberá reconocer en todo momento mi calidad de autor de “La Tesis”. Adicionalmente, y en mi calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales de “La Tesis”, manifiesto que la misma es original y que la presente autorización no contraviene ninguna otorgada por el suscrito respecto de “La Tesis”, por lo que deslindo de toda responsabilidad a El IPN en caso de que el contenido de “La Tesis” o la autorización concedida afecte o viole derechos autorales, industriales, secretos industriales, convenios o contratos de confidencialidad o en general cualquier derecho de propiedad intelectual de terceros y asumo las consecuencias legales y económicas de cualquier demanda o reclamación que puedan derivarse del caso.

Ciudad de México, a 18 de agosto del 2022

Atentamente

Yonatan Hernandez Ramirez





## Autorización de uso de obra

**Instituto Politécnico Nacional**

**P r e s e n t e**

Bajo protesta de decir verdad el que suscribe Saul Rodríguez Soto (se anexa copia simple de identificación oficial), manifiesto ser autor (a) y titular de los derechos morales y patrimoniales de la obra titulada “Prototipo de máquina separadora de café fruto maduro e inmaduro usando métodos de identificación de color”, en adelante “La Tesis” y de la cual se adjunta copia, por lo que por medio del presente y con fundamento en el artículo 27 fracción II, inciso b) de la Ley Federal del Derecho de Autor, otorgo a el Instituto Politécnico Nacional, en adelante El IPN, autorización no exclusiva para comunicar y exhibir públicamente total o parcialmente en medios digitales, Plataforma de la Dirección de Bibliotecas del IPN y/o consulta directa en la Coordinación de Biblioteca de la UPIITA “La Tesis” por un periodo de 5 años contado a partir de la fecha de la presente autorización, dicho periodo se renovará automáticamente en caso de no dar aviso expreso a “El IPN” de su terminación.

En virtud de lo anterior, “El IPN” deberá reconocer en todo momento mi calidad de autor de “La Tesis”. Adicionalmente, y en mi calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales de “La Tesis”, manifiesto que la misma es original y que la presente autorización no contraviene ninguna otorgada por el suscrito respecto de “La Tesis”, por lo que deslindo de toda responsabilidad a El IPN en caso de que el contenido de “La Tesis” o la autorización concedida afecte o viole derechos autorales, industriales, secretos industriales, convenios o contratos de confidencialidad o en general cualquier derecho de propiedad intelectual de terceros y asumo las consecuencias legales y económicas de cualquier demanda o reclamación que puedan derivarse del caso.

Ciudad de México, a 18 de agosto de 2022

Atentamente

Saúl Rodríguez Soto



# Dedicatoria

*A mi padre, Rafael Alberto Rodríguez Anguiano, quien me ha enseñado el valor del trabajo y me ha brindado todo el apoyo que pudo durante mis estudios y vida hasta el momento. Por transmitirme su pasión por el uso de herramientas, competencia sin la cual no hubiera sido posible la construcción física de este proyecto.*

*A mi madre, Mónica Soto Villaseñor, por acompañarme y guiarme a lo largo de mi formación académica y vida, por preocuparse siempre por mi bienestar, siempre dispuesta a escucharme y darme consejos para cualquier problema independientemente del tema que fuere. Por motivarme durante todo este proceso a no rendirme y darme la calma para analizar y lograr mis objetivos.*

*Por último, a mi novia, Jimena Galván, que formó parte de toda mi vida estudiantil, siempre me motivo a seguir adelante a pesar de los días y semanas complicadas. Nunca dudó de mí y no me dejó de motivar en ningún momento.*

*Saúl Rodríguez Soto*

*Para mis hermanas, quienes gracias al apoyo y ejemplo brindado he podido lograr este objetivo. A mi padre, porque siempre creyó en mí e incentivó a que yo también lo hiciera. A todos mis amigos, quien sin su compañía la vida como estudiante sería mucho más difícil.*

*Por última y más importante, a mi madre, quien ha sido el pilar y la motivación de mi carrera, por todo el esfuerzo y apoyo incondicional que me ha brindado, por estar conmigo desde pequeño en mi vida académica, muchas gracias.*

*Yonatan Hernández Ramírez*

# Agradecimientos

*A los profesores asesores, M. en C. Miguel Ángel Rodríguez Fuentes y Dr. en C. Helvio Ricardo Mollinedo Ponce de León por brindarnos todo el apoyo que necesitamos durante el desarrollo del proyecto, por mostrarse siempre interesados con las dudas que fueron surgiendo y por su aportación para la resolución de problemas.*

*A nuestro tutor, el Ing. Octavio Montes Campuzano quien, a pesar de no ser asesor del proyecto, estuvo siempre dispuesto a apoyarnos y se mantuvo atento a nuestros problemas y progresos, colaborando en gran medida en el desarrollo del proyecto.*

*Al Instituto Politécnico Nacional y en especial a la Unidad Profesional Interdisciplinaria en Ingeniería y Tecnologías Avanzadas por darnos los conocimientos, competencias y herramientas que nos motivaron a seguir adelante en nuestra formación académica y profesional.*

# Índice

Índice de ilustraciones .....	9
Índice de tablas .....	13
Resumen / Abstract .....	14
Resumen .....	14
Abstract .....	15
1. Introducción .....	16
1.1 Planteamiento del problema .....	16
1.2 Justificación .....	17
1.3 Objetivos.....	18
Objetivo general .....	18
Objetivos específicos.....	18
2. Marco teórico .....	18
2.1 Estado del arte .....	18
2.2 Marco conceptual .....	22
2.3 Tipos de cosechas de café.....	22
2.4 Características del café fruto .....	23
2.5 Alimentadores y transportadores de materiales.....	23
2.5.1 Tolvas o chutes .....	23
2.5.2 Sistemas vibratorios.....	24
2.5.3 Cintas transportadoras .....	25
2.6 Análisis de color .....	26
3.6.1 Colorimetría .....	26
3.6.2 Sistemas de visión artificial.....	26
3.6.3 Análisis de color por umbralizado .....	27
3.6.4 Análisis de color por histograma.....	27
3. Diseño conceptual .....	28
3.1 Requerimientos .....	28
3.2 Descomposición por áreas funcionales.....	29
3.3 Análisis morfológico y selección del diseño conceptual.....	31
4. Diseño detallado .....	33
4.1 Velocidad de separación requerida.....	33
4.2 Características físicas de los frutos de café .....	33

4.3	Cálculo de la banda.....	34
4.3.1	Geometría de la banda.....	34
4.3.2	Capacidad de transporte de la banda.....	36
4.3.3	Cálculo de la potencia de accionamiento de la banda.....	38
4.3.4	Selección de los rodillos de carga y retorno.....	49
4.3.5	Selección de rodamientos para rodillos de la banda.....	52
4.4	Cálculo de la tolva.....	54
4.4.1	Geometría de la tolva.....	54
4.4.2	Espesor de las paredes de la tolva.....	56
4.5	Identificación de color.....	62
4.6	Separador de los frutos.....	75
5.	Diseño eléctrico.....	80
6.	Programación y diseño de los circuitos impresos.....	89
7.	Planos normalizados.....	96
7.1	Integración de subsistemas.....	114
8.	Implementación.....	115
8.1	Construcción de la tolva.....	115
8.2	Construcción del transportador de la banda.....	118
8.3	Implementación de identificadores y separadores.....	121
8.4	Comparación y selección de modelos finales del fruto de café.....	122
8.5	Calibración del sistema de identificadores y separadores.....	125
8.6	Implementación eléctrica.....	128
8.7	Pruebas y correcciones.....	133
9.	Resultados.....	135
9.1	Margen de error e intervalo de confianza.....	135
9.2	Estimación de costos.....	138
9.3	Infraestructura.....	140
	Conclusiones.....	141
	Referencias.....	142

## Índice de ilustraciones

Ilustración 1. Máquina separadora de café por métodos mecánicos [5] .....	19
Ilustración 2 Cosecha de café por el método striping [13].....	23
Ilustración 3 Gama de colores y tamaños del café fruto [14].....	23
Ilustración 4 Tipos de tolvas según su uso [15] .....	24
Ilustración 5 Sistema vibratorio mediante masa excéntrica-resorte [17] .....	25
Ilustración 6 Tejidos empleados en bandas transportadoras [19]. .....	25
Ilustración 7 Configuración básica de un transportador de banda [18].....	26
Ilustración 8 (a) Imagen en escala de grises (b) Imagen tras aplicar el umbralizado [23] .....	27
Ilustración 9 Histograma de una imagen [Elaboración propia].....	28
Ilustración 10 Áreas funcionales de la máquina separadora de café [Elaboración propia] .....	29
Ilustración 11 Esquema de funcionamiento general [Elaboración propia] .....	31
Ilustración 12 Muestra de frutos de café arábica [Elaboración propia] .....	33
Ilustración 13 Perfiles para bandas transportadoras serie K [25].....	34
Ilustración 14 Vista lateral de la de banda dentada [Elaboración propia].....	35
Ilustración 15 Boceto de la banda transportadora [Elaboración propia] .....	36
Ilustración 16 Distribución del material sobre banda transportadora [26].....	36
Ilustración 17 Características del café según fuentes [27] .....	38
Ilustración 18 Coeficiente de fricción de las partes giratorias .....	39
Ilustración 19 Perfil de la banda transportadora [Elaboración propia] .....	40
Ilustración 20 Coeficiente C de fricción por longitud de banda [26].....	40
Ilustración 21 Espaciamiento propuesto para distancia entre rodillos [26] .....	41
Ilustración 22 Valores promedio del peso de los rodillos superiores e inferiores....	42
Ilustración 23 Valores promedio del peso de la banda transportadora .....	42
Ilustración 24 Banda transportadora real [Elaboración propia] .....	43
Ilustración 25 Masa total de la banda transportadora real [Elaboración propia] .....	44
Ilustración 26 Eficiencias mecánicas de equipos reductores de velocidad [26] .....	48
Ilustración 27 Motor de accionamiento de la banda .....	49
Ilustración 28 Especificaciones del motor de accionamiento de la banda [28] .....	49
Ilustración 29 Clasificación de los rodillos según CEMA .....	50
Ilustración 30 Modelo del rodillo de carga en SolidWorks .....	52
Ilustración 31 Análisis de esfuerzos del eje del rodillo de carga .....	52
Ilustración 32 Dimensiones de rodamiento de una hilera de bolas SKF.....	53
Ilustración 33 Formulas para calcular diámetro mínimo de la boca de salida de la tolva [15] .....	54



Ilustración 34 Experimento para determinar ángulo de reposo [27].....	55
Ilustración 35 Dimensionamiento de la tolva de alimentación [Elaboración propia] .....	56
Ilustración 36 Esquema de fuerzas sobre las paredes de la tolva [Elaboración propia] .....	58
Ilustración 37 Modelo de la columna que soporta la placa trapezoidal en SolidWorks .....	58
Ilustración 38 Diagrama de distribución de carga sobre la placa trapezoidal.....	60
Ilustración 39 Análisis de esfuerzos del claro más grande de la tolva.....	61
Ilustración 40 Análisis de deformación del claro más grande de la tolva.....	62
Ilustración 41 Diagrama de flujo del proceso de identificación de color.....	63
Ilustración 42 Escala de preferencias [31] .....	65
Ilustración 43 Divisor de tensión con fotorresistencia [40] .....	70
Ilustración 44 Programa para la detección de color con sensor TCS34725.....	71
Ilustración 45 Programa para generar la constante de color de los frutos de café ...	71
Ilustración 46 Frutos de café utilizados para pruebas .....	72
Ilustración 47 Medición de velocidad con video .....	72
Ilustración 48 Detección de fruto rojo a 10.36 cm/s .....	73
Ilustración 49 Detección de fruto verde a 10.36 cm/s.....	73
Ilustración 50 Muestras de plastilina para simular los frutos de café .....	74
Ilustración 51 Detección de color a 10.36 cm/s .....	74
Ilustración 52 Diagrama de conexiones para el sensor RGB .....	75
Ilustración 53 Esquema de propuesta de diseño del separador .....	75
Ilustración 54 Esquema para cálculo de longitud de la compuerta.....	76
Ilustración 55 Compuerta del separador.....	77
Ilustración 56 Diagrama de fuerzas ejercidas en la compuerta.....	77
Ilustración 57 Actuador electromagnético de 5V y 10mm de carrera.....	78
Ilustración 58 Esquema del separador con el actuador acoplado [Elaboración propia] .....	80
Ilustración 59 Arquitectura básica del circuito eléctrico.....	81
Ilustración 60 Diagrama eléctrico general de la máquina.....	81
Ilustración 61 Regulador de voltaje con matrícula XL4015 [43].....	82
Ilustración 62 Circuito de censado .....	83
Ilustración 63 Circuito de control del actuador electromagnético .....	84
Ilustración 64 Fuente DC seleccionada del fabricante Mean Well [47] .....	86
Ilustración 65 Esquemático del circuito de control de velocidad.....	86
Ilustración 66 Medición de corriente del motor .....	87
Ilustración 67 Código generado en lenguaje C para circuito identificador de color	91

Ilustración 68 Diseño del circuito impreso del identificador de color en Proteus ...	92
Ilustración 69 Modelo en 3D del circuito impreso con componentes montados realizado en Proteus .....	93
Ilustración 70 Código del circuito de control de velocidad .....	94
Ilustración 71 Diseño del circuito impreso del control de velocidad del motor .....	95
Ilustración 72 Modelo en 3D del circuito impreso del control de velocidad con componentes montados .....	95
Ilustración 73 Integración de subsistemas.....	114
Ilustración 74 Piezas de la tolva.....	115
Ilustración 75 Tolva unida por remaches .....	115
Ilustración 76 Soldado de estructura principal de la máquina .....	116
Ilustración 77 Estructura de la máquina y tolva instalada.....	116
Ilustración 78 Aplicación de primario a la estructura .....	117
Ilustración 79 Estructura y tolva pintadas .....	117
Ilustración 80 Maquinado de largueros de la banda.....	118
Ilustración 81 Largueros de la banda .....	118
Ilustración 82 Maquinado del eje del rodillo motriz .....	119
Ilustración 83 Preimpresión de tapas de rodillos .....	119
Ilustración 84 Ensamble de la banda transportadora.....	120
Ilustración 85 Ensamble de la banda pintada .....	120
Ilustración 86 Caja de engranes para el accionamiento de la banda .....	121
Ilustración 87 Prototipos de identificador de color .....	121
Ilustración 88 Identificador y separador acoplados.....	122
Ilustración 89 Caramelos como modelos alternos al fruto de café .....	123
Ilustración 90 Datos RGB obtenidos de los modelos alternos .....	125
Ilustración 91 Valores de la fotorresistencia con y sin presencia del fruto en el separador [Elaboración propia] .....	126
Ilustración 92 Subsistema de identificación calibrado .....	128
Ilustración 93 Montaje de componentes electrónicos [Elaboración propia] .....	128
Ilustración 94 PCBs con los componentes montados [Elaboración propia] .....	129
Ilustración 95 Primeras conexiones de la caja de circuitos [Elaboración propia]..	130
Ilustración 96 Montaje y calibración de reguladores de tensión [Elaboración propia] .....	130
Ilustración 97 Acoplamiento del motor de accionamiento con encoder [Elaboración propia] .....	131
Ilustración 98 Velocidad de separación en kg/h.....	132
Ilustración 99 Caja de circuitos terminada .....	132

Ilustración 100 Modificación de las paredes de la resbaladilla [Elaboración propia]	133
Ilustración 101 Problema de agrupamiento de frutos [Elaboración propia]	134
Ilustración 102 Modificación hecha en el recibidor del identificador [Elaboración propia]	134
Ilustración 103 Separaciones añadidas al final de separador [Elaboración propia]	135
Ilustración 104 Soporte de la banda instalado [Elaboración propia]	135

## Índice de tablas

Tabla 1 Estado del Arte .....	19
Tabla 2 Requerimientos .....	28
Tabla 3 Cuadro morfológico .....	31
Tabla 4 Características físicas de los frutos de café [Elaboración propia].....	34
Tabla 5 Rodamientos rígidos de una hilera de bolas de 25 a 35mm [29] .....	53
Tabla 6 Rodamientos rígidos de una hilera de bolas de 15 mm [29].....	54
Tabla 7 Opciones y criterios de selección para el microcontrolador .....	64
Tabla 8 Tabla de evaluación del criterio 1 para elección de microcontrolador .....	65
Tabla 9 Tabla de evaluación del criterio 2 para elección de microcontrolador .....	65
Tabla 10 Tabla de evaluación del criterio 3 para elección de microcontrolador .....	65
Tabla 11 Tabla de evaluación del criterio 4 para elección de microcontrolador .....	66
Tabla 12 Tabla de evaluación del criterio 5 para elección de microcontrolador .....	66
Tabla 13 Tabla de ponderación de criterios para elección de microcontrolador.....	66
Tabla 14 Matriz final de selección del microcontrolador .....	66
Tabla 15 Opciones y criterios de selección para el sensor de color .....	67
Tabla 16 Tabla de evaluación del criterio 1 para elección del sensor de color.....	67
Tabla 17 Tabla de evaluación del criterio 2 para elección del sensor de color.....	68
Tabla 18 Tabla de evaluación del criterio 3 para elección del sensor de color.....	68
Tabla 19 Tabla de evaluación del criterio 4 para elección del sensor de color.....	68
Tabla 20 Tabla de evaluación del criterio 5 para elección del sensor de color.....	68
Tabla 21 Tabla de ponderación de criterios para elección del sensor de color.....	68
Tabla 22 Matriz final de selección del sensor de color .....	69
Tabla 23 Características del sensor FC-51 [39] .....	69
Tabla 24 Resultados tras realizar las pruebas de velocidad .....	72
Tabla 25 Características de actuador Zye1-0530z [41].....	79
Tabla 26 Corrientes máximas consumidas en el circuito de control.....	84
Tabla 27 Corrientes máximas consumidas en el circuito de control de velocidad... 87	
Tabla 28 Potencia total consumida por la máquina.....	88
Tabla 29 Comparación de características notables entre el modelo real y alterno	124
Tabla 30 Datos RGB de modelos alternos para calibración del subsistema de identificación.....	127
Tabla 31 Resultados de las pruebas realizadas.....	136
Tabla 32 Gastos realizados en materia prima y construcción. ....	138
Tabla 33 Infraestructura necesaria para el desarrollo del proyecto.....	140

## Resumen / Abstract

### Resumen

El presente trabajo terminal, plantea la realización de un prototipo de una máquina separadora de café fruto por colorimetría, utilizando sensores de color.

Actualmente, México es uno de los principales productores de café en el mundo, para poder llegar a ese punto, la industria mexicana tuvo que cambiar los métodos empleados en la recolección y procesamiento del fruto del café, esto trajo consigo la necesidad de utilizar máquinas y herramientas que agilizaran estas actividades, mismas que, si bien es cierto, hicieron que el café pudiera ser comercializado en grandes masas, no garantizan que el proceso sea de calidad y por tanto el producto final, esto representa grandes problemas a los cafecultores de México.

La implementación del prototipo descrito en este documento se concentrará en resolver uno de los principales problemas en el procesamiento del fruto del café, este problema es la separación del fruto en verdes y rojos (maduros) para su correcta clasificación y con el mínimo maltrato posible.

Hoy en día, existen máquinas que realizan esta actividad mediante métodos mecánicos, que tienen un porcentaje bastante alto de eficiencia en cuanto a separación, sin embargo, no son tan buenas con el manejo de los frutos, puesto que maltratan los granos verdes, dejando un gran porcentaje de éstos en pérdida total como producto comercial, esto se traduce en pérdidas monetarias considerables para las grandes casas productoras.

Con el desarrollo de este proyecto no solo se pretende ayudar a las fincas de café, sino que se busca que el prototipo sea de un precio mucho más bajo que las máquinas que se usan actualmente y con esto, que los pequeños agricultores de México tengan acceso a este tipo de tecnologías, haciendo el trabajo mucho más rápido, con menor costo y esfuerzo.

**Palabras clave:** Café fruto, colorimetría, sensores, máquina separadora.



## **Abstract**

In the present final project, the accomplishment of a separating machine of coffee considers fruit by colorimetry, using color sensors.

At the moment, Mexico is one of the main producers of coffee in the world, to be able to arrive at that point, the Mexican industry had to change the methods used in the harvesting and processing of the fruit of the coffee, this brought with himself the necessity to use machines and tools that made agile these activities, same that although are certain, caused that the coffee could be commercialized in great masses, do not guarantee that the process is of quality and therefore the end item also, this represents great problems the coffee growers of Mexico.

The implementation of the prototype described in this document will be concentrated in solving one of the main problems in the processing of the fruit of the coffee, this problem is the separation of the fruit in green and red (mature) for its correct classification and with minimum I mistreat possible.

Nowadays, machines exist which they make this activity by means of mechanical methods, that have a quite high percentage of efficiency as far as separation, nevertheless, are not so good with the handling of the fruits, since they mistreat green grains, leaving a great percentage of these in total losses like commercial product, this is translated in considerable monetary losses for the great producing houses.

With the development of this project not only it is tried to help the coffee property, but that one looks for that the prototype is of a price much more under which the machines that are used now and with this, that the small agriculturists of Mexico much more have access to this type of technologies, doing the fast work, with smaller cost and effort.

**Key words:** Coffee fruit, colorimetry, sensors, separating machine.

# 1. Introducción

La producción de café en México ha sido durante décadas, una de las principales actividades comerciales del país y el sustento de miles de familias. Durante este tiempo, los métodos de sembrado, recolección y procesamiento del café han sido transmitidos de generación en generación, sin embargo, debido a la globalización, estos métodos ya no son suficientes para abastecer las necesidades de los consumidores del valioso producto, es por ello que se han desarrollado máquinas y herramientas para que el proceso del café sea mucho más rápido.

Como es de esperarse, la industrialización del café trae consigo muchas ventajas al igual que desventajas, siendo éstas últimas las de mayor interés debido a que degrada la calidad del producto final.

Hoy en día, México ocupa el onceavo lugar en producción de café a nivel mundial. Gracias a la topografía, altura y clima que presenta el territorio, especialmente en el centro y sur, se exportan cerca de 28000 toneladas al año, principalmente a la Unión Europea, y se estima que en el 2030 el volumen de producción aumentará de 4 a 15 millones de sacos al año. Esto da una idea de lo importante que es mantener el aumento en la producción de nuestro país sin perder calidad.

El consumo de café en el país va en aumento. El café molido ha tenido un alza significativa en los últimos años, según datos de la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural se estima que para el año 2030 el consumo nacional tenga un aumento de 0.80 a 0.94 millones de toneladas y que la producción nacional pase de 0.82 a 4.70 millones de toneladas, lo cual representa un crecimiento acumulado de 16.48 y 471.46%, respectivamente [1]. Esto obliga a las empresas a aumentar tanto la siembra como la cosecha del fruto, es aquí donde entra la industrialización.

Si bien es cierto, muchas de las principales fincas productoras de café ya cuentan con maquinaria para hacer mucho más rápido el proceso, estas máquinas no entregan la calidad deseada, en especial las separadoras de café, las cuales en su mayoría operan bajo algún principio mecánico, que hace que el café se maltrate demasiado, degradando su calidad y por tanto su precio en el mercado.

El desarrollo de nuevos métodos para la separación de estos frutos es de gran importancia para el sector agrícola enfocado en el café, puesto que, con ellos, la velocidad de la separación sigue siendo suficiente para el volumen que se maneja, pero sin sacrificar la calidad del producto. Algunos de estos métodos incluyen la implementación de visión artificial o colorimetría para una mayor eficiencia de las máquinas.

## 1.1 Planteamiento del problema

Actualmente, muchas industrias cafetaleras en México producen el café en cantidades muy grandes, por lo cual, involucrar procesos industriales es de suma importancia dentro de este sector.

La cosecha, es uno de los principales procesos en la producción del aromático, pues es aquí en dónde se define la calidad del café en gran medida.

Existen dos tipos de cosecha del café, la selectiva y la general. La primera consiste en recoger únicamente el café maduro de la mata, y la segunda en quitar absolutamente todos los frutos (maduros e inmaduros) siendo esta la más popular en las casas cosechadoras de café actuales [2].

Por esta razón, después de la cosecha es necesario realizar la separación del café verde del maduro, pues como es de esperar, el café maduro es de mejor calidad que el verde y por

lo tanto se puede vender a un precio más elevado, lo cual es muy bueno para los caficultores. Esta información, obtenida tras una entrevista en la finca San Nicolas en el estado de Chiapas [3].

El verde por otro lado también se puede vender, sin embargo, es importante que no se maltrate al separarlo, pues baja su calidad y precio si no se encuentra en óptimas condiciones.

Muchas máquinas separadoras del fruto de café que existen en la actualidad hacen este trabajo por medios mecánicos, aprovechando la diferencia de tamaños que existen entre el café maduro y el verde, siendo este último de menor tamaño. Durante el proceso de separación se busca colar a través de una rejilla cilíndrica giratoria el café verde, dejando al café maduro pasar directo a otro depósito.

Las máquinas que implementan estos métodos no tienen control alguno sobre el proceso y calidad del trabajo realizado, esto se traduce a un maltrato significativo en los granos separados; en cuestión del café maduro, esto no tiene mucha relevancia puesto que el siguiente proceso del café es el despulpado, así que es indiferente si el grano sale entero o no; por otra parte, el café verde debe separarse de manera íntegra para seguir considerándolo como un café comercial, obviamente a este grano se le da un proceso diferente al maduro, que para fines de este trabajo es irrelevante saber, la única condición es que el grano verde salga entero y sin ningún tipo de maltrato posible después de la separación.

En un año de producción se llega a tener del 5 al 8% de café verde del cual, debido al método de separación, el 40% es pérdida total por maltrato durante el proceso de separación, según los datos obtenidos en la finca San Nicolas [3].

Por lo mencionado anteriormente, es necesario implementar un método de separación menos agresivo, el cual está basado en procedimientos de identificación de color por colorimetría. Uno de los principales inconvenientes al trabajar con estos métodos es la caracterización de las tonalidades de los colores, debido a que no todos los maduros presentan la misma tonalidad del rojo al igual que los verdes; teniendo esto en cuenta también es importante diseñar y calibrar el sistema identificador para que realice un adecuado trabajo.

El procesamiento y manipulación de los datos es otro obstáculo que hay que superar debido a los grandes volúmenes que se manejan en la industria, por ello se requerirá una capacidad de procesamiento acorde con las necesidades del cliente. Con todo esto se pretende que el aprovechamiento del café verde mejore a un 90% del café cosechado.

## **1.2 Justificación**

La separación de café mediante métodos mecánicos es la más utilizada en las fincas cafetaleras, no es de extrañarse que este método sea popular debido a la relativa simpleza y rapidez con la que trabaja, comparado con una separación manual, sin mencionar que este último método, incluye costos extras debido al pago por el servicio a los trabajadores, ahorrándose así, una gran cantidad de tiempo, dinero y esfuerzo.

De acuerdo con una investigación realizada en la finca San Nicolás, ubicada en el estado de Chiapas, en el mercado internacional, el kilo de café verde en término pergamino, incluso en las peores condiciones tiene aún un precio que va desde \$9.00 a \$15.00 MXN, en contraste con el precio del café en óptimas condiciones que va desde \$24 a \$30 MXN por kilo, lo cual se traduce en una pérdida de alrededor del 50% en las ganancias brutas.

En la finca San Nicolás, se produjo el último año un total de 11500 cajas, de las cuales 650 fueron de café verde, de esta cantidad y después de todo el proceso para llegar al producto final, la finca producirá aproximadamente 9100 kilogramos de café verde en pergamino. Debido a la mala calidad, se pretende que este tipo de café alcance un precio máximo en el

marcado de \$15 MXN en el mejor de los casos y haciendo mezclas con café de mayor calidad, es decir que las pérdidas netas para este año (2021) debido al proceso de separación del café superarán los \$100,000 MXN [3].

Por ello se propone la realización de un prototipo basado en análisis de color por colorimetría, el cual busca tener una eficiencia de al menos el 90% y que no maltrate los frutos, de esta manera se conserva su calidad y se reducen las pérdidas considerablemente. Es importante mencionar que se pretendía el uso de visión artificial como método de identificación de color, sin embargo, el costo de las herramientas para este método (cámara, cables de fibra óptica y tarjeta de procesamiento) superaban por mucho (alrededor de 10 veces más) el costo de los dispositivos electrónicos, esta selección se detalla más adelante en la sección “Análisis morfológico y selección del diseño conceptual”.

### **1.3 Objetivos**

#### **Objetivo general**

Diseñar y construir un prototipo de máquina separadora de café fruto maduro e inmaduro con métodos basados en análisis de color por colorimetría.

#### **Objetivos específicos**

- Diseñar un sistema capaz de identificar colores en frutos de café.
- Diseñar y construir un sistema mecánico, capaz de ordenar los frutos de café en unifilas.
- Diseñar y construir un sistema mecánico que separé los frutos de café en dos grupos de acuerdo con el análisis de color.
- Diseñar un sistema de comunicación entre la etapa de análisis de color y la etapa de separación.
- Diseñar e implementar un esquema de control capaz de gobernar a los subsistemas de la máquina.
- Implementar un medio de comunicación entre el operario y la máquina.
- Obtener una capacidad de separación de 50 kilogramos de café fruto por hora.

## **2. Marco teórico**

### **2.1 Estado del arte**

Existen dos maneras de cosechar el café, sin embargo, cuando la cosecha se hace de forma general las cerezas verdes se incluyen en la cosecha, pero tendrán un impacto negativo en el sabor del café si se procesa con las cerezas maduras [4]. Por esta razón, muchos caficultores optan por separar los frutos del café maduros de los inmaduros, ya que pueden vender su producto a mejor precio si viene separado de esta manera.

Los productores pequeños realizan esta tarea de forma manual, tendiendo sobre una mesa todos los frutos cosechados y escogiendo uno por uno los que se encuentran en mejor punto de maduración. Sin embargo, para los productores a mayor escala se convierte esto en una tarea sumamente tardada y cara, pues deben pagar el servicio de muchos trabajadores, por lo cual muchos han optado por la compra de máquinas capaces de realizar este trabajo de forma automática, como la mostrada en la Ilustración 1.

Estas máquinas en su mayoría hacen la separación de los verdes utilizando medios mecánicos, para lo cual, utilizan la diferencia de tamaños que existe entre los verdes y los maduros.

Según datos obtenidos en la finca San Nicolás, la máquina con la que operan tiene una capacidad de 20 quintales (960 kg) por hora de café maduro, sin embargo, la máquina debe ser muy bien calibrada para conseguir esta eficiencia, puesto que los trabajadores de este lugar comentan que la máquina únicamente puede separar los verdes cuando en el lote se encuentra entre el 10 y el 40% de café verde, fuera de este rango la separación no es muy efectiva [3].

Estas máquinas pueden tener mucha mayor eficiencia según sus tamaños y tipo de rejilla utilizada como selectora, siendo las marcas Bendig [5] y Phinalense [6] las más utilizadas en la industria cafetalera de Chiapas.



*Ilustración 1. Máquina separadora de café por métodos mecánicos [5]*

Existen también máquinas que trabajan por visión artificial, aprovechando la diferencia de colores entre los frutos a seleccionar como principal característica. Estas máquinas tienen una eficiencia mayor a las mecánicas, y su principal ventaja es que no maltratan el fruto durante el proceso de separación.

Las máquinas CoffeCherryTec tienen la capacidad de separar de 3000 a 3500 kilos de café por hora [7] con su máquina de mayor tamaño, sin embargo, los precios de estas máquinas son sumamente elevados, y deja de ser rentable para muchas fincas cafetaleras mexicanas.

Gracias a una investigación en la base de datos del IPN y medios ajenos al Instituto encontramos algunas máquinas comerciales e investigaciones relacionadas con la separación de frutos de café. La mayoría de ellas por medios mecánicos.

Dichas máquinas se presentan en la Tabla 1, la cual contiene los datos de su origen, así como una breve descripción de sus alcances.

*Tabla 1 Estado del Arte*

No.	Nombre	Descripción y Características	País	Instituto	Tipo	Ref.
1	Separadora Oscar 1/Oscar 2	Máquina que separa los granos verdes y secos de café, con tolva depredadora	Perú	Cooperación alemana al Desarrollo - GIZ	Catálogo	[8]



		Stanley, usa agua reciclada.				
2	Separadora de verde	Separa café verde que se recibe mezclado con el maduro. La máquina cumple dos funciones, separar y despulpar.		Jocasa	Catálogo	[9]
3	Separadora de café Verde- Despulpadora - Criba	La máquina recibe el café una vez pasada por la lavadora mecánica, separa el café verde y despulpa el café maduro.		International Cofee Expert	Catálogo	[10]
4	Separadora de café verde ecológica sin uso de agua	Sistema de separación con rejilla cilíndrica, la alimentación de la máquina se realiza en seco. Toda su construcción es de acero laminado y perfiles.	Costa Rica	Bendig	Catálogo	[5]
5	DC-PBOIA	Separadora de verdes por criba tubular	Brasil	Pinhalense	Catálogo	[6]

6	CofeeCherryTek	<p>Diseñada para eliminar cerezas verdes antes del proceso de despulpado, se puede utilizar en mojados o secos.</p> <p>Utiliza la banda completa del espectro de color para eliminar cerezas verdes, amarillas, naranjas y negras junto con materiales extraños.</p>	Estados Unidos	WEKO	Informe	[7]
7	Diseño e implementación de una planta selectora de objetos por color	<p>Software de aplicación para una planta separadora de materiales por su color.</p> <p>El software muestra en tiempo real las variables del sistema, así como el funcionamiento del controlador dando la opción de modificar cualquier parte del proceso.</p>	México	Instituto Politécnico Nacional, ESIME, Unidad Culhuacán	Tesis	[11]

8	Sistema mecatrónico de monitoreo y control de calidad de tomates empleando visión artificial	Sistema formado por tres dispositivos mecatrónicos enfocados en la organización, transporte y selección automática de tomates, de acuerdo con las necesidades del usuario, utilizando visión artificial y manipulando el conjunto de los 3 dispositivos por una computadora central.	México	Instituto Politécnico Nacional, UPIITA	Tesis	[12]
---	--	--	--------	--	-------	------

## 2.2 Marco conceptual

Como se ha mencionado, este proyecto está enfocado a la separación del fruto de café maduro e inmaduro mediante el análisis de colores. El café fruto es el café recién cosechado, que tiene un color rojizo cuando está maduro y verde cuando no lo está.

Para poder realizar este proyecto, es necesario conocer algunos temas relacionados, mismos que se irán estudiando a lo largo de esta sección.

## 2.3 Tipos de cosechas de café

Es lógico pensar que la cosecha del café se hace únicamente cuando el café ya está maduro, sin embargo, en muchas fincas debido a diferentes factores, no se hace de esa manera o no todas las veces que se cosecha durante la temporada.

Existen dos técnicas de cosecha del fruto, que son la *picking* (selectivo) y la *striping* (general), como su nombre lo dice, en la primera se escoge únicamente el café maduro, y en la segunda se cosecha todo el café por igual.

La cosecha selectiva se realiza en lugares en donde, debido al clima el fruto del café no madura de forma homogénea [2].

Según una entrevista realizada por el equipo en la finca San Nicolás, ubicada en el estado de Chiapas, se ocupan ambos métodos de cosecha del café durante la temporada, pues durante este periodo el café se cosecha 3 veces, en la primera se recolecta únicamente el café que ya está maduro (cosecha selectiva), dejando que el café que aún no está listo termine de madurar, pues a diferencia de muchos otros frutos, estos no continúan su proceso de maduración una vez cortados.

En la segunda cosecha ya aplican la cosecha general, como se puede apreciar en la Ilustración 2, puesto que es en esta cuando la gran mayoría del café de la mata se encuentra completamente maduro.

Para la tercera etapa se hace lo mismo que en la segunda, con la diferencia de que en este punto hay en la mata un porcentaje importante de café verde, sin embargo, es importante dejar la mata preparada para la próxima temporada sin ningún fruto en ella [3].



*Ilustración 2 Cosecha de café por el método striping [13]*

## **2.4 Características del café fruto**

Una vez que el fruto del café comienza a crecer en las matas este comienza a tener cambios en sus características físicas, como se puede ver en la Ilustración 3. Los cambios más notorios son en color y en tamaño.

Entre los 120 y 180 días después de la floración de la mata del café, el fruto prácticamente ha alcanzado su tamaño final, adquiere consistencia sólida y gana peso, durante esta etapa el café tiene un color verde.

Entre los 180 y los 224 días, el fruto comienza a madurar y pasan de ser verdes a un tono rojo intenso [14], además de volverse ligeramente más grande.



*Ilustración 3 Gama de colores y tamaños del café fruto [14]*

## **2.5 Alimentadores y transportadores de materiales**

### **2.5.1 Tolvas o chutes**

Estos alimentadores son utilizados en la industria para el procesamiento de diferentes materiales y, por ende, existe una gran variedad de diseños para aplicaciones en particular. La Ilustración 4 muestra los tipos de alimentadores según su uso, que se pueden clasificar en alimentadores de flujo tubular, es decir que la tendencia es que se forme un agujero en el

centro del material a medida que se va descargando; y los de flujo másico, en los que el material se mantiene nivelado durante la descarga [15].

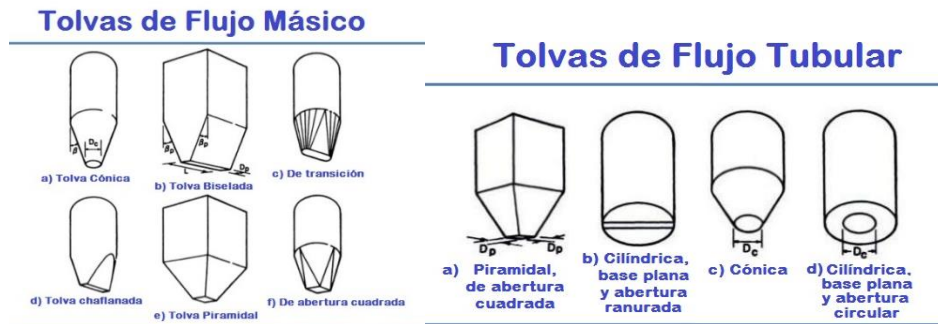


Ilustración 4 Tipos de tolvas según su uso [15]

Para el diseño de una tolva es necesario tomar en cuenta muchos factores, tales como:

- Resistencia y propiedades de flujo de los materiales bajo las peores condiciones.
- Geometría de la tolva para proporcionar la capacidad deseada.
- Cargas ejercidas sobre las paredes de la tolva bajo condiciones de operación.
- Diseño de la estructura de depósito.

### 2.5.2 Sistemas vibratorios

Se denomina vibración u oscilación a cualquier movimiento que se repite en determinado lapso temporal [16].

Las vibraciones en muchos casos son perjudiciales para las maquinas en la industria, pues estos movimientos pueden hacer que los componentes sometidos a ellos sufran alteraciones o incluso la descomposición. Sin embargo, es posible tomar este movimiento a favor de la máquina que lo sufre.

Los alimentadores vibratorios son algo muy común hoy en día en las máquinas de transporte de productos, pues con ayuda de estos es posible clasificar y ordenar piezas en masa. El principio de funcionamiento de los alimentadores es mediante dos masas que se unen de manera elástica como se muestra en la Ilustración 5, y una de ellas, es movida gracias al accionamiento de un motor electromagnético. La entrada de corriente de este controla el tirón del electroimán y la longitud de carrera, por lo tanto, si se controla la entrada de corriente, es posible regular la velocidad de avance de los componentes a clasificar [17].



*Ilustración 5 Sistema vibratorio mediante masa excéntrica-resorte [17]*

### **2.5.3 Cintas transportadoras**

Las cintas transportadoras son sistemas muy empleados en la industria para realizar el transporte de materiales granulados u otros.

Estas cintas tienen la ventaja de poder ser adaptadas para transportar cualquier tipo de materiales, por lo tanto, es posible encontrar en el mercado una amplia gama de cintas transportadoras.

Una cinta transportadora es básicamente una banda continua que es arrastrada por fricción o tracción contra un cilindro estrella llamado tambor motriz que es accionado por un motor. Del otro lado de la banda existe un segundo tambor que rueda libremente y funciona como retorno de la banda [18].

Por otro lado, la banda por lo general es soportada por una serie de rodillos, o en algunos casos por una chapa continua, la cual debe proporcionar la menor fricción posible contra la banda.

Los componentes principales de las cintas transportadoras son por supuesto la cinta, que como se ve en la Ilustración 6 pueden ser de diferentes materiales, que según los requerimientos del material a transportar hay uno que se adapta mejor.

<b>Tabla 1. Tejidos empleados en bandas transportadoras</b>	
<b>Tipo de Tejido</b>	<b>Designación</b>
Algodón	B
Rayón	Z
Poliéster	E
Poliamida	P
Cables de acero	St

*Ilustración 6 Tejidos empleados en bandas transportadoras [19].*

En la Ilustración 7 se muestra la configuración básica de una cinta transportadora, en ella podemos ver que las estaciones de rodillos son otro de los principales componentes de estos medios de transporte, pues soportan el peso de la cinta girando libremente sobre rodamientos facilitando el desplazamiento de la banda.

Estos rodillos deben estar colocados a cierta distancia uno del otro, dependiendo de algunos factores tales como ancho de la banda y peso del material a transportar

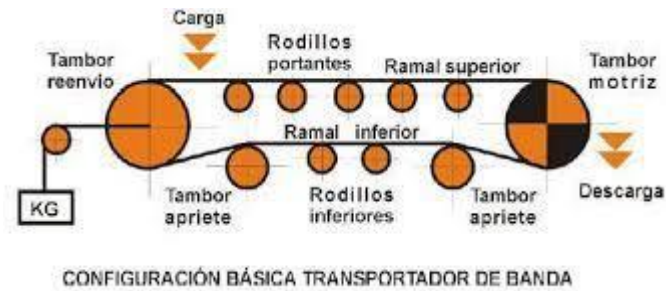


Ilustración 7 Configuración básica de un transportador de banda [18]

Los elementos de encauzado son también parte importante de este transportador, pues son los encargados de impedir que el material se salga de la cinta. Estos elementos se encuentran fijos sobre el bastidor de la cinta.

## 2.6 Análisis de color

### 3.6.1 Colorimetría

El color es una percepción, una sensación visual estudiada por ámbitos tan diversos como la física, la química o la psicología.

Podemos definir la colorimetría como la ciencia que estudia las medidas cualitativas y cuantitativas del color. Nos ayuda a medir y combinar los colores según las necesidades de cada momento. Las variables del color son:

- Luminosidad: cantidad de luz
- Tono: Longitud de onda dominante
- Saturación: medida en que un color se aleja del gris [20]

Se debe tomar en cuenta que el color es producto de un estímulo percibido por el ojo humano y codificado por el cerebro, es decir, los colores son productos de la percepción de una longitud de onda en específico, esta percepción es lograda gracias a receptores fotosensibles que poseemos a nivel del ojo humano, a estos receptores se les otorga el nombre de “conos” estos se encuentran situados en la retina, podemos percibir muchos colores gracias a que poseemos diferentes conos que son sensibles a longitudes de onda distintas, de esta manera se explica porque distinguimos un gran número de colores [21].

### 3.6.2 Sistemas de visión artificial

La visión artificial es una disciplina científica que incluye métodos para adquirir, procesar y analizar imágenes del mundo real con el fin de producir información que pueda ser tratada por una máquina.

Una manera simple de comprender este sistema es basarnos en nuestros propios sentidos. Los humanos usamos nuestros ojos para comprender el mundo que nos rodea, y la visión artificial trata de producir ese mismo efecto en máquinas. Éstas podrán percibir y entender una imagen o secuencia de imágenes y actuar según convenga en una determinada situación. La comprensión en los dispositivos se consigue gracias a una descomposición de la imagen en pequeños fragmentos (píxeles) y en su posterior estudio.

La principal finalidad de la visión artificial es dotar a la máquina de “ojos” para ver lo que ocurre en el mundo real, y así poder tomar decisiones para automatizar cualquier proceso [22].

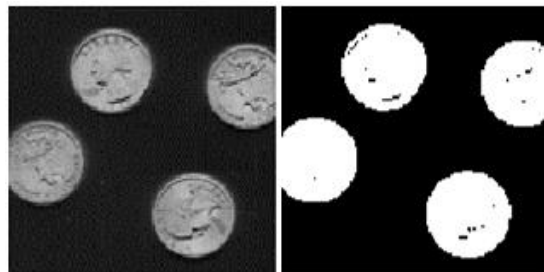
La visión artificial nos permite entre muchas cosas realizar la identificación de color mediante el procesamiento de las imágenes. Esta identificación la puede hacer por distintos métodos.

### 3.6.3 Análisis de color por umbralizado

Umbralización es uno de los métodos más importantes para la segmentación de imágenes, pues su objetivo es convertir una imagen en escala de grises a una nueva imagen que sólo tenga dos niveles de color (negro y blanco), detectando así únicamente los objetos que se encuentren en el rango de umbral requerido.

Para este proceso se realiza un barrido de la imagen pixel por pixel, entonces, si se considera un umbral de magnitud  $T$  podemos decir que cualquier pixel en el que el umbral sea mayor a  $T$  pertenecerá al objeto que queremos identificar, en caso contrario pertenecerá al fondo [23].

En la siguiente figura se muestra una imagen en escala de grises (Ilustración 8a), que tras aplicarle un umbralizado se binariza (Ilustración 8b) y permite identificar que partes de la imagen pertenecen a los objetos de estudio.



*Ilustración 8 (a) Imagen en escala de grises (b) Imagen tras aplicar el umbralizado [23]*

### 3.6.4 Análisis de color por histograma

El análisis de color también se puede hacer aprovechando el histograma de la imagen. El histograma es una representación gráfica de la distribución de los distintos tonos de una imagen [24].

En estas gráficas se tiene en el eje vertical el número de píxeles que contiene la imagen para cada tono. Para poder utilizar esto como identificador de color se puede generar un barrido de la imagen en cada capa de la gama RGB, para así ver cuál es el color que más predomina en la imagen.



En la Ilustración 9 se muestra el histograma de cada uno de los colores de una imagen, del cual podemos ver que el color que predomina más se encuentra en la capa del azul, y el que predomina menos está en el verde.

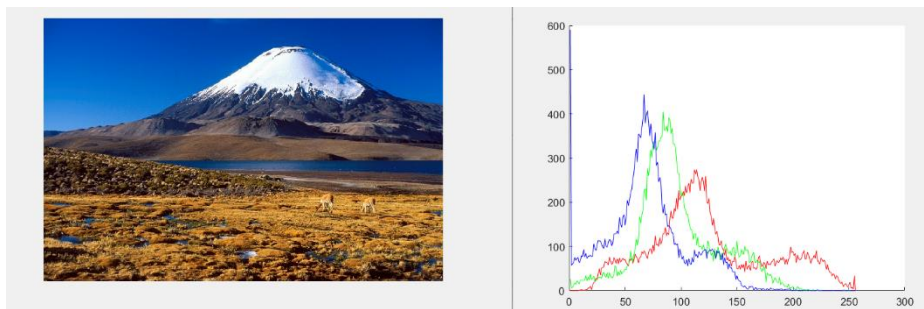


Ilustración 9 Histograma de una imagen [Elaboración propia].

### 3. Diseño conceptual

#### 3.1 Requerimientos

El prototipo de la máquina separadora de café debe cumplir con ciertas características solicitadas por el cliente:

- La eficiencia de la separación del café debe ser igual o mayor a la de las máquinas con las que ya se cuenta, esto es superior al 90%.
- Los frutos verdes del café deben separarse de manera íntegra y con el menor maltrato posible, esto es que, al menos el 90% del café verde separado esté en condiciones comerciales.
- Los materiales no deben reducir la calidad al estar en contacto con los granos de café.
- La capacidad de separación de la máquina final debe ser de al menos 50 kilogramos de café fruto por hora.

Para lograr todos estos requerimientos, la máquina debe recibir los siguientes servicios:

- Mantenimiento por lo menos una vez al año y en temporada de café, una vez por cosecha.
- Espacio de trabajo amplio y con condiciones ambiente.

La siguiente tabla resume todas las variables que se involucran para que el sistema se considere completo para el trabajo y que funcione de manera eficiente.

Tabla 2 Requerimientos

Requerimiento	Valor	Origen	Tipo
---------------	-------	--------	------

<b>Eficiencia en separación</b>		90%	Cliente	Funcional
<b>Capacidad de separación</b>		50 kg/h	Cliente	Funcional
<b>Mantenimiento</b>		1 vez al año	Sistema	Funcional
<b>Espacio de trabajo</b>	Largo	2 m	Sistema	No funcional
	Ancho	1.5 m		
	Alto	2 m		

### 3.2 Descomposición por áreas funcionales

Las áreas funcionales requeridas para cubrir con las necesidades son las mostradas en el gráfico de la ilustración siguiente.



*Ilustración 10 Áreas funcionales de la máquina separadora de café [Elaboración propia]*

Cada una de las áreas funcionales tiene tareas específicas por cumplir, mismas que se describen a continuación.

#### 1. Alimentación eléctrica

En esta etapa se harán todas las transformaciones de energía necesarias para alimentar todos los componentes eléctricos y electrónicos de la máquina.

#### 2. Recepción y colación de frutos de café

Previo a la separación de café, el fruto se lleva a una lavadora para quitar la mayor cantidad de impurezas posible, por lo cual se recibe el café con agua, es por ello que, es necesario que se quite la mayor cantidad de líquido posible antes de empezar con la separación del fruto.

### 3. Transporte y ordenamiento de frutos de café

Para poder separar de forma eficiente, se llevará a cabo un sistema de ordenamiento del café, que puede ser a través de una plancha vibratoria acanalada, que nos permitirá formar unifilas de café para el posterior análisis, o bien una banda transportadora con la misma capacidad mencionada.

### 4. Análisis y procesamiento de colores

Una vez formados adecuadamente los frutos se llevará a cabo el análisis de color, el cual consistirá en la detección de color por unifilas, con alguno de los métodos de visión artificial o por sensores RGB, este proceso se realizará simultáneamente en todas las filas formadas; con este análisis, el sistema mandará la información del color del fruto de café que se encuentra al inicio de la fila para todas las filas formadas, esta dupla de información (posición y color) será transmitida al controlador del sistema, el cuál decidirá, de acuerdo con esta información, si deja pasar o no el fruto de café.

### 5. Separación mecánica de frutos

En esta etapa, una vez procesados los datos, se moverán actuadores para dirigir a los granos a su grupo correspondiente (maduro o verde). Es importante mencionar que, al hablar de grupo, se refiere a las distintas tonalidades de cada color, con el análisis, se definirán los límites que caracterizan a cada grupo.

### 6. Interfaz hombre máquina

En esta área se proporcionará al usuario un medio de comunicación con la máquina, se incluyen controles de encendido y paro, así como el ajuste de características de la máquina necesarias para su calibración.

Todas estas áreas funcionales deben trabajar en completa sinergia para conseguir resultados con el menor error posible. La estructura de funcionamiento general es la que se describe observa en el diagrama de la Ilustración 11.

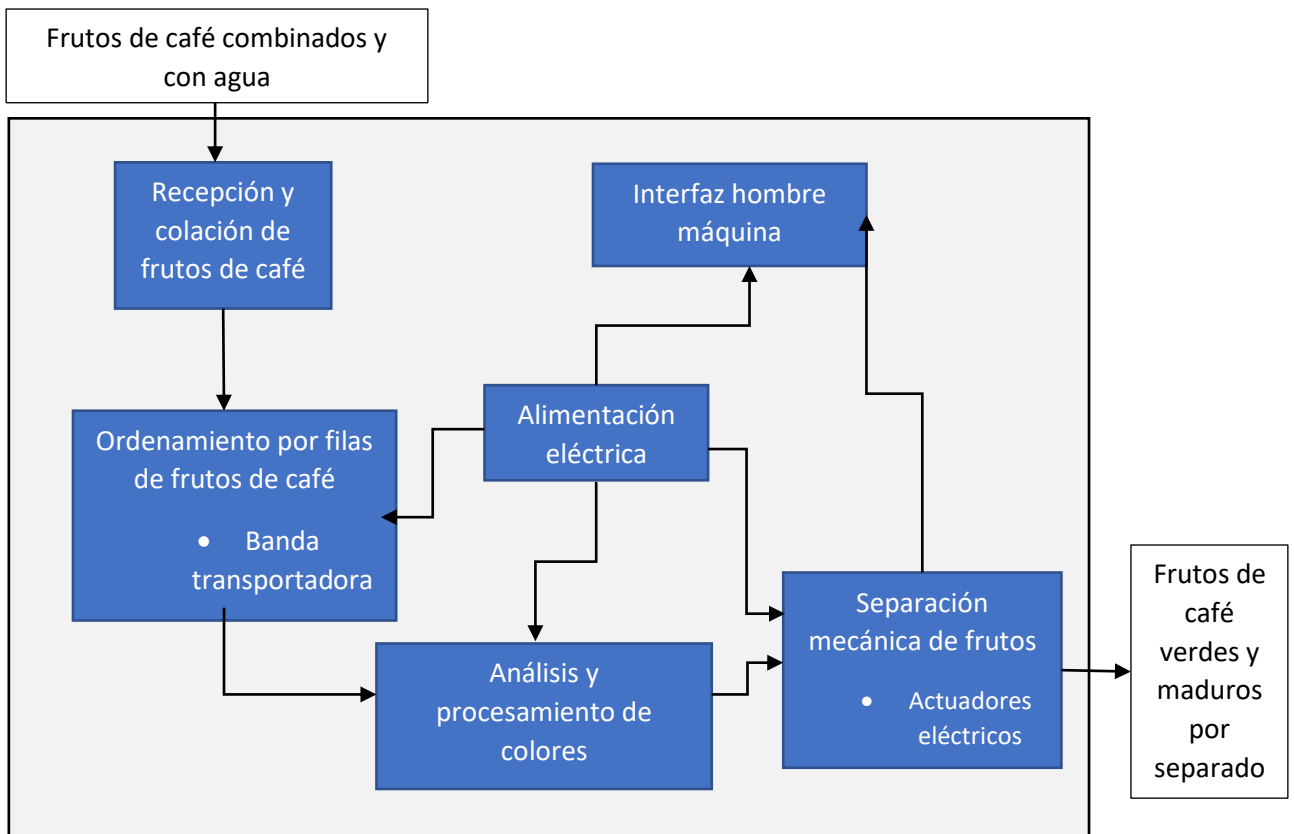

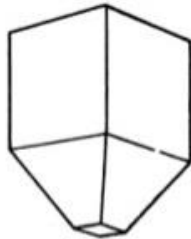
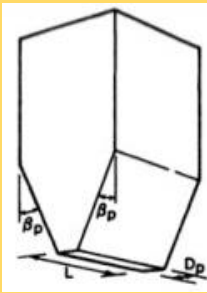


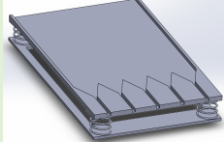
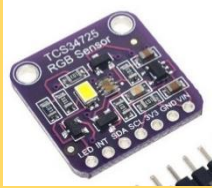


Ilustración 11 Esquema de funcionamiento general [Elaboración propia]

### 3.3 Análisis morfológico y selección del diseño conceptual

Teniendo en cuenta las áreas funcionales, es necesario elegir entre las diferentes alternativas para cada una, considerando que, a pesar de que cada área funcional tiene cierto grado de independencia, el funcionamiento puede ser optimizado si se seleccionan correctamente los componentes y metodologías. Para ello se utiliza el cuadro morfológico de la Tabla 3, donde se aprecian las variantes que puede tener cada área funcional.

Tabla 3 Cuadro morfológico

Área funcional	Alternativa de solución		
<b>Alimentación Eléctrica</b>	CA 127V	CA 220V	
<b>Recepción y colación de frutos de café</b>	Tolva cónica 	Tolva rectangular 	<b>Tolva biselada</b> 

<b>Trasporte y de frutos de café</b>	Rodillo agujerado 	Banda 	Plancha vibratoria acanalada 
<b>Análisis y de colores</b>	Visión artificial 	Sensor RGB 	Sensor de color 
<b>Separación mecánica de frutos</b>	Actuador magnético 	Servomotor 	Actuador neumático 
<b>Interfaz hombre máquina</b>	Interfaz gráfica 	Botonera 	

Tras ver las opciones que existen, se elige el camino de los cuadros amarillos. Primeramente, se tiene la fase de alimentación, que forzosamente debe ser de corriente alterna, ya que es el tipo de corriente utilizada en las instalaciones eléctricas.

Para la siguiente área funcional, que es la recepción de los frutos de café se elige una tolva biselada, como se ve en la Tabla 3, que permite distribuir el recuso en un plano, lo cual facilita el posterior ordenamiento del café, a diferencia de la cónica y rectangular, que ponen todo el producto en un área pequeña.

Para trasportar el café, la opción que más se adecúa a las necesidades es la banda, que debe ser una banda capaz de separar los frutos tanto en filas como en columnas.

Para la sección del análisis y procesamiento de color se tienen tres opciones, de las cuales se elige el sensor RGB, pues una de sus principales ventajas es el precio contra las otras dos opciones. La opción de visión artificial también es muy buena, pues permite analizar más de un fruto a la vez, pero la velocidad de procesamiento que se requiere es mucha y por tanto se requiere de un controlador muy robusto.

Para la separación de los frutos se considera la posibilidad de trabajar con actuadores neumáticos, sin embargo, la principal desventaja es que es necesario incorporar un compresor al sistema, lo cual eleva mucho el costo. Las otras dos opciones son buenas, sin embargo, se opta por trabajar con actuadores electromagnéticos, pues requieren menor coste computacional trabajar con ellos, a comparación de los servomotores.

Finalmente, para la interfaz se piensa en una interfaz gráfica de usuario, pero al no tener muchas variables por monitorear no se considera tan factible, por lo que, con una botonera con los controles principales es suficiente.

## 4. Diseño detallado

### 4.1 Velocidad de separación requerida

Para iniciar con los cálculos que se requieren se debe primero saber qué velocidad de separación requiere el prototipo.

En la Tabla 2, de la sección de requerimientos, se pide que se tenga una capacidad de separación de 50 kg/h. Como el método de separación se hará analizando fruto por fruto, es necesario saber cuántos frutos se deben separar. Para ello, se lleva a cabo el estudio de características de una muestra de 100 frutos de café (Ilustración 12), lo cual da como resultado los datos mostrados en la Tabla 4, en la cual se ve que para esta cantidad de frutos se tiene una masa de 120 gramos. Sin embargo, existen variedades de café, unas más pesadas que otras, por lo cual se toma como peso aproximado 150 gramos por cada 100 frutos, lo cual nos da un rango para frutos de mayor masa.

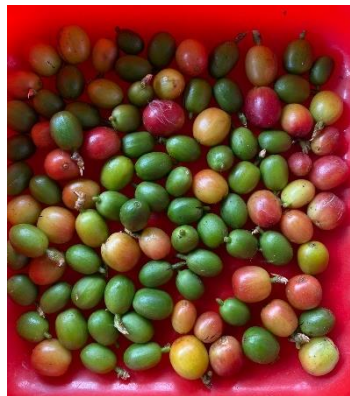


Ilustración 12 Muestra de frutos de café arábica [Elaboración propia]

Partiendo de esto se tienen las siguientes ecuaciones.

$$100 \text{ frutos} = 150 \text{ g}$$

$$\frac{1000}{150} * 100 \text{ frutos} = 666.666 \frac{\text{frutos}}{\text{kg}} \quad \therefore \quad 50 \text{ kg} = 33333.333 \text{ frutos}$$

Entonces, por segundo se deben separar...

$$\frac{33333.33 \text{ frutos}}{3600 \text{ segundos}} = 9.259 \text{ frutos por segundo}$$

Se redondea ese valor al inmediato superior para tener así margen de operación, por lo cual se considera que se deben separar 10 frutos por segundo.

### 4.2 Características físicas de los frutos de café

De la muestra tomada para el cálculo anterior se toman medidas para saber el tamaño y peso aproximado de los frutos con los que debe trabajar el prototipo. La Tabla 4, muestra los resultados obtenidos.

Tabla 4 Características físicas de los frutos de café [Elaboración propia]

	Mínimo [cm]	Máximo [cm]
<b>Alto</b>	1	1.5
<b>Ancho</b>	0.5	1.4
<b>Profundidad</b>	0.5	1.5
<b>Masa de 100 frutos</b>	150 gramos	

Tomando esto en cuenta se diseña la banda transportadora de tal forma que asegure el posicionamiento de todos los frutos, tomando como referencia la medida máxima, que en este caso es 1.5 cm.

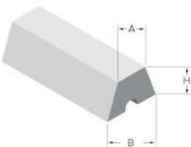
### 4.3 Cálculo de la banda

#### 4.3.1 Geometría de la banda

Para facilitar el análisis por color de los frutos es recomendable tener cada uno de los frutos separado entre del resto, para ello se debe formar una especie de matriz de frutos bien ordenados.

Tomando en cuenta la tabla de la Ilustración 13, se selecciona un perfil K13, para así dar una separación considerable entre cada fruto de café.

Cabe mencionar que este tipo de perfiles no son para este uso, sin embargo, su geometría es ideal para la tarea requerida.



TYPE	DIMENSIONES (MM)			MATERIAL	COLOUR			WEIGHT gr/m	TRANSVERSAL		LONGITUDINAL	
	B	H	A		WHITE	BLUE	GREEN		PITCH MM MM	Ø MINIMO MM	Ø MIN PULLEY MM	Underside
K6 liso	6	4	4,2	PVC	☉	●	●	23			25	30
K8 liso	8	5	4,4	PVC	☉	●	●	40	28	50	50	60
K10 liso	10	6	5,6	PVC	☉	●	●	60	30	70	70	80
<b>K13 liso</b>	<b>13</b>	<b>8</b>	<b>7,2</b>	<b>PVC</b>	<b>☉</b>	<b>●</b>	<b>●</b>	<b>100</b>	<b>33</b>	<b>90</b>	<b>90</b>	<b>100</b>
K17 liso	17	11	9,0	PVC	☉	●	●	180	37	100	100	120
K22 liso	22	14	11,8	PVC	☉	●	●	300	42	150	150	180
K30 liso	30	16	18,4	PVC	☉	●	●	470	50	250	250	250
K10 liso	10	6	5,6	PVC	☉	●	●	59	30	70	70	80
K13 liso	13	8	7,2	PVC	☉	●	●	98	33	90	90	100
k17 liso	17	11	9,0	PVC	☉	●	●	170	37	100	100	120

Ilustración 13 Perfiles para bandas transportadoras serie K [25]

Con el perfil seleccionado, y basándonos en el tamaño máximo que puede llegar a tener un fruto de café se proponen las dimensiones del perfil de la banda como se muestra en la Ilustración 14.

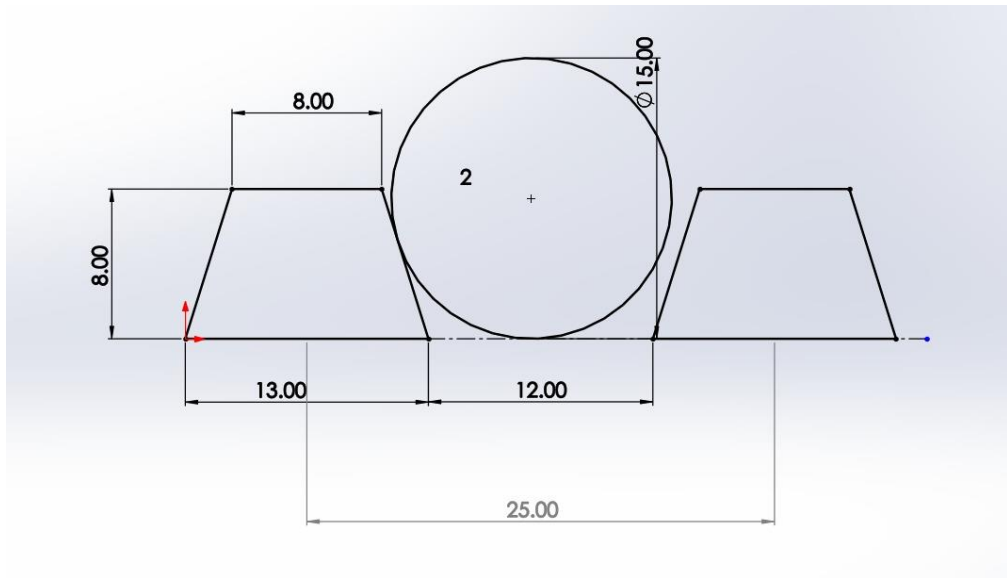


Ilustración 14 Vista lateral de la de banda dentada [Elaboración propia]

Del cálculo de la velocidad de separación requerida se obtiene que se deben separar al menos 10 frutos de café por segundo, entonces se propone una velocidad de separación de un segundo por cada fruto, lo cual implica que debe haber 10 filas de café para cumplir con el volumen de frutos separados requerido.

Tomando en cuenta lo anterior y que se quiere una separación mínima entre cada fruto de 10mm, la banda debe tener un ancho de:

$$1 \text{ fruto} = 15\text{mm} \therefore 10 \text{ frutos} = 150\text{mm}$$

A esto se le suma 10 mm entre cada fruto, considerando que entre 10 frutos hay 9 espacios de 10 mm y se considera además un margen de cada lado de 10 mm tenemos entonces.

$$10\text{mm}(9 \text{ espacios}) + 10\text{mm}(2 \text{ margen}) + 150\text{mm} = 260\text{mm}$$

Que es el ancho total de la banda. La separación entre cada fruto en filas se hará con un bastidor fijo con separaciones de 10mm de espesor, mientras que la banda hace la separación en columnas como se ve en la Ilustración 15.

La velocidad de avance de la banda es fácilmente calculada con los datos anteriores, pues la separación total entre cada fruto a lo largo de la banda es de 25mm, y considerando que debe separar un fruto por segundo por cada fila la velocidad de avance está dada por:

$$V = 25 \frac{\text{mm}}{\text{s}} = 0.025 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

La Ilustración 15 muestra un boceto de la propuesta de diseño de la banda transportadora.



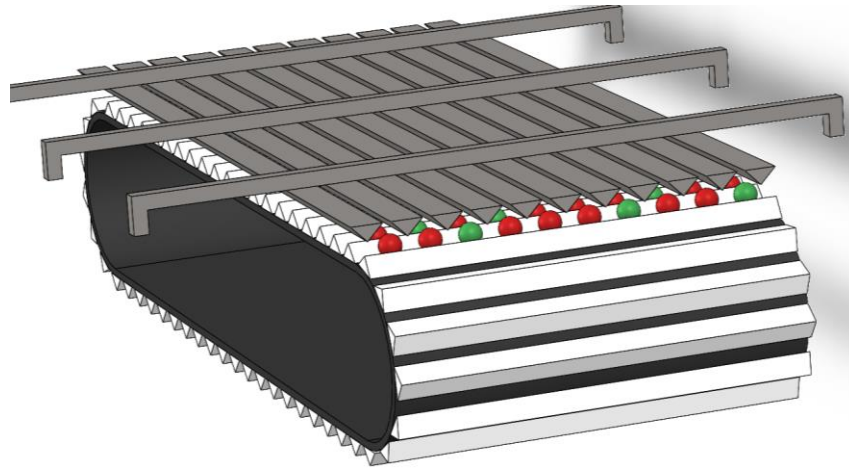


Ilustración 15 Boceto de la banda transportadora [Elaboración propia]

### 4.3.2 Capacidad de transporte de la banda

El volumen de material transportado por unidad de tiempo es lo que se conoce como capacidad de transporte de la banda. En esta sección se muestra el procedimiento para obtener esta información, sin embargo y, como se verá más adelante, para este caso específico se tomarán ciertas consideraciones basadas en el diseño de la máquina, lo cual reducirá considerablemente los cálculos para la obtención de la capacidad de transporte. Típicamente, esta información es determinada por la sección transversal de la carga, el ángulo de apilamiento sobre la banda sin caída del material, tanto en el punto de alimentación como en el trayecto de la banda transportadora.

Como se verá más a detalle en la sección “4.4.1 Geometría de la tolva”, El ángulo de reposo del material se ve afectado por la granulometría de este, humedad y la forma de las partículas. En esta misma sección se muestran los resultados de los experimentos realizados para obtener este ángulo, los cuales arrojan un ángulo máximo de  $17^\circ$ .

Debido a que el diseño de la banda, en este caso, es totalmente horizontal, el cálculo del área de sección transversal de la carga está dada por los parámetros mostrados en la Ilustración 16.

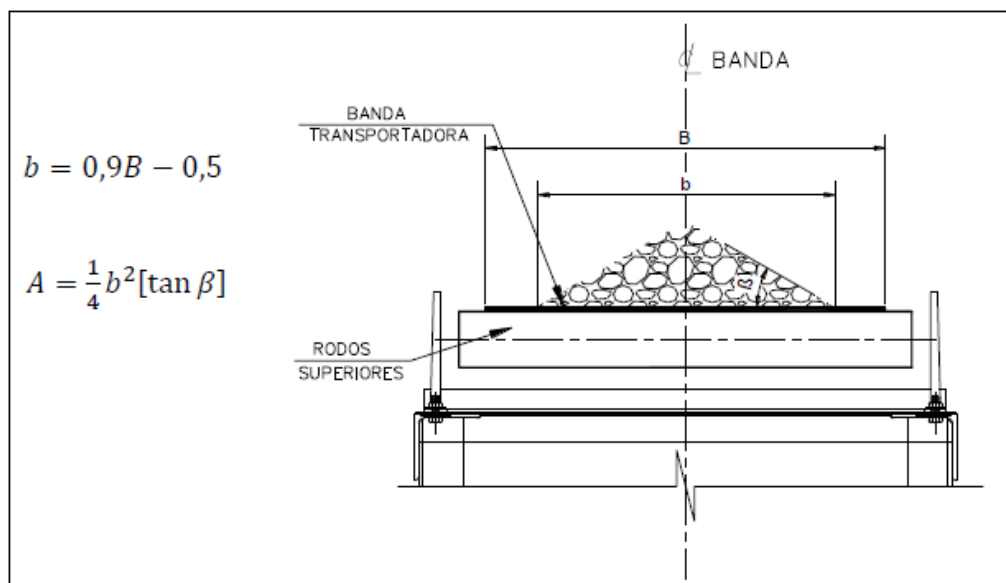


Ilustración 16 Distribución del material sobre banda transportadora [26]

Donde:

$B$  = Ancho de la banda

$b$  = Ancho ocupado por el material sobre la banda transportadora

$A$  = Área de sección transversal de la carga

$\beta$  = Ángulo de reposo del material

Debido a la naturaleza de la banda, el ancho ocupado por el material es obtenido de sección 4.3 y es de 240 mm, el cálculo del área transversal de la carga queda de la siguiente manera:

$$A = \frac{1}{4} b^2 [\tan \beta] = \frac{1}{4} (0.24 \text{ m})^2 [\tan 17^\circ] = 4.402 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

El objetivo de calcular el área de sección transversal es utilizar este dato para conocer el “caudal” generado sobre la banda, de esta forma, este concepto se puede visualizar como el área ocupada por la cantidad de material transportado en cierto instante y punto de referencia, para nuestro caso, el área está conformada por la suma de 10 áreas (es el número de frutos por cada división de la banda) individuales de frutos de café; de acuerdo con la Tabla 4, se tomará un promedio de sección transversal máxima (área transversal) igual a:

$$A_{\text{máx}} = 10 * (\text{alto} * \text{ancho}) = 10(1.5 \text{ cm} * 1.4 \text{ cm}) = 21 \text{ cm}^2$$

$$A_{\text{máx}} = 21 \text{ cm}^2 * \frac{1 \text{ m}^2}{(100 \text{ cm})^2} = 2.1 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

Conociendo el área de la sección transversal, y la velocidad de trabajo lineal de la banda (0.025 m/s) se puede conocer la capacidad volumétrica.

$$Q = 3600 * A * v = 3600 \frac{\text{s}}{\text{h}} * 2.1 \times 10^{-3} \text{ m}^2 * 0.025 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 0.189 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

Donde:

$Q$  = Capacidad volumétrica de la banda ( $\frac{\text{m}^3}{\text{h}}$ )

$A$  = Área de sección transversal de la carga ( $\text{m}^2$ )

$v$  = velocidad de la banda ( $\frac{\text{m}}{\text{h}}$ )

Este cálculo solo es válido para bandas transportadoras que no poseen ángulo de inclinación, para fines de este trabajo este cálculo es el final.

Finalmente expresaremos el resultado anterior en unidades correspondientes para los siguientes cálculos [26].

$$Q_1 = Q * \gamma$$

Donde:

$Q$  = Capacidad volumétrica de la banda ( $\frac{\text{m}^3}{\text{h}}$ )

$Q_1$  = Capacidad volumétrica de la banda ( $\frac{\text{t}}{\text{h}}$ )

$$\gamma = \text{Peso específico del material } \left(\frac{t}{m^3}\right)$$

Se calcula el peso específico con la información de la Ilustración 17. Es importante mencionar que se tomó la densidad máxima obtenida de las variedades de los frutos de café, esto con la finalidad de establecer los cálculos en los límites superiores como factor de seguridad.

Cuadro 1 Características físicas de frutos de café cosechados de la parcela del COLPOS, Córdoba, Veracruz, México (2014).						
Variedad	Estado de maduración	Densidad aparente (kg L <sup>-1</sup> )	Angulo de reposo (°)	Masa de 50 frutos (g)	Dimensiones	
					Largo (mm)	Ancho (mm)
Colombia	Inmaduro	0.69 <sup>f</sup>	18.85 <sup>cd</sup>	56.33 <sup>c</sup>	14.51 <sup>c</sup>	11.16 <sup>c</sup>
Costa Rica	Inmaduro	0.64 <sup>e</sup>	20.18 <sup>d</sup>	61.00 <sup>d</sup>	15.39 <sup>d</sup>	11.75 <sup>d</sup>
Oro Azteca	Inmaduro	0.64 <sup>e</sup>	15.09 <sup>ab</sup>	59.33 <sup>d</sup>	14.64 <sup>c</sup>	12.15 <sup>e</sup>
Colombia	Pintón-maduro	0.67 <sup>f</sup>	17.35 <sup>bc</sup>	94.66 <sup>f</sup>	16.31 <sup>e</sup>	14.25 <sup>f</sup>
Costa Rica		0.60 <sup>c</sup>	15.98 <sup>ab</sup>	90.66 <sup>e</sup>	16.14 <sup>e</sup>	14.10 <sup>f</sup>
Oro Azteca		0.62 <sup>d</sup>	16.29 <sup>ab</sup>	99.33 <sup>g</sup>	16.03 <sup>e</sup>	14.88 <sup>g</sup>
Colombia	Seco	0.49 <sup>b</sup>	17.45 <sup>bc</sup>	24.33 <sup>a</sup>	12.43 <sup>a</sup>	9.14 <sup>a</sup>
Costa Rica	Seco	0.49 <sup>b</sup>	16.30 <sup>ab</sup>	30.00 <sup>b</sup>	13.59 <sup>b</sup>	10.24 <sup>b</sup>
Oro Azteca	Seco	0.419 <sup>a</sup>	15.24 <sup>ab</sup>	22.00 <sup>a</sup>	12.32 <sup>a</sup>	10.00 <sup>b</sup>

Ilustración 17 Características del café según fuentes [27]

$$\gamma = \frac{0.67 \text{ kg}}{L} = \frac{0.67 \text{ kg}}{L} * \left(\frac{1 \text{ t}}{1000 \text{ kg}}\right) * \frac{1000 \text{ L}}{1 \text{ m}^3}$$

$$\gamma = \frac{0.67 \text{ t}}{\text{m}^3}$$

De esta forma, la capacidad volumétrica queda de la siguiente forma

$$Q_1 = Q * \gamma = 0.189 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} * \frac{0.67 \text{ t}}{\text{m}^3} = 0.12663 \frac{\text{t}}{\text{h}}$$

#### 4.3.3 Cálculo de la potencia de accionamiento de la banda

En la siguiente sección se mostrará un cálculo aproximado para la potencia que debe transmitir el tambor móvil de la banda transportadora, sin embargo, al ser un valor teórico, al final se le dará cierto margen de operación para asegurar que el sistema funcionará de manera correcta.

Es importante mencionar que existe tres grandes fuerzas parciales involucradas en el cálculo de la potencia final, se presentan a continuación:

- $F_1$ : Fuerza necesaria para mover la cinta en vacío, con desplazamiento horizontal de la cinta.
- $F$ : Fuerza necesaria para vencer la fricción estática.
- $F_3$ : Fuerza necesaria para desplazar la carga verticalmente

Durante el funcionamiento de la banda transportadora habrá pérdidas de energía mecánica, estas son a causa de fricción en el sistema de accionamiento, las cuales son generadas a partir de algunos componentes.

Para el cálculo de estas fuerzas se genera un factor  $f$ , el cual es un coeficiente de fricción de las partes móviles (adimensional), que está en función del tipo de rodillos de carga, mantenimiento del sistema y la estructura del transportador. Se tiene como valor ideal para el coeficiente de fricción 0.020, y depende de algunas condiciones:

- Alta fricción interna del material
- Rodillos de carga menores a 4" (108 mm)
- Velocidad de transporte mayor a 5 m/s
- Temperatura de operación menor a 20 °C
- Banda no tensionada
- Banda con cobertura sobredimensionada

Se han creado tablas en las cuales se establecen los valores del coeficiente de fricción de los equipos móviles, en función del tipo de transportador, condiciones de operación, mantenimiento y estanqueidad [26]. Esta tabla se muestra en la Ilustración 18.

Condición	Coficiente $f$
Buenos transportadores con rodillos de marcha suave y pequeña fricción interna en el material.	0.017
Valor estándar para bandas transportadoras con ambiente normal de trabajo.	0.02
Para condiciones de marcha desfavorables operación polvo, sobrecargas periódicas.	0.023-0.030
Transportadores descendentes que requieren frenado por medio de motor.	0.012

*Ilustración 18 Coeficiente de fricción de las partes giratorias*

Para nuestro caso y considerando las condiciones de trabajo de la máquina, elegiremos un coeficiente  $f=0.02$ . Según la Norma DIN 22101, en la cual se agrupan las resistencias secundarias, se consideran en este grupo fuerzas de los rodamientos en los tambores, fricción de los raspadores, inercia de los tambores; se establece un coeficiente  $C$ , este se propone en función de la longitud de la cinta, siendo este inversamente proporcional a la longitud de la banda (una banda corta, coeficiente grande), esto es debido a la proporción de las resistencias secundarias en el total es grande y viceversa para longitudes arriba de los 2 000 m, para este cálculo, el ángulo de inclinación es despreciable, siempre se tomará como una longitud horizontal proyectada [26]. En nuestro caso y debido a que la banda no tiene ningún ángulo de inclinación, la longitud total  $L$  es igual a  $L=0.4654$  m, este valor se calcula a partir del perímetro  $P$  total de una banda comercial, el cual es de  $P=1250$  mm, y del radio  $R$  del rodillo motriz y de retorno, el cual tiene un valor de 2 pulgadas, todo esto se puede observar en la Ilustración 19.

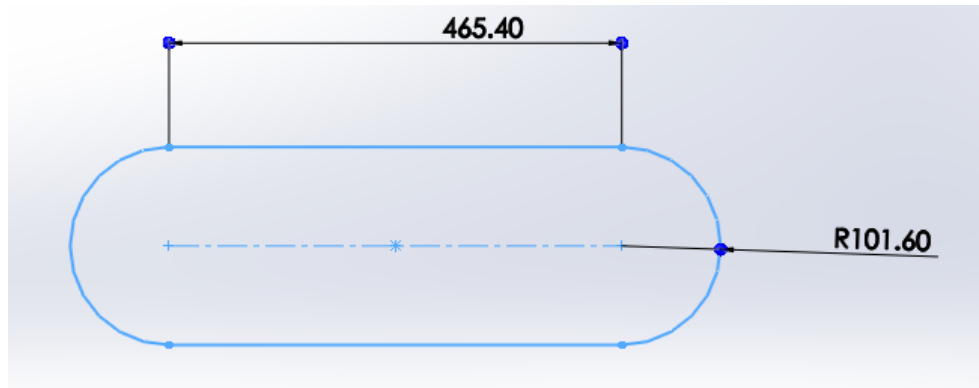


Ilustración 19 Perfil de la banda transportadora [Elaboración propia]

Por lo tanto, el valor L se calcula de la siguiente manera:

$$L = \frac{P - 2 * \pi * R}{2} = \frac{1250 \text{ mm} - 2 * \pi * 50.8 \text{ mm}}{2} = 465.4 \text{ mm} = 0.4654 \text{ m}$$

El coeficiente de fricción C y la longitud L se relacionan en la siguiente ecuación:

$$C = 15.9 * L^{-0.61} + 0.77$$

$$\therefore C = 15.9 * 0.4654^{-0.61} + 0.77 = 26.122$$

Esta ecuación se deduce a partir de la gráfica de la variación del coeficiente C, en función de la longitud L, según la Norma DN22101 [26].

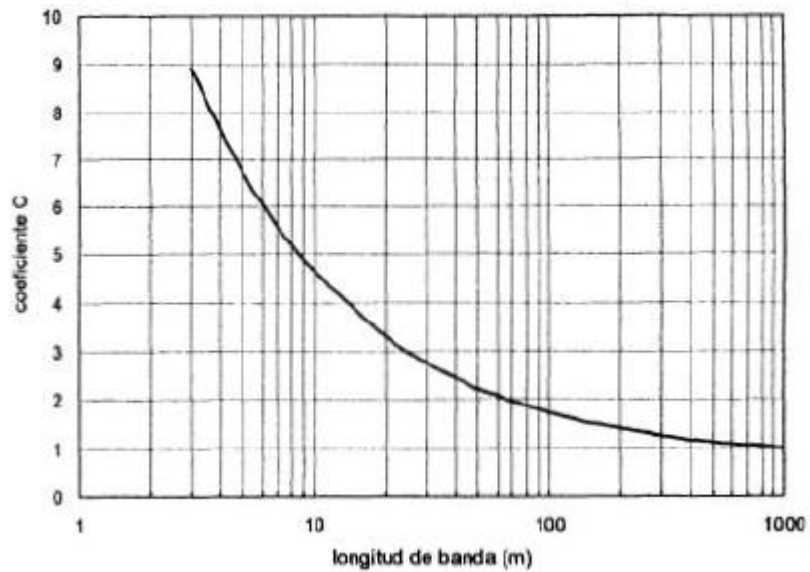


Ilustración 20 Coeficiente C de fricción por longitud de banda [26]

Con fines estructurales se estima un peso unitario de todo el equipo mecánico de la banda transportadora, en esta dimensión se incluyen los rodos de carga o superiores, rodos de retorno, banda transportadora, se ignoran los tambores y equipo de tensión. Este cálculo genera una dimensional de kilogramos por metro lineal, entre centros de tambores. El cálculo de este valor es mediante la expresión:

$$G = 2G_b + \frac{G_{ro}}{S_1} + \frac{G_{ru}}{S_2}$$

Donde:

$G$  = peso de las partes móviles (kilogramo por metro)

$G_b$  = peso de la banda transportadora (kilogramo por metro)

$G_{ro}$  = peso de los rodillos superiores (kilogramo)

$S_1$  = espaciado entre rodillos superiores (metro)

$G_{ru}$  = peso de los rodillos inferiores (kilogramo)

$S_2$  = espaciado entre rodillos inferiores (metro)

Se han elaborado tablas con valores promedios de  $G$ , por algunos de los fabricantes en función del ancho de la banda y el peso específico del material. Estos valores se pueden tomar para cálculos preliminares (los cuales serán realizados), sin embargo, al final de este apartado se utilizará el valor real obtenido al medir el peso de la banda implementada.

La Ilustración 21 muestra los valores recomendados por CEMA (*Conveyor Equipment Manufacturers Association*) entre rodillos de carga y retorno, según el ancho de la banda y el peso específico del material [26].

Ancho de banda (mm)	Espaciado rodillos superiores $S_1$ (mm)						Espaciado rodillos inferiores $S_2$ (mm)
	peso específico del material ( $\text{kg/m}^3$ )						
	500	800	1200	1600	2400	3200	
450	1.7	1.5	1.5	1.5	1.4	1.4	3.0
600	1.5	1.4	1.4	1.2	1.2	1.2	3.0
750	1.5	1.4	1.4	1.2	1.2	1.2	3.0
900	1.5	1.4	1.2	1.2	1.0	1.0	3.0
1050	1.4	1.4	1.2	1.0	0.9	0.9	3.0
1200	1.4	1.4	1.2	1.0	0.9	0.9	3.0
1350	1.4	1.2	1.0	1.0	0.9	0.9	3.0
1500	1.2	1.2	1.0	0.9	0.9	0.9	2.4
1650	1.2	1.0	1.0	0.9	0.8	0.8	2.4
1800	1.2	1.0	1.0	0.9	0.8	0.8	2.4
2100	1.0	1.0	0.9	0.8	0.8	0.6	2.4
2400	1.0	1.0	0.9	0.8	0.6	0.6	2.4

Ilustración 21 Espaciado propuesto para distancia entre rodillos [26]

Para nuestro caso, los valores en la tabla de la Ilustración 21 no son suficientes para nuestro valor de ancho de banda, es por ello por lo que, se realizará una extrapolación de los datos de dicha tabla. Sin embargo, debido a que los patrones de los datos son muy fáciles de

identificar, se puede seleccionar directamente el valor de 1.5 para  $S_1$  y 3.0 para  $S_2$ , considerando el valor inmediato superior para los valores del peso específico.

En la Ilustración 22 se muestran los valores promedios de los pesos de los rodillos de carga y de retorno, en función del ancho de banda y del peso específico del material.

Ancho de banda (mm)	Servicio liviano peso específico < 1.5 ton/m <sup>3</sup>		Servicio pesado peso específico > 1.5 ton/m <sup>3</sup>	
	$G_{ro}$ (kg)	$G_{ru}$ (kg)	$G_{ro}$ (kg)	$G_{ru}$ (kg)
<b>300</b>	2.5	2.5	3.5	3.5
<b>400</b>	3.0	3.0	4.0	4.0
<b>500</b>	3.5	3.5	5.5	5.5
<b>650</b>	5.5	5.5	10.0	10.0
<b>800</b>	11.0	11.0	14.0	14.0
<b>1000</b>	13.0	13.0	18.0	18.0
<b>1200</b>	15.0	15.0	20.0	20.0
<b>1400</b>	22.0	22.0	31.0	31.0
<b>1600</b>	25.0	25.0	35.0	35.0
<b>1800</b>	39.0	39.0	47.0	47.0
<b>2000</b>	43.0	43.0	52.0	52.0
<b>2200</b>	47.0	47.0	56.0	56.0

Ilustración 22 Valores promedio del peso de los rodillos superiores e inferiores

De acuerdo con el peso específico de los frutos de café calculado y a que 300 mm es el valor inmediato superior para el ancho de banda en la tabla de la Ilustración 22, los valores seleccionados para  $G_{ro}$  y  $G_{ru}$  son de 2.5 para ambos parámetros.

En la Ilustración 23 se muestran los valores promedios del peso de la banda de caucho, en función del ancho de banda y de la capacidad de transporte.

Ancho de banda (mm)	Servicio liviano peso específico < 0.8 ton/m <sup>3</sup>	Servicio mediano peso específico 0.8 a 1.6 ton/m <sup>3</sup>	Servicio pesado, peso específico > 1.6 ton/m <sup>3</sup>
	Peso de la banda transportadora $G_b$ (kg/m)		
<b>350</b>	1.5	3	4.5
<b>400</b>	3	4.5	6
<b>450</b>	4.5	6	7.5
<b>500</b>	6	7.5	9
<b>600</b>	7.5	9	10.5
<b>750</b>	9	10.5	12
<b>900</b>	10.5	13.5	16.5
<b>1050</b>	13.5	16.5	21
<b>1200</b>	18	22.5	27
<b>1350</b>	21	27	33
<b>1500</b>	25.5	31.5	40.5
<b>1650</b>	30	36	48
<b>1800</b>	33	42	54

Ilustración 23 Valores promedio del peso de la banda transportadora



De la misma forma, el valor inmediato superior del ancho de banda de acuerdo con la tabla de la Ilustración 23 es de 350 mm y con el peso específico del material, se selecciona el valor de  $G_b = 1.5$ .

De esta forma, se procede a calcular el valor de  $G$ .

$$G = 2G_b + \frac{G_{ro}}{S_1} + \frac{G_{ru}}{S_2}$$
$$G = 2 \left( 1.5 \frac{kg}{m} \right) + \frac{2.5 kg}{1.5 \times 10^{-3} m} + \frac{2.5 kg}{3 \times 10^{-3} m} = 2503 \frac{kg}{m}$$

Como se mencionó anteriormente, todos los datos obtenidos a partir de tablas y conceptos teóricos no son los valores reales; es por ellos que a partir de este punto se obtendrán dos valores para un mismo parámetro, estos valores se diferencian en que uno es un valor teórico y el otro real (obtenido a partir de mediciones reales). Esta doble obtención de datos también servirá como una comparativa entre el valor teórico y el real. Dentro del trabajo escrito, esta diferencia será notoria en los subíndices de cada parámetro.

Por lo anterior expuesto, la masa total de la banda real, la cual se observa en la Ilustración 24, se obtiene de la medición de esta con la ayuda de una báscula, como se puede observar en la Ilustración 25. En la cual se puede notar que la masa es de 10.61 kg.



*Ilustración 24 Banda transportadora real [Elaboración propia]*





Ilustración 25 Masa total de la banda transportadora real [Elaboración propia]

Una vez obtenido el valor de la masa total de la banda, se calcula el valor de  $G_{real}$  con ayuda de la longitud total de la banda ( $L$ ).

$$G_{real} = \frac{10.61 \text{ kg}}{L} = \frac{10.61 \text{ kg}}{0.4654 \text{ m}} = 22.797 \frac{\text{kg}}{\text{m}}$$

Y

$$G_{teórico} = G = 2503 \frac{\text{kg}}{\text{m}}$$

La siguiente fórmula indica la fuerza que se requiere para hacer trabajar la banda sin carga, esto se realiza durante la fase de pruebas y se convierte en un punto de referencia para el consumo de potencia.

$$F_1 = [C * f * L * G] * g$$

Donde:

$F_1$  = fuerza para mover la banda en vacío (Newton)

$C$  = factor de fricción por la longitud de banda

$f$  = factor de fricción de las partes móviles

$L$  = longitud total de la banda (proyección horizontal, metros)

$G$  = peso de las partes móviles (kilogramo por metro)

$g$  = aceleración de la gravedad (metro por segundo al cuadrado)

Entonces, se obtienen el valor con los parámetros teóricos y reales:

$$F_{1teórico} = [C * f * L * G_{teórico}] * g$$

$$F_{1_{teórico}} = \left[ 26.122 * 0.02 * 0.4654 \text{ m} * 2503 \frac{\text{kg}}{\text{m}} \right] * 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$F_{1_{teórico}} = 5970.2519 \text{ N}$$

Por lo tanto:

$$F_{1_{real}} = [C * f * L * G_{real}] * g$$

$$F_{1_{real}} = \left[ 26.122 * 0.02 * 0.4654 \text{ m} * 22.797 \frac{\text{kg}}{\text{m}} \right] * 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$F_{1_{real}} = 54.3762 \text{ N}$$

Debemos tener en cuenta que para vencer la inercia del material y que pueda ser desplazado horizontalmente, desde el punto de alimentación, hasta el de descarga, se necesita de una segunda fuerza. Esta fuerza puede ser calculada mediante la siguiente expresión [26]:

$$F_2 = \left[ \frac{C * f * L * Q_t}{3.6 * v} \right] * g$$

Donde:

$F_2$  = fuerza necesaria para desplazar el material horizontalmente (Newton)

$Q_t$  = capacidad máxima de transporte (tonelada por hora)

$v$  = velocidad de la banda (metros por segundo)

$g$  = aceleración gravitacional (metro por segundo al cuadrado)

Para el cálculo de este parámetro, los datos involucrados son los mismos tanto para el teórico como para el real, por lo tanto:

$$F_{2_{teórico}} = F_{2_{real}} = \left[ \frac{26.122 * 0.02 * 0.4654 \text{ m} * 0.12663 \frac{\text{t}}{\text{h}}}{3.6 * 0.025 \frac{\text{m}}{\text{s}}} \right] * 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 3.356 \text{ N}$$

Debido a que la banda es totalmente horizontal, el cálculo para  $F_3$  es innecesario, por lo tanto y para este caso en particular,  $F_1$  y  $F_2$  son las únicas fuerzas involucradas para este sistema.

La potencia que se requiere para accionar una banda transportadora tiene varios componentes, el desplazamiento del material, fricción de guías de carga (faldones). El objetivo de las ecuaciones que se describen es determinar los valores de las potencias, estas

ecuaciones han sido deducidas por los fabricantes y se han obtenido con base en pruebas y ensayos experimentales.

Los faldones son accesorios que se montan en la banda con el objetivo de encauzar el material, y evitar el derrame por los laterales de la banda, estos regularmente son fabricados con caucho de bandas provocando una resistencia a la libre circulación de la banda, esta resistencia puede determinarse mediante la siguiente ecuación, según Roulunds.

$$P_s = 0.08 * v * l$$

Donde:

$P_s$  = potencia adicional por guías de carga (kilowatt)

$v$  = velocidad de la banda (metro por segundo)

$l$  = longitud total de las guías de carga (metro)

Es recomendable el uso de faldones laterales tomados de la estructura metálica de la tolva y en contacto con la correa para aquellos casos de materiales de granulometría fina (hasta 25 mm). Estos faldones deben ser de caucho, sin inserciones de tela con espesores que oscilan entre los 5 a 10 mm. Como regla general, para transportadores horizontales se toma un largo equivalente a la distancia que recorre la correa en 1.4 a 1.6 segundos. Por lo tanto:

$$l = v * t = 0.025 \frac{m}{s} * 1.6 s = 0.04 m$$

$$\Rightarrow P_s = 0.08 * 0.025 \frac{m}{s} * 0.04 m = 8 \times 10^{-5} kW$$

La potencia teórica (y en nuestro caso, también la real), es la sumatoria de las potencias para desplazamiento del material y la de las guías de carga:

$$P = \frac{[F_1 + F_2 + F_3] * v}{1000} + P_s$$

Donde:

$P$  = potencia teórica (kilowatt)

$F_1$  = fuerza para mover la banda en vacío (Newton)

$F_2$  = fuerza para mover la carga horizontalmente (Newton)

$F_3$  = fuerza para elevar o bajar la carga (Newton)

$v$  = velocidad de la banda (metro por segundo)

$P_s$  = potencia adicional por guías de carga (kilowatt)

Esta es la potencia que se requiere en el cabezal motriz para generar la fuerza tangencial, también llamada tensión efectiva, esta tiene que ser capaz de mover la banda con material a su máxima capacidad. Entonces:

$$P_{teórico} = \frac{[F_{1teórico} + F_{2teórico} + F_{3teórico}] * v}{1000} + P_s$$

$$P_{teórico} = \frac{[5970.2519 \text{ N} + 3.356 \text{ N}] * 0.025 \frac{m}{s}}{1000} + 8 \times 10^{-5} \text{ kW}$$

$$P_{teórico} = 0.149 \text{ kW}$$

Para el cálculo del parámetro real:

$$P_{real} = \frac{[F_{1real} + F_{2real} + F_{3real}] * v}{1000} + P_s$$

$$P_{real} = \frac{[54.3762 \text{ N} + 3.356 \text{ N}] * 0.025 \frac{m}{s}}{1000} + 8 \times 10^{-5} \text{ kW}$$

$$P_{real} = 1.523 \times 10^{-3} \text{ kW} = 1.523 \text{ W}$$

El motor es el encargado de generar la potencia para la banda transportadora, para transmitir esa potencia es necesario el montaje de elementos intermedios, sin embargo, en el sistema de transmisión existen pérdidas mecánicas, que tienen que ser tomadas en cuenta para determinar la potencia real del motor. La velocidad del motor puede ser reducida mediante la combinación de poleas, ruedas dentadas, engranajes, cajas reductoras o la combinación de dos o más de estos equipos. La eficiencia del motor debe estar dentro del 85 al 95 %, nosotros tomaremos el caso más crítico (85%). Las eficiencias mecánicas debido a los equipos de transmisión aparecen en la tabla de los equipos reductores de velocidad según CEMA (Ilustración 26).

Tipo de reducción	Eficiencia (%)
Poleas y fajas en V	94
Sprockets y cadena de rodillos	93
Sprocket y cadenas de rodillos lubricados en aceite	95
reductor de engranes helicoidales (una reducción)	95
Reductor de engranajes helicoidales (doble reducción)	94
Reductor de engranajes helicoidales (triple reducción)	93
Reductor de tornillo sin fin (relación 20:1)	90
Reductor de tornillo sin fin (relación 20:1 a 60:1)	70
Reductor de tornillo sin fin (relación 60:1 a 100:1)	50

Ilustración 26 Eficiencias mecánicas de equipos reductores de velocidad [26]

Debido a que nuestra reducción será por medio de engranajes helicoidales y a la reducción necesaria se selecciona una eficiencia de 93%.

La potencia teórica del motor se determina mediante:

$$P_{mteórica} = \frac{P_{teórica}}{\varepsilon * \eta}$$

Donde:

$P_m$  = potencia del motor (kilowatt)

$P$  = potencia teórica (kilowatt)

$\eta$  = eficiencia del motor

$\varepsilon$  = eficiencia mecánica de la transmisión

Por lo tanto:

$$P_{mteórica} = \frac{0.149 \text{ kW}}{0.93 * 0.85} = 0.188 \text{ kW}$$

Para el parámetro real y tomando las mismas condiciones de eficiencia y reducción se tiene:

$$P_{mreal} = \frac{1.523 \text{ W}}{0.93 * 0.85} = 1.926 \text{ W}$$

$$P_m = 1.926 \text{ W} * \frac{1.34102 \text{ HP}}{1 \times 10^3 \text{ W}} = 2.5836 * 10^{-3} \text{ HP}$$

Tomando en cuenta el cálculo anterior se selecciona el motor mostrado en la Ilustración 27, cuyas especificaciones se muestran en la tabla de la Ilustración 28.

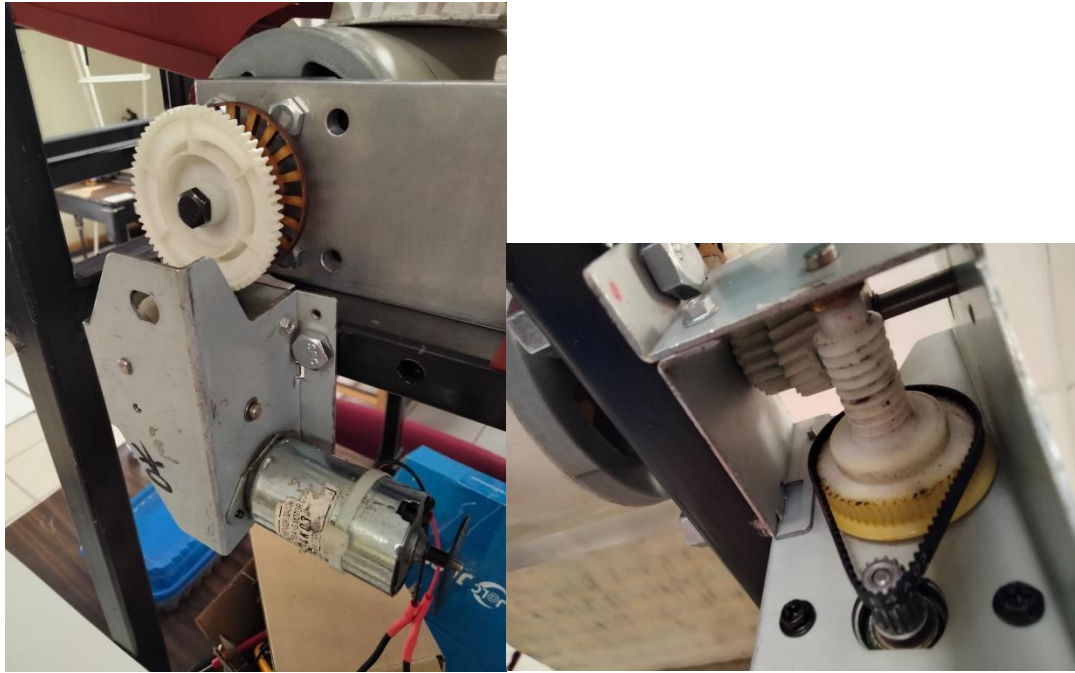


Ilustración 27 Motor de accionamiento de la banda

MODEL NAME	VOLTAGE (Volt)	NO LOAD		ON LOAD			STALL (APPROX)	
		CURRENT	SPEED (RPM)	LOAD	CURRENT	SPEED (RPM)	CURRENT	TORQUE
S3657-035075-3WHF	DC 24V	0.42A	12690	750g-cm	4.60A	10510	24.60A	4360g-cm
S3657-022200-3GH	DC 24V	0.12A	5770	200g-cm	0.53A	5060	3.46A	1625g-cm

Ilustración 28 Especificaciones del motor de accionamiento de la banda [28]

De la tabla anterior se tiene un torque del motor en g-cm que en Nm equivale a 0.15935 Nm. Con este dato y la velocidad de salida del motor con carga se puede calcular la potencia del motor de la siguiente manera.

$$\omega = \frac{2\pi * RPM}{60} = \frac{2\pi * 5060}{60} = 529.8816 \frac{rad}{s}$$

$$P = \tau\omega = 0.15935 Nm * 529.8816 \frac{rad}{s} = 84.43 W$$

Que es mucho mayor a la potencia requerida, por lo que el motor satisface las necesidades de accionamiento de banda.

#### 4.3.4 Selección de los rodillos de carga y retorno

Los rodillos de carga y retorno, como casi todos los elementos de esta sección, ha sido normalizados con el objetivo de que, al momento de elegir entre una marca y otra, no afecte de forma significativa la estructura. Si bien es cierto, cada fabricante posee diferentes valores de capacidad, resistencia y fricción, la selección realizada a continuación presenta un modelo bastante aproximado a cada una de ellas.

Los rodillos para bandas transportadoras son construidos en diámetros que van de 4 a 7", son equipos sellados con ejes, carcasa, rodamientos y sellos mecánicos. La selección del diámetro del rodillo está en función de la velocidad, peso específico del material, peso de la banda transportadora, granulometría y esperanza de vida útil.

Basándose en los catálogos de los fabricantes y apoyado en las Normas de Asociación de Fabricantes de Equipos de Transporte (CEMA, por sus siglas en inglés), sin embargo, se pueden establecer generalidades, los rodillos con diámetros de 4 y 5 pulgadas son apropiados para velocidades de bandas entre 1.5-3 m/s (300-600 pie/min). Los rodillos de 6 y 7 pulgadas son para materiales con un alto peso específico y velocidades entre 4-5 m/s (800-1000 pie/min) [26].

A continuación, se presenta una tabla con los valores recomendados en el diseño de los rodillos según CEMA.

Clase de servicio	Clase CEMA	Diámetro de rodillo (pulgadas)	Tipo de rodamiento	Ancho de banda (pulgadas)
Carga liviana	A	4-5	bolas	18-36
	B	4-5		18-48
Carga mediana	C	4-5	bolas	18-60
	D	6		36-72
Carga pesada	E	6	rodillos	36-96
		7		

Ilustración 29 Clasificación de los rodillos según CEMA

Por lo tanto, se selecciona el valor inmediato superior de acuerdo con las especificaciones de la banda, en este caso, el diámetro de los rodillos es de 4" con rodamientos de bolas.

Tanto los rodillos de carga y de retorno deben tener el mismo diámetro para conservar la velocidad angular. La longitud de los rodillos debe ser 2 pulgadas por lado mayor que la banda transportadora, ya que con esto se protege a la banda para que los bordes no rocen con la estructura y provocando el deterioro prematuro. Por lo tanto, la longitud del rodillo es:

$$L_{ro} = B + 2 * 2''$$

$$L_{ro} = 260mm + 2 * 2 * 25.4 mm = 361.6 mm$$

El cálculo anterior se redondeará a 360 mm, esto para tener una holgura por cada lado de 50 mm.

La carga que actúa sobre los rodillos superiores se puede determinar mediante la ecuación:

$$C_{ro} = [(W_{bl} + k * M_{pm}) * S_1] + C_{dr}$$

Donde:

$C_{ro}$  = carga sobre los rodillos superiores (kilogramo)

$W_{bl}$  = peso de la banda por unidad de longitud (kilogramo por metro)

$S_1$  = espaciamiento de los rodillos superiores (según tabla)

$k$  = factor de ajuste por granulometría (según tabla)

$M_{pm}$  = carga del material por metro de banda (kilogramo por metro)

$C_{dr}$  = carga por desalineamiento de los rodillos (kilogramo)

Algunas consideraciones que hay que tomar en cuenta para este cálculo son que, el factor de ajuste por granulometría es igual a 1, esto es debido a que la banda está totalmente horizontal y, debido a que el movimiento es totalmente lineal, no existe la carga por desalineamiento de los rodillos, por lo tanto:

$$C_{ro} = [(W_{bl} + M_{pm}) * S_1]$$

El valor de  $W_{bl}$  es el mismo que el valor para  $G$  calculado; en la sección anterior se obtuvo el valor teórico y el real a partir de los parámetros obtenidos y calculados, en esta sección se realiza un procedimiento similar para obtener estos valores, por lo tanto:

$$W_{bl_{teórico}} = G_{teórico} = 2503 \frac{kg}{m}$$

$$W_{bl_{real}} = G_{real} = 22.797 \frac{kg}{m}$$

Y para obtener el valor de  $M_{pm}$  se utiliza la siguiente expresión, el cual será el mismo para ambos casos:

$$M_{pm} = \left[ \frac{Q_t}{3.6 * v} \right] = \left[ \frac{Q_t}{3.6 * v} \right] = \left[ \frac{0.12663 \frac{t}{h}}{3.6 * 0.025 \frac{m}{s}} \right] = 1.407 \frac{kg}{m}$$

Por lo tanto:

$$C_{ro_{teórico}} = [(W_{bl_{teórico}} + M_{pm}) * S_{1_{teórico}}]$$

$$C_{ro_{teórico}} = \left[ \left( 2503 \frac{kg}{m} + 1.407 \frac{kg}{m} \right) * 1.5 \times 10^{-3} m \right] = 3.756 kg$$

Y:

$$C_{ro_{real}} = [(W_{bl_{real}} + M_{pm}) * S_{1_{real}}]$$

$$C_{ro_{real}} = \left[ \left( 22.797 \frac{kg}{m} + 1.407 \frac{kg}{m} \right) * 0.4654 m \right] = 11.2645 kg$$

Análogamente se calcula la carga para los rodillos de retorno de la siguiente manera:

$$C_{ru_{teórico}} = W_{bl_{teórico}} * S_{2_{teórico}} + C_{dr}$$

$$C_{ru_{teórico}} = 2503 \frac{kg}{m} * 3 \times 10^{-3} m = 7.509 kg$$

Y:

$$C_{ru_{real}} = W_{bl_{real}} * S_{2_{real}} + C_{dr}$$

$$C_{ru_{real}} = 22.797 \frac{kg}{m} * 0.4654 m = 10.609 kg$$



Debido a que tanto el rodillo de retorno como el de carga tienen el mismo diámetro, se realiza el análisis de esfuerzos en el rodillo con mayor carga, tomando en cuenta también la parte teórica y real, por lo tanto:

$$F_{RC} = C_{ro_{real}} * g = 11.2645 \text{ kg} * 9.81 \frac{m}{s^2} = 110.504 \text{ N}$$

Para realizar este análisis se utiliza el software SolidWorks, de tal forma que el diseño del rodillo queda de la forma mostrada en la Ilustración 30.

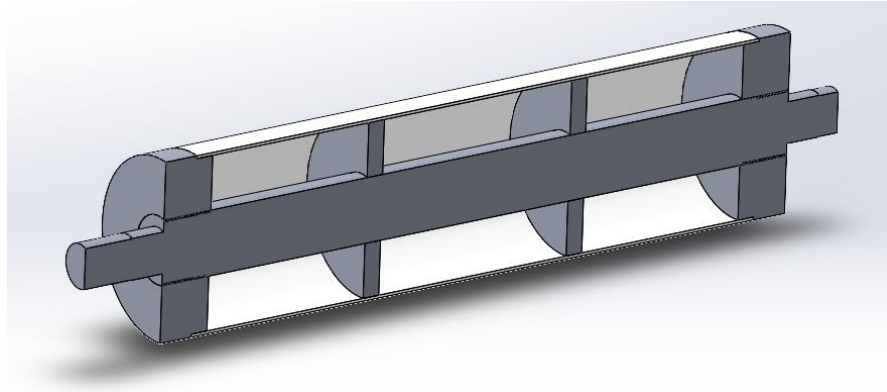


Ilustración 30 Modelo del rodillo de carga en SolidWorks

Se propone el uso de aluminio para el eje principal del rodillo y para los soportes, mientras que, por facilidad de obtención y trabajo, para el cuerpo del rodillo se propone el uso de tubo PVC de 4 pulgadas. Tomando esto en cuenta, se realiza el análisis de esfuerzos. Los resultados obtenidos se muestran en la Ilustración 31.

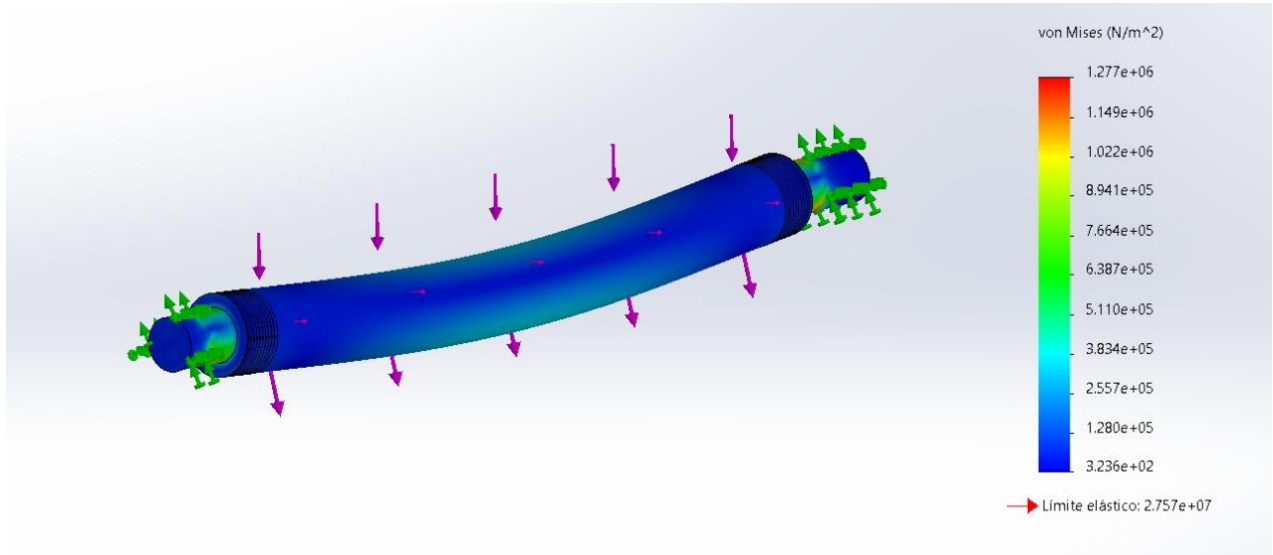


Ilustración 31 Análisis de esfuerzos del eje del rodillo de carga

Con esto se puede concluir que el diseño y selección del material para los rodillos de carga y retorno son correctos y satisfacen las necesidades de la banda.

#### 4.3.5 Selección de rodamientos para rodillos de la banda

Para dar movimiento a los rodillos son indispensables los rodamientos, ya que son elementos que disminuyen en gran medida la fricción de los materiales entre ellos facilitando así la ruptura de la inercia estática de los cuerpos.

Para el caso de los rodillos de carga y retorno se requieren rodamientos a sus extremos que soporten al menos la fuerza emitida por la banda.

Los rodamientos se seleccionan del catálogo de rodamientos SKF [29], y por su facilidad de obtención se utilizan rodamientos de una hilera de bolas, como el que se muestra en la Ilustración 32.

Como el diámetro del eje del rodillo resultó de aproximadamente una pulgada se toma un rodamiento cuyo diámetro interno sea lo más próximo, que en este caso el diámetro comercial más aproximado es el de 25 mm.

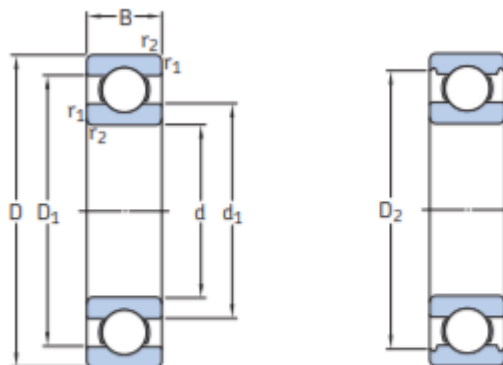


Ilustración 32 Dimensiones de rodamiento de una hilera de bolas SKF

En la tabla mostrada de bajo se pueden ver los rodamientos de esta dimensión, de la cual, se selecciona el rodamiento W6005 que es un rodamiento con la capacidad de carga necesaria para soportar el esfuerzo de la banda.

Tabla 5 Rodamientos rígidos de una hilera de bolas de 25 a 35mm [29]

Dimensiones principales			Capacidad de carga básica		Carga límite de fatiga	Velocidades nominales		Masa	Designación
d	D	B	dinámica C	estática C <sub>0</sub>	P <sub>u</sub>	Velocidad de referencia	Velocidad límite		
mm			kN		kN	r. p. m.		g	-
20	32	7	3,12	2,08	0,09	-	13 000	17	▶ W 61804-2RS1
	32	7	3,12	2,08	0,09	48 000	24 000	17	▶ W 61804-2Z
	37	9	5,53	3,65	0,156	-	12 000	35,5	▶ W 61904-2RS1
	37	9	5,53	3,65	0,156	43 000	26 000	32,5	W 61904
	42	12	8,06	5	0,212	-	11 000	64,5	▶ W 6004-2RS1
	42	12	8,06	5	0,212	38 000	19 000	64,5	▶ W 6004-2Z
	42	12	8,06	5	0,212	38 000	24 000	60,5	W 6004
	47	14	10,8	6,55	0,28	-	10 000	105	▶ W 6204-2RS1
	47	14	10,8	6,55	0,28	34 000	17 000	106	▶ W 6204-2Z
	47	14	10,8	6,55	0,28	34 000	22 000	100	W 6204
	52	15	13,8	7,8	0,335	-	9 500	143	▶ W 6304-2RS1
	52	15	13,8	7,8	0,335	34 000	17 000	144	▶ W 6304-2Z
	52	15	13,8	7,8	0,335	34 000	20 000	136	W 6304
	25	37	7	3,38	2,5	0,108	-	11 000	21
37		7	3,38	2,5	0,108	38 000	19 000	21	▶ W 61805-2Z
42		9	6,05	4,5	0,193	-	10 000	39,5	▶ W 61905-2RS1
47		12	8,71	5,85	0,25	-	9 500	76,5	▶ W 6005-2RS1
47		12	8,71	5,85	0,25	32 000	16 000	77,5	▶ W 6005-2Z
47		12	8,71	5,85	0,25	32 000	20 000	71,5	W 6005
52		15	11,7	7,65	0,335	-	8 500	128	▶ W 6205-2RS1
52		15	11,7	7,65	0,335	30 000	15 000	130	▶ W 6205-2Z
52		15	11,7	7,65	0,335	30 000	19 000	122	▶ W 6205
62		17	17,8	11,2	0,48	-	7 500	234	▶ W 6305-2RS1
62		17	17,8	11,2	0,48	26 000	13 000	235	▶ W 6305-2Z
62		17	17,8	11,2	0,48	26 000	17 000	224	W 6305

Para el caso del rodillo de soporte, debido a que la carga no es muy grande se propone el uso de un eje de media pulgada.

En este caso, de la Tabla 6 del catálogo SKF, se selecciona el rodamiento 16002, pues al no haber un rodamiento de media pulgada exacta seleccionamos el inmediato superior, que con ayuda de un buje se puede hacer que se adapte al eje seleccionado.

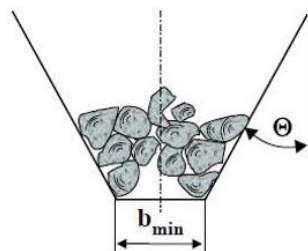
Tabla 6 Rodamientos rígidos de una hilera de bolas de 15 mm [29]

15	24	5	1,9	1,1	0,048	-	17 000	0,0074	▶ 61802-2RS1	-
	24	5	1,9	1,1	0,048	60 000	30 000	0,0074	▶ 61802-2Z	-
	24	5	1,9	1,1	0,048	60 000	38 000	0,0065	▶ 61802	-
	28	7	4,36	2,24	0,095	-	16 000	0,016	▶ 61902-2RS1	-
	28	7	4,36	2,24	0,095	56 000	28 000	0,016	▶ 61902-2RZ	-
	28	7	4,36	2,24	0,095	56 000	28 000	0,016	▶ 61902-2Z	-
	28	7	4,36	2,24	0,095	56 000	34 000	0,016	▶ 61902	-
	32	8	5,85	2,85	0,12	50 000	32 000	0,027	▶ 16002	-
	32	8	5,85	2,85	0,12	50 000	26 000	0,025	▶ 16002-2Z	16002-Z
	32	9	5,85	2,85	0,12	50 000	32 000	0,03	▶ 6002	-
	32	9	5,85	2,85	0,12	-	14 000	0,03	▶ 6002-2RSH	6002-RSH
	32	9	5,85	2,85	0,12	50 000	26 000	0,03	▶ 6002-2RSL	6002-RSL

## 4.4 Cálculo de la tolva

### 4.4.1 Geometría de la tolva

Para calcular y dimensionar la tolva partiremos del cálculo del diámetro mínimo de la boca de salida. En la Ilustración 33 se muestran las ecuaciones para determinar dicha dimensión.



$$b_{\min \circ} = 5 d_o \sqrt{k} \quad (1a)$$

$$b_{\min \square} = 5 d_o \sqrt{1,08 k} \quad (1b)$$

$$b_{\min \square} = 5 d_o \sqrt{3} \quad \text{slot width} \quad (1c)$$

$$d_o \approx d_{95} \quad \text{upper particle size}$$

$$k = 0.6 \dots 1.4 \text{ shape dependent parameter}$$

Ilustración 33 Formulas para calcular diámetro mínimo de la boca de salida de la tolva [15]

Entonces, como se ha propuesto trabajar con una tolva rectangular se tiene que

$$b_{\min} = 5d_o\sqrt{3}$$

Donde:

$b_{\min}$ =Diámetro mínimo de la boca de salida

$d_o$ =Tamaño máximo de las partículas del material

Así, tomando las dimensiones de la Tabla 4 el diámetro de salida mínimos debe ser de

$$b_{\min} = 5(15\text{mm})\sqrt{3} = 129.9\text{mm} \approx 13\text{cm}$$

Como se trata de una tolva rectangular, el largo de la boca de salida será del tamaño del ancho de la banda que es este caso es de 26 cm.

Para calcular el ángulo de las paredes de la tolva se debe determinar primero el ángulo de reposo del material, para ello se encuentra en la tabla de la Ilustración 17 que tras un estudio vertiendo cierta cantidad de frutos sobre una superficie totalmente horizontal

(Ilustración 34) se midió un ángulo de reposo de  $17^\circ$  como máximo, al cual se le deben sumar 15 grados para asegurar el desplazamiento del material dentro de la tolva. [30]



Ilustración 34 Experimento para determinar ángulo de reposo [27]

Entonces, el ángulo de inclinación de las paredes está dado por:

$$\alpha = 17^\circ + 15^\circ = 32^\circ$$

Inclinación a la cual le daremos  $3^\circ$  más para asegurar el movimiento de los frutos de café, quedando:

$$\alpha = 35^\circ$$

Se debe ahora de calcular el volumen requerido de la tolva, pero, dado que ese volumen está dado por la velocidad de llenado de esta, y se puede regular, el volumen requerido de la tolva se puede proponer.

En el cálculo de la velocidad de separación requerida se tiene que se deben separar 33333.333 frutos cada hora, pero, como no se debe almacenar en la tolva esa cantidad de frutos debido a que la alimentación es contante, se puede proponer una tercera parte del volumen que ocupan esa cantidad de frutos, de modo que se tiene lo siguiente.

De la Tabla 4 se puede determinar el volumen máximo aproximado de los frutos de café.

$$V_C = 15 * 14 * 15 = 3150 \text{ mm}^3$$

Entonces, para un tercio de los frutos de café que se separarán por hora, se tiene:

$$V_{requerido} = \frac{33333.333}{3} * 3150 \text{ mm}^3 = 34999999.65 \text{ mm}^3$$

Finalmente, la siguiente ilustración muestra las dimensiones calculadas y la geometría propuesta para la tolva.

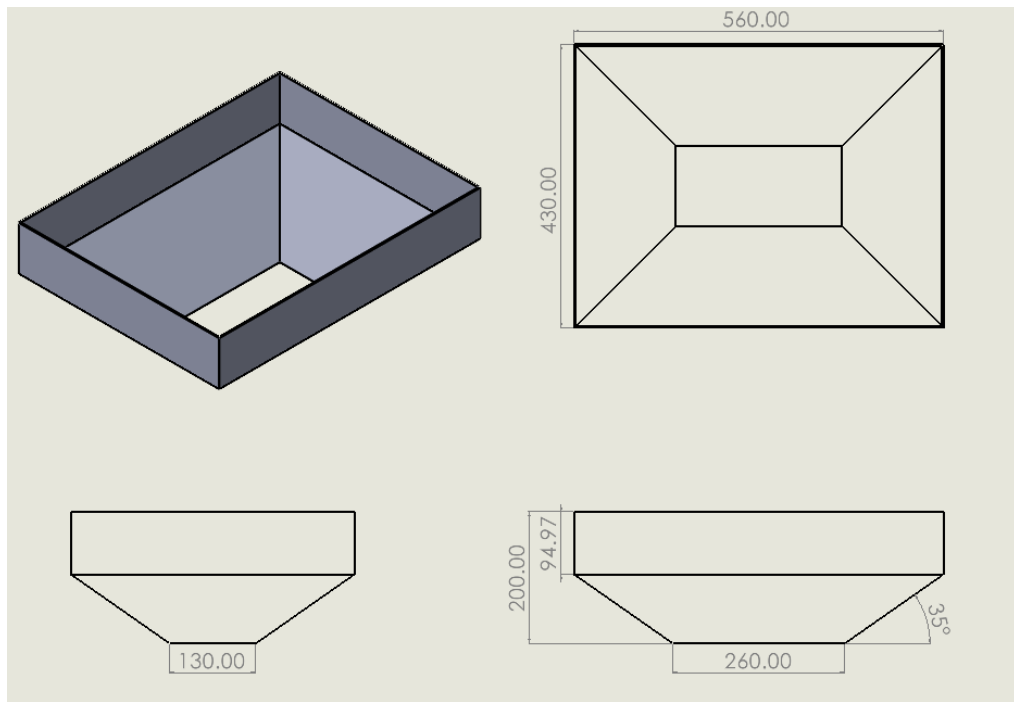


Ilustración 35 Dimensionamiento de la tolva de alimentación [Elaboración propia]

Entonces, de la figura anterior, si calculamos su volumen con SolidWorks tenemos que es de 35713811.01 mm<sup>3</sup> que supera al valor calculado para un tercio de la capacidad de separación por hora.

#### 4.4.2 Espesor de las paredes de la tolva

Para determinar el espesor requerido de las paredes de la tolva para que estas no sufran pandeo se debe calcular la fuerza ejercida de los frutos cuando la tolva esté llena, entonces, si se analiza a los frutos de café como un fluido, primero se debe determinar su densidad, para ello, de la Ilustración 17, se ve que la densidad aparente de los frutos maduros es de aproximadamente.

$$\rho = 0.67 \frac{kg}{L} = 670 \frac{kg}{m^3}$$

Las paredes inclinadas de la tolva son las que reciben el mayor esfuerzo, por ello debemos analizar la fuerza ejercida por los frutos de café en esta sección.

Como se ve en la Ilustración 36 la fuerza ejercida sobre la pared inclinada se descompone en dos fuerzas para facilitar su análisis, de modo que se tiene:

$$P = \frac{F}{A_t} \rightarrow F = P A_t$$

Y, además

$$P = \rho g h$$

Entonces, como no toda la tolva tiene la superficie inclinada se debe dividir la altura en las dos secciones. También hay que tomar en cuenta que las paredes tienen forma trapezoidal, por lo tanto, el área de ellas está dada por:

$$A_t = \frac{B + b}{2} * a$$

Debido a que las 4 placas trapezoidales tienen diferentes dimensiones, se realiza el análisis en la que recibirá el mayor esfuerzo y por ende es más propenso a pandearse. Esta placa es la de mayor área, para ello calcularemos el parámetro  $a$  visto en la Ilustración 36 y que corresponde a la altura de la placa trapezoidal.

$$a = \frac{200 \text{ mm} - 94.97 \text{ mm}}{\sin 35^\circ} = 183.11 \text{ mm}$$

Por lo tanto, utilizando estos datos y el área queda de la siguiente forma:

$$A_t = \frac{B + b}{2} * a = \frac{0.56 \text{ m} + 0.26 \text{ m}}{2} * 0.18311 \text{ m} = 0.07507 \text{ m}^2$$

Adicionalmente se calcula el centroide de la plaza trapezoidal, este parámetro sirve para localizar el punto teórico en donde actúa la fuerza total, el cual sirve para el análisis posterior en SolidWorks para la selección del calibre de la placa. Debido a que la placa tiene forma de un trapecio regular y de acuerdo a la Ilustración 36 el parámetro del centroide a lo largo del eje x queda justo a la mitad de B, de esta forma:

$$x_c = \frac{B}{2} = \frac{0.56}{2} = 0.28 \text{ m}$$

El parámetro  $y_c$  para un trapecio está dado por la siguiente expresión:

$$y_c = \left[ \frac{b + 2B}{B + b} \right] * \frac{a}{3} = \left[ \frac{0.26 \text{ m} + 2(0.56 \text{ m})}{0.56 \text{ m} + 0.26 \text{ m}} \right] * \frac{0.18311 \text{ m}}{3} = 0.1027 \text{ m}$$

Para la componente horizontal de la fuerza se tiene:

$$F_H = PA_t$$

La presión ejercida, de acuerdo con las ecuaciones de mecánica de fluidos es:

$$P = \rho gh$$

Donde  $h$  es la distancia vertical desde la superficie, en nuestro caso es la parte superior de la tolva, hasta la profundidad del centroide de la placa que se analiza, para nuestro caso, esta profundidad está dada por la longitud de la pared vertical de la tolva más la proyección vertical del centroide, entonces:

$$h = h_o + y_c \sin \alpha$$

Entonces la ecuación queda como:

$$F_H = \rho g (h_o + y_c \sin \alpha) A_t$$

$$F_H = \left( 670 \frac{kg}{m^3} \right) \left( 9.81 \frac{m}{s^2} \right) (0.09497 m + (0.1027 m) * \sin(35^\circ)) * (0.07507 m^2)$$

$$F_H = 75.925 N$$

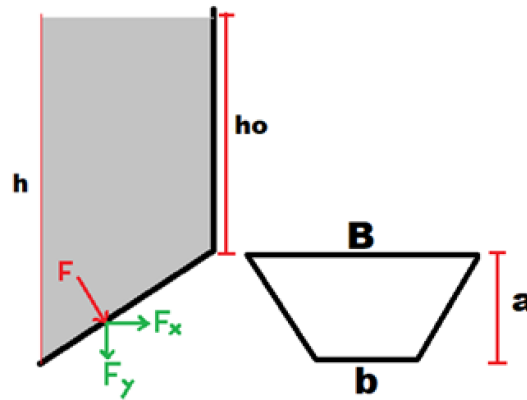


Ilustración 36 Esquema de fuerzas sobre las paredes de la tolva [Elaboración propia]

Para la componente vertical se tiene que calcular el peso del volumen de la columna que soporta la pared inclinada, debido a que este cálculo no es trivial, se obtendrá con la ayuda del software SolidWorks, el modelo en dicho software se muestra en la Ilustración 37:

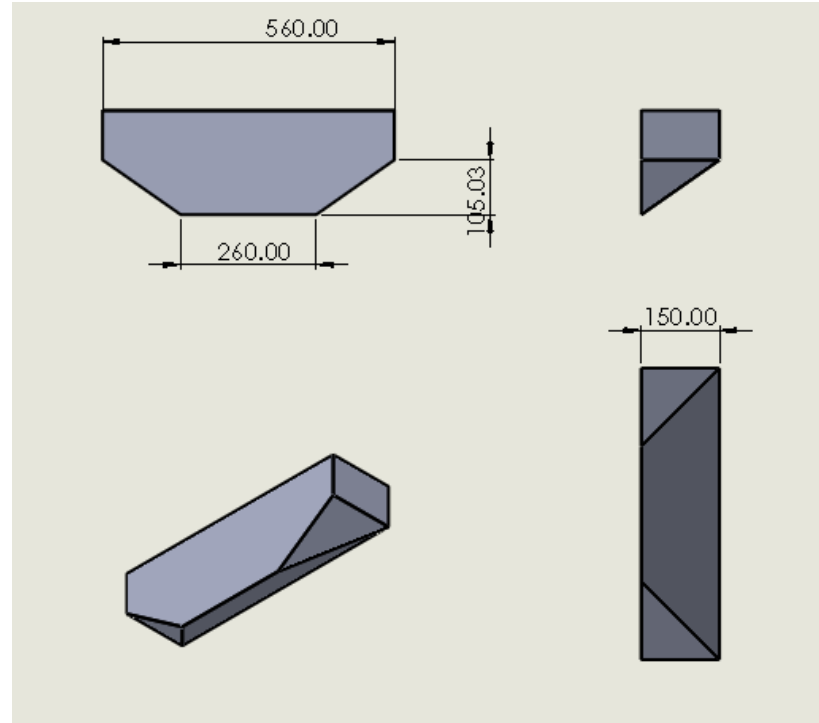


Ilustración 37 Modelo de la columna que soporta la placa trapezoidal en SolidWorks

De esta forma se obtiene un volumen de  $11601015.00 \text{ mm}^3$

$$V = 11601015.00 \text{ mm}^3 * \left(\frac{1 \text{ m}}{1000 \text{ mm}}\right)^3 = 0.0116 \text{ m}^3$$

Entonces el peso queda:

$$W = \rho V = \left(670 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right) * (0.0116 \text{ m}^3) = 7.772 \text{ kg}$$

Y, por lo tanto:

$$F_V = W * g$$

$$F_V = 7.772 \text{ kg} * 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 76.24332 \text{ N}$$

Entonces, la fuerza resultante de las componentes vertical y horizontal queda como:

$$F_R = \sqrt{(F_H)^2 + (F_V)^2}$$

$$F_R = \sqrt{(75.925 \text{ N})^2 + (76.24332 \text{ N})^2} = 107.6 \text{ N}$$

El siguiente análisis se realizará con ayuda de SolidWorks y consiste en calcular la deformación de la placa trapezoidal con la carga anteriormente calculada  $F_R$ . Debido a que esta carga es producto de un cálculo con una consideración inicial del material como un fluido, la carga soportada por la placa aumenta proporcionalmente a la profundidad dentro de la tolva, en otras palabras, la carga puntual calculada se puede modelar como una carga linealmente distribuida a lo largo de la superficie de la placa trapezoidal, recordando que esta superficie tiene una longitud total de  $a = 0.18311 \text{ m}$ . Debido a que el sistema coordenado en SolidWorks toma como punto (0,0,0) uno de los vértices de la base menor del trapecio y la parte negativa del eje x hacia la base mayor, el diagrama de distribución de carga queda como se ve en la Ilustración 38. Este diagrama muestra como la carga va aumentando a medida que se recorre la distancia a (altura del trapecio), esto quiere decir que mientras más profundo estés en la tolva, mayor será el esfuerzo soportado.

Es importante mencionar que, el inicio de la placa trapezoidal no se encuentra en la superficie de la tolva, si no que ya está a cierta profundidad, es por ello que la distribución de carga comienza con otra carga distribuida (rectángulo), la cual tendrá su valor máximo  $F_2$  a la profundidad de  $h_o = .09497 \text{ m}$ . Recordemos que tanto  $F_1$  como  $F_2$  son distribuciones de carga lineal, se encuentran expresados en unidades de N/m.



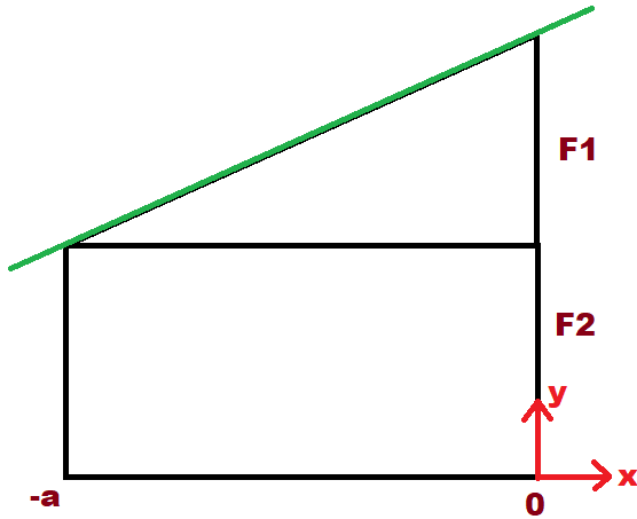


Ilustración 38 Diagrama de distribución de carga sobre la placa trapezoidal

Tomando en cuenta lo anterior, el cálculo para F2 queda de la siguiente manera:

$$F2 = \rho g h_o B$$

Teniendo en cuenta que este máximo de distribución de carga se encuentra a la profundidad  $h_o$  y actúa a lo largo de la base mayor de la placa trapezoidal  $B$ , entonces:

$$F2 = \left(670 \frac{kg}{m^3}\right) * \frac{9.81m}{s^2} * 0.09497 m * 0.560 m = 349.557 \frac{N}{m}$$

En la Ilustración 38 también se puede apreciar que la carga total que está actuando sobre la placa trapezoidal  $F_R$  es el área total de la distribución ahí mostrad, por lo tanto:

$$F2 * a + F1 * \frac{a}{2} = F_R$$

$$F1 = 2 * \frac{F_R}{a} - 2 * F2 = 476.135 \frac{N}{m}$$

Para poder realizar el análisis en SolidWorks, requerimos la ecuación de la distribución de carga de nuestro sistema, en nuestro caso, está ecuación describe la línea en color verde mostrada en la Ilustración 38. Haciendo un análisis geométrico podemos obtener la ecuación de la recta calculando la pendiente como:

$$m = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} = \frac{(F1 + F2) - F2}{0 - (-a)}$$

$$m = \frac{F1}{a} = \frac{476.135}{0.18311} = 2600.267$$

Y la constante  $b$  como:

$$y = mx + b$$

Cuando  $x=0$

$$F1 + F2 = m(0) + b$$

$$\therefore b = F1 + F2 = 825.692$$

Por lo tanto

$$y = 2600.267x + 825.692$$

Debido a que el material más utilizado en tolvas es el acero A36, se selecciona este material y, por ende, se realiza el análisis en SolidWorks con estos parámetros y tomando un calibre de 1/16". Los resultados de aplicar la carga distribuida de acuerdo con la ecuación de la recta calculada y los parámetros seleccionados se muestran en la Ilustración 39. En dicha ilustración se ve el análisis de esfuerzos por Von Mises, donde podemos notar que el esfuerzo máximo que sufre la placa es de  $4.281 \times 10^7 \frac{N}{m^2}$  el cual claramente es menor al límite elástico del material seleccionado que como se ve es de  $2.5 \times 10^8 \frac{N}{m^2}$ , validando así la correcta selección del material y espesor de la placa.

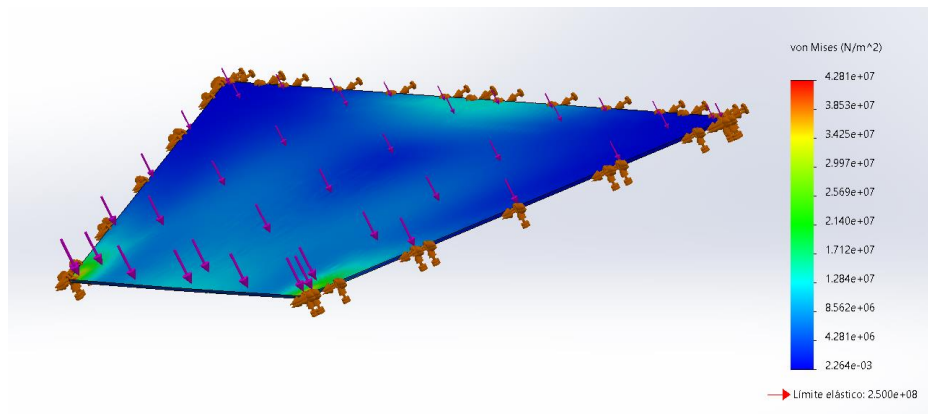
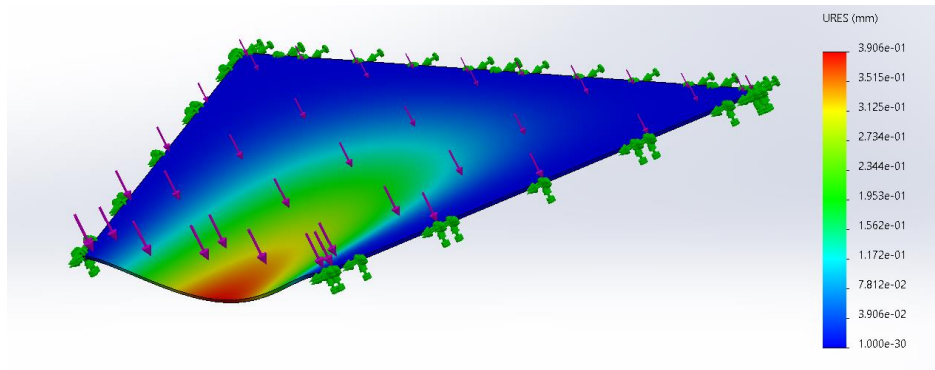


Ilustración 39 Análisis de esfuerzos del claro más grande de la tolva

Adicionalmente se muestra en la Ilustración 40, la deformación máxima que sufre la placa con la carga y distribución calculada, la cual es de 0.3906 mm.



*Ilustración 40 Análisis de deformación del claro más grande de la tolva*

## 4.5 Identificación de color

El proceso de análisis de color involucra un algoritmo programado, el cual basa su funcionamiento en el diagrama de flujo mostrado en la Ilustración 41.

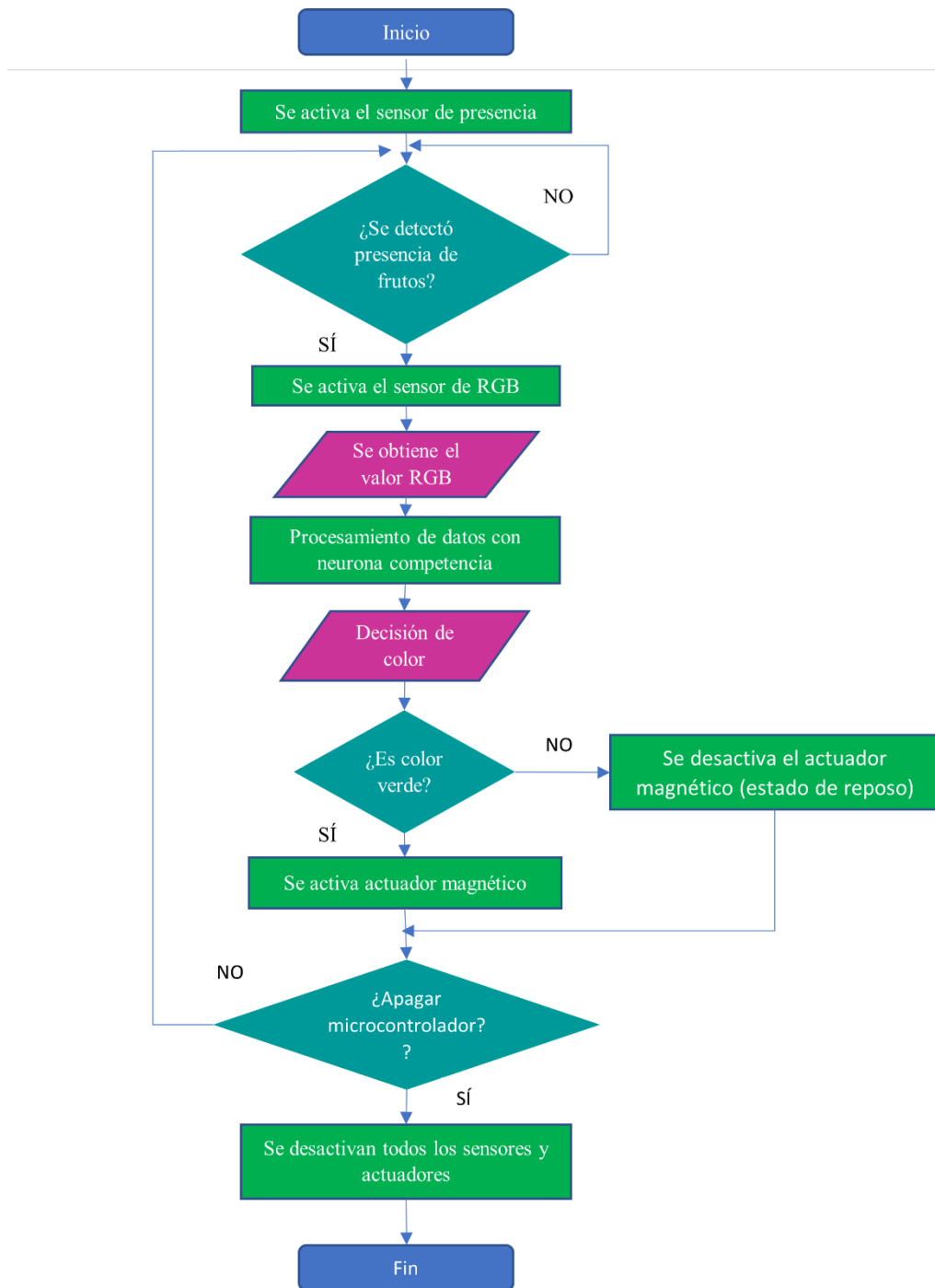


Ilustración 41 Diagrama de flujo del proceso de identificación de color

Dicho algoritmo programado, tiene que ser ejecutado por un microcontrolador. Para la elección de este dispositivo, se utilizará la metodología del Proceso de Análisis Jerárquico.

El Proceso de Análisis Jerárquico, desarrollado por Thomas L. Saaty está diseñado para resolver problemas complejos de criterios múltiples [31]. Es por ello que, esta metodología es especialmente útil para la elección del microcontrolador. En la Tabla 7 se muestran las opciones consideradas, así como las características de cada una de ellas con base en los criterios de selección.

Tabla 7 Opciones y criterios de selección para el microcontrolador

Opciones	Voltaje de alimentación	Entradas y salidas	Características de procesamiento	Disponibilidad en el mercado	Precio
1.- ATMega 328p [32]	1.8 VDC a 5.5 VDC	Hasta 23 pines I/O disponibles, ADC de 10 bits y 6 canales, 6 canales PWM, TWI Two-wire Serial Interface (2-Wire) (I2C compatible)	Memoria de programa flash de 32 kB, SRAM de 2 kB, EEPROM de datos de 1 kB, velocidad max. de la CPU 20 MIPS, oscilador externo hasta 20 MHz	Muy alta	\$105.00 MXN
2.- Raspberry Pi pico [33]	5 VDC	2 SPI, 2 I2C, 2 UART, 3 ADC de 12-bit, 16 canales PWM y 8 puertos programables I/O (PIO)	264 KB de SRAM, 2MB de memoria Flash en placa	Muy alta	\$160.00 MXN
3.- PIC16F887 [34]	2VDC a 5.5VDC	Hasta 35 pines I/O disponibles, ADC de 10 bits y 14 canales, 2 módulos de captura/comparación/PWM, 2 timers de 8 bits y 1 de 16 bits, MSPP que soporta SPI y PC	Memoria de programa flash de 8192 words (8k @ 14bits), RAM de 368 Bytes, EEPROM de datos de 256 Bytes, velocidad de la CPU 5 MIPS, oscilador externo hasta 20 MHz, oscilador interno de precisión con frecuencia seleccionable entre 31 kHz y 8 MHz	Alta	\$125.00 MXN

Los criterios de selección serán ponderados de acuerdo con la información de la Ilustración 42.

Planteamiento verbal de la preferencia	Calificación Numérica
Extremadamente preferible	9
Entre muy fuertemente y extremadamente preferible	8
Muy fuertemente preferible	7
Entre fuertemente y muy fuertemente preferible	6
Fuertemente preferible	5
Entre moderadamente y fuertemente preferible	4
Moderadamente preferible	3
Entre igualmente y moderadamente preferible	2
Igualmente preferible	1

Ilustración 42 Escala de preferencias [31]

A continuación, y con base en lo anterior, se presentan las tablas de evaluación para cada uno de los criterios.

Tabla 8 Tabla de evaluación del criterio 1 para elección de microcontrolador

Criterio 1: Voltaje de alimentación							
	Opción 1	Opción 2	Opción 3	Matriz normalizada			Promedio
Opción 1	1	1	1	1.00	1.00	1.00	1.00
Opción 2	1	1	1	1.00	1.00	1.00	1.00
Opción 3	1	1	1	1.00	1.00	1.00	1.00
Total	1	1	1				

Tabla 9 Tabla de evaluación del criterio 2 para elección de microcontrolador

Criterio 2: Entradas y salidas							
	Opción 1	Opción 2	Opción 3	Matriz normalizada			Promedio
Opción 1	1	5	1	1.36	2.37	0.60	1.44
Opción 2	0.2	1	3	0.27	0.47	1.80	0.85
Opción 3	1	0.33333333	1	1.36	0.16	0.60	0.71
Total	0.73333333	2.11111111	1.66666667				

Tabla 10 Tabla de evaluación del criterio 3 para elección de microcontrolador

Criterio 3: Características de procesamiento							
	Opción 1	Opción 2	Opción 3	Matriz normalizada			Promedio
Opción 1	1	0.33	7	0.72	0.68	1.40	0.93
Opción 2	3	1	7	2.17	2.03	1.40	1.87
Opción 3	0.14285714	0.14285714	1	0.10	0.29	0.20	0.20
Total	1.38095238	0.49206349	5				

Tabla 11 Tabla de evaluación del criterio 4 para elección de microcontrolador

Criterio 4: Disponibilidad en el mercado							
	Opción 1	Opción 2	Opción 3	Matriz normalizada			Promedio
Opción 1	1	1	3	1.29	1.29	1.29	1.29
Opción 2	1	1	3	1.29	1.29	1.29	1.29
Opción 3	0.33333333	0.33333333	1	0.43	0.43	0.43	0.43
Total	0.77777778	0.77777778	2.33333333				

Tabla 12 Tabla de evaluación del criterio 5 para elección de microcontrolador

Criterio 5: Precio							
	Opción 1	Opción 2	Opción 3	Matriz normalizada			Promedio
Opción 1	1	5	3	1.96	1.67	2.08	1.90
Opción 2	0.2	1	0.33333333	0.39	0.33	0.23	0.32
Opción 3	0.33333333	3	1	0.65	1.00	0.69	0.78
Total	0.51111111	3	1.44444444				

De la misma forma, se ponderan los criterios de acuerdo con la importancia para el proyecto, estas ponderaciones se ven de forma contable en la Tabla 13.

Tabla 13 Tabla de ponderación de criterios para elección de microcontrolador

Importancia de los criterios de selección											
	Criterio 1	Criterio 2	Criterio 3	Criterio 4	Criterio 5	Matriz normalizada					Promedio
Criterio 1	1.00	0.33	0.33	0.33	0.20	0.41	0.16	0.16	0.33	0.52	0.32
Criterio 2	3.00	1.00	1.00	0.33	0.20	1.22	0.48	0.48	0.33	0.52	0.61
Criterio 3	0.33	1.00	1.00	0.33	0.20	0.14	0.48	0.48	0.33	0.52	0.39
Criterio 4	3.00	3.00	3.00	1.00	0.33	1.22	1.45	1.45	1.00	0.86	1.20
Criterio 5	5.00	5.00	5.00	3.00	1.00	2.03	2.42	2.42	3.00	2.59	2.49
Total	2.47	2.07	2.07	1.00	0.39						

Finalmente, y de acuerdo con los datos obtenidos anteriormente, se calcula, de acuerdo con el procedimiento de Saaty, la mejor opción de microcontrolador. Esta selección se muestra en la Tabla 14

Tabla 14 Matriz final de selección del microcontrolador

	Criterio 1	Criterio 2	Criterio 3	Criterio 4	Criterio 5	Total
Opción 1	1.00	1.44	0.93	1.29	1.90	7.82688
Opción 2	1.00	0.85	1.87	1.29	0.32	3.89197
Opción 3	1.00	0.71	0.20	0.43	0.78	3.28115
Importancia Criterios	0.315712	0.606907	0.39069	1.1963	2.490389	

Lo anterior muestra que el microcontrolador seleccionado es el ATmega328p.

Siguiendo el mismo procedimiento, se hace la selección del sensor de identificación del color de acuerdo con las opciones mostradas en la Tabla 15.

Tabla 15 Opciones y criterios de selección para el sensor de color

Opciones	Voltaje de alimentación	Rango de detección	Características adicionales	Disponibilidad en el mercado	Precio
1.- Sensor RGB TCS34725 [35]	3 VDC a 5 VDC	3 mm a 10 mm	Corriente de funcionamiento: 65uA, interface I2C, Frecuencia de reloj: 0 ~ 400KHz Temperatura de operación: - 30°C ~ 70°C	Muy alta	\$102.00 MXN
2.-Sensor RGB TCS230 [36]	3 VDC a 5 VDC	Hasta 1 cm	Conversión de alta resolución, de intensidad de luz a frecuencia, color y rango de frecuencia de salida programables	Muy alta	\$128.00 MXN
3.- Sensor RGB ISL29125 [37]	2.25 VDC a 3.63 VDC	Dos rangos de sensibilidad óptica: Rango 0 = 5.7 m lux a 375 lux Rango 1 = 0.152 lux a 10.000 lux	Corriente de funcionamiento de 56 µA y apagado de 5 µA. rango seleccionable (mediante I2C). salida I2C (SMBus compatible), resolución ADC de 16 bits ventanas de interrupción programables	Baja	\$380.00 MXN

Las tablas de evaluación para estos criterios se presentan a continuación.

Tabla 16 Tabla de evaluación del criterio 1 para elección del sensor de color

Criterio 1: Voltaje de alimentación							
	Opción 1	Opción 2	Opción 3	Matriz normalizada			Promedio
Opción 1	1	1	3	1.29	1.29	1.29	1.29



<b>Opción 2</b>	1	1	3	1.29	1.29	1.29	1.29
<b>Opción 3</b>	0.33333333	0.33333333	1	0.43	0.43	0.43	0.43
<b>Total</b>	0.77777778	0.77777778	2.33333333				

Tabla 17 Tabla de evaluación del criterio 2 para elección del sensor de color

Criterio 2: Rango de detección							
	Opción 1	Opción 2	Opción 3	Matriz normalizada			Promedio
<b>Opción 1</b>	1	1	3	1.29	1.29	1.29	1.29
<b>Opción 2</b>	1	1	3	1.29	1.29	1.29	1.29
<b>Opción 3</b>	0.33333333	0.33333333	1	0.43	0.43	0.43	0.43
<b>Total</b>	0.77777778	0.77777778	2.33333333				

Tabla 18 Tabla de evaluación del criterio 3 para elección del sensor de color

Criterio 3: Características adicionales							
	Opción 1	Opción 2	Opción 3	Matriz normalizada			Promedio
<b>Opción 1</b>	1	3.00	1	1.29	1.29	1.29	1.29
<b>Opción 2</b>	0.33333333	1	0.33333333	0.43	0.43	0.43	0.43
<b>Opción 3</b>	1	3	1	1.29	1.29	1.29	1.29
<b>Total</b>	0.77777778	2.33333333	0.77777778				

Tabla 19 Tabla de evaluación del criterio 4 para elección del sensor de color

Criterio 4: Disponibilidad en el mercado							
	Opción 1	Opción 2	Opción 3	Matriz normalizada			Promedio
<b>Opción 1</b>	1	1	5	1.36	1.36	1.36	1.36
<b>Opción 2</b>	1	1	5	1.36	1.36	1.36	1.36
<b>Opción 3</b>	0.2	0.2	1	0.27	0.27	0.27	0.27
<b>Total</b>	0.73333333	0.73333333	3.66666667				

Tabla 20 Tabla de evaluación del criterio 5 para elección del sensor de color

Criterio 5: Precio							
	Opción 1	Opción 2	Opción 3	Matriz normalizada			Promedio
<b>Opción 1</b>	1	3	5	1.96	2.08	1.67	1.90
<b>Opción 2</b>	0.33333333	1	3	0.65	0.69	1.00	0.78
<b>Opción 3</b>	0.2	0.33333333	1	0.39	0.23	0.33	0.32
<b>Total</b>	0.51111111	1.44444444	3				

De igual forma, se muestra a continuación en la Tabla 21, las ponderaciones de cada uno de los criterios para esta selección. En la Tabla 22 se muestra la selección final del sensor de color, el cual es el TCS34725.

Tabla 21 Tabla de ponderación de criterios para elección del sensor de color

Importancia de los criterios de selección							
	Criterio 1	Criterio 2	Criterio 3	Criterio 4	Criterio 5	Matriz normalizada	Promedio

<b>Criterio 1</b>	1.00	0.33	1.00	0.20	0.20	0.35	0.29	0.38	0.48	0.18	0.34
<b>Criterio 2</b>	3.00	1.00	3.00	0.33	1.00	1.06	0.88	1.15	0.81	0.90	0.96
<b>Criterio 3</b>	0.20	0.33	1.00	0.20	0.33	0.07	0.29	0.38	0.48	0.30	0.31
<b>Criterio 4</b>	5.00	3.00	5.00	1.00	3.00	1.76	2.65	1.92	2.42	2.71	2.29
<b>Criterio 5</b>	5.00	1.00	3.00	0.33	1.00	1.76	0.88	1.15	0.81	0.90	1.10
<b>Total</b>	2.84	1.13	2.60	0.41	1.11						

Tabla 22 Matriz final de selección del sensor de color

	Criterio 1	Criterio 2	Criterio 3	Criterio 4	Criterio 5	Total
Opción 1	1.29	1.29	1.29	1.36	1.90	7.28378
Opción 2	1.29	1.29	0.43	1.36	0.78	5.78884
Opción 3	0.43	0.43	1.29	0.27	0.32	1.92738
Importancia Criterios	0.339088	0.960521	0.306846	2.29218	1.101366	

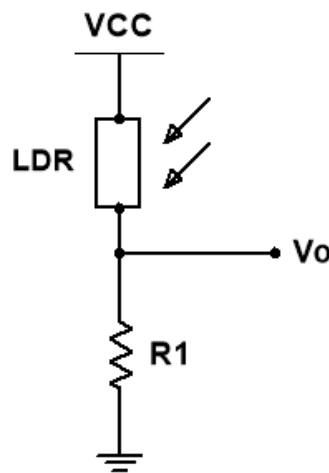
Los resultados anteriores muestran que la mejor opción de acuerdo con los criterios de selección es el sensor TCS34725, por lo tanto, es el seleccionado.

El proceso de selección del sensor de presencia fue mucho más directo, esto debido a que hay dos opciones muy comunes en el mercado y otro que no está diseñado para la detección de presencia pero que cumple con el objetivo. Estas tres opciones son, el encapsulado CNY70, el sensor FC-51 y una fotorresistencia. Si bien es cierto, la fotorresistencia es un dispositivo mucho más simple que las otras dos opciones, cumple a la perfección con el objetivo de detectar presencia, por lo que se selecciona este último elemento. Esta decisión se basa en el hecho de que el sensor CNY70 posee un rango muy pequeño de funcionamiento (menor a 5 mm [38]) y que, además, es fijo. Las características del sensor FC-51 se presentan a continuación en la Tabla 23.

Tabla 23 Características del sensor FC-51 [39]

Modelo	FC-51
<b>Chip de funcionamiento</b>	LM393
<b>Voltaje de alimentación</b>	3.3VDC - 5VDC
<b>Voltaje de salida digital</b>	5VDC
<b>Dimensiones</b>	31 mm x 15 mm x 7 mm
<b>Distancia de detección</b>	20 mm - 300 mm (ajustable)
<b>Angulo de detección</b>	35°
<b>Consumo actual</b>	3.3 VDC: ~ 23 mA 5.0 VDC: ~ 43 mA

Como se puede observar en la tabla anterior, el rango de detección de este sensor es variable, sin embargo, debido al diseño del separador de frutos (el cual se verá en la sección 4.6) y a las pruebas realizadas previo a la construcción final del diseño, este sensor no es capaz de detectar de forma óptima la presencia de los frutos, esto debido a diversos factores como la iluminación propia del sensor de color, la distancia de separación entre las paredes y la poca precisión que ofrece la regulación de la distancia de detección por medio del potenciómetro. Finalmente, la fotorresistencia toma todos esos factores a su favor, debido a que la regulación del umbral de detección se hace mediante software (lo que lo hace mucho más preciso), esto quiere decir que la implementación dentro del sistema de detección funciona de la siguiente manera: El voltaje de salida de un divisor de tensión formado por la fotorresistencia y una resistencia, conectados de la misma forma que se observa en la Ilustración 43, determinará el estado del sistema de detección (si hay fruto o no) mediante un umbral previamente obtenido por pruebas, esto significa que mientras no exista presencia en el conducto, el voltaje de salida presentará un nivel diferente que cuando sí haya fruto, todo esto con el fundamento de que la fotorresistencia estará recibiendo luz del sensor RGB siempre que no haya fruto (estarán contrapuestos) por lo que la resistencia en ese momento será menor (debido a la naturaleza del dispositivo) y cuando haya fruto, bloqueará la luz emitida por el sensor de color y hará que la resistencia suba, cambiando así, el valor del voltaje.



*Ilustración 43 Divisor de tensión con fotorresistencia [40]*

De esta forma se justifica el uso de una fotorresistencia como método de detección de presencia en el conducto.

Para esta sección, es necesario realizar pruebas de detección de colores en movimiento, para ello, se emplea, únicamente para pruebas, un microcontrolador Arduino y un sensor TCS34725.

Lo primero es realizar un programa con la capacidad de leer los datos proporcionados por el sensor, para lo cual nos auxiliaremos en esta ocasión de una interfaz desarrollada en LabVIEW, que se ve en la Ilustración 44.

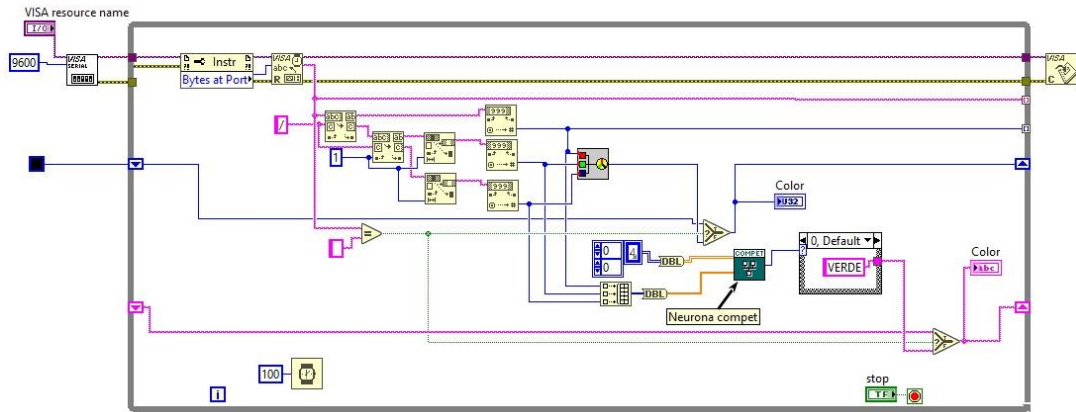


Ilustración 44 Programa para la detección de color con sensor TCS34725

Como podemos ver, se ha incorporado una neurona competencia, que lo que hace es comparar los valores dados de las capas R, G y B del sensor, contra los valores previamente determinados de los colores del café. Estos valores fueron sacados con el programa de la Ilustración 45, en el cual, cada que picamos en alguna zona de interés, nos determina el color del pixel seleccionado y lo descompone en sus capas RGB.

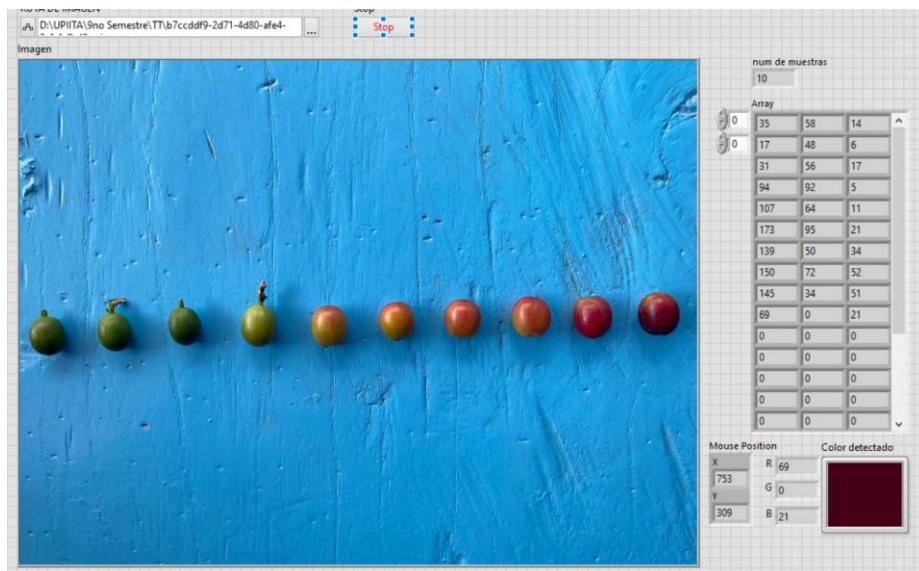
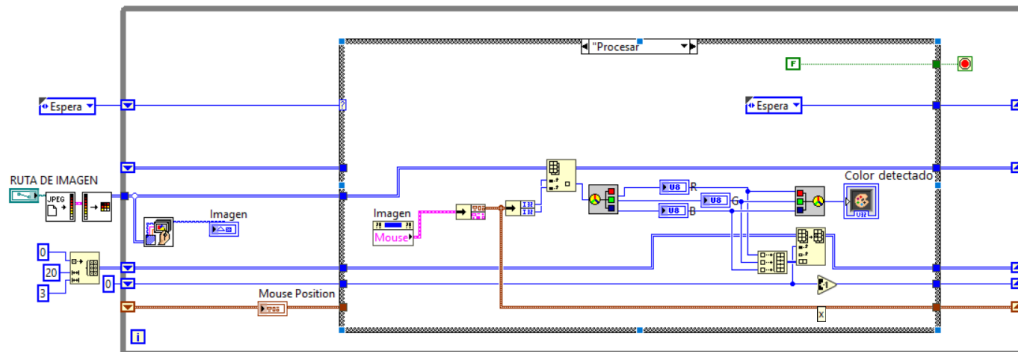


Ilustración 45 Programa para generar la constante de color de los frutos de café

La constante generada en el programa anterior es la que se inserta en el programa de la Ilustración 44 para que la neurona COMPET busque el parecido con lo que el sensor detecta.

Una vez hecho esto, es necesario recrear un escenario en el que los frutos de café, que en este caso se utilizaron los mostrados en la Ilustración 46, avancen simulando estar en la banda, para así verificar que efectivamente el sensor es capaz de detectar con los frutos en movimiento.



Ilustración 46 Frutos de café utilizados para pruebas

Para poder calcular esta velocidad de avance de las muestras de los frutos, se construye una rampa con cierta inclinación con marcas de inicio y fin, que en este caso se ponen a una distancia de 10 cm, y con ayuda de una cámara se toma video para ver el tiempo exacto que tarda en trasladarse de un punto a otro como se muestra en la Ilustración 47.

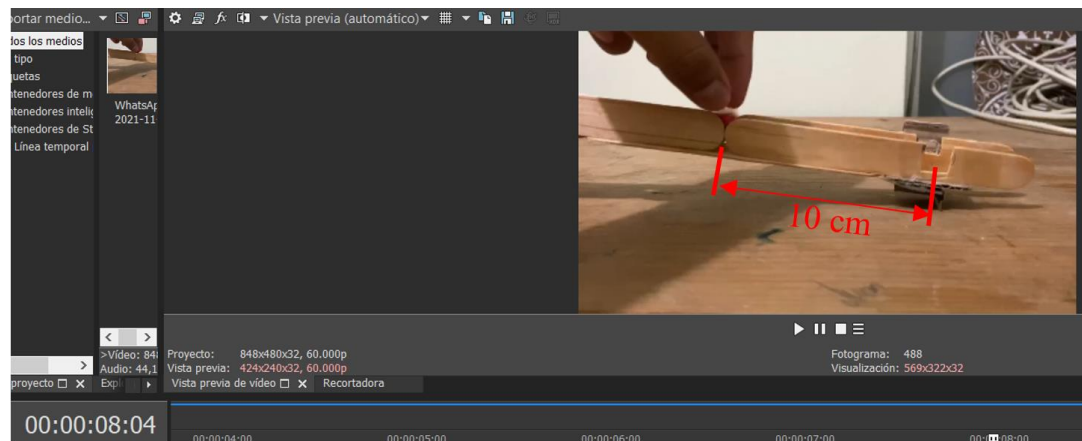


Ilustración 47 Medición de velocidad con video

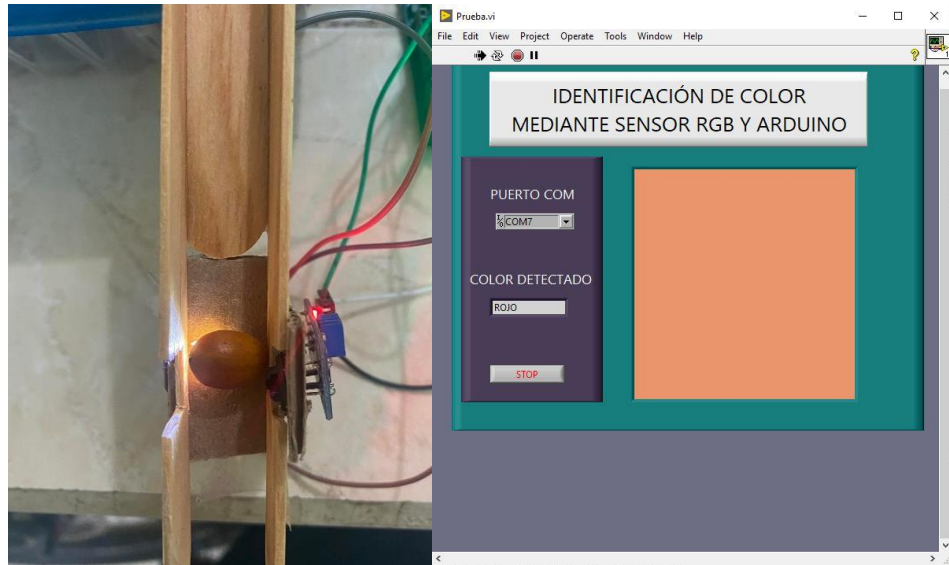
La Tabla 24 muestra los resultados de este análisis, y vemos que con la inclinación dada a la rampa se tiene una velocidad de 10.3679 cm/s.

Tabla 24 Resultados tras realizar las pruebas de velocidad

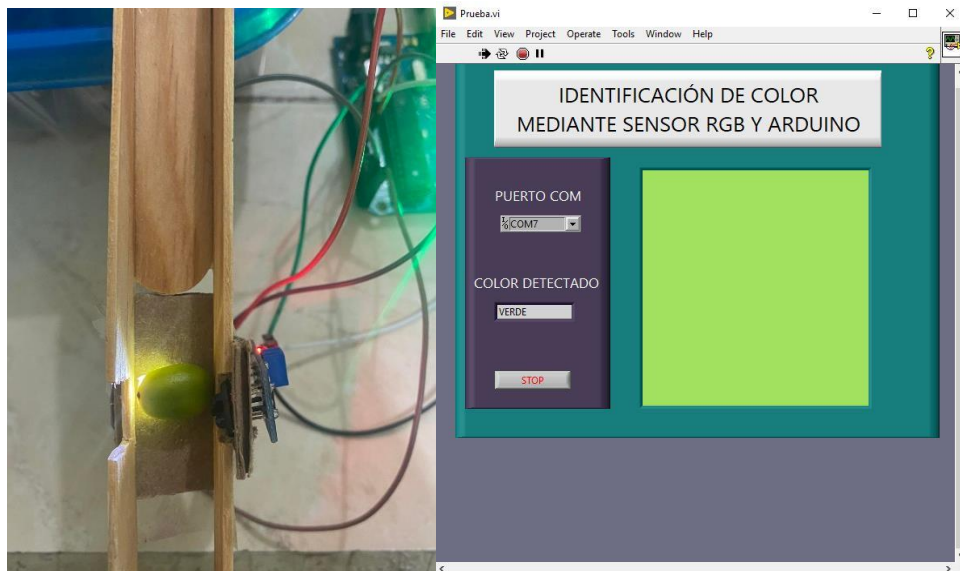
No. de Prueba	Tiempo en marca 1 (s)	Tiempo en marca 2 (s)	Diferencia de tiempo (s)	Velocidad (cm/s)
1	11.21	12.18	0.97	10.3092
2	16.25	17.14	0.89	11.2359
3	24.1	25.02	0.92	10.8695
4	30.18	31.27	1.09	9.1743
5	37.04	38.01	0.97	10.3092

6	54.04	55.01	0.97	10.3092
<b>Promedio:</b>				10.3679

Ahora resta comprobar que el sensor efectivamente detecte a estas velocidades, para lo cual se hace la prueba y como vemos en la Ilustración 48 e Ilustración 49 efectivamente detecta el color de la muestra de fruto que pasa por la rampa. Por lo tanto, si el sensor es capaz de detectar a una velocidad mayor a la requerida de la banda transportadora, no tiene por qué tener problema a una velocidad menor.



*Ilustración 48 Detección de fruto rojo a 10.36 cm/s*



*Ilustración 49 Detección de fruto verde a 10.36 cm/s*

Adicionalmente se realizaron pruebas con modelos hechos de plastilina que simulen los frutos de café. Estas pruebas adicionales se realizaron debido a que la cosecha del café no ocurre todo el año, por lo que la materia prima principal, que son los frutos de café, no

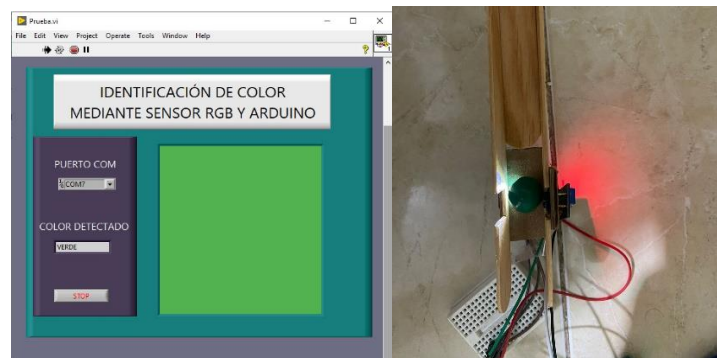


estarán disponibles durante todo el año, es por ello que se necesita desarrollar modelos que tengan características similares a los frutos reales de café en cuanto a tamaño y color para que, si en algún momento se requieren hacer pruebas y no hay disponibilidad de la materia prima, se puedan validar dichas pruebas con estos modelos, los cuales se muestran en la Ilustración 50.



*Ilustración 50 Muestras de plastilina para simular los frutos de café*

Para que dichos modelos sean validados como referencia en caso de no contar con los frutos de café, es necesario realizar las mismas pruebas que se hicieron con los frutos reales y en donde se espera que los resultados sean iguales o muy parecidos para que se puedan contemplar como modelos funcionales en el futuro. En la Ilustración 51 se muestra la prueba realizada con estos modelos de plastilina, obteniendo resultados satisfactorios, por lo que se puede concluir que sirven como referencia en caso de no contar con los frutos reales.



*Ilustración 51 Detección de color a 10.36 cm/s*

El diagrama de conexiones empleado para las pruebas anteriores es el que se muestra a continuación.

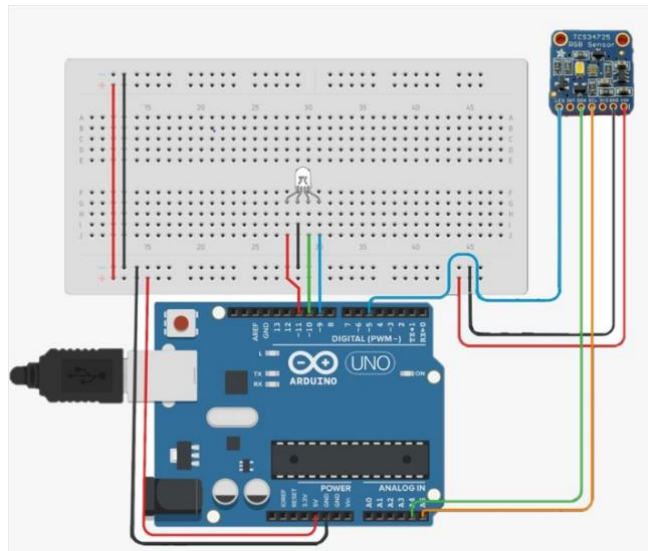


Ilustración 52 Diagrama de conexiones para el sensor RGB

## 4.6 Separador de los frutos

Como propuesta de diseño de este subsistema se tiene el dibujo de la Ilustración 53, en el que se puede ver que se trata de un ducto tipo Y invertida.

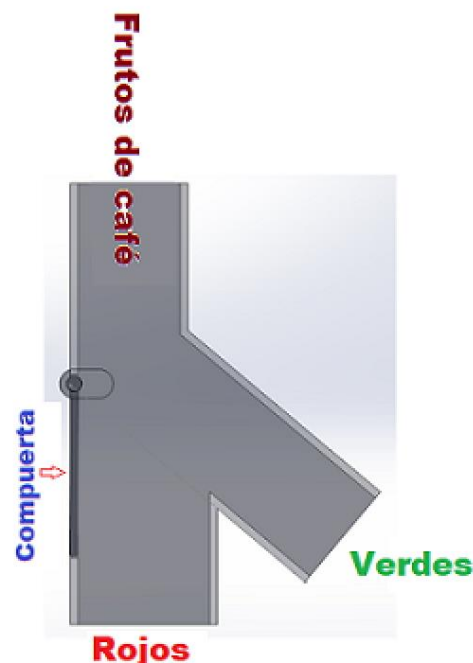


Ilustración 53 Esquema de propuesta de diseño del separador

El funcionamiento básico del separador consiste en que una vez que se ha analizado el color del fruto de café que viene por la banda se envía una orden de posición a la compuerta, de modo que, si se ha detectado rojo la compuerta se mantiene en su posición de reposo, tal como se muestra en la ilustración anterior, de lo contrario un actuador moverá la compuerta para así mandar el fruto a los verdes.

Tomando esto como base se pueden calcular las dimensiones necesarias, la fuerza requerida del actuador y su posición con respecto al eje de movimiento de la compuerta.

Como ya sabemos, los frutos de café tienen una medida máxima de 15mm de diámetro, por ello, la medida mínima interna del separador debe superar esta dimensión,



entonces para dejar una tolerancia considerable se propone que la entrada del separador sea cuadrada con 20mm por lado.

Para evitar que los frutos rojos se vayan al ducto de verdes cuando la compuerta esté en reposo se propone ampliar el espacio justo en el vértice, de modo que la salida de los frutos rojos queda de aproximadamente 27 mm, mientras que la de verdes es del mismo tamaño que la boca de entrada.

El ángulo de inclinación del ducto de verdes se propone de 50 grados con respecto a la vertical, de modo que, cuando se accione el actuador debe llevar a la compuerta a esta inclinación.

La longitud de la compuerta se calcula tomando en cuenta la Ilustración 54, así:

$$\cos \phi = \frac{27mm}{c}$$

$$c = \frac{27mm}{\cos 40^\circ} = 35.24 mm \approx 35 mm$$

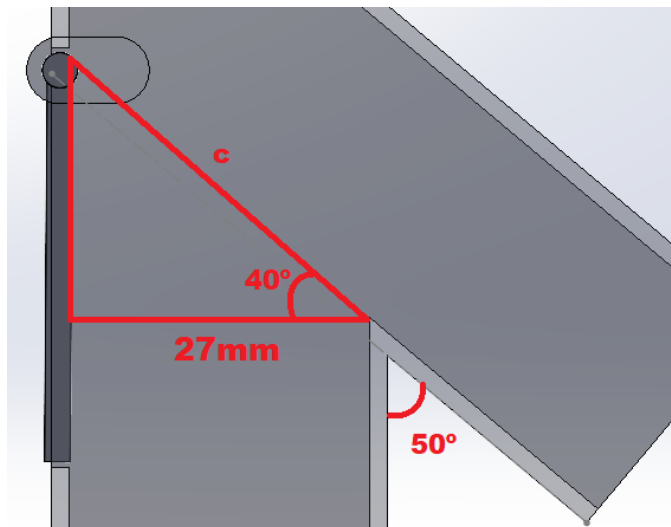


Ilustración 54 Esquema para cálculo de longitud de la compuerta

Se debe asegurar que el actuador tenga la fuerza suficiente para mover a la compuerta, así que, para calcular esta fuerza requerida se propone que esta pieza sea de aluminio calibre 13 que equivale a 2.28mm. Si la compuerta es de las dimensiones mostradas en la Ilustración 55 el volumen de la placa está dado por la ecuación siguiente.

$$V = 35mm * 20mm * 2.28mm = 1596 mm^3 = 1.596 cm^3$$

Y considerando la densidad del aluminio como  $\rho_{Al} = 2.7 \frac{g}{cm^3}$  tenemos que el peso de la compuerta es:

$$W_c = \rho_{Al} V = 2.7 \frac{g}{cm^3} * 1.596 cm^3 = 4.3092 g = 4.3092 \times 10^{-3} kg$$

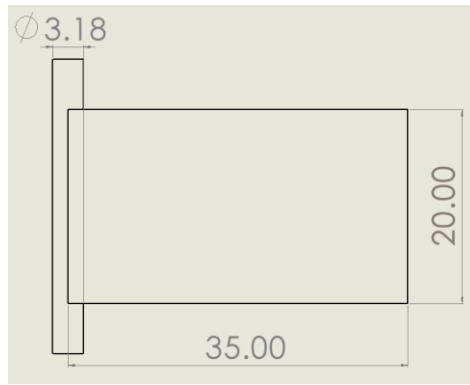


Ilustración 55 Compuerta del separador

Para calcular la posición a la que debe colocarse el actuador con respecto al eje de rotación de la compuerta se debe tomar en cuenta la longitud de carrera LC. Así, basado en la Ilustración 56 se tiene.

$$\tan \alpha = \frac{LC}{h} \rightarrow h = \frac{LC}{\tan \alpha}$$

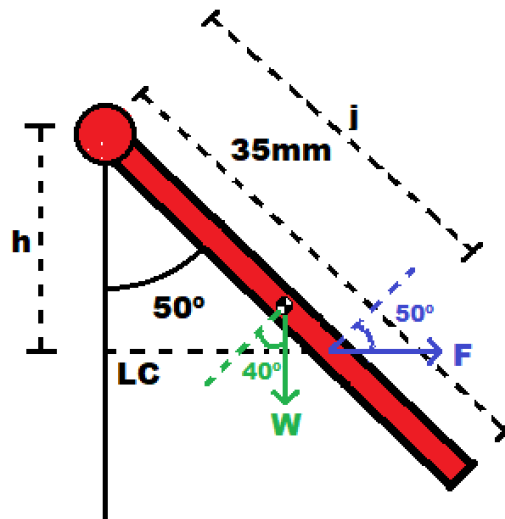


Ilustración 56 Diagrama de fuerzas ejercidas en la compuerta

Para calcular la fuerza que se requiere para llevar a la barra a esa posición se debe tomar en cuenta que la variable  $W$  mostrada en la ilustración anterior es la suma del peso de la compuerta más el peso máximo del fruto de café, puesto que al estar en esa posición implica que un fruto de café está pasando por ahí. Entonces:

$$W = (W_c + W_f) * g$$

El peso promedio del fruto de acuerdo con la Tabla 4 es de 1.2 g, sin embargo, se toma el valor final de 3 g como factor de seguridad, por lo tanto:

$$W = (4.3092 \times 10^{-3} \text{ kg} + 3 \times 10^{-3} \text{ kg}) \left(9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right) = 0.0717 \text{ N}$$

Para calcular la fuerza necesaria del actuador para poner la barra en esa posición, se realiza el análisis en equilibrio por suma de torques, en estática:

$$\Sigma\tau = 0$$

De acuerdo con la Ilustración 56, la suma de torque queda de la siguiente manera:

$$W * \cos 40^\circ * \frac{0.035 \text{ m}}{2} - F * \cos 50^\circ * j = 0$$

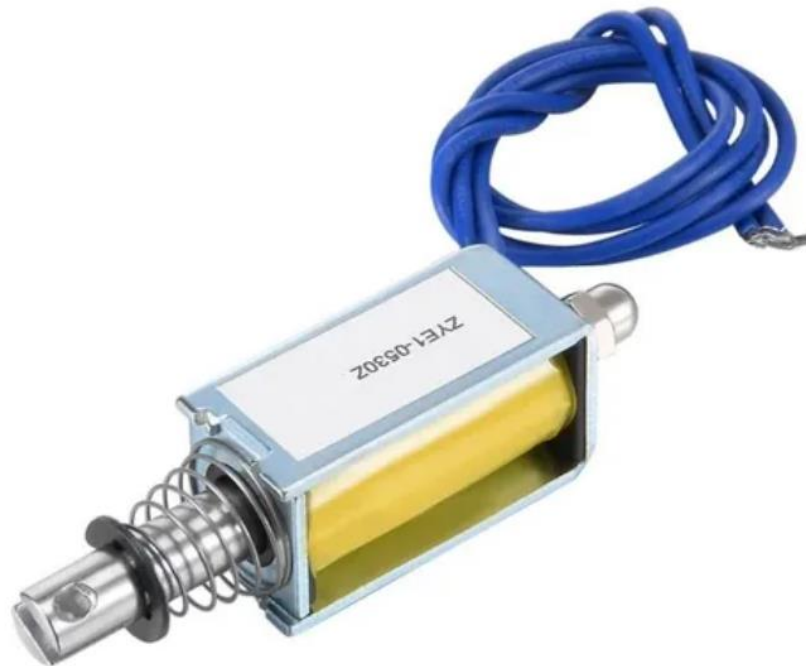
La variable  $j$  se deja expresada en términos de  $LC$ , por lo tanto:

$$j = \frac{h}{\cos 50^\circ} = \frac{LC}{\tan 50^\circ * \cos 50^\circ}$$

Sustituyendo la expresión anterior y despejando  $F$  de la suma de torque se tiene:

$$F = \frac{W * \cos 40^\circ * \frac{0.035 \text{ m}}{2}}{\cos 50^\circ * \frac{LC}{\tan 50^\circ * \cos 50^\circ}} = \frac{0.0717 \text{ N} * \cos 40^\circ * \frac{0.035 \text{ m}}{2}}{\frac{LC}{\tan 50^\circ}} = \frac{1.145}{LC} \times 10^{-3} \text{ N}$$

Se propone el uso del actuador ZYE1-0530Z debido a su bajo costo y fácil adquisición, este dispositivo se muestra en la Ilustración 57.



*Ilustración 57 Actuador electromagnético de 5V y 10mm de carrera*

Las características de este actuador se listan en la tabla siguiente, en donde se puede ver que la longitud de carrera es de 10 mm.

Tabla 25 Características de actuador Zye1-0530z [41]

<b>Modelo</b>	ZYE1-0530Z
<b>Voltaje nominal</b>	6V DC
<b>Corriente</b>	500mA-1A
<b>Dimensiones</b>	30mm*15mm*13mm
<b>Carrera</b>	10mm
<b>Fuerza de retención</b>	0.5N

Sustituyendo esto en la ecuación se tiene:

$$F = \frac{1.145 \times 10^{-3}}{10 \times 10^{-3}} N = 0.1145 N$$

Que es menor a la fuerza de retención que proporciona el actuador seleccionado, por lo tanto, el actuador seleccionado cumple con su propósito.

Después de realizar modelos de pruebas, se llegó a la conclusión de que el material de la compuerta será plástico PLA, el cual posee una densidad de  $1.24 \frac{g}{cm^3}$  [42], por lo tanto y conservando las mismas medidas propuestas se tiene que el peso de la compuerta con el nuevo material es de:

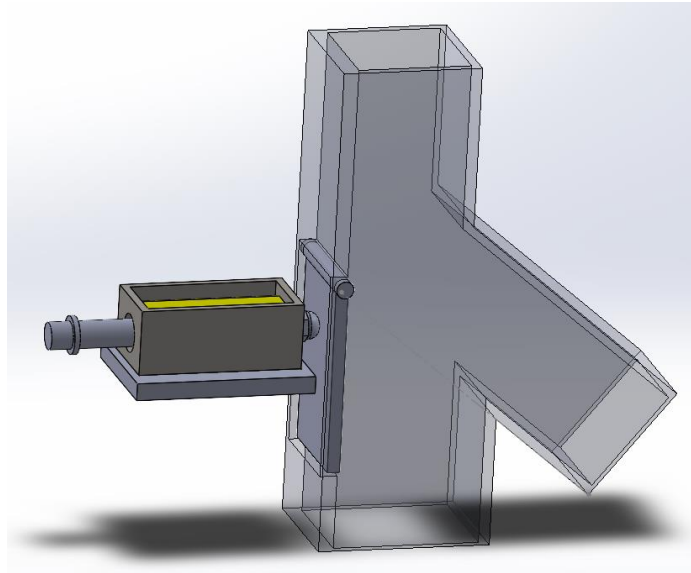
$$W_{cPLA} = \rho_{PLA} V = 1.24 \frac{g}{cm^3} * 1.596 cm^3 = 1.97904 g = 1.97904 \times 10^{-3} kg$$

El peso de la compuerta hecha con plástico PLA es menor que la compuesta por aluminio, por lo tanto, la fuerza F seguiría siendo menor a la fuerza de retención del actuador seleccionado, por lo que el PLA también cumple con el propósito.

La posición del actuador entonces queda definida como:

$$h = \frac{LC}{\tan \alpha} = \frac{10mm + 1.5mm}{\tan 50^\circ} = 8.39mm \approx 8.5mm$$

La Ilustración 58 muestra a grandes rasgos el acomodo del actuador con respecto al separador para un solo carril, sin embargo, para hacer el acople con el número de carriles calculado se debe diseñar una estructura diferente.



*Ilustración 58 Esquema del separador con el actuador acoplado [Elaboración propia]*

## 5. Diseño eléctrico

Para realizar el diseño eléctrico es indispensable tener claro qué es lo que se requiere alimentar para así hacer un diseño tal con la capacidad de alimentar todo el circuito de la máquina.

Para empezar, debemos tomar en cuenta que la conexión será de 127 V de corriente alterna, pues es el tipo de conexión que se usará para alimentar fuentes (una para activación del motor y otro para los circuitos de identificación de color) que a su vez entregan corriente directa, las cuales se detallarán más adelante.

Por otro lado, se debe alimentar la parte de control de todo el sistema, lo cual incluye a los sensores, actuadores y controladores, que se alimentan con corriente directa, de modo que, la arquitectura de funcionamiento del circuito es como el mostrado en la Ilustración 59.

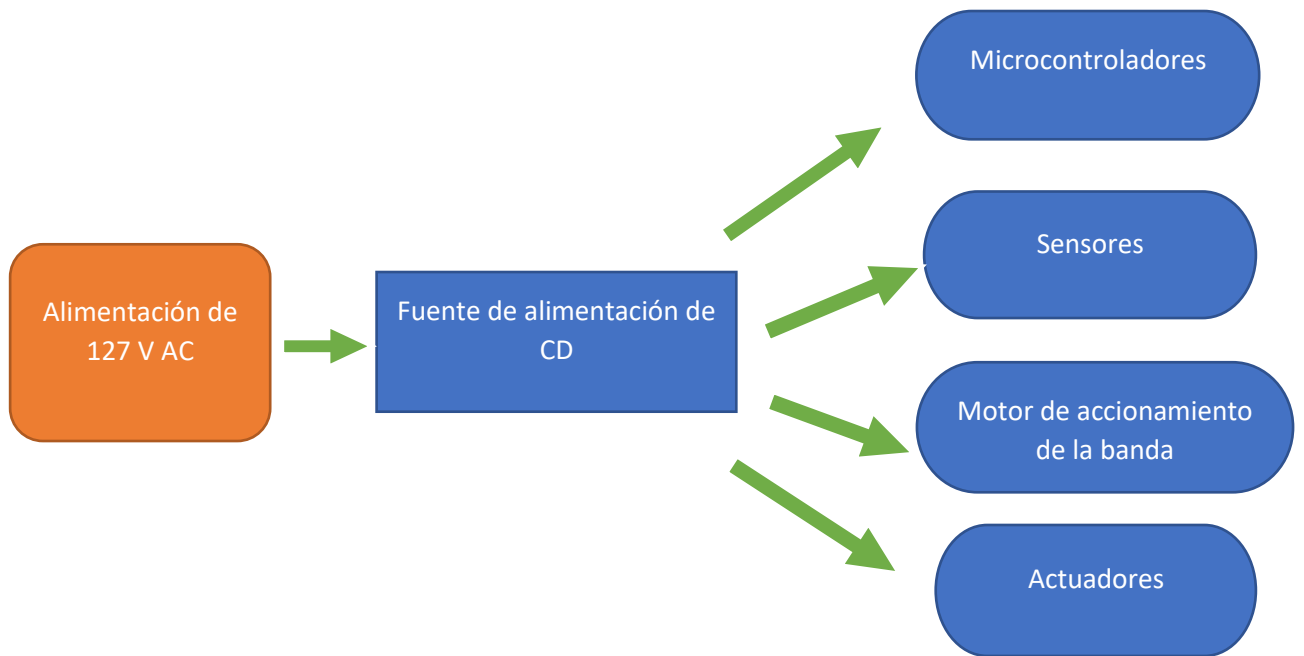


Ilustración 59 Arquitectura básica del circuito eléctrico

Se inicia el diseño con el circuito de alimentación, el cual está diseñado de tal forma que el circuito que alimenta a los microcontroladores y actuadores enciendan de forma independiente al circuito de activación del motor de la banda transportadora, este diagrama se muestra en la Ilustración 60.

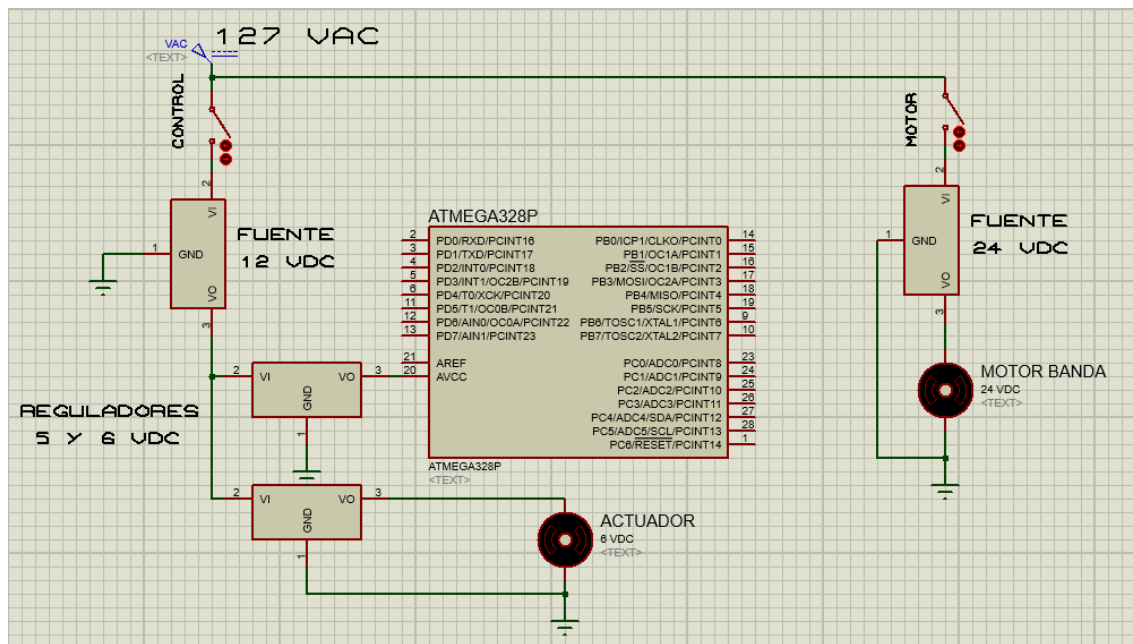
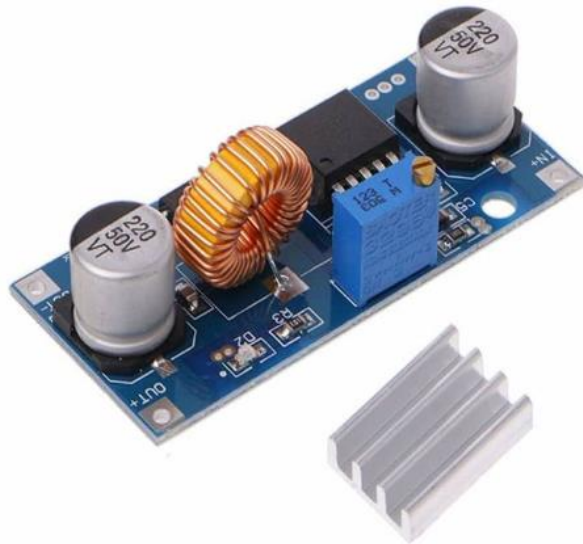


Ilustración 60 Diagrama eléctrico general de la máquina

En dicha imagen se pueden apreciar dos fuentes de DC, las cuales estarán alimentadas directamente de la alimentación de corriente alterna de 127 V. La fuente de 12 VDC es una fuente de corriente directa, esta se encarga de alimentar a dos reguladores con matrícula XL4015, este regulador se muestra en la Ilustración 61, el cual se selecciona de acuerdo con sus características que incluyen, entradas de voltaje de 4 a 36 V y salidas de 1.25 a 32 V con hasta 5 A [43]. Gracias a estas características es posible alimentar el circuito del microcontrolador (necesita una entrada de 5 V) y el circuito del actuador (funciona con 6 V).



*Ilustración 61 Regulador de voltaje con matrícula XL4015 [43]*

La fuente de 24 VDC alimenta directamente al motor debido a que éste funciona con voltajes nominales del mismo valor que entrega dicho dispositivo.

La siguiente parte del circuito que se diseña es el circuito de control, que consta del microcontrolador ATMEGA328P y los sensores encargados de monitorear el comportamiento de la máquina.

El circuito es el mostrado en la Ilustración 62, en donde se ve las terminales del sensor RGB TCS34725, la fotorresistencia y las de alimentación del propio circuito, las cuales aparecen marcadas como “CONTROL”.

La fotorresistencia se encarga de detectar si hay o no un fruto de café cercano. En caso de detectarlo activa al sensor RGB para poder analizar el color y envía una señal a un optoacoplador con matrícula PC817 que se encarga de controlar si el actuador del separador se activa o no. También se le añadieron LED's indicadores, los cuales se activarán dependiendo del color detectado.

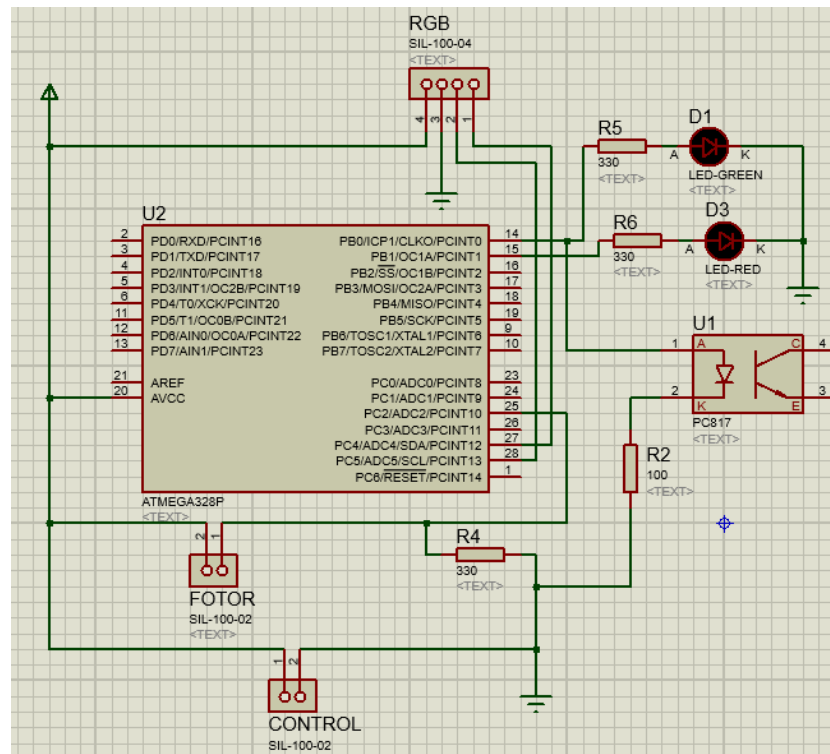


Ilustración 62 Circuito de censado

El circuito de activación del actuador es el mostrado en la Ilustración 63, que está basado en el funcionamiento de un transistor MOSFET, que al recibir una tensión mayor a la de umbral permite el flujo de corriente. Este circuito es totalmente independiente del circuito del microcontrolador, es por ello que se hace el acoplamiento mediante un optoacoplador, esto es debido a que la corriente consumida por el actuador es relativamente grande en comparación con la que entrega el microcontrolador, por lo que se utiliza un transistor del tipo MOSFET IRFZ44N para activar dicho actuador y con la fuente independiente aseguramos que la corriente sea suficiente para activarlo. Es importante mencionar que la resistencia de 10 kΩ conectada a la compuerta del MOSFET, sirve para evitar picos de corrientes que se podrían generar debido al constante cambio entre estados lógicos. De la misma forma, el capacitor y el diodo conectado en paralelo con el actuador son medidas de seguridad; el capacitor funge como filtro para las corrientes generadas por el mismo embobinado del solenoide y el diodo para evitar que la corriente “regrese” al circuito, dañando así los componentes electrónicos.



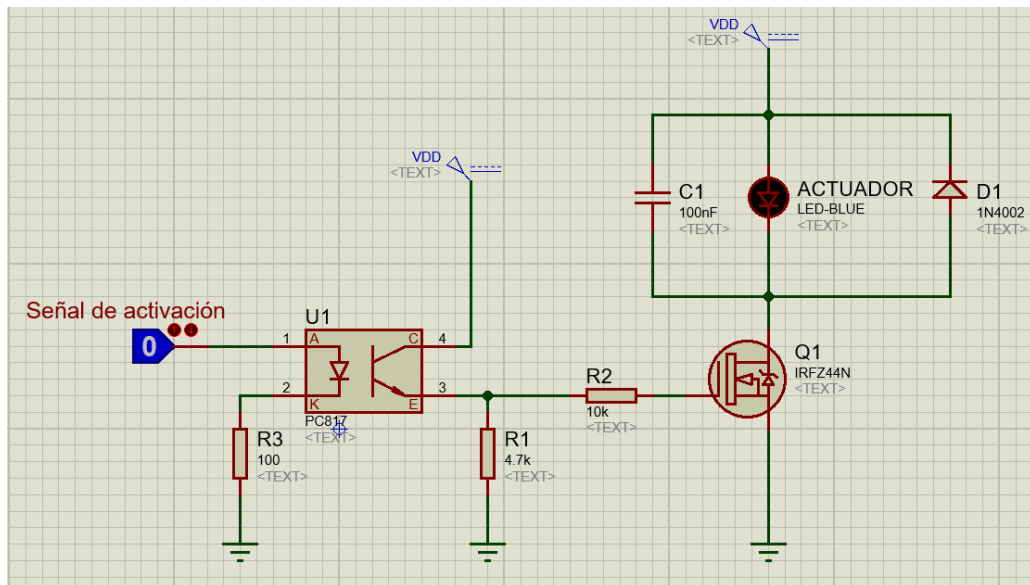


Ilustración 63 Circuito de control del actuador electromagnético

Teniendo en cuenta el diseño anterior, es necesario conocer las corrientes y voltajes que consumirá cada componente relevante y, por ende, el circuito entero. Para ello se tomarán los valores máximos consumidos por cada componente, en el caso del MOSFET IRFZ44N solo se calcula la corriente en compuerta por Ley de Ohm con un voltaje de entrada de 5 V y el valor de resistencia de compuerta, el cual es de 10 k $\Omega$ , lo cual nos da una corriente de 0.5 mA y en el drenador la corriente consumida es prácticamente la del actuador electromagnético. Para las corrientes consumidas por las resistencias de los LED's indicadores y las del divisor de tensión de la fotorresistencia se usa también la ley de Ohm considerando un voltaje de 5 V para todas estas. Es importante mencionar que la fotorresistencia tiene un rango de operación que va de 1 M $\Omega$  en la oscuridad a 100  $\Omega$  con luz brillante [44], por lo que la corriente máxima se tomará con el último valor más la resistencia con la que está conectada en el divisor. Esta información se presenta en la Tabla 26.

Tabla 26 Corrientes máximas consumidas en el circuito de control

Componente	Corriente nominal consumida	Voltaje
ATmega328p [45]	2.7 mA	5 V
Circuito fotorresistencia	11.62 mA	5 V
Sensor RGB TCS34725 [35]	65 $\mu$ A	5 V
Optoacoplador PC817 [46]	Corriente ánodo: 20 mA máx.	5 V
	Corriente colector: 50 mA máx.	5 V
Compuerta MOSFET IRFZ44N	0.5 mA	5 V

<b>Actuador electromagnético [41]</b>	1 A	5 V
<b>LED's indicadores</b>	30.30 mA	5 V
<b>Total</b>	<b>1.115 A</b>	<b>No aplica</b>

El diseño del sistema de selección se basa en un diseño modular, para nuestros fines, esto significa que cada circuito de control estará destinado únicamente para un carril de la banda transportadora, es decir, existirá un circuito de identificación de carril para los 10 carriles totales en la banda transportadora. El modelo se diseñó de esta forma basándose en dos principales rubros, el primero es que con un diseño modular, tanto el desarrollo, implementación e incluso mantenimiento preventivo y correctivo, se vuelve una tarea mucho más sencilla y óptima para el funcionamiento de la máquina, la segunda y más importante es que el microcontrolador seleccionado trabaja de manera secuencial, esto significa que el microcontrolador no podrá realizar un funcionamiento óptimo y correcto si controlara dos carriles en la identificación del color al mismo tiempo o de forma paralela.

Con los datos obtenidos en la Tabla 26, también verificamos de forma teórica que el regulador de voltaje seleccionado (XL4015), el cual entrega una corriente máxima de 5 A, es suficiente para alimentar máximo a 4 circuitos de control por regulador, sin embargo, para no sobrecargar y alargar la vida útil del dispositivo, solo se alimentarán dos circuitos de control por regulador y dos circuitos del actuador por regulador, utilizando así un total de 10 reguladores.

Teniendo en cuenta lo anterior, se necesitan 10 circuitos de control idénticos al visto anteriormente para solventar los 10 carriles de la banda transportadora para la identificación de color. Como vimos en la Tabla 26 el consumo de corriente por cada circuito de control es de 1.115 A, esto quiere decir que para los 10 circuitos necesarios se consumirá una corriente total de 11.15 A. Para solventar este consumo de corriente se necesita seleccionar una fuente de DC con especificaciones tales que cubran esta demanda, es por ello que se elige la fuente LRS-200-12 del fabricante Mean Well la cual ofrece una salida de 12 V suficientes para alimentar los reguladores activación del relevador y otorga una corriente de 17 A [47], la cual cubre de manera satisfactoria la demanda de los circuitos de control. La fuente seleccionada se muestra en la Ilustración 64.



Ilustración 64 Fuente DC seleccionada del fabricante Mean Well [47]

Debido a que el motor y la caja de reducciones seleccionados son comerciales, es decir, ya cuentan con especificaciones de velocidad y reducción definidas por el fabricante, se opta por el diseño de un circuito de control de velocidad y, como su nombre lo dice, controlará la velocidad de avance de la banda por medio de un PWM, el diagrama esquemático se muestra en Ilustración 65.

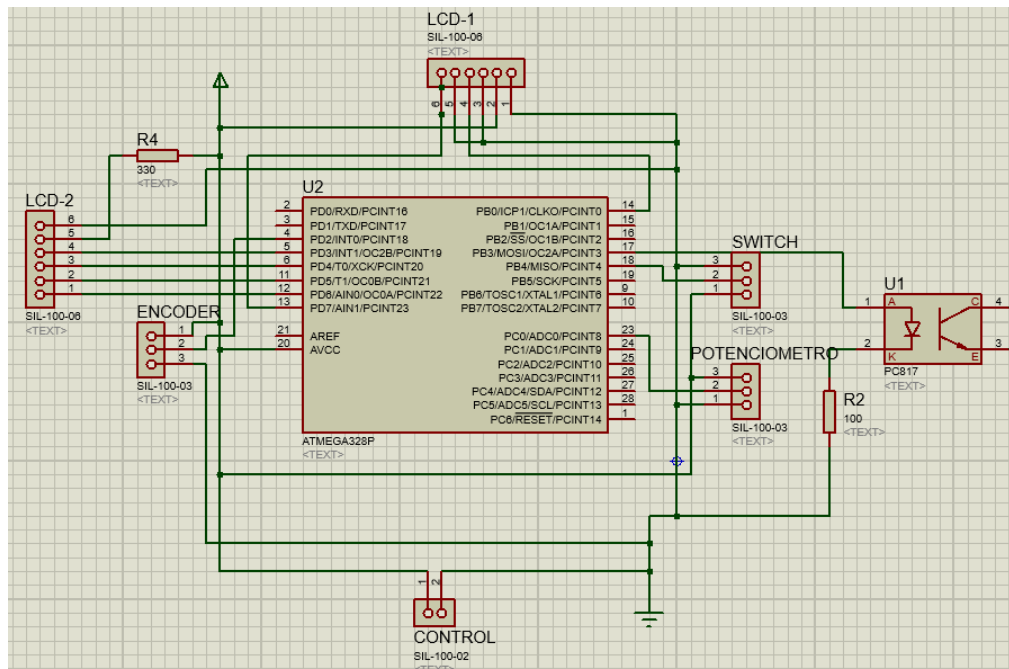


Ilustración 65 Esquemático del circuito de control de velocidad

En el diagrama anterior podemos observar que se utilizará también un microcontrolador ATMEGA328p, un potenciómetro encargado de regular la velocidad, un switch el cual tendrá la función de cambiar de formato de kg/h a m/s de la información que

se muestra en la LCD y un *encoder* que estará monitoreando la velocidad, información necesaria para mostrar en la LCD. Este circuito de control tendrá una alimentación independiente a la del motor, por lo que, de la misma manera que se acoplaron el circuito identificador con los actuadores, este circuito estará acoplado con el circuito del motor mediante el optoacoplador PC817 y el circuito de activación del motor es el mismo que se mostró en la Ilustración 63, con la diferencia que el lugar del actuador, se encontrará el motor.

Como se mencionó anteriormente, otra fuente independiente a la de los circuitos de control alimentará al motor de la banda, para poder seleccionar de forma adecuada se mide de manera experimental el consumo de corriente del motor con carga, el cual vemos en la Ilustración 66 es de 3 A.



Ilustración 66 Medición de corriente del motor

También es necesario realizar un análisis similar al visto en la Tabla 26, pero ahora con los elementos del circuito de control de velocidad, este análisis se muestra en la Tabla 27.

Tabla 27 Corrientes máximas consumidas en el circuito de control de velocidad

Componente	Corriente nominal consumida	Voltaje
<b>ATmega328p [45]</b>	2.7 mA	5 V
<b>LCD 16x2 [48]</b>	25 mA	5 V
<b>Sensor de velocidad FC-33 [49]</b>	15 mA	5 V
<b>Optoacoplador PC817 [46]</b>	Corriente ánodo: 20 mA máx.	5 V

	Corriente colector: 50 mA máx.	5 V
<b>Compuerta MOSFET IRFZ44N</b>	0.5 mA	5 V
<b>Motor DC</b>	3 A	5 V
<b>Potenciómetro de 10 k<math>\Omega</math></b>	50 mA	5 V
<b>Total</b>	<b>3.163 A</b>	<b>No aplica</b>

Con base en los datos obtenidos de la tabla anterior, se selecciona para el accionamiento del motor, la fuente de corriente directa LRS-350-24 del fabricante Mean Well, la cual ofrece una salida de 24 V ideal para alimentar el motor y hasta 14.6 A según datos del fabricante [50], corriente suficiente para alimentar al circuito de control de velocidad y al motor.

De acuerdo con las especificaciones del fabricante, las fuente seleccionada tiene un consumo de 350 W [50] para la fuente de 24 V y 204 W [47] para la fuente de 12 V, estos datos son útiles para el cálculo de potencia consumida por la máquina, el cual es realizado con base en el circuito visto en la Ilustración 60, los cuales incluyen como elementos relevantes las fuentes de DC, puesto que serán éstas las que alimenten a toda la máquina; con base en estos datos, se puede calcular la potencia consumida. Los resultados se muestran en la Tabla 28.

*Tabla 28 Potencia total consumida por la máquina*

Componente	Potencia consumida
<b>Fuente de alimentación 24 VDC</b>	350 W
<b>Fuente de alimentación 12 VDC</b>	204 W
<b>Total</b>	<b>554 W</b>

Con los resultados vistos en la tabla anterior, se obtiene entonces que la potencia total consumida por la máquina separadora es de 0.554 kW.

La época de recolección del café inicia en el mes de septiembre y concluye en el mes de marzo del siguiente año [51]; sin embargo, como se mencionó en el marco teórico, el tiempo de cosecha en el que se recolectan frutos tanto maduros como inmaduros (y por lo tanto el tiempo en que podría utilizarse la máquina), es un periodo más corto que los 6 meses totales de la época de cosecha. Teniendo en cuenta lo anterior, se considera los meses de trabajo a los 3 meses intermedios en el lapso total mencionado, la jornada de trabajo por día de la máquina está estimada en 8 horas, por lo que el cálculo final de la potencia consumida al año está dada por la expresión:

$$PT = 554 \text{ W} * \frac{8 \text{ h} * 30 * 3}{\text{año}} = 398.88 \frac{\text{kWh}}{\text{año}}$$

La cual es la potencia total consumida en un periodo de un año.

## 6. Programación y diseño de los circuitos impresos

A continuación, se presenta el código utilizado para la programación de los microcontroladores del circuito de identificación de color, este código fue genera en lenguaje C.

```
#include "Adafruit_TCS34725.h"
Adafruit_TCS34725 tcs = Adafruit_TCS34725(TCS34725_INTEGRATIONTIME_50MS, TCS34725_GAIN_1X);
int cont=0;
long tiempo[2]={0,0};
float DifTiempo=0;

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  pinMode(A2, INPUT); //Entrada de la fotoresistencia
  pinMode(8, OUTPUT); //LED verde
  pinMode(9, OUTPUT); //LED rojo
}

void loop() {
  uint16_t R,G,B,C;
  if(analogRead(A2)<75) {
    tcs.getRawData(&R, &G, &B, &C);
    if(R> G && R >B) {
      R+=30;
      G-=20;
      //B-=20;
    }
    if(G> R && G >B) {
      R-=20;
      G+=30;
      B-=20;
    }
    if(B> G && B >R) {
      R-=20;

```

```

    G-=20;
    B+=30;
}
if(R>255){R=255;}
if(G>255){G=255;}
if(B>255){B=255;}

//Declaración de variables y patrones
float result[2]={0,0};
float patrones[2][3]={{0.1999,0.9798,0},
                      {0.9657,0.0199,0.2588}} ; //Patrón normalizado [nxm]->[2x3]

//Normalizar entrada [m]->[3]
float div=sqrt(pow(float(R),2)+pow(float(G),2)+pow(float(B),2));
float dato[3]={float(R)/div,float(G)/div,float(B)/div};

//Neurona compet
int filas=sizeof(patrones)/sizeof(patrones[0]);
int columnas=sizeof(patrones[0])/sizeof(patrones[0][0]);
for(int i=0; i<filas; i++){
    for(int j=0; j<columnas; j++){
        result[i]=result[i]+(patrones[i][j]*dato[j]);
    }
}

//Encontrar posición del más grande
int index=0;
float mayor=0;
for(int a=0; a<filas; a++){

```

---

```

for(int a=0; a<filas; a++){
    if(result[a]>mayor){
        index=a;
        mayor=result[a];
    }
}

//Desición de si es verde o rojo
if(index>0){
    //Serial.println("Rojo");
    digitalWrite(8,LOW);
    digitalWrite(9,HIGH);
}else{
    //Serial.println("Verde");
    digitalWrite(9,LOW);
    digitalWrite(8,HIGH);
}
cont=0;
tiempo[0]=0;
tiempo[1]=0;
delay(500);
}
else{
    if(cont==0){
        tiempo[0]=millis();
    }
    else{
        tiempo[1]=millis();
    }

    cont=cont+1;
    DifTiempo=tiempo[1]-tiempo[0];
    if(DifTiempo>5000){
        digitalWrite(8,LOW);
        cont=0;
    }
    delay(10);
}
}
}

```

*Ilustración 67 Código generado en lenguaje C para circuito identificador de color*

El funcionamiento del código anterior está basado en el diagrama de flujo visto en la Ilustración 41, sin embargo, al código también se le añadió la función de desactivar el actuador en caso de estar activado por más de 5 segundos sin detectar presencia, esto con la finalidad de reducir el consumo energético y evitar sobrecalentamientos en los actuadores.

El diseño del circuito impreso de este subsistema se muestra en la Ilustración 68, el cual fue realizado en el software de Proteus. En la misma imagen podemos apreciar también las dimensiones finales de la placa, la cual se diseñó a una sola cara.



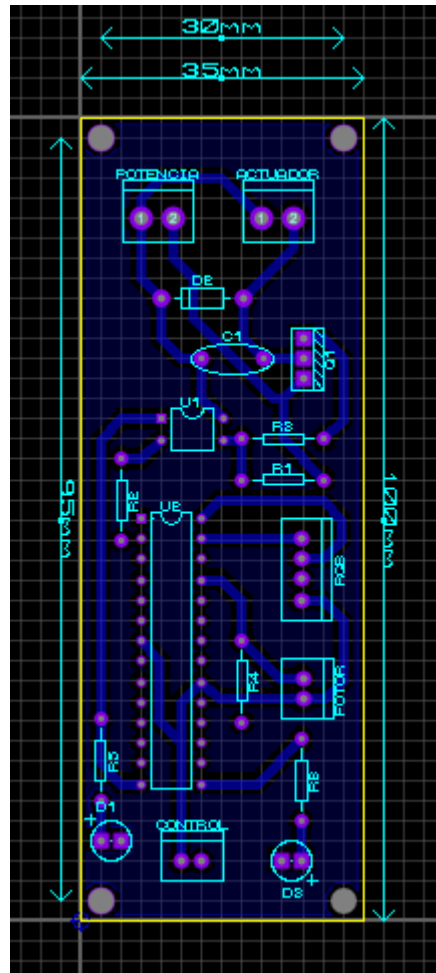
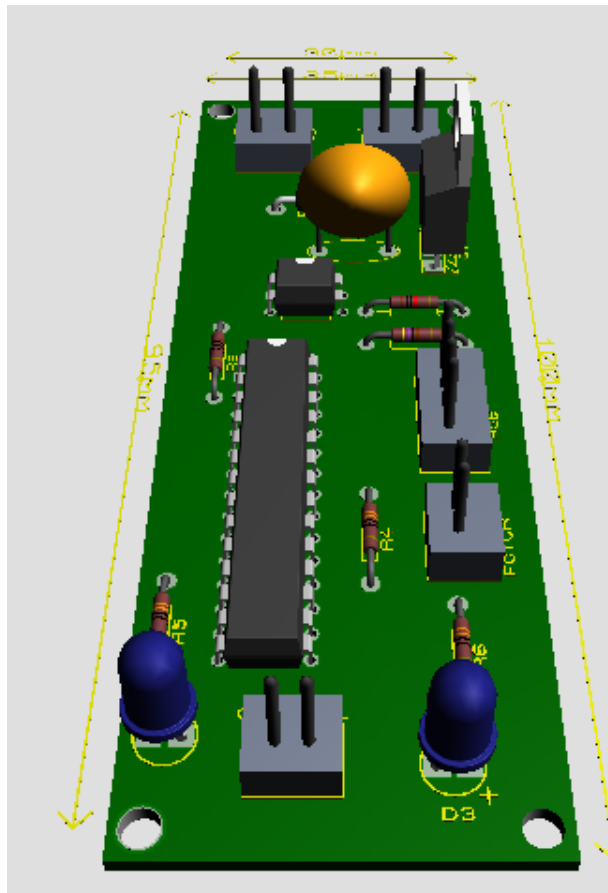


Ilustración 68 Diseño del circuito impreso del identificador de color en Proteus

Para tener la certeza de que las pistas y componentes añadidos cabrían perfectamente en el espacio designado, se realizó el modelo en 3D de la placa con el circuito impreso y los componentes montados, este modelo se realizó en el mismo software de Proteus y se muestra en la Ilustración 69.



*Ilustración 69 Modelo en 3D del circuito impreso con componentes montados realizado en Proteus*

Todo el proceso anterior se hizo también para el circuito de control de velocidad. A continuación, se presenta el código.

```
#include <LiquidCrystal.h>

int pot=A0;
int Switch=12;
unsigned long tiempo[2]={0,0}; // el encoder es de 20 pasos y completa la vuelta en el pulso 21
float DifTiempo=0;
float VelRPM=0, VelMS=0, VelKGHR=0, Radio=0.0508;
unsigned int VelMS_Int=0, VelKGHR_Int=0;
int cont=0;
int pinPWM=11;
int valorPWM=0, valorSwitch=0;
int Vec_Int=0; //Pin de interrupción (pin digital 2) Es el pin del encoder
LiquidCrystal lcd(8,7,6,5,4,3);

void setup() {
  pinMode(pinPWM,OUTPUT);
  pinMode(Switch,INPUT);
  lcd.begin(16,2);
  attachInterrupt(Vec_Int, velocidad, RISING);
}

void loop() {
  valorPWM=analogRead(pot)/4;
  valorSwitch=digitalRead(Switch);
  analogWrite(pinPWM,valorPWM);
  delay(10);
  lcd.setCursor(0,0);
  lcd.print("La velocidad es:");
  if(cont==0 && tiempo[1]>tiempo[0]){
```

```

    DifTiempo=(tiempo[1]-tiempo[0]); //Se multiplica por 2*pi rad y por 1000 para obtener rad/s
    VelMS=2*6283.185*Radio/DifTiempo; // y luego por el radio para m/s; Y por dos porque el tiempo tomado es de dos revoluciones
  }
  lcd.setCursor(0,1);
  if(valorSwitch==0){ //Se multiplica por 60 porque son los 60 s en un minuto
    //VelRPM=60000/DifTiempo; // Y se multiplica por 1000 porque el tiempo está en milisegundos
    VelMS_Int=round(VelMS);
    lcd.print(VelMS_Int);
    lcd.setCursor(2,1);
    lcd.print(" ");
    lcd.setCursor(12,1);
    lcd.print(" m/s");
  }
  if(valorSwitch==1){
    VelKGHR=VelMS*2160; //2160 es el factor para pasar de m/s a kg/hr por una sola fila
    VelKGHR_Int=round(VelKGHR);
    lcd.print(VelKGHR_Int);
    lcd.setCursor(12,1);
    lcd.print("kg/h");
  }
}

void velocidad(){
  if(cont==0){
    tiempo[0]=millis();
  }
  if(cont==40){
    tiempo[1]=millis();
    cont=-1;
  }
  cont=cont+1;
}

```

Ilustración 70 Código del circuito de control de velocidad

El funcionamiento del código anterior es tal que mediante interrupciones que detectan el flanco de subida en la entrada del sensor de velocidad gracias al *encoder*, aumenta un contador que cuando llega a 20 (número de pasos del *encoder* por vuelta) obtiene el valor en milisegundos que se requirió para dar una vuelta, con esa información y los factores previamente calculados, se puede pasar de esa velocidad angular, a una velocidad lineal de avance de la banda y para nuestro caso, una conversión a kg/h, esto con el conocimiento previo del flujo másico de frutos de café sobre la banda.

Estas dos conversiones están disponibles en la LCD gracias a un interruptor de dos tiros, el cual, dependiendo la posición, se muestra una conversión u otra sobre la pantalla.

De la misma forma que el circuito de control, se realizaron el diseño del circuito impreso y el modelo en 3D en Proteus, los resultados se muestran en la Ilustración 71 y la Ilustración 72 respectivamente.

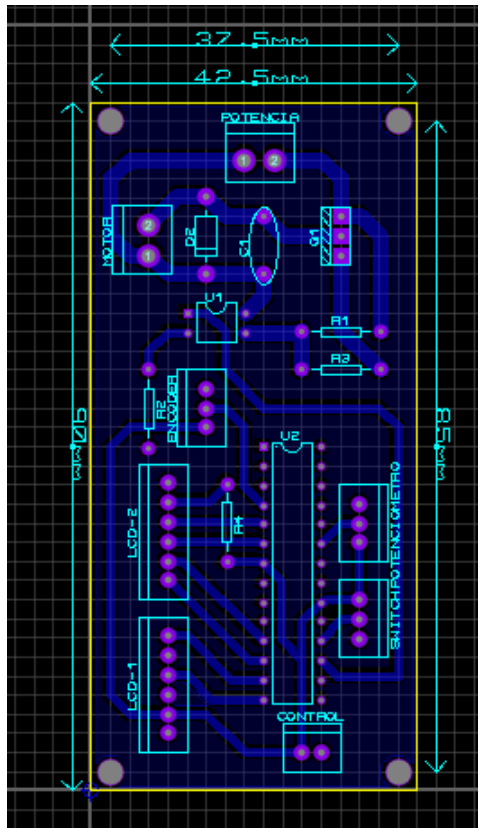


Ilustración 71 Diseño del circuito impreso del control de velocidad del motor

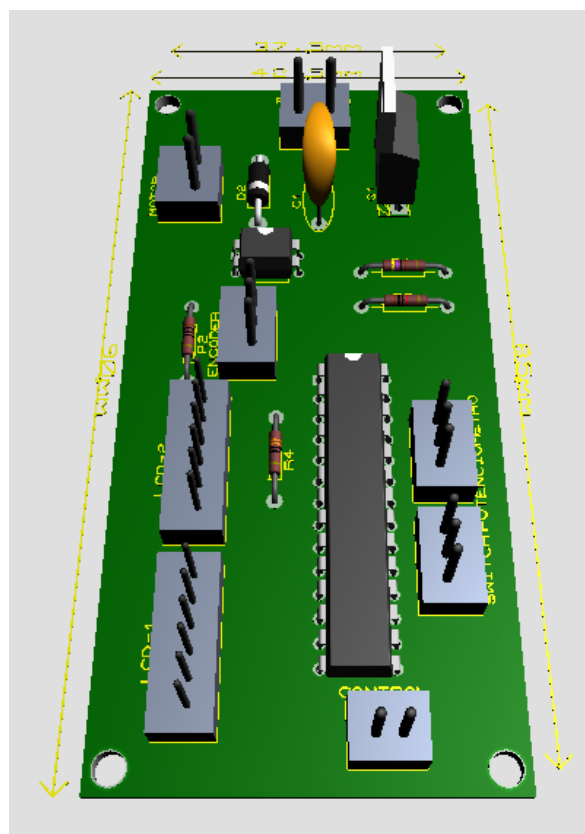
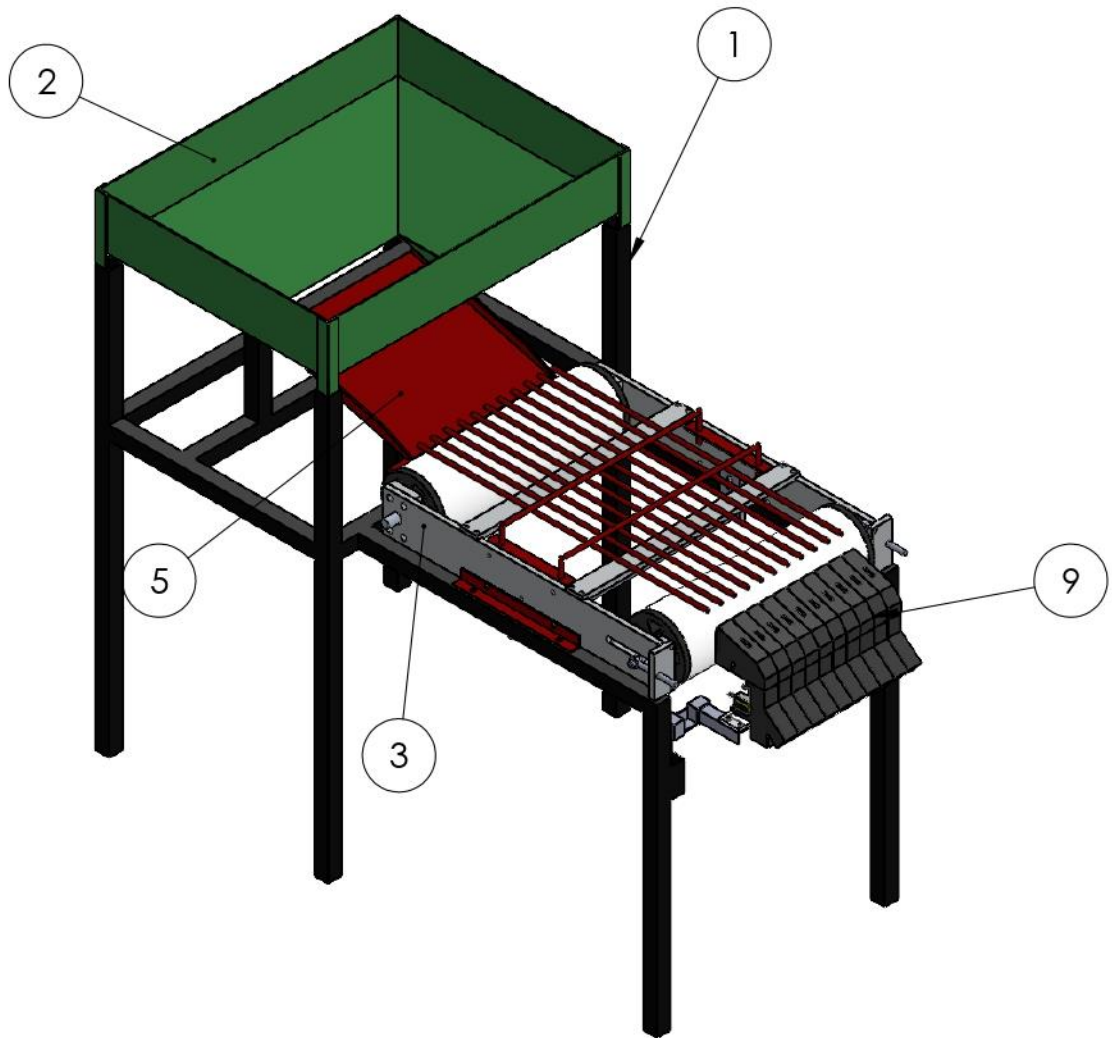


Ilustración 72 Modelo en 3D del circuito impreso del control de velocidad con componentes montados

## 7. Planos normalizados

Todos los planos que se presentan a partir de la página siguiente son de las piezas más relevantes del sistema, y son las medidas reales de la máquina ya implementada.

	4	3	2	1
	N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
F	1	Estructura		1
	2	Tolva		1
	3	SubsistemaBandaTransportadora		1
	4	SoporteResbaladilla		1
	5	Rasbaladilla		1
E	6	Extensores		2
	7	Extensores		2
	8	Extensores		2
	9	Subsistemaldentificado orSeparador		1




 Instituto Politécnico Nacional  
 Unidad Profesional Interdisciplinaria en  
 Ingeniería y tecnologías avanzadas



TÍTULO:

Ensamble de máquina

MATERIAL:

FECHA

29/05/2022

N.º DE PIEZA

A4

PESO:

ESCALA:1:20

HOJA 1 DE 17

4 3 2 1

F

F

E

E

D

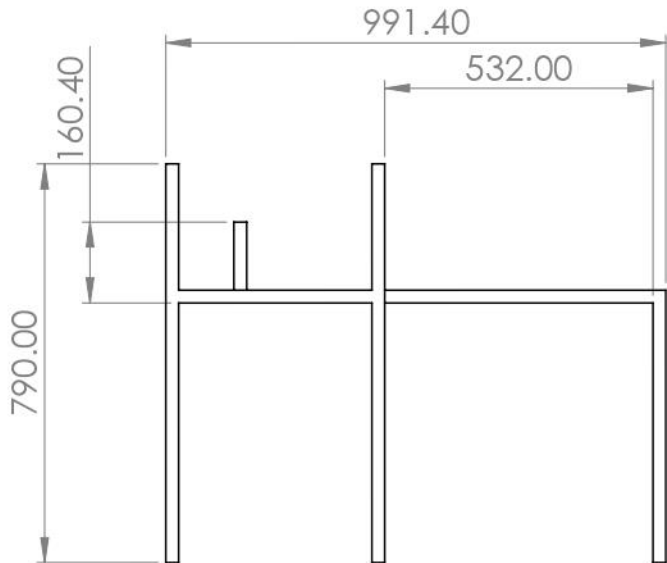
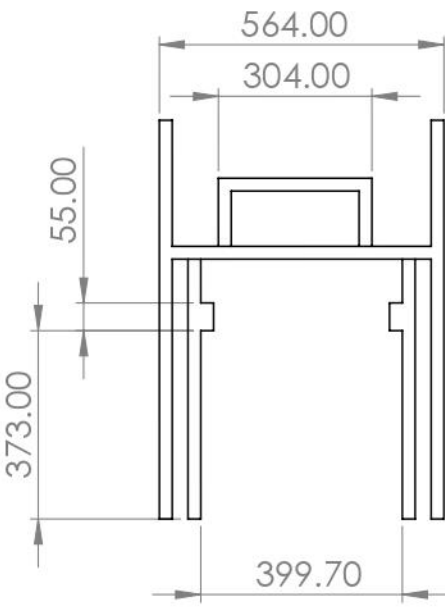
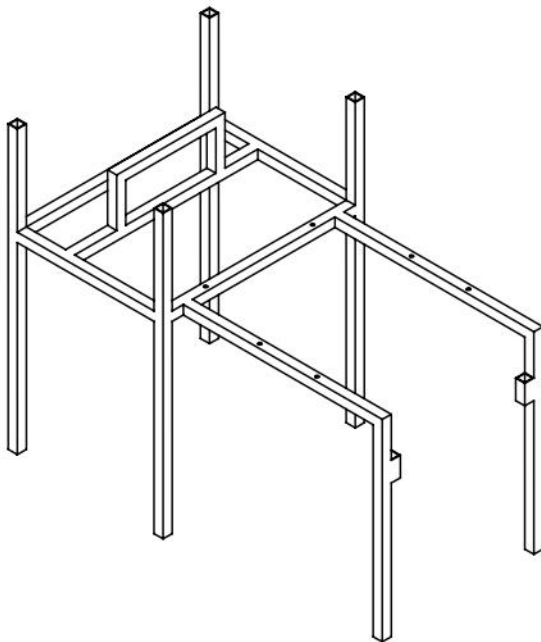
D

C

C

B

B



A

A

 Instituto Politécnico Nacional  
Unidad Profesional Interdisciplinaria en  
Ingeniería y tecnologías avanzadas



TÍTULO:  
**Estructura**

**PTR de 1"**  
MATERIAL:

FECHA  
**29/05/22**

N.º DE PIEZA  
**PIEZA 1**

**A4**

PESO:

ESCALA:1:15

HOJA 2 DE 17

4 3 2 1

4 3 2 1

F

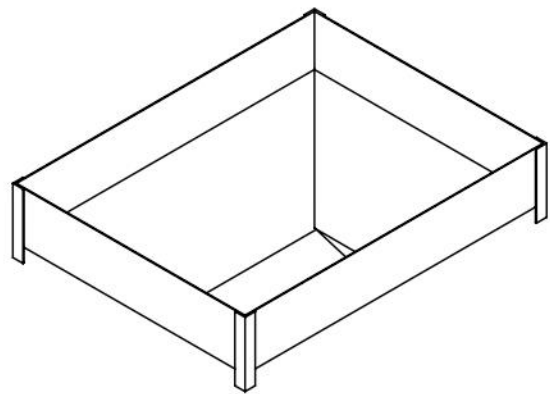
F

E

E

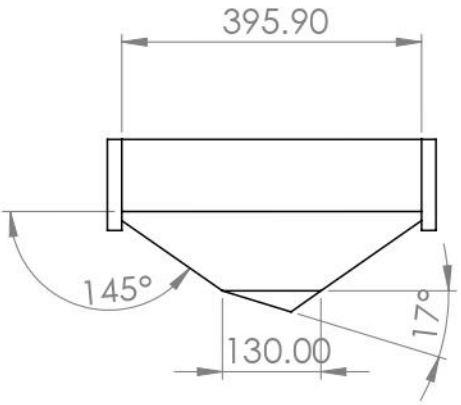
D

D



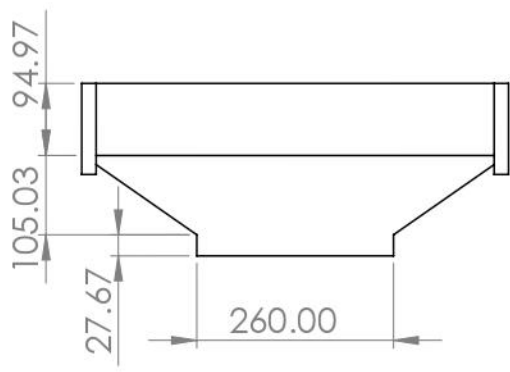
C

C



B

B



A

A


 Instituto Politécnico Nacional  
 Unidad Profesional Interdisciplinaria en  
 Ingeniería y tecnologías avanzadas



TÍTULO:  
**Tolva**

Lamina de acero  
 de 1/16  
 MATERIAL:

FECHA  
 29/05/22

N.º DE PIEZA  
 Pieza 2

A4

PESO:

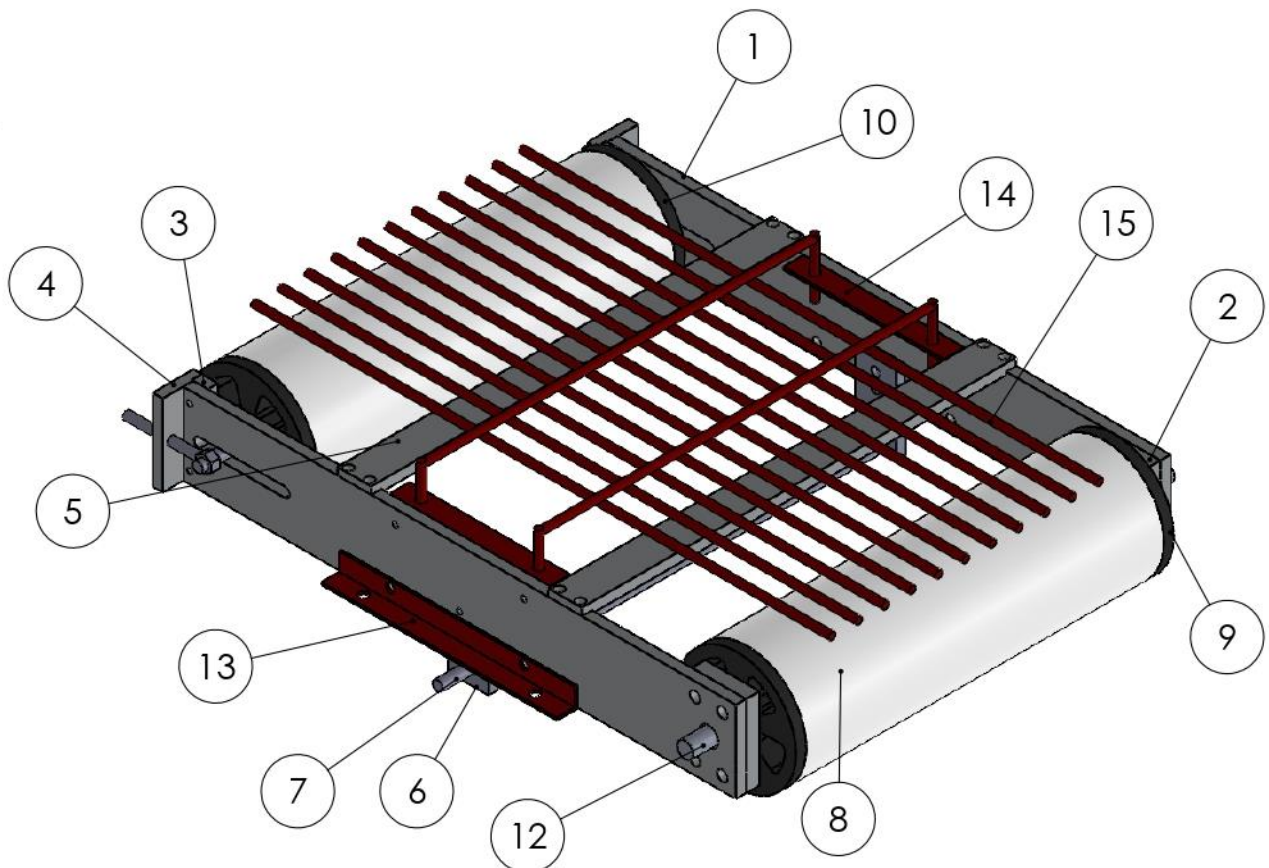
ESCALA:1:10

HOJA 3 DE 17

4 3 2 1



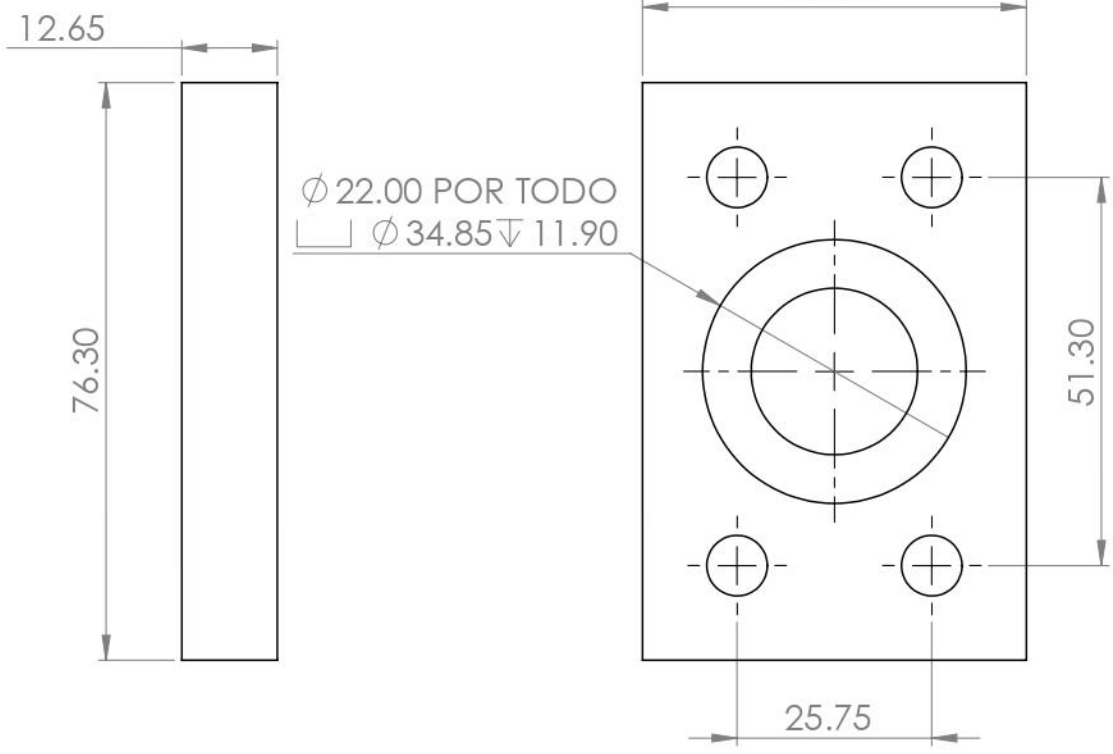
	4	3	2	1	
	N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	
F	1	Larguero		2	F
	2	Chumacera		2	
	3	ConectorTensor		2	
	4	Tensor		2	
E	5	Travesaño		2	E
	6	SoporteRodilloTensor		2	
	7	RodilloSoporte		2	
	8	RodilloPVC		2	
	9	TaponMotriz		2	
	10	TaponRetorno		2	
D	11	TornilloTensor		2	D
	12	EjeRodilloMotriz		1	
	13	SoporteBanda		2	
	14	SoporteCarriles		2	
	15	CarrilesBanda		1	



Larguero en escala 1:4



Chumacera en escala 1:1



Instituto Politécnico Nacional  
 Unidad Profesional Interdisciplinaria en  
 Ingeniería y tecnologías avanzadas



TÍTULO:  
 Larguero y chumacera

Aluminio y acero

FECHA:  
 29/05/22

N.º DE PIEZA:  
 Piezas 3.1 y 3.2

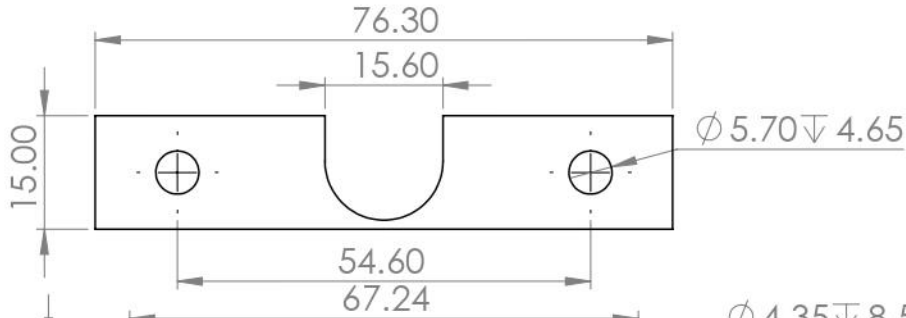
A4

PESO:

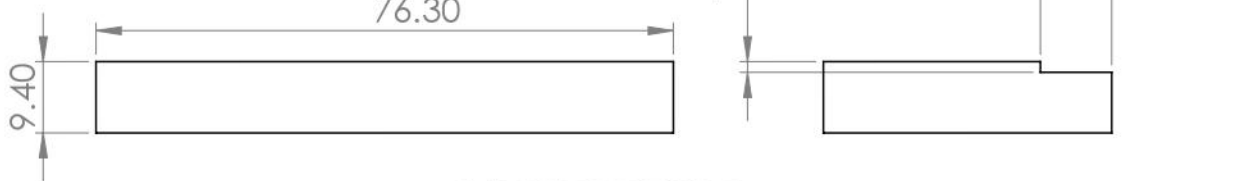
ESCALA:

HOJA 5 DE 17

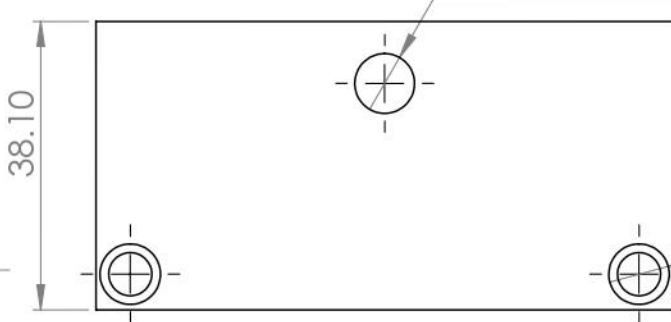
Conector tensor en escala 1:1



Tensor en escala 1:1

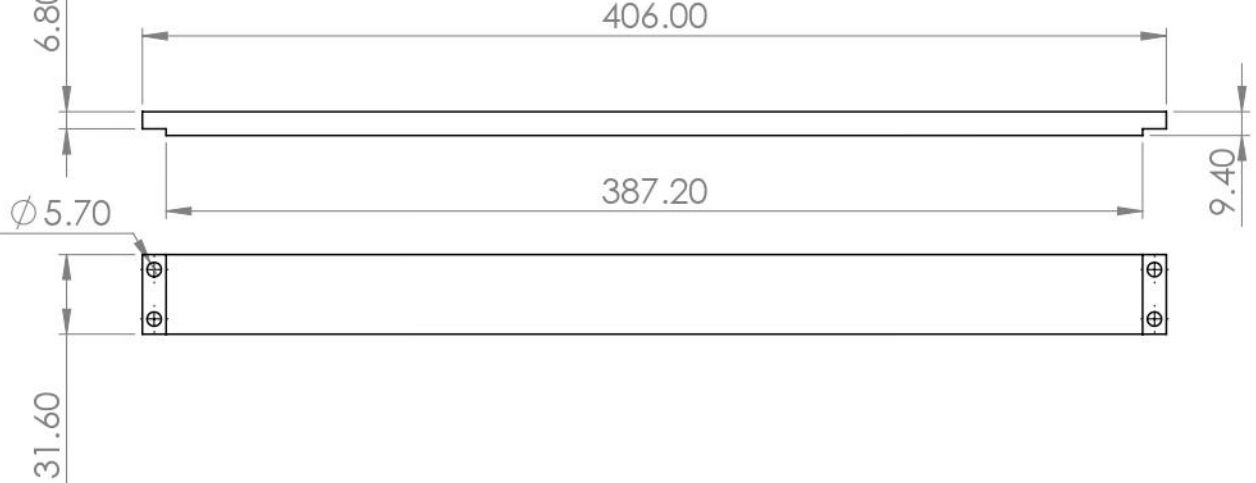


$\phi 7.90$  POR TODO



$\phi 5.70$  POR TODO  
 $\nabla 4.75$

Travesaño en escala 1:3



TÍTULO:

Tensor y travesaño

N.º DE PIEZA

Pieza 3.3, 3.4 y 3.5

A4

Aluminio

MATERIAL:

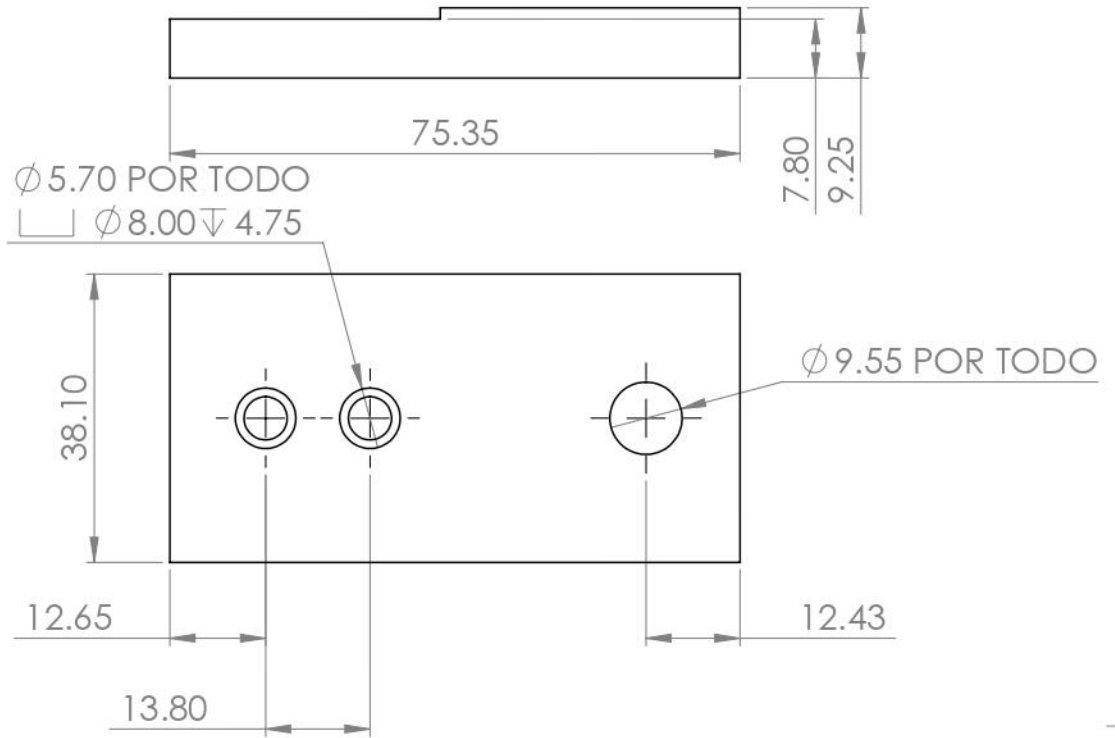
FECHA

29/05/22

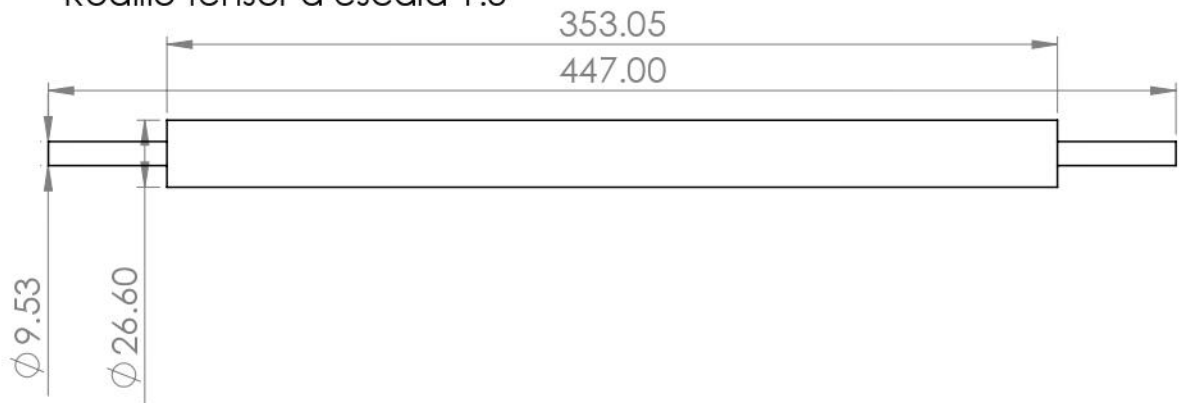
ESCALA:

HOJA 6 DE 17

Soporte de rodillo tensor a escala 1:1



Rodillo tensor a escala 1:3




 Instituto Politécnico Nacional  
 Unidad Profesional Interdisciplinaria en  
 Ingeniería y tecnologías avanzadas



TÍTULO:

Soporte y rodillo tensor

Aluminio

MATERIAL:

FECHA

29/05/22

N.º DE PIEZA

Pieza 3.6 y 3.7

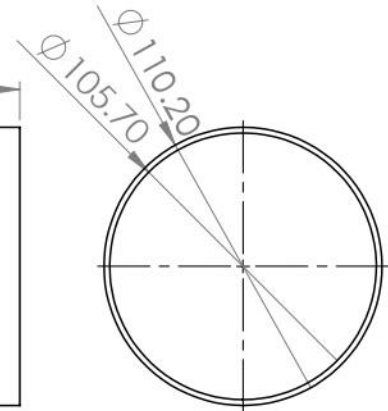
A4

PESO:

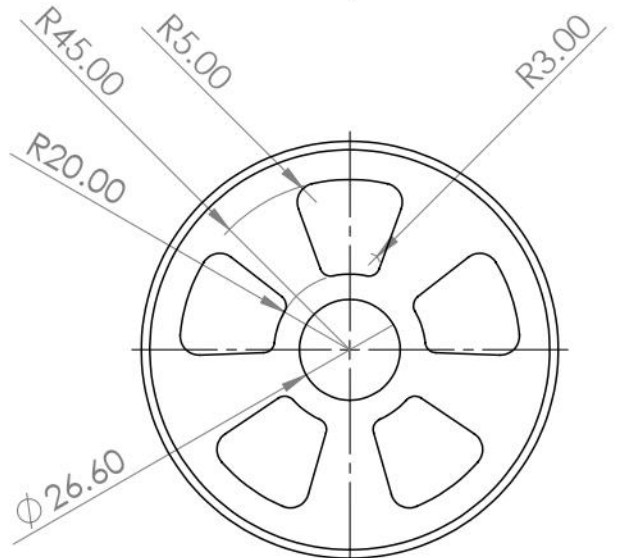
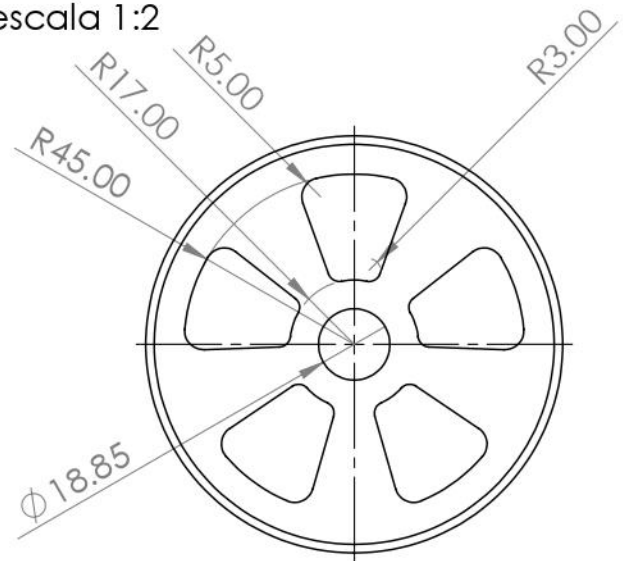
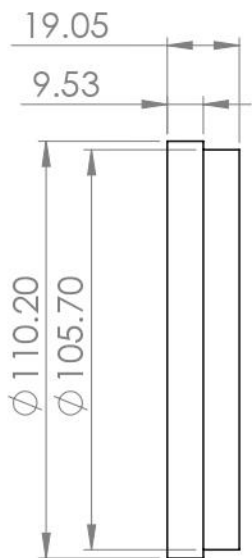
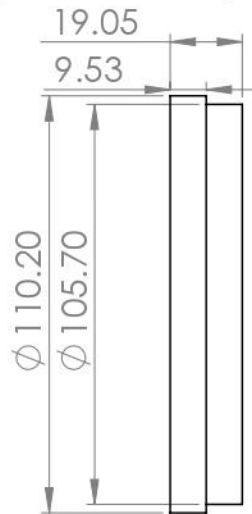
ESCALA:

HOJA 7 DE 17

Tuvo PVC a escala 1:3  
334.00



Tapones motriz y de retorno a escala 1:2



 Instituto Politécnico Nacional  
Unidad Profesional Interdisciplinaria en  
Ingeniería y tecnologías avanzadas



TÍTULO:

Rodillo PVC, tapon motriz y  
tapon retorno

PVC y PLA

MATERIAL:

FECHA

29/05/22

N.º DE PIEZA

Piezas 3.8, 3.9 y 3.10

A4

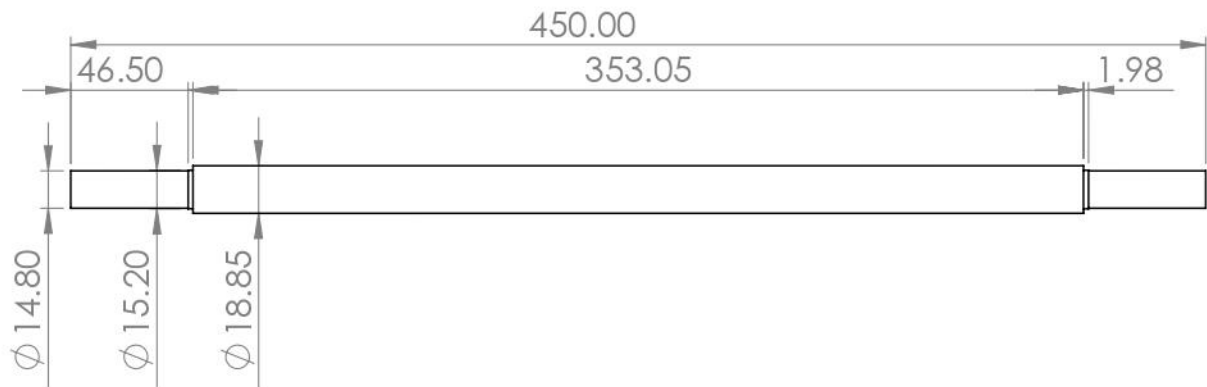
PESO:

ESCALA:

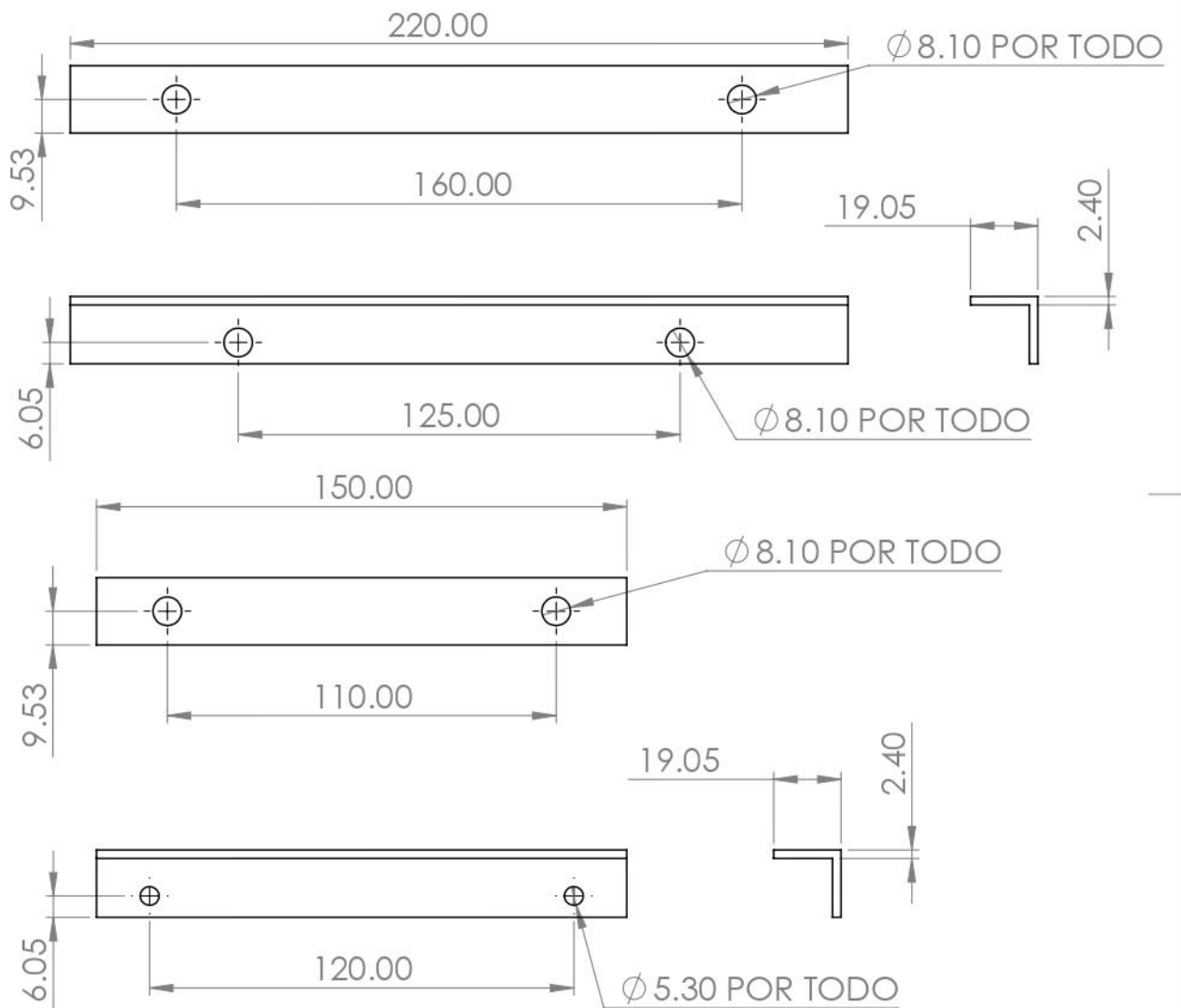
HOJA 8 DE 17



Rodillo motriz a escala 1:3



Soporte banda y soporte carriles a escala 1:2



 Instituto Politécnico Nacional  
Unidad Profesional Interdisciplinaria en  
Ingeniería y tecnologías avanzadas



TÍTULO:

Eje rodillo motriz y soportes

Aluminio y acero

MATERIAL:

FECHA

29/05/22

N.º DE PIEZA

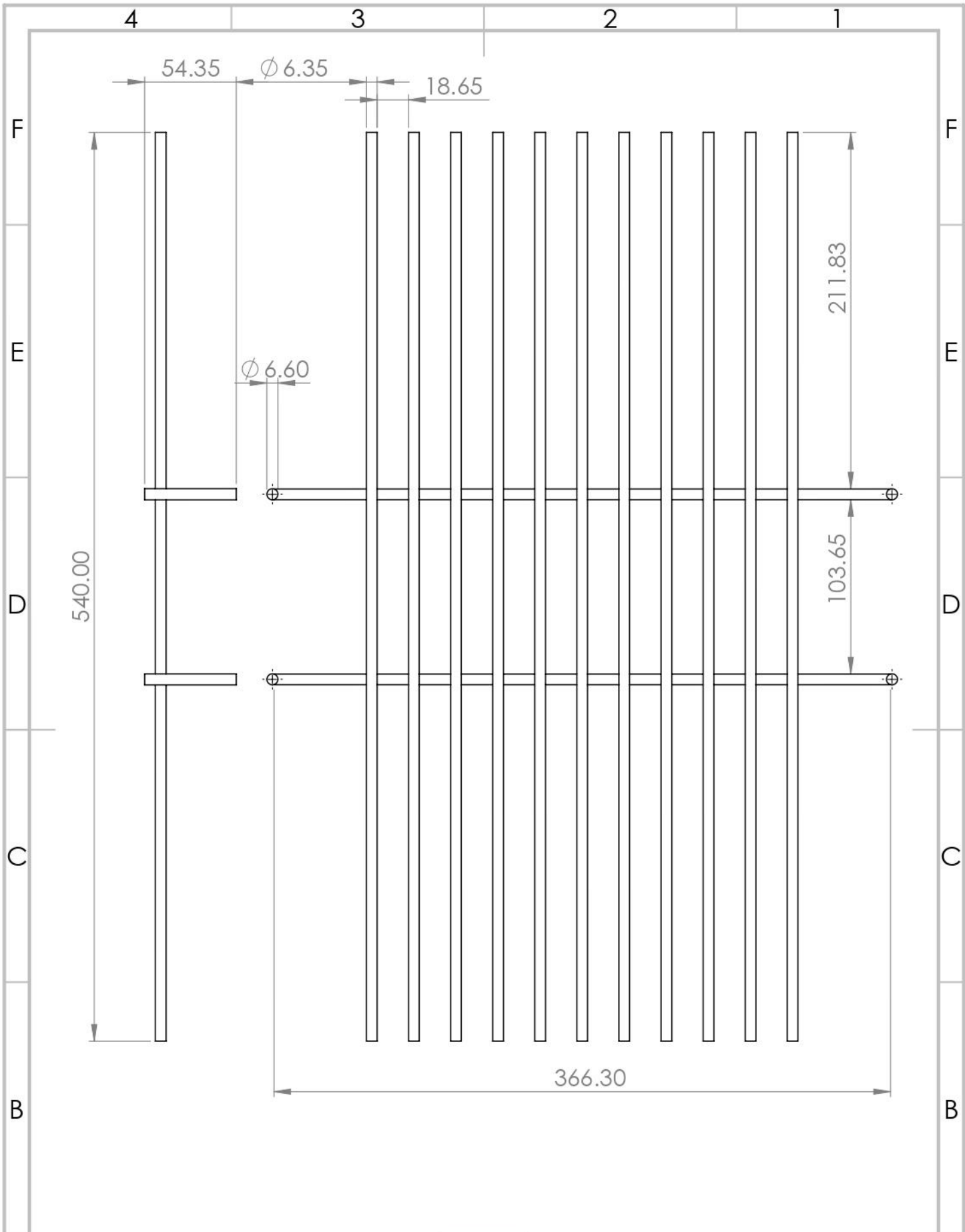
Piezas 3.12, 3.13 y 3.14

A4

PESO:

ESCALA: 1:5

HOJA 9 DE 17

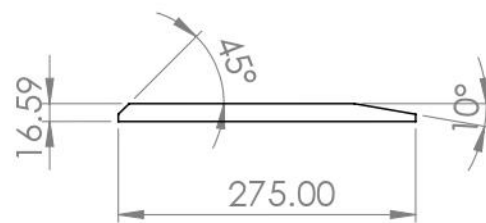
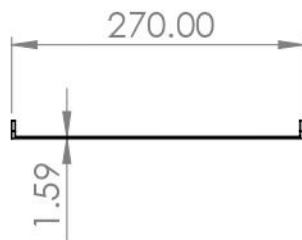
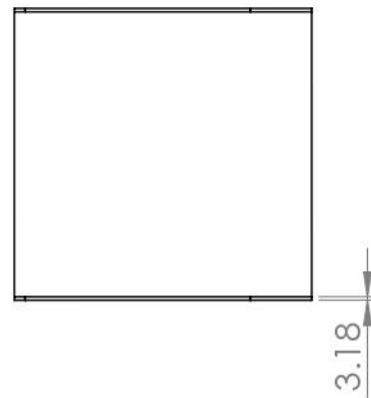
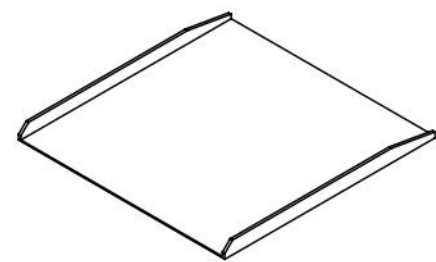



 Instituto Politécnico Nacional  
 Unidad Profesional Interdisciplinaria en  
 Ingeniería y tecnologías avanzadas



TÍTULO:  
Carriles banda

A	MATERIAL: Acero	FECHA: 29/05/22	N.º DE PIEZA: Pieza 3.15	A4
	PESO:		ESCALA: 1:5	HOJA 10 DE 17



 Instituto Politécnico Nacional  
Unidad Profesional Interdisciplinaria en  
Ingeniería y tecnologías avanzadas



TÍTULO:

Resbaladilla

Lamina de acero  
de 1/16

FECHA

29/05/22

N.º DE PIEZA

Pieza 5

A4

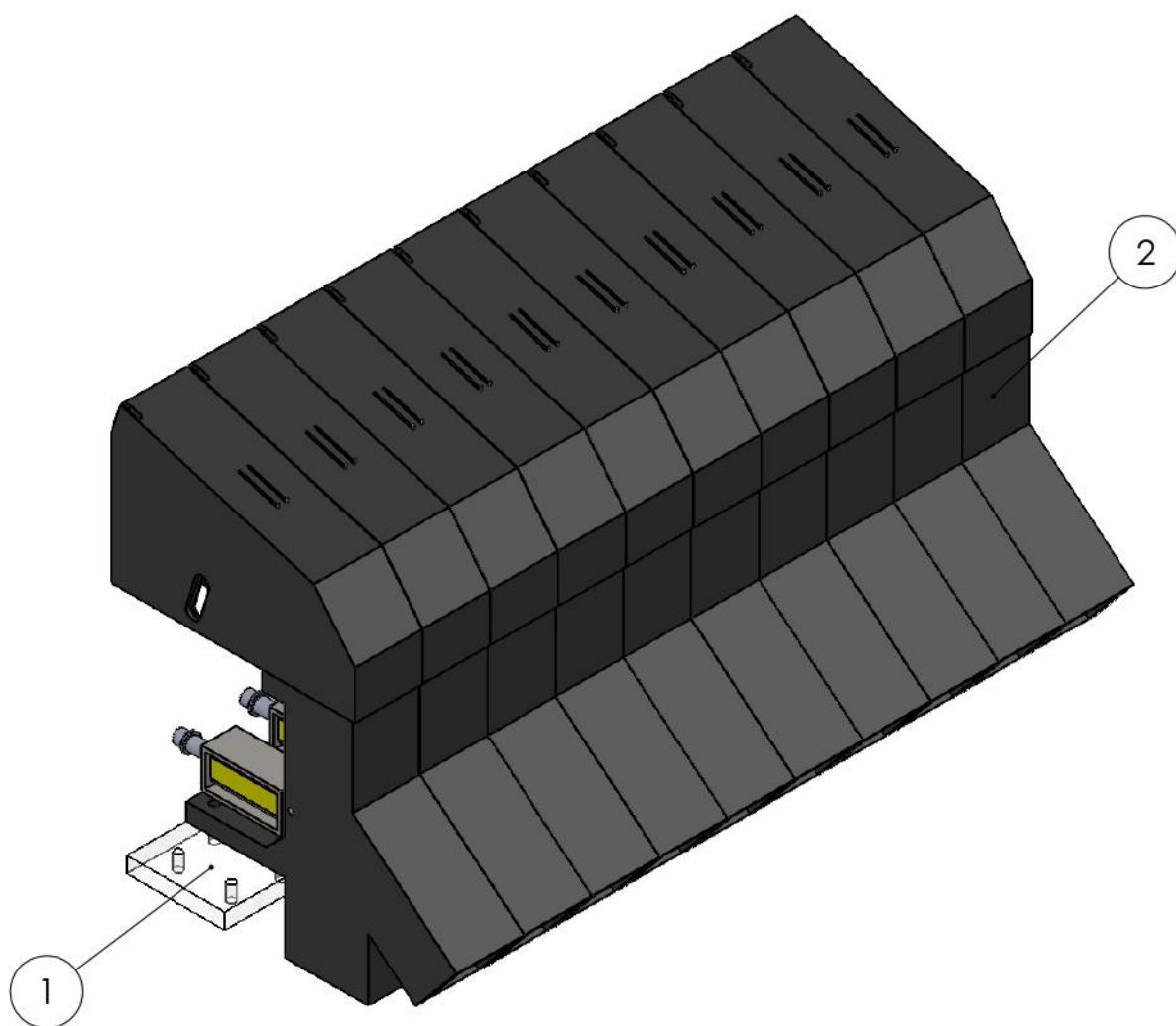
PESO:

ESCALA:1:7

HOJA 11 DE 17



4	3	2	1
N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
1	soporte de separador		1
2	SeparadorIndividual		10




 Instituto Politécnico Nacional  
 Unidad Profesional Interdisciplinaria en  
 Ingeniería y tecnologías avanzadas



TÍTULO:

Ensamble identificador y  
separador

PLA

MATERIAL:

FECHA

29/05/22

N.º DE PIEZA

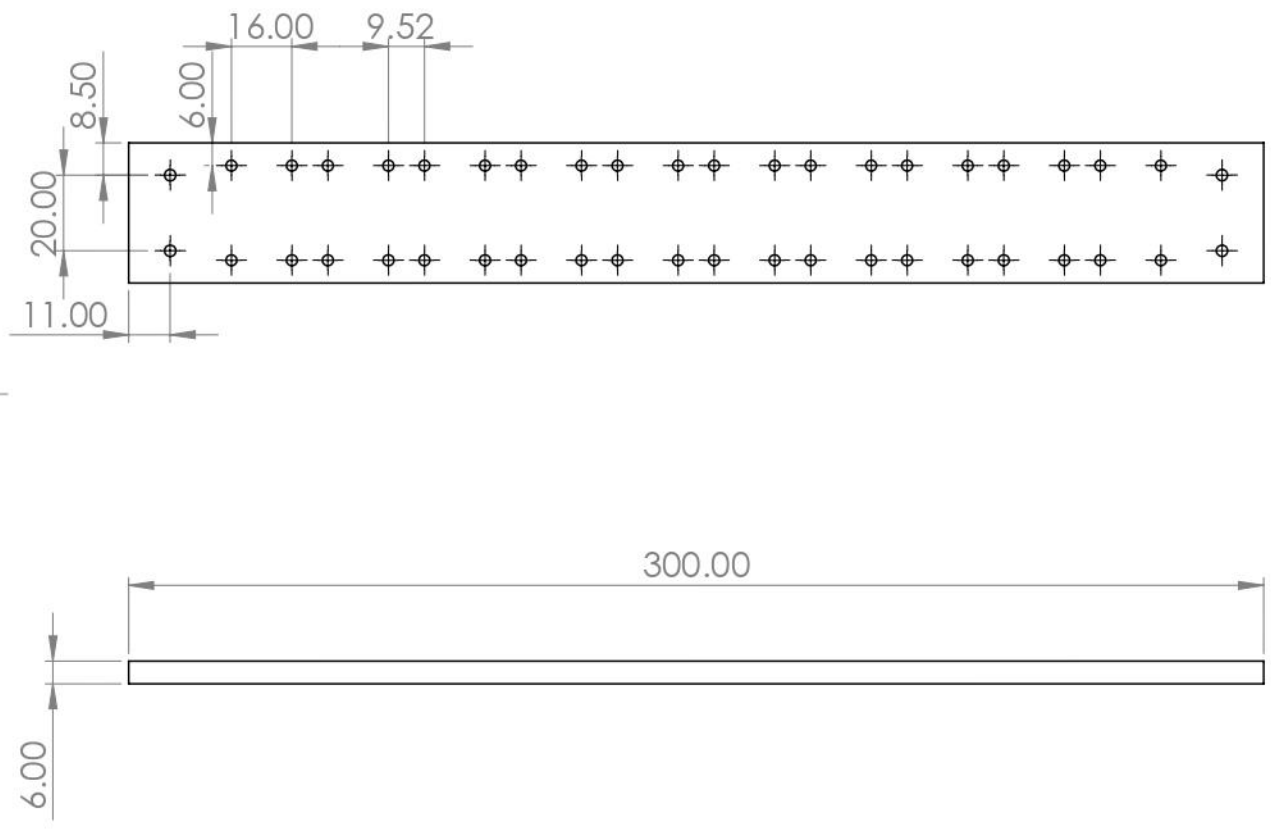
Pieza 9

A4

PESO:

ESCALA: 1:2

HOJA 12 DE 17




 Instituto Politécnico Nacional  
 Unidad Profesional Interdisciplinaria en  
 Ingeniería y tecnologías avanzadas



TÍTULO:  
**Soporte separador**

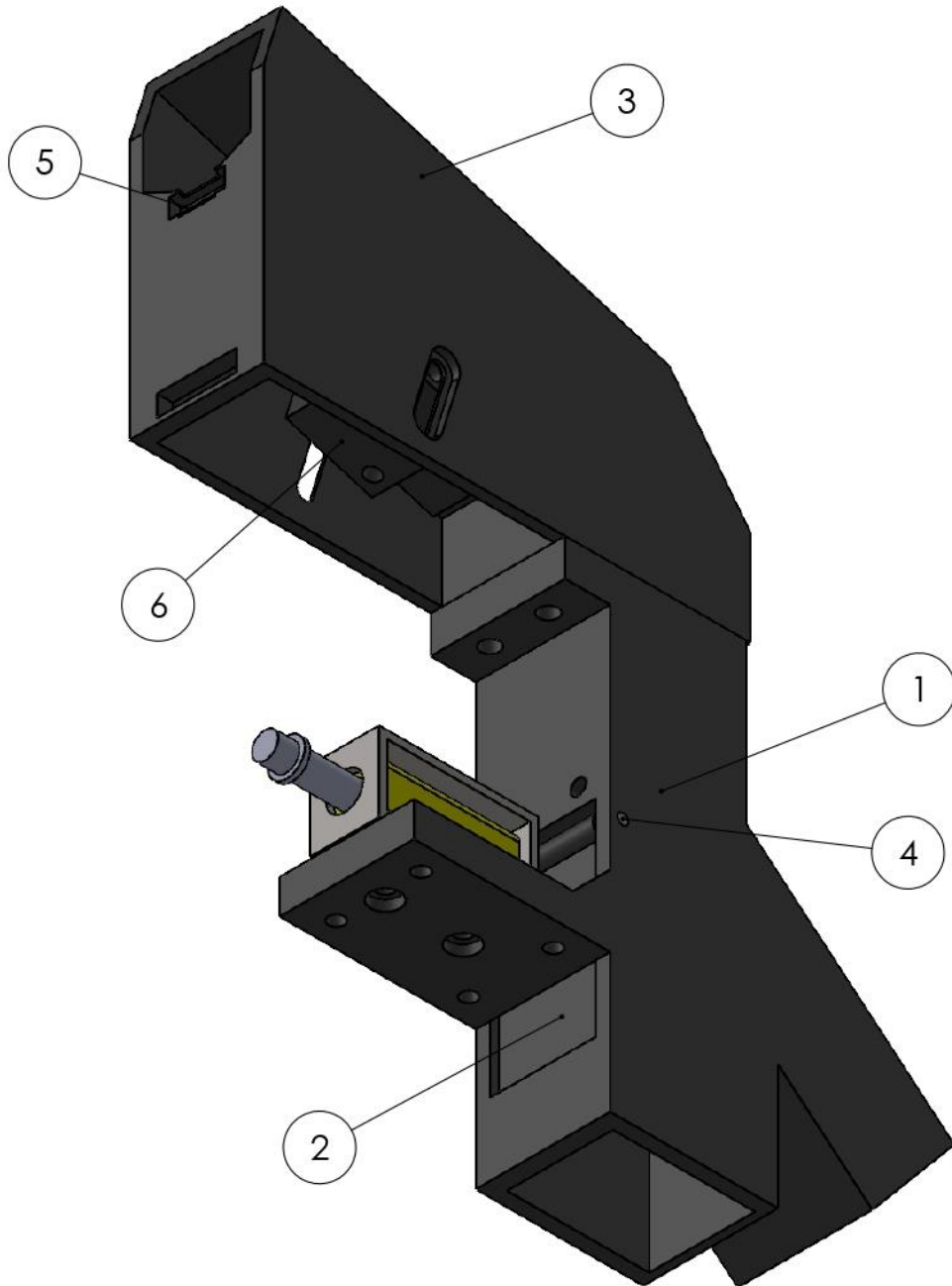
MATERIAL:  
**Acrilico**  
 PESO:

FECHA:  
**29/05/22**

N.º DE PIEZA:  
**Pieza 9.1**  
 ESCALA: 1:3

A4  
 HOJA 13 DE 17

4	3	2	1
N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
1	BaseSeparador		1
2	Compuerta		1
3	Ducto		1
4	PernoCompuerta		1
5	Cristal		1
6	Soporte sensor de color		1




 Instituto Politécnico Nacional  
 Unidad Profesional Interdisciplinaria en  
 Ingeniería y tecnologías avanzadas



TÍTULO:

Ensamble del identificador y searador

PLA

MATERIAL:

FECHA

29/05/22

N.º DE PIEZA

Pieza 9.2

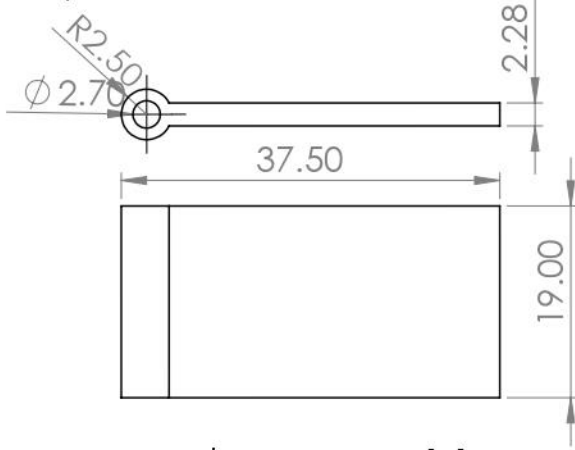
A4

PESO:

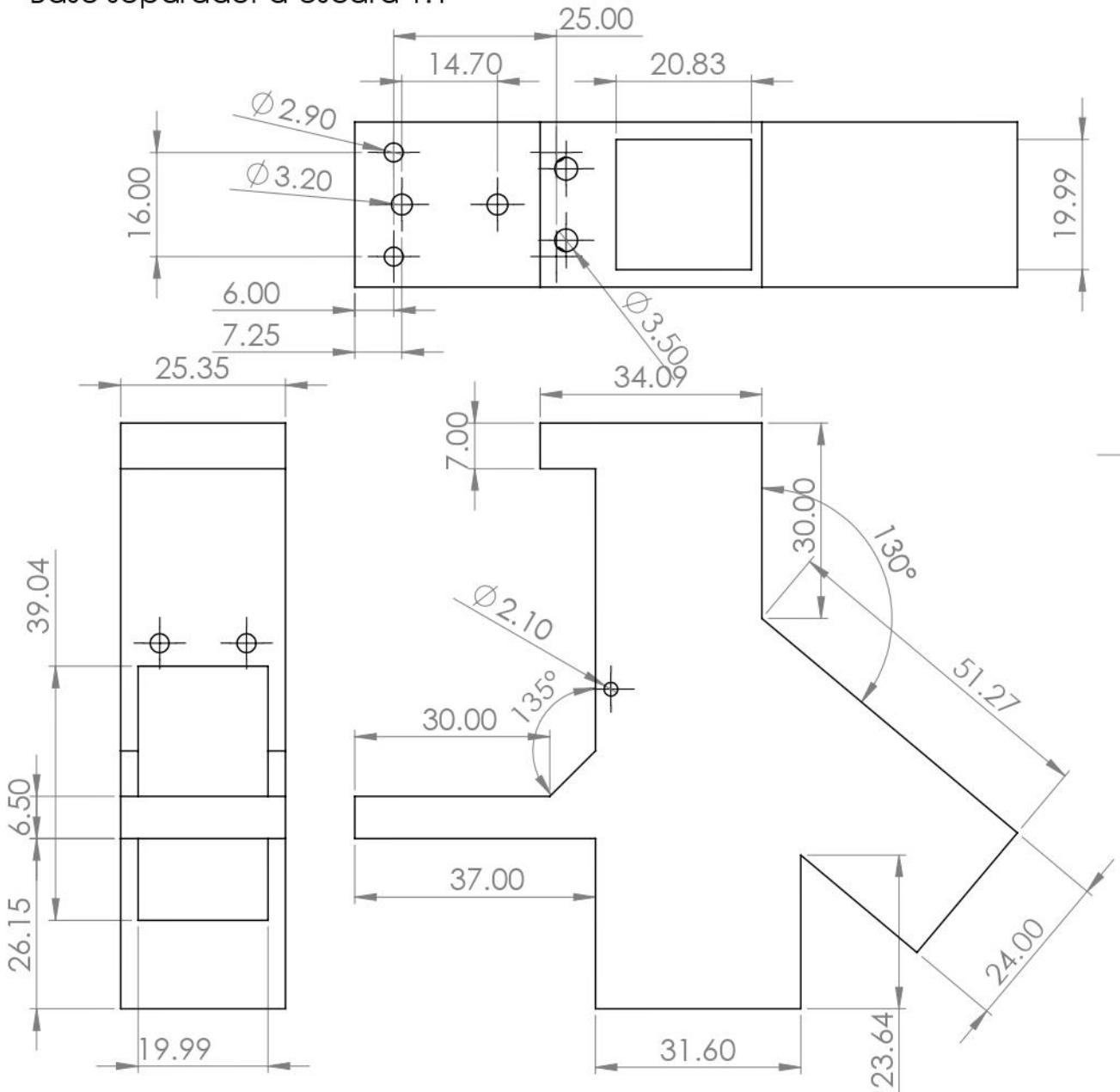
ESCALA: 1:5

HOJA 14 DE 17

Compuerta a escala 2:1.5



Base separador a escala 1:1




 Instituto Politécnico Nacional  
 Unidad Profesional Interdisciplinaria en  
 Ingeniería y tecnologías avanzadas



TÍTULO:

Separador y compuerta

PLA

MATERIAL:

FECHA

29/05/22

N.º DE PIEZA

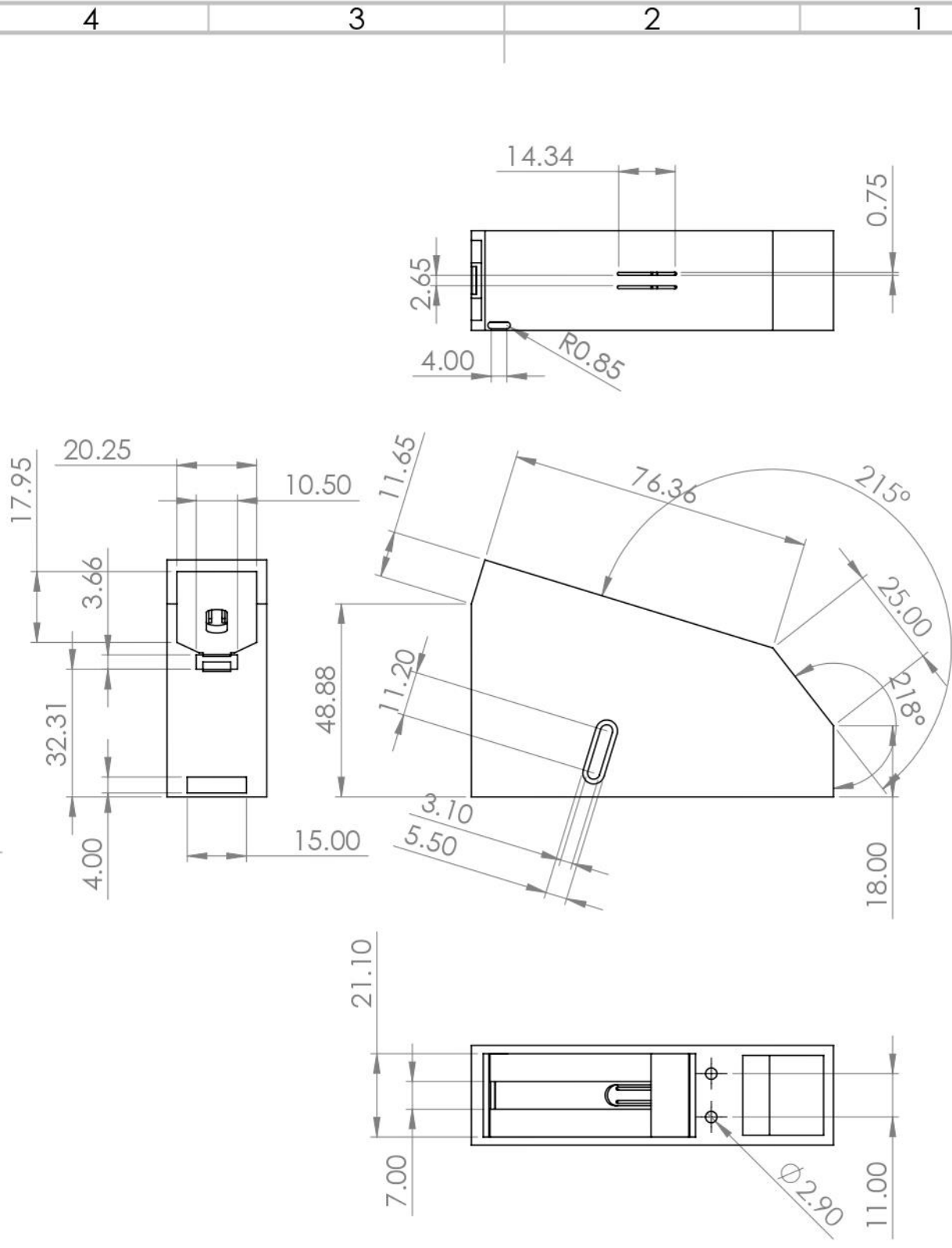
Piezas 9.2.1 y 9.2.2

A4

PESO:

ESCALA:

HOJA 15 DE 17



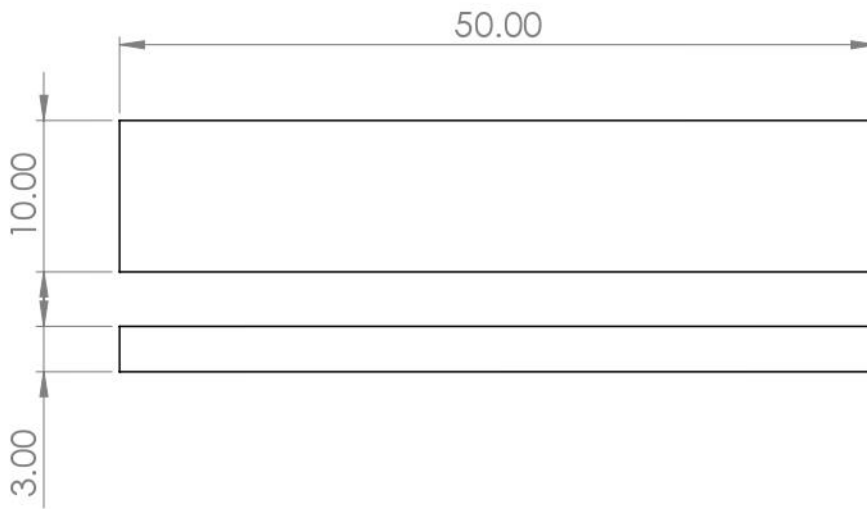

 Instituto Politécnico Nacional  
 Unidad Profesional Interdisciplinaria en  
 Ingeniería y tecnologías avanzadas



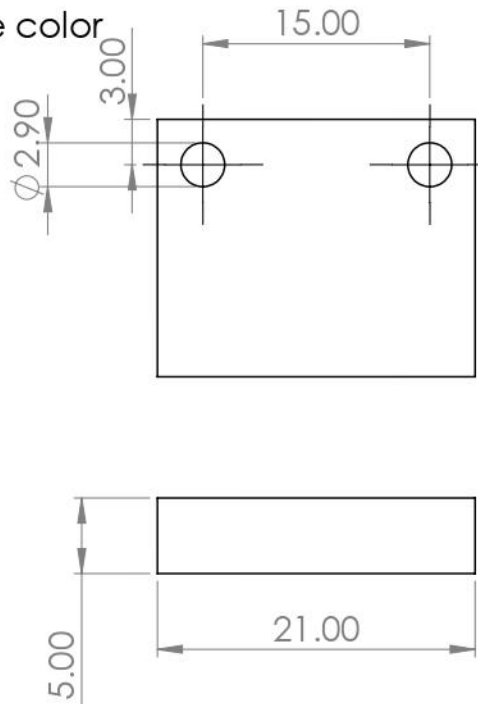
TÍTULO:  
Identificador

MATERIAL: PLA	FECHA: 29/05/22	N.º DE PIEZA: Pieza 9.2.3	A4
PESO:		ESCALA: 1:5	HOJA 16 DE 17

Cristal



Soporte sensor de color



Instituto Politécnico Nacional  
Unidad Profesional Interdisciplinaria en  
Ingeniería y tecnologías avanzadas



TÍTULO:

Soporte sensor y cristal

PLA y cristal

MATERIAL:

FECHA

29/05/22

N.º DE PIEZA

Pieza 9.2.5 y 9.2.6

A4

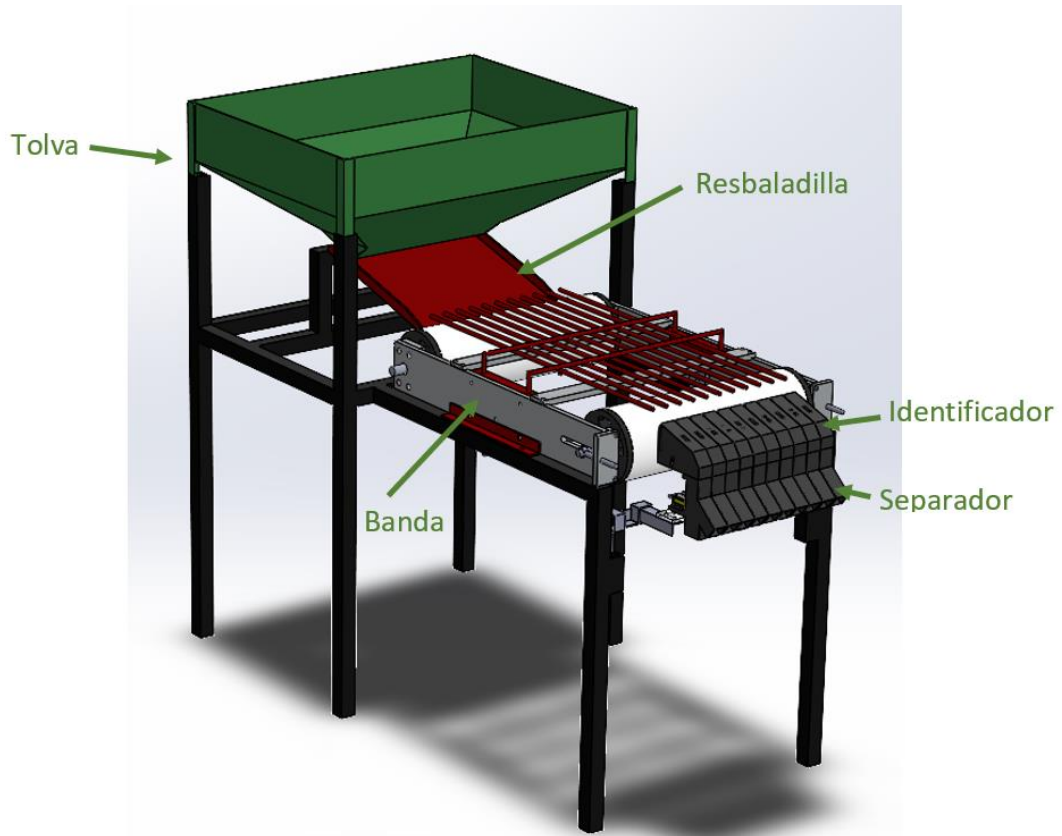
PESO:

ESCALA: 2:1

HOJA 17 DE 17

## 7.1 Integración de subsistemas

Todos los subsistemas anteriores deben poder unirse para trabajar en completa sinergia desde el alimentador hasta el separador, la Ilustración 73 muestra el ensamblaje de todos estos subsistemas en conjunto.



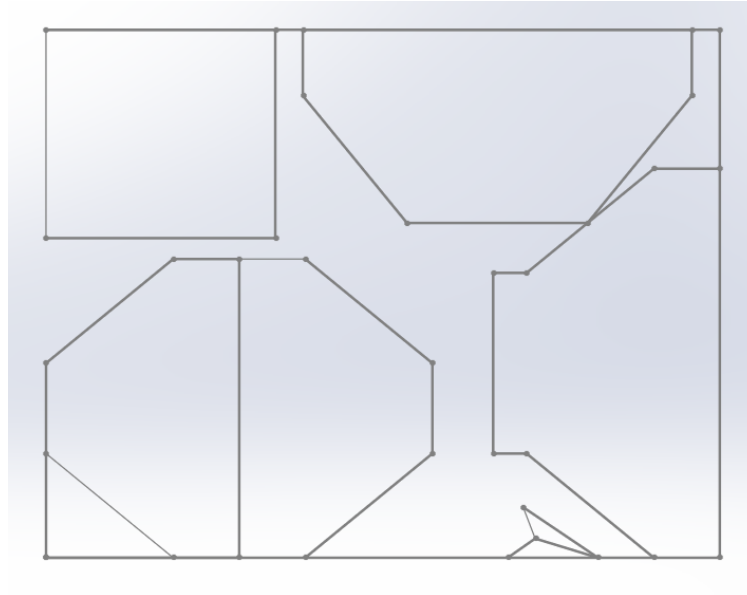
*Ilustración 73 Integración de subsistemas*



## 8. Implementación

### 8.1 Construcción de la tolva

Para la construcción de la tolva se ocupa una lámina de acero unida por remaches. Las piezas cortadas en la lámina para la tolva y la resbaladilla son las mostradas en la Ilustración 74.



*Ilustración 74 Piezas de la tolva*

Una vez cortadas las piezas se doblan para conformar la estructura mostrada a continuación.



*Ilustración 75 Tolva unida por remaches*



Una vez construida la tolva se realiza el soldado de toda la estructura, como se muestra en las ilustraciones siguientes.



*Ilustración 76 Soldado de estructura principal de la máquina*

La altura de la estructura se propuso pensando en poder colocar en el recibidor final una caja o cubeta. La estructura con la tolva montada se muestra en la Ilustración 77.



*Ilustración 77 Estructura de la máquina y tolva instalada*

Con el fin de mejorar la presentación de la máquina se aplica pintura a la misma, no sin antes aplicar una capa de primario a todas las superficies para evitar oxidación.



*Ilustración 78 Aplicación de primario a la estructura*



*Ilustración 79 Estructura y tolva pintadas*



## 8.2 Construcción del transportador de la banda

Una vez hecho esto se realiza el maquinado de las piezas con las máquinas que la escuela nos proporciona.



*Ilustración 80 Maquinado de largueros de la banda*



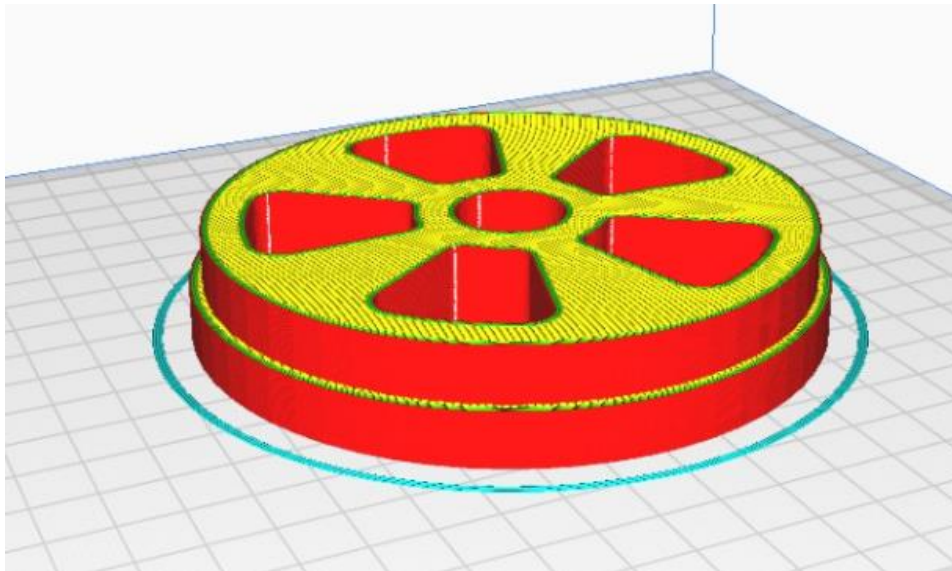
*Ilustración 81 Largueros de la banda*

Para el rodillo motriz de la banda fue necesario el maquinado del eje, esto se hace considerando el diámetro interior de los rodamientos que lo soportarán y el acoplamiento del motor.



*Ilustración 82 Maquinado del eje del rodillo motriz*

Así mismo, se imprimen con material PLA las tapas de los tubos de PVC buscando que queden exactas para que entren a presión.



*Ilustración 83 Preimpresión de tapas de rodillos*

Una vez maquinadas todas las piezas se ensambla la banda, quedando como se muestra a continuación.



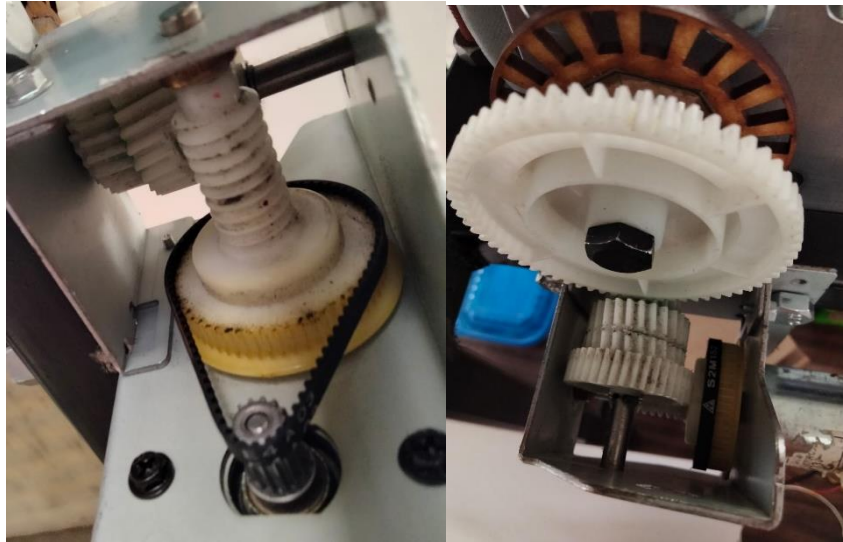
*Ilustración 84 Ensamble de la banda transportadora*



*Ilustración 85 Ensamble de la banda pintada*

Se realiza el acoplamiento del motor a la banda, la caja de engranes utilizada es la mostrada en la siguiente ilustración.





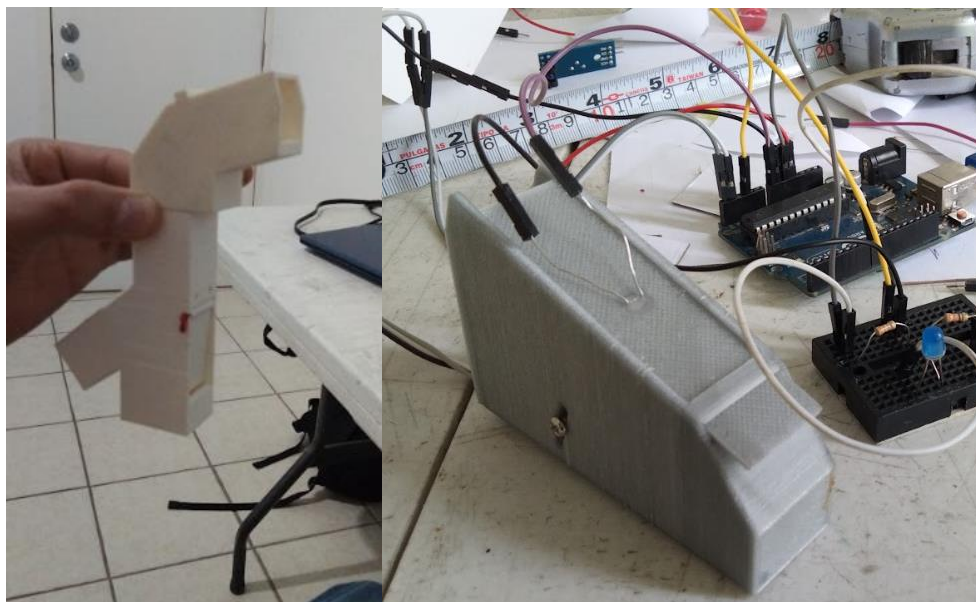
*Ilustración 86 Caja de engranes para el accionamiento de la banda*

Una vez teniendo esto se hacen las mediciones de velocidad correspondiente y se obtiene que la velocidad máxima de la banda es de 26mm/s, que es solo un poco mayor a lo calculado.

### **8.3 Implementación de identificadores y separadores**

Para esta fase, se realizan diversas pruebas modificando poco a poco la geometría del identificador hasta conseguir el resultado esperado.

Los prototipos se muestran en la ilustración de abajo.



*Ilustración 87 Prototipos de identificador de color*

Una vez alcanzado el objetivo esperado se imprimen los identificadores y separadores en el material final.



*Ilustración 88 Identificador y separador acoplados*

Como se puede observar en la imagen anterior, no solo cambió la geometría del modelo final en comparación con los prototipos, sino que también el color, esto se hizo con la finalidad de que la luz exterior afectara lo menos posible al sistema identificador y que la luz interna no pueda salir de este dispositivo.

Como es de esperarse, estas modificaciones cambian notoriamente las condiciones con las que fueron realizadas las pruebas preliminares, es por ello por lo que se hacen modificaciones, o lo que llamaremos, calibraciones del sistema identificador con las nuevas condiciones del entorno.

#### **8.4 Comparación y selección de modelos finales del fruto de café**

Como se menciona en la parte final de la sección “Diseño eléctrico”, la cosecha del café en México inicia en el mes de septiembre y concluye en el mes de marzo del siguiente año, por lo tanto, el resto del ciclo anual, es difícil conseguir café fruto y mucho más difícil conseguirlo maduro (rojo); por esta razón es necesario seleccionar modelos alternativos a los frutos reales con características similares, todo esto con el fin de que la pruebas realizadas se acerquen lo más posible a un escenario con frutos reales.



*Ilustración 89 Caramelos como modelos alternos al fruto de café*

Para ello se opta por utilizar caramelos como los mostrados en la Ilustración 89, estos modelos se seleccionaron con base en las características más importantes que competen en este trabajo y que podrían comprometer el funcionamiento de la máquina, estas características, así como la comparación de los modelos finales y reales se muestran en la Tabla 29.



Tabla 29 Comparación de características notables entre el modelo real y alterno

Características	Fruto real	Modelo alterno	Modelo alterno vs Fruto real		
			Diferencia cualitativa	Diferencia cuantitativa	
Alto	1.5 cm	1.61 cm	Más grande	7.33 %	
Largo	1.4 cm	1.5 cm	Más grande	6.66 %	
Ancho	1.5 cm	1.5 cm	Iguales	0 %	
Peso	1.5 g	2.56 g	Más pesados	70.66 %	
Información RGB (color)	Verde	[31,56,17]	[16,35,16]	Tonalidad más clara	[5.88 %,8.23 %,0.39 %]
	Rojo	[139,50,34]	[30,15,13]	Tonalidad más clara	[42.75%,13.72%,8.23%]

Los datos de peso, largo, ancho y peso capturados en la tabla anterior de los frutos reales, se obtuvieron de la sección “Características físicas de los frutos de café” (tanto los datos del fruto real como el de los modelos alternos fueron tomados de los máximos obtenidos) mientras que los datos de color de los frutos reales se obtuvieron de la sección “Identificación de color”; debido a que en esta última sección se presentan datos de tonalidades de verde y rojo, se tomó como referencia una tonalidad intermedia de cada uno de los colores (verde y rojo).

Los datos de peso, largo, ancho y peso capturados de los modelos alternos fueron obtenidos mediante mediciones realizadas durante las pruebas finales, mientras que la información RGB se obtuvieron con la ayuda de la placa Arduino y el monitor serial de este. El proceso consiste en dejar pasar los modelos finales por las estructuras de los separadores con el sensor de color y la fotorresistencia previamente montados, para así obtener la información de los modelos finales y mostrarlos en el monitor serial de Arduino IDE, los valores obtenidos tanto para los modelos rojos y verdes se muestran en la Ilustración 90.

```

14 30 8 //VERDE
19 43 19
14 33 16
21 49 21
18 42 19
11 25 13
15 33 16
17 40 18
13 30 14
13 28 14
11 23 12
19 43 19
37 15 14 //ROJO
32 14 13
29 14 13
21 11 10
26 12 11
31 15 13
27 13 12
21 11 10
44 18 16

```

*Ilustración 90 Datos RGB obtenidos de los modelos alternos*

De los valores obtenidos se tomaron los intermedios del rango en el que se obtuvieron, la aproximación de estos valores fue muy básica (no necesariamente un promedio), esto con el fundamento de que la identificación de color funciona con base en una neurona, así que debido a la naturaleza de esta neurona los datos “exactos” no tienen mucho sentido, pero sí es importante que los patrones sean muy parecidos a la información obtenida en estas pruebas.

Los porcentajes de error (diferencia cuantitativa) calculados para los parámetros alto, largo, ancho y peso, se calcularon tomando como referencia que la máxima diferencia que puede haber entre esos dos modelos es la misma medida del fruto real; por ejemplo, para el parámetro “alto”, una diferencia entre el modelo real y el alternativo del 100% sería que el modelo alternativo midiera el doble de lo que mide el fruto real o en su defecto, que la medida del alto del modelo alternativo sea 0 (físicamente imposible). Por otro lado, la referencia del porcentaje de error para los datos RGB es tomada con base en la resolución en la que se entrega esta información, la cual es de 8 bits, por lo que la diferencia máxima posible sería de 255, lo que significaría un porcentaje de error del 100%.

Otro punto importante es que las condiciones (posición de los sensores, iluminación, modelos de separadores finales, umbral de detección) sean las mismas o lo más parecido que tendrán al momento de la integración del sistema, es por ello por lo que estos subsistemas tienen que calibrarse. El proceso de calibración se explica en la siguiente sección.

## **8.5 Calibración del sistema de identificadores y separadores**

Para poder realizar la calibración de este sistema es importante determinar cuáles son los factores que afectan a éste. Debido a que el sensor de presencia es una fotorresistencia y que este dispositivo reacciona a la luz, es evidente que el primer factor para revisar es la iluminación.

En la Ilustración 67 se puede observar el código utilizado para el circuito de control del identificador de color, en donde la condición para que el sensor RGB se active para obtener la información de color del objeto es que el valor del voltaje de la entrada en el pin A2 del microcontrolador sea menor a cierto umbral, el cual será determinado de acuerdo con los pasos que se describen a continuación. Esto es posible debido a que el valor de la resistencia intrínseca

de la fotorresistencia cambia de acuerdo con la cantidad de luz que recibe este dispositivo, como se explicó en la sección “Identificación de color”.

El umbral entonces es obtenido con la ayuda de una placa Arduino, con la cual se observa el valor del voltaje de salida del circuito, estos valores se aprecian en la Ilustración 43, el cual es el mismo que entrará en el pin A2 del microcontrolador y con el que se compara el umbral. Es importante mencionar que la resolución de voltaje en el microcontrolador seleccionado es de 8 bits. Esto quiere decir que el valor máximo de voltaje de entrada (5 V) está representado por el valor 255 y el mínimo (0 V) por el valor de 0. Teniendo esto en cuenta, lo siguiente es determinar el valor del voltaje de entrada cuando hay y no hay presencia en el separador. Para el segundo caso la luz del sensor RGB llega directamente a la fotorresistencia y debido al diseño final del separador visto en la sección “Implementación de identificadores y separadores”, se espera que la luz del ambiente no logre penetrar en la cámara del separador, por lo que se espera un valor constante en la fotorresistencia, justo como podemos apreciar en los primeros valores de la Ilustración 91, donde el valor específicamente para esta fotorresistencia es de 109 sin presencia de fruto; es importante resaltar esto debido a que en cada fotorresistencia con el subsistema de separación asociado se obtuvo valores distintos, esto también indica que la calibración se debe hacer de manera independiente a los 10 subsistemas de separación. Para el caso en donde hay fruto frente a la fotorresistencia se obtuvieron valores que van desde 105 hasta 18 y posteriormente regresando a 109, esta variación es entendible en virtud de que el fruto al pasar genera cierta sombra que varía dependiendo del instante en el que el microcontrolador obtiene esa información. De esta forma, solo basta elegir un valor dentro del rango antes mencionado, asegurándonos que en ese valor el fruto está frente al sensor RGB; para este caso se eligió el valor de 70.

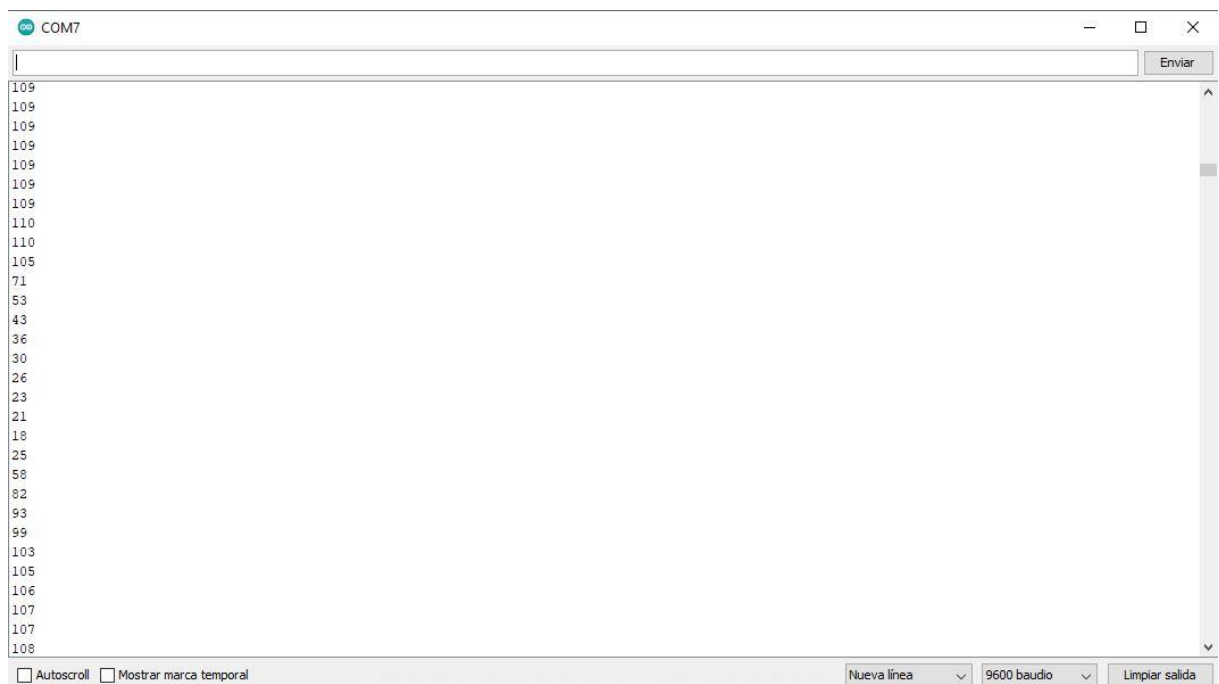


Ilustración 91 Valores de la fotorresistencia con y sin presencia del fruto en el separador [Elaboración propia]

El siguiente paso es calibrar el sensor RGB, esto implícitamente significa calibrar los patrones con los cuales la neurona *compet* hará la comparación y decisión del color, para esto se obtienen la información RGB de múltiples frutos. Recordemos que en la sección “Comparación y selección de modelos finales del fruto de café” se seleccionaron los modelos alternos utilizados en la implementación y el porqué de esto, así mismo, se obtuvo la

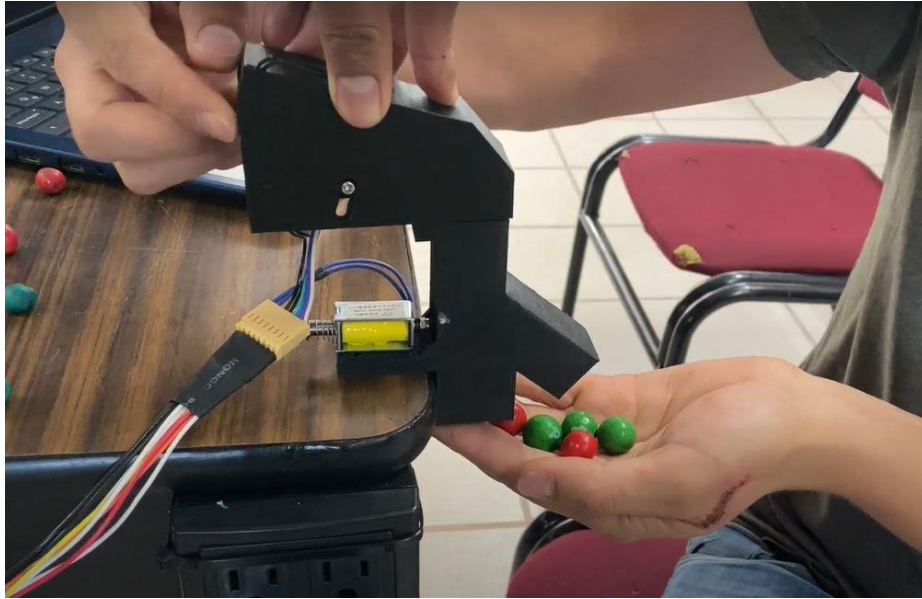
información RGB de dichos modelos, los cuales se observan en la Ilustración 90. Sin embargo, en esa misma sección se explica que la calibración de cada subsistema de identificación debe ser independiente, por lo que en la Tabla 30 se muestran la información RGB del sensor para calibrar.

Tabla 30 Datos RGB de modelos alternos para calibración del subsistema de identificación

	R	G	B	Norma	Normalizado		
					R	G	B
Verde	9	21	16	$\sqrt{778}$	0.3226	0.7528	0.5736
	11	23	10	$5\sqrt{30}$	0.4016	0.8398	0.3651
Rojo	21	9	9	$3\sqrt{67}$	0.8551	0.3665	0.3665
	33	14	14	38.4837	0.8575	0.3637	0.3637

En la tabla anterior, además de la información RGB obtenida, también se muestra la norma del arreglo generado por los 3 valores involucrados y posteriormente los mismos 3 valores, pero normalizados. Todo lo anterior se hizo con el motivo de que la neurona *compet* requiere que los patrones con los cuales compara la información obtenida deben estar en un arreglo (vector) y normalizados. La información RGB obtenida en el instante en el que el modelo pasa por el sensor no está normalizada, por lo que el proceso anterior lo realiza directamente el software en el instante posterior al que recibe la información antes de realizar la comparación.

Finalmente, y después de realizar todos los pasos anteriores, solo resta probar todo el subsistema de identificación integrado, para ellos simplemente se montan los sensores, actuadores y se conecta el circuito de control tal y como se muestra en la Ilustración 92. En esta misma imagen se observa que el sistema es probado con varios modelos alternos, validando así el correcto funcionamiento y por lo tanto, la correcta calibración del subsistema.

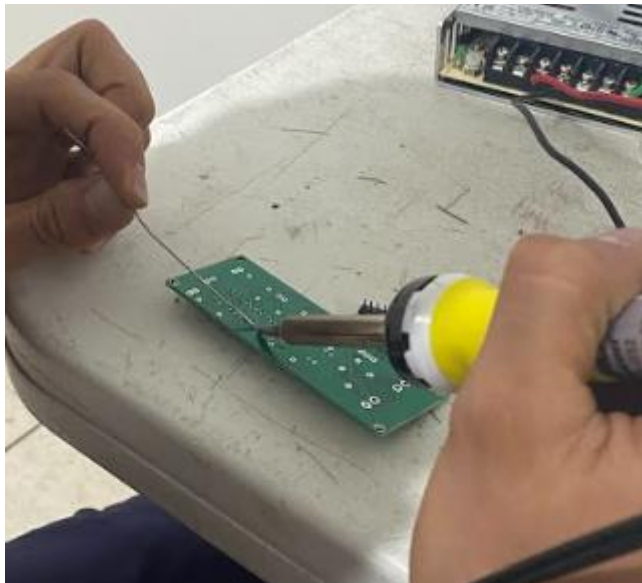


*Ilustración 92 Subsistema de identificación calibrado*

## **8.6 Implementación eléctrica**

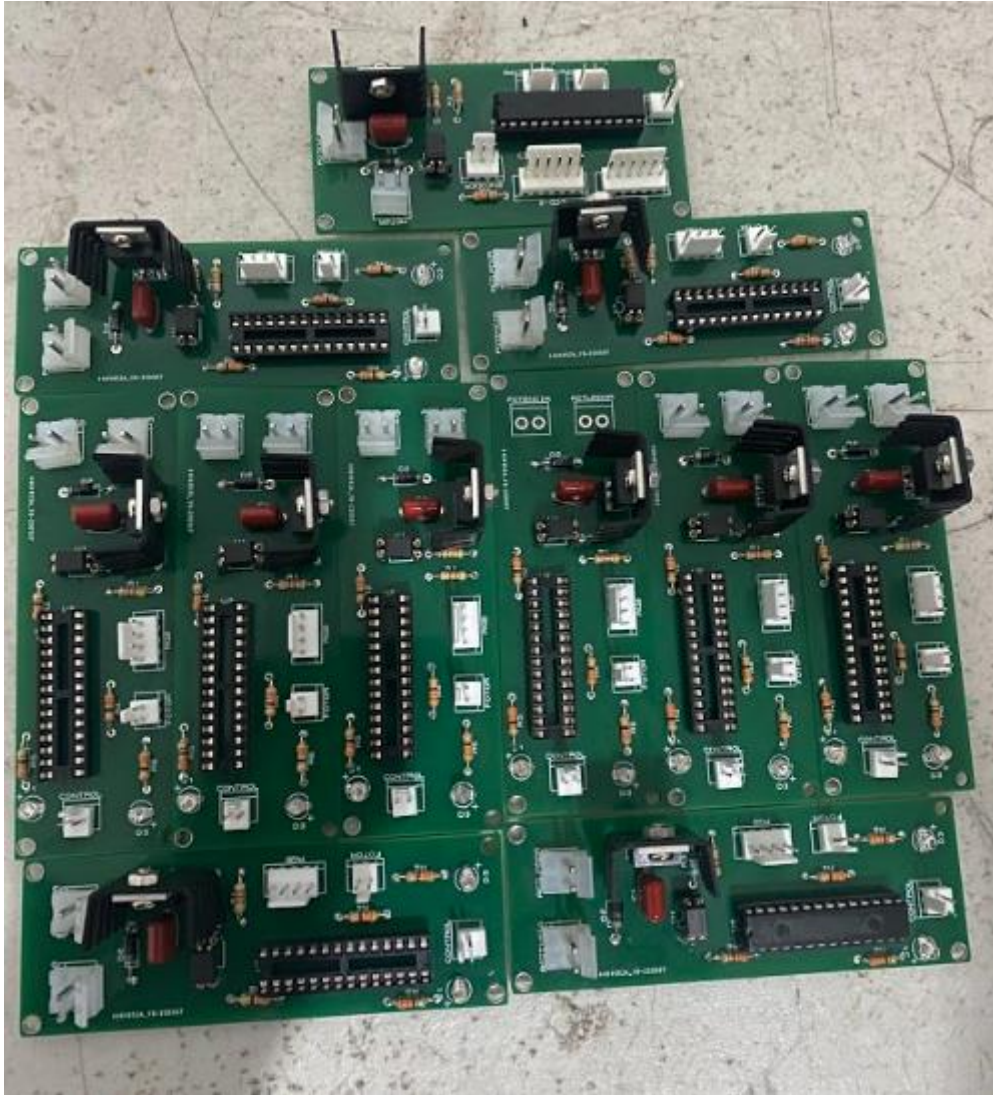
Teniendo todo lo anterior solo resta la implementación eléctrica, para la cual se mandan a hacer las PCB con los circuitos diseñados para conseguir un acabado profesional.

Se realiza el montaje de todos los componentes y pruebas de funcionamiento



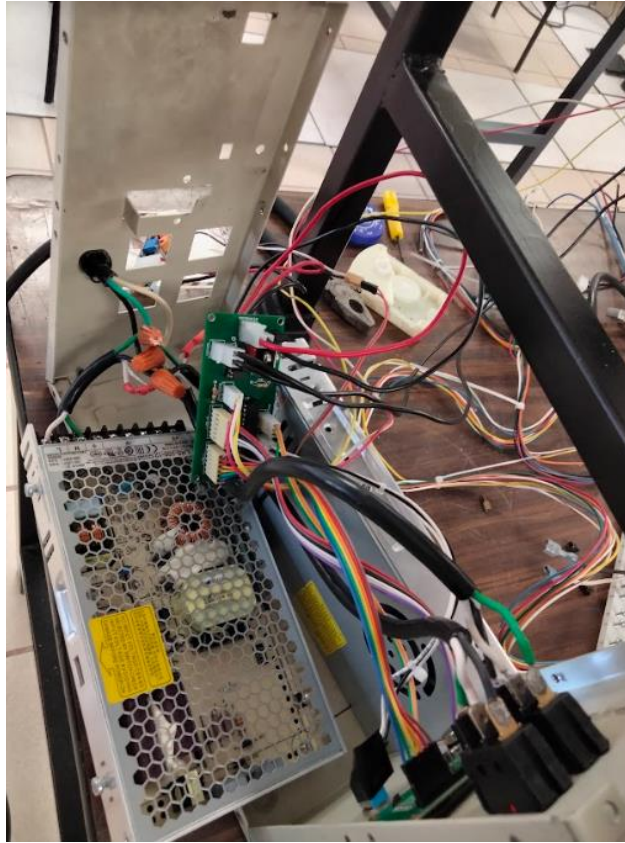
*Ilustración 93 Montaje de componentes electrónicos [Elaboración propia]*





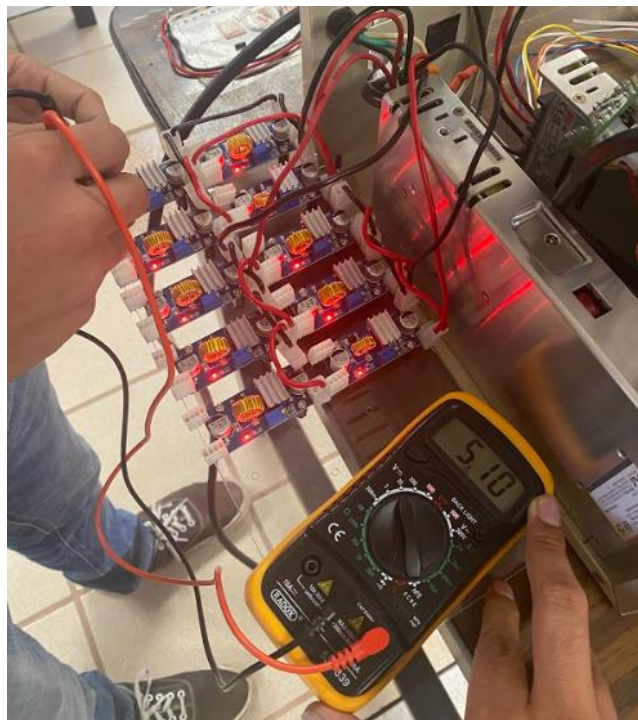
*Ilustración 94 PCBs con los componentes montados [Elaboración propia]*

Para el ensamblado de la caja de circuitos se hacen conexiones y pruebas de funcionamiento de forma gradual.



*Ilustración 95 Primeras conexiones de la caja de circuitos [Elaboración propia]*

Se realiza el montaje de los reguladores de tensión para la alimentación de los circuitos, así mismo se realiza la calibración de estos.



*Ilustración 96 Montaje y calibración de reguladores de tensión [Elaboración propia]*

Gracias al circuito de control de velocidad diseñado y la interfaz hombre-máquina, se puede monitorear y regular la velocidad; el objetivo de este trabajo es que la máquina funcione con una velocidad de avance lineal de 0.025 m/s, lo que es equivalente a 25 mm/s, este resultado se puede observar en la Ilustración 97.



Ilustración 97 Acoplamiento del motor de accionamiento con encoder [Elaboración propia]

Adicionalmente, se realiza la conversión de la velocidad lineal de la banda a su equivalente en kg/h, para ello se toman los datos de equivalencia de la Tabla 4. Donde se tiene que:

$$100 \text{ frutos} = 150 \text{ g}$$

Y sabemos que con una velocidad de avance de la banda de 25 mm/s obtenemos un avance de 10 frutos por segundo, según el diseño visto en la sección “Velocidad de separación requerida, entonces se tiene que:

$$\frac{25 \text{ mm}}{\text{s}} = \frac{25 \text{ mm}}{\text{s}} * \frac{10 \text{ frutos}}{25 \text{ mm}} * \frac{150 \text{ g}}{100 \text{ frutos}} * \frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ g}} * \frac{3600 \text{ s}}{1 \text{ h}}$$

$$\frac{25 \text{ mm}}{\text{s}} = \frac{2.16 \text{ kg}}{\text{h}}$$

El resultado anterior es el factor de conversión único para nuestro sistema, para pasar de velocidad lineal a una velocidad de separación en kg/h. Este formato de velocidad de separación también fue implementado en el sistema de control de velocidad gracias a un interruptor, por lo que para una velocidad lineal de 25 mm/s, se debe visualizar una velocidad de separación de 50 kg/h, tal y como se muestra en la Ilustración 98.





*Ilustración 98 Velocidad de separación en kg/h*

Finalmente, se monta tanto las fuentes, los reguladores y circuitos de control dentro de una misma caja, el resultado final se muestra en la Ilustración 99.



*Ilustración 99 Caja de circuitos terminada*

## 8.7 Pruebas y correcciones

Como es de esperarse, una vez ensamblada toda la máquina y sometida a pruebas se encuentran varios problemas no considerados en el diseño de la máquina.

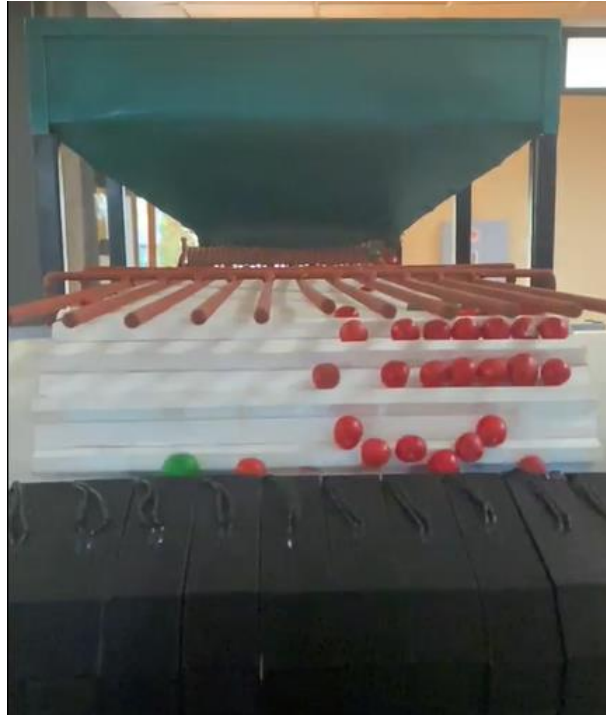
Uno de los problemas encontrados es la caída de frutos antes de llegar a la banda transportadora, esto debido a la poca altura de las barreras de la resbaladilla. La modificación realizada se observa en la Ilustración 100.



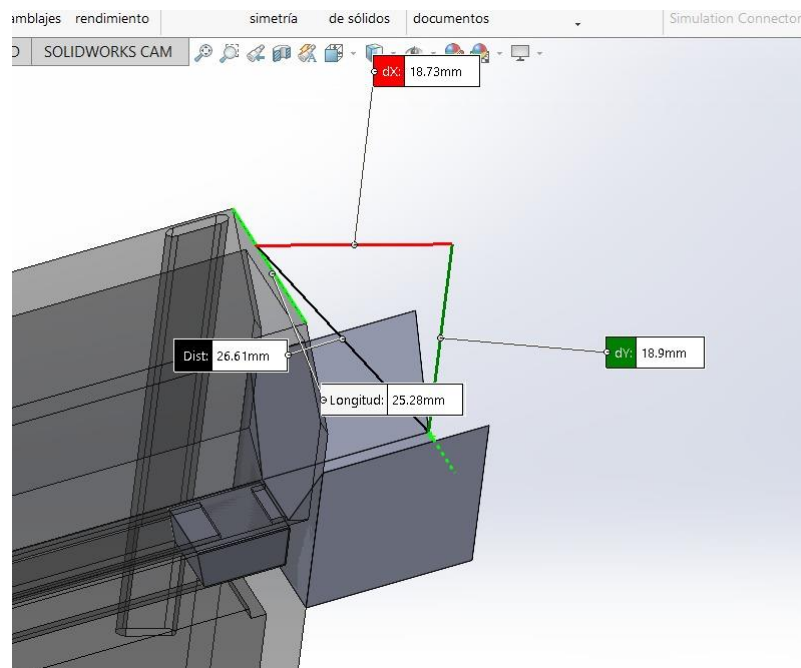
*Ilustración 100 Modificación de las paredes de la resbaladilla [Elaboración propia]*

De la ilustración anterior se observa que la altura de las barreras es mayor, permitiendo así que los frutos sean guiados correctamente hasta la banda transportadora.

La siguiente modificación es debida a que los frutos cuando están próximos a entrar a los separadores en ocasiones se juntan unos con otros, cómo se muestra en la Ilustración 101 esto provoca varios problemas, entre los cuales está la sobredosis de la banda y destrucción de los frutos contra los separadores, por ello se hacen dos modificaciones en el recibidor del identificador, la primera de ellas fue la añadidura de una especie de cuchara a la entrada, para dar así espacio suficiente para que el fruto caiga sin problema en el ducto deseado, tal como se muestra en la Ilustración 102.

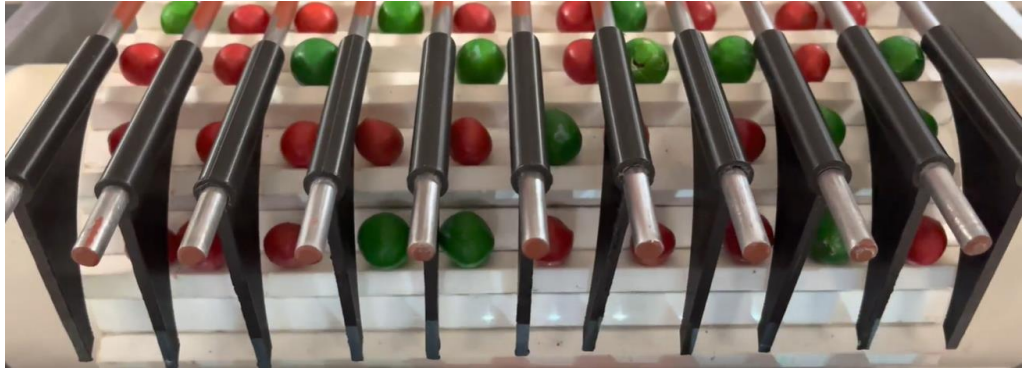


*Ilustración 101 Problema de agrupamiento de frutos [Elaboración propia]*



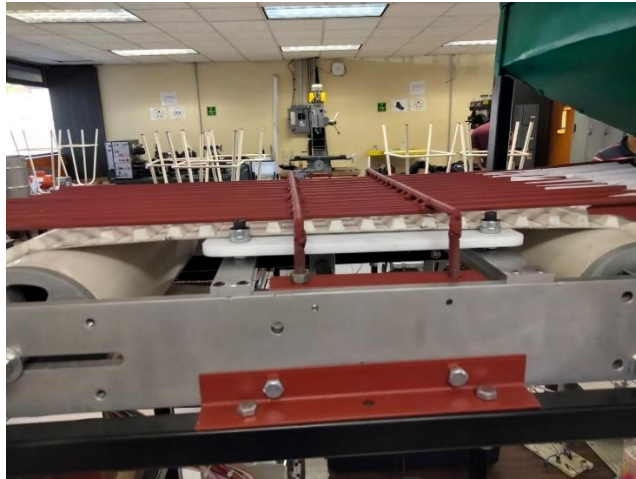
*Ilustración 102 Modificación hecha en el receptor del identificador [Elaboración propia]*

La segunda modificación es la adición de separadores entre las filas en el espacio libre del bastidor a los separadores, tal como se muestra a continuación.



*Ilustración 103 Separaciones añadidas al final de separador [Elaboración propia]*

Debido a que la banda no tiene un soporte a lo largo de toda su longitud, la banda tiende a verse pandeada, provocando así el movimiento de los frutos durante su avance. Para solucionar este problema se añade un soporte con poca rugosidad para que la banda patine sobre el sin problema, modificación mostrada en la Ilustración 104.



*Ilustración 104 Soporte de la banda instalado [Elaboración propia]*

## 9. Resultados

### 9.1 Margen de error e intervalo de confianza

Para comenzar este análisis, se tomaron ciertas consideraciones y parámetros al momento de realizar las pruebas, el primero es que la población total de frutos de café está dada por la cantidad de frutos que se separan por hora, la cual es de:

*33333.33 frutos*

Es importante mencionar que para este estudio se realizaron 20 pruebas en dos condiciones distintas de alimentación, resultados de las cuales se encuentran en la tabla siguiente.

Tabla 31 Resultados de las pruebas realizadas

Condiciones de alimentación	Tamaño de muestra inicial	Tamaño de la final	Total de frutos mal clasificados	% de error
Controlada	100	100	7	8
	100	100	2	2
	100	100	12	12
	100	100	5	5
	100	100	7	6
	100	100	6	6
	100	100	4	4
	100	100	7	8
	100	100	9	8
	100	100	9	9
No controlada	100	96	6	6.250
	100	98	5	5.102
	100	94	11	11.702
	100	91	3	3.297
	100	94	6	6.383
	100	93	4	4.301
	100	96	5	5.208
	100	96	8	8.333
	100	98	13	13.265
	100	95	6	6.316

Para las pruebas realizadas con la alimentación controlada, se toman una muestra de la población de 100 frutos:

$$n = 100$$

Con esta muestra se realizaron 10 pruebas, lo que nos entregó una media, mediana y moda del error igual a:

$$media = \bar{x} = 6.8 \%$$

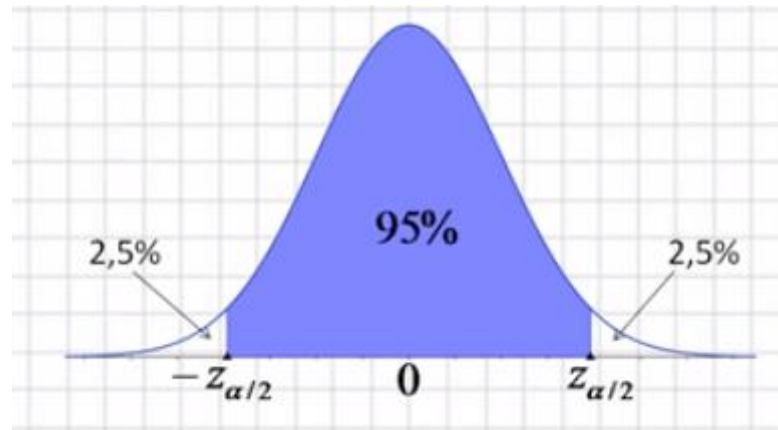
$$mediana = Me = 7 \%$$

$$\text{moda} = M_o = 7 \%$$

Y una desviación estándar de:

$$S = 2.82 \%$$

Debido a que el tamaño de la muestra es menor al 10% de la población total, se puede suponer que cada prueba es independiente. Una de las propiedades de la distribución normal es que su media, mediana y moda son iguales [52], en nuestro caso, estas tres variables no son iguales, pero son demasiado parecidas, por lo tanto, hacemos una aproximación a que la distribución muestral se puede modelar con una curva normal.



Para el intervalo de confianza tomaremos un margen del 95%. Se sabe que, en una distribución normal, el porcentaje del 95% equivale aproximadamente a dos desviaciones estándar por encima y por debajo de la media, por lo que el intervalo de confianza queda:

$$(6.8 - 2 * 2.82) \% a (6.8 + 2 * 2.82)\% \\ 1.16 \% a 12.44\%$$

Por lo tanto, el 95% de todos los resultados en el error se encuentran en este intervalo.

Se realiza un análisis similar para las pruebas no controladas y se tiene que:

$$\bar{x} = 7.01 \%$$

$$Me = 6.28 \%$$

$$S = 3.2 \%$$

Y el intervalo de confianza es:

$$(7.01 - 2 * 3.2) \% a (7.01 + 2 * 3.2)\% \\ 0.61 \% a 13.41\%$$

## 9.2 Estimación de costos

Tabla 32 Gastos realizados en materia prima y construcción.

Recurso material	Cantidad	Costo unitario (MXN)	Costo total (MXN)	Fuente de financiamiento
<b>Caja de circuitos</b>				
Fuente de 12V	1	1016	1016	Propio
Fuente de 24V	1	1013	1013	Propio
Reguladores de voltaje	12	34	408	Propio
Microcontroladores	11	83	913	Propio
Bases para microcontroladores	11	4.31	47.41	Propio
Molex paso 100 de 2 vías	21	7.5	157.5	Propio
Molex paso 100 de 3 vías	3	8	24	Propio
Molex paso 100 de 4 vías	10	9	90	Propio
Molex paso 100 de 6 vías	2	9.5	19	Propio
Molex paso 100 de 8 vías	10	11	110	Propio
Molex paso 156 de 2 vías	22	8.5	187	Propio
Zapatas paso 100	494	0.5	247	Propio
Zapatas paso 156	44	1.5	66	Propio
Cable calibre 22	80	3.5	280	Propio
Cable calibre 16	3	8.5	25.5	Propio
Jumpers	40	2	80	Propio
Opto acoplador PC817	11	6.03	66.33	Propio
MOSFET IRFZ44N	11	23.6	259.6	Propio
Sensores RGB TCS34725	10	136	1360	Propio
Fotorresistencias	10	5.5	55	Propio
Interruptores	2	24	48	Propio
Interruptor cola de rata	1	8	8	Propio
Potenciómetro	1	6	6	Propio
Capuchones	4	2	8	Propio
Resistencias de valores varios	63	1.25	78.75	Propio
Disipadores de calor	11	2.5	27.5	Propio
Diodos	11	1.5	16.5	Propio
Leds rojos y verdes	20	1.5	30	Propio
Termofit de diferentes medidas	3	8	24	Propio
Postes para fijar de 1/2"	24	4.5	108	Propio
Postes para fijar de 1"	20	5.5	110	Propio
Actuadores	10	125	1250	Propio
Soportes de acrílico	2	75	150	Propio
Capacitores	20	2.5	50	Propio
<b>Identificador y separador</b>				
Cristales para separador	10	0.5	5	Propio
Impresión 3D de identificador, separador y compuertas	10	150	1500	Propio
Tornillería M2	150	1.5	225	Propio



Soporte de acrílico	1	64.5	64.5	Propio
Filamento para impresión	1	600	600	Propio
<b>Banda transportadora</b>				
Pedacería de aluminio	1	250	250	Propio
Tapones para rodillos	4	150	600	Propio
Solera para rodamientos de rodillos	1	50	50	Propio
Rodamientos de 1/2"	8	10	80	Propio
Banda transportadora	1	3480	3480	Propio
Tubo de PVC	1	60	60	Propio
Motor DC para accionamiento	1	650	650	Propio
<b>Tolva y estructura</b>				
PTR de 1"	6	80	480	Propio
Angulo de 3/4"	3	50	150	Propio
Redondo de 1/4"	1	190	190	Propio
Tapones antiderrapantes	12	6	72	Propio
Lamina de acero	0.5	750	375	Propio
<b>Gastos indirectos</b>				
Tornillería variada	1	327	327	Propio
Remaches	1	50	50	Propio
Pintura	4	89	356	Propio
Electrodos E6013	1	85	85	Propio
Gastos variados en pruebas y materiales no utilizados			3500	Propio
<b>TOTAL GASTADO</b>			<b>21488.59</b>	

Es importante señalar que algunos de los materiales utilizados fueron comprados en pedacerías, por lo que su costo es menor a lo comercial, por lo que el costo real de la materia prima puede ser mayor a lo gastado. Por otro lado, no se han tomado en cuenta los gastos de fabricación en mano de obra.

Si tomamos en cuenta que se cobre la hora de trabajo a 15 pesos mexicanos por cada trabajador, que en este caso son 2, y consideramos que se trabajó durante un periodo de 90 días aproximadamente tenemos que el costo por mano de obra es de:

$$\text{Horas de trabajo} = 90 * 8 = 720 \text{ hrs por trabajador}$$

$$\text{Mano de obra total} = 2 * 720 * 15 \text{ pesos} = 21600 \text{ pesos}$$

Por lo tanto, el precio sugerido de venta de esta máquina es de 43088.59 pesos mexicanos.

### 9.3 Infraestructura

Tabla 33 Infraestructura necesaria para el desarrollo del proyecto.

Recurso	Descripción	Cantidad	Uso
Herramientas variadas	Todas las herramientas de mano como taladros, cortadora de disco, pinzas, llaves, entre otras.	1	Para realizar el corte, ajuste y ensamble de las piezas.
Fresadora vertical y CNC	Máquina herramienta para el mecanizado de piezas que requieran operación de ejes cartesianos.	1	Para realizar el acanalado de las piezas que lo requieran, así como creas piezas que requieran medidas de suma precisión.
Torno	Máquina herramientas para la producción de piezas con geometría de revolución	1	Para el maquinado de ejes o piezas cilíndricas que no encontremos fácilmente en el mercado.
Planta para soldar	Planta para soldar inversora Munich	1	Es necesaria para unir las piezas de acero que no deben moverse nuevamente.

## Conclusiones

Con base en los pruebas y correcciones realizadas anteriormente se obtuvieron resultados dirigidos al cumplimiento de los objetivos específicos y requerimientos descritos al inicio del documento.

Como primer punto, el sistema de identificación de color puede operar con una eficiencia mayor al 90% incluso con velocidades de separación de hasta 10 veces (hasta donde se logró medir) al propuesto de 0.025 m/s; sin embargo y a pesar de que el sistema de comunicación entre el identificador y el separador mecánico recibe y manda la señal de actuación casi de manera instantánea, el actuador electromagnético tarda cierto tiempo en “reaccionar” a esta señal. Este tiempo de conmutación máximo no es especificado por el fabricante, por lo que a través de las pruebas realizadas se obtuvo que este límite en la conmutación recae alrededor de una frecuencia de 1 Hz en la señal de activación. En otras palabras, el sistema de identificación y separación otorga una eficiencia mayor al 90% siempre y cuando no se supere la velocidad de separación de 0.025 m/s o 50 kg/h. En caso de querer aumentar esta velocidad, se tiene que cambiar el sistema de separación mecánica a uno con una respuesta mayor como podría ser un sistema neumático.

El sistema de recepción y colación de frutos a pesar de lograr el objetivo principal de llevar hasta la banda transportadora los frutos, no hace una perfecta colación (ordenamiento preliminar) es decir, los frutos llegan demasiado amontonados como para que la banda tenga una operación adecuada, esto de forma operacional muestra que en los espacios de la banda transportadora asignados para un solo fruto logra entrar dos o incluso tres, lo que provoca que el exceso de frutos sea en el mejor de los casos mal clasificado y en el peor, triturado por el mismo bastidor de la banda. Por lo que se observa que el sistema empleado es funcional siempre y cuando la alimentación no se haga de forma brusca, es decir, que la carga de frutos sea de forma gradual. Una posible solución a esto sería agregar un sistema de criba vibratorio que ayude a realizar una colación mucho más eficiente que la que se obtuvo en este trabajo y añadir escobetas en el bastidor de la banda transportadora, esto con la finalidad de ayudar al acomodo de los frutos sin dañarlos.

Finalmente, las dimensiones finales del prototipo fueron de 1 m\*0.562 m\*0.910 m en largo, ancho y alto respectivamente, lo que deja en comparación al requerimiento visto en la sección de “Requerimientos” un margen de 1 m, 0.938 m y 1.09 m en largo, ancho y alto respectivamente, suficientes para el espacio de trabajo destinado para la máquina.

## Referencias

- [1] Secretaria de Agricultura y Desarrollo Rural, «Secretaria de Agricultura y Desarrollo Rural,» Gobierno de México, 2 Marzo 2018. [En línea]. Available: <https://www.gob.mx/agricultura/es/articulos/mexico-onceavo-productor-mundial-de-cafe?idiom=es#:~:text=La%20producci%C3%B3n%20de%20sus%20cafetos%20representa%202.4%25%20del%20total%20mundial&text=El%20caf%C3%A9%20es%20un%20cultivo,kg%20per%20c%C3%A1pita%20>. [Último acceso: 12 Abril 2021].
- [2] Anónimo, «Así es la recolección del café, una cosecha increíble,» Nestle Bonka, [En línea]. Available: <https://www.bonka.es/amor-por-el-cafe/recoleccion-cafe#:~:text=La%20recolecci%C3%B3n%20del%20caf%C3%A9%20la,entre%206%20y%208%20meses..> [Último acceso: 09 Abril 2021].
- [3] E. d. J. De León Lopez, Interviewee, *Proceso de separación de los frutos de café*. [Entrevista]. 6 Abril 2021.
- [4] K. Ly, «El café, Una explicación básica de la semilla a la taza,» Perfect Daily Grind, 2 enero 2017. [En línea]. Available: <https://perfectdailygrind.com/es/2017/01/02/el-cafe-una-explicacion-basic-de-la-semilla-la-taza/>. [Último acceso: 9 abril 2021].
- [5] Bendig, «Separadora de café verde ecológica sin uso de agua,» Bendig, [En línea]. Available: <https://www.bendig.co.cr/detalle.php?id=SEPARADORA%20DE%20CAF%C3%89%20VERDE%20ECOLOG%C3%8DA%20SIN%20USO%20DE%20AGUA>. [Último acceso: 10 abril 2021].
- [6] Pinhalense, «DC-PBOIA,» Pinhalense, [En línea]. Available: <https://www.pinhalense.com.br/espanhol/cafe/beneficio-umido/peneiras-tubulares/dc-pboia/>. [Último acceso: 10 abril 2021].
- [7] Weko, «CoffeeCherryTec,» [En línea]. Available: [https://af017acc-dded-4486-ad72-5d0145437e8f.filesusr.com/ugd/273378\\_5728926e245d41fa9da2e572c166fb54.pdf](https://af017acc-dded-4486-ad72-5d0145437e8f.filesusr.com/ugd/273378_5728926e245d41fa9da2e572c166fb54.pdf). [Último acceso: 10 abril 2021].
- [8] R. E. e. al., «Catálogo de maquinaria para procesamiento de café,» Iلاتا SAC, Lima, Perú, 2013.
- [9] Jocasa, «Separadora de verde,» [En línea]. Available: <http://www.jocasa.com/>. [Último acceso: 10 abril 2021].

- [10] Solocafé, «Separadora de café verde,» Solocafe, [En línea]. Available: <https://www.expertosencafe.com/beneficio-humedo>. [Último acceso: 13 abril 2021].
- [11] C. González, M. Braulio, G. Caporal y M. Gaudalupe, «Repositorio Dspace,» 17 Febrero 2010. [En línea]. Available: <https://tesis.ipn.mx/handle/123456789/5856>. [Último acceso: 21 Abril 2021].
- [12] J. A. Aguirre Larios y I. A. Cárdenas Sosa, «Repositorio Dspace,» Agosto 2012. [En línea]. Available: <http://tesis.ipn.mx:8080/xmlui/handle/123456789/18706>. [Último acceso: 21 05 2021].
- [13] Anónimo, «Cómo se procesa el café,» OCU, 3 septiembre 2019. [En línea]. Available: <https://www.ocu.org/alimentacion/cafe/informe/procesado-del-cafe>. [Último acceso: 20 abril 2021].
- [14] Molido y Servido, «Fases de cultivo de café,» Molido y Servido, [En línea]. Available: <https://www.molidoyservido.com/fases-del-cultivo-de-cafe/>. [Último acceso: 09 Abril 2021].
- [15] A. J. P. Guerra, «Diseño Mecánico de Tolvas (Primera Parte),» Mecanotecnia, 31 01 2017. [En línea]. Available: <http://mecanotecnia.blogspot.com/2017/01/diseño-mecanico-de-tolvas-industriales.html>. [Último acceso: 02 10 2021].
- [16] Anónimo, «¿Qué son los sistemas vibratorios?,» CetaceaLab, 15 noviembre 2019. [En línea]. Available: <https://www.cetacealab.org/que-son-los-sistemas-vibratorios/#:~:text=Por%20lo%20general%2C%20este%20sistema,sea%20de%20masa%20o%20inercia..> [Último acceso: 10 abril 2021].
- [17] 911 Metallurgist, «Alimentador Vibratorio,» Metallurgistic, [En línea]. Available: <https://www.911metallurgist.com/metallurgia/alimentador-vibratorio/>. [Último acceso: 10 abril 2021].
- [18] E. A. Felipe, «Diseño de una cinta transportadora en una intalación de carga automática de coque,» Univercidad Jaume, Spetiembre 2016. [En línea]. Available: <https://ingemecanica.com/proyectos/objetos/proyecto45.pdf>. [Último acceso: 02 10 2021].
- [19] Anónimo, «Cálculo y diseño de cintas tranportadoras,» [En línea]. Available: <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn84.html>. [Último acceso: 02 10 2021].
- [20] Workshop Experience, «Colorimetría, qué es y para qué sirve conocerla,» Workshop Experience, 22 Mayo 2017. [En línea]. Available: <https://www.workshopexperience.com/colorimetria-que-es-para-que-sirve/>. [Último acceso: 04 Abril 2021].

- [21] DEFINICIONYQUE.ES, «Definición y Que es colorimetría,» DEFINICIONYQUE.ES, [En línea]. Available: <https://definicionyque.es/colorimetria/>. [Último acceso: 14 Abril 2021].
- [22] Contaval, «¿Qué es la visión artificial y para qué sirve?,» Contaval, 18 Febrero 2016. [En línea]. Available: <https://www.contaval.es/que-es-la-vision-artificial-y-para-que-sirve/>. [Último acceso: 14 Abril 2021].
- [23] Anónimo, «Umbralización (Thresholindig),» [En línea]. Available: [https://www.lpi.tel.uva.es/~nacho/docencia/ing\\_ond\\_1/trabajos\\_03\\_04/sonificacion/cabroa\\_archivos/umbralizacion.html](https://www.lpi.tel.uva.es/~nacho/docencia/ing_ond_1/trabajos_03_04/sonificacion/cabroa_archivos/umbralizacion.html). [Último acceso: 21 Mayo 2021].
- [24] THEWEFORT, «El histograma,» THEWEFORT.com, [En línea]. Available: <http://www.thewebfoto.com/2-hacer-fotos/217-el-histograma>. [Último acceso: 21 mayo 2021].
- [25] Anónimos, «Sucesor de Pérez Verdú,» [En línea]. Available: <http://www.sucesordeperezverdu.com/es/perfil>. [Último acceso: 8 08 2021].
- [26] F. E. Alvarado Maldonado, «Repositorio del sistema bibliotecario Universidad de San Carlos de Guatemala,» 10 Febrero 2016. [En línea]. Available: <http://www.repositorio.usac.edu.gt/3355/>. [Último acceso: 02 Noviembre 2021].
- [27] J. Bravo, «Características físicas del fruto de café,» Agroproductividad, Veracruz, 2018.
- [28] Komachine, «COREA IG Motor,» Komachine, [En línea]. Available: <https://www.komachine.com/en/companies/korea-i-g-motor/products/49441-motor-s3657-series-b>. [Último acceso: 05 06 2022].
- [29] SKF, «Rodamientos,» Enero 2019. [En línea]. Available: [https://www.skf.com/binaries/pub201/Images/0901d19680416953-Rolling-bearings---17000\\_1-ES\\_tcm\\_201-121486.pdf](https://www.skf.com/binaries/pub201/Images/0901d19680416953-Rolling-bearings---17000_1-ES_tcm_201-121486.pdf).
- [30] R. S. Bonifacio, «Diseño de tolvas,» Slideshare, 29 Junio 2016. [En línea]. Available: <https://es.slideshare.net/RamiroSIUCEBONIFACIO1/diseo-de-tolvas-63586969>.
- [31] G. B. Toskano Hurtado, «Tesis Digitales UNMSM,» [En línea]. Available: [https://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata/tesis/basic/toskano\\_hg/cap3.PDF](https://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata/tesis/basic/toskano_hg/cap3.PDF). [Último acceso: 26 Noviembre 2021].
- [32] Electrónicos CALDAS, «ATmega328P,» Electrónicos CALDAS, [En línea]. Available: <https://www.electronicoscaldas.com/es/microcontroladores-atmel/383-microcontrolador-atmega328p-pu.html>. [Último acceso: 26 Noviembre 2021].
- [33] C. Martínez, «La nueva Raspberry Pi es tan pequeña y barata que podrías confundirla con un pendrive,» ELOUTPUT, 21 Enero 2021. [En línea]. Available:

- <https://eloutput.com/productos/gadgets/raspberry-pi-pico-precio-caracteristicas/>. [Último acceso: 2021 Noviembre 2021].
- [34] Electrónicos CALDAS, «PIC16F887,» Electrónicos CALDAS, [En línea]. Available: <https://www.electronicoscaldas.com/es/microcontroladores-pic/121-microcontrolador-pic-16f887.html>. [Último acceso: 26 Noviembre 2021].
- [35] Didácticas Electrónica, «Sensor de color (RGB) TCS34725,» Didácticas Electrónica, [En línea]. Available: <https://www.didacticaselectronicas.com/index.php/sensores/color/sensor-de-color-color-sensor-sensores-de-color-detector-detectores-de-color-tcs3472-dfrobot-detail>. [Último acceso: 26 Noviembre 2021].
- [36] Carrod Electrónica, «Sensor TCS230 de Color RGB,» Carrod Electrónica, [En línea]. Available: <https://www.carrod.mx/products/sensor-de-color-rgb-gy-31-tcs230-tcs3200>. [Último acceso: 26 Noviembre 2021].
- [37] Digikey Electronics, «Sensores RGB ISL29125,» Digikey Electronics, 15 Julio 2015. [En línea]. Available: <https://www.digikey.com.mx/es/product-highlight/i/intersil/isl29125-rgb-sensors>. [Último acceso: 26 Noviembre 2021].
- [38] Geek Factory, «CNY70 Sensor óptico de reflexión,» Geek Factory, [En línea]. Available: <https://www.geekfactory.mx/tienda/sensores/cny70-sensor-optico-de-reflexion/>. [Último acceso: 26 Noviembre 2021].
- [39] R Slicing 3D, «Sensor de Obstáculos – FC-51,» R Slicing 3D, [En línea]. Available: <https://www.rslicing3d.com/programacion-arduino-complementos/sensor-fc51/>. [Último acceso: 29 Noviembre 2021].
- [40] El blog del profesro de tecnología, «Medidor de luz con LDR y Arduino,» [En línea]. Available: <https://elblogdelprofesordetecnologia.blogspot.com/2016/12/control-ldr-con-arduino.html>. [Último acceso: 17 Mayo 2022].
- [41] UNIT ELECTRONICS, «Solenoid Push Pull 5v 6v Zye1-0530z Carrera 10mm,» Mercado Libre, [En línea]. Available: [https://articulo.mercadolibre.com.mx/MLM-793451028-solenoid-push-pull-5v-6v-zye1-0530z-carrera-10mm-\\_JM](https://articulo.mercadolibre.com.mx/MLM-793451028-solenoid-push-pull-5v-6v-zye1-0530z-carrera-10mm-_JM). [Último acceso: 29 Noviembre 2021].
- [42] Grilon3, «Especificaciones para impresión 3D,» [En línea]. Available: [https://grilon3.com.ar/tabla\\_comparativa/](https://grilon3.com.ar/tabla_comparativa/). [Último acceso: 17 Mayo 2022].
- [43] UNIT Electronics, «XL4015 Modulo Regulador Step Down 50W 5A,» UNIT Electronics, [En línea]. Available: <https://uelectronics.com/producto/modulo-regulador-step-up-1-25-35v-xl4015-5-40v-5a/>. [Último acceso: 29 Mayo 2022].
- [44] M. L. A. P. Granados, «Fotoresistencia,» Facultad de Ingenierías y Arquitectura-Universidad de Pamplona, 2015. [En línea]. Available: [https://www.unipamplona.edu.co/unipamplona/portallIG/home\\_74/recursos/visual-](https://www.unipamplona.edu.co/unipamplona/portallIG/home_74/recursos/visual-)





- [53] C. Brito, «Metodología de Diseño en Ingeniería V model. Diagrama de Bloques,» [En línea]. Available: [https://www.academia.edu/36691215/Metodolog%C3%ADa\\_de\\_Dise%C3%B1o\\_en\\_Ingenieria\\_Vmodel\\_Diagrama\\_de\\_Bloques](https://www.academia.edu/36691215/Metodolog%C3%ADa_de_Dise%C3%B1o_en_Ingenieria_Vmodel_Diagrama_de_Bloques). [Último acceso: 10 abril 2021].
- [54] Y. P. C. Quintero, «Caracterización de la rugosidad de frutos del café variedad colombien, en los estados de desarrollo,» 2008. [En línea]. Available: <https://www.cenicafe.org/es/publications/arc059%2803%29204-213.pdf>. [Último acceso: Octubre 2021].
- [55] Mitutoyo, «Rugosidad Superficial,» [En línea]. Available: <http://www3.fi.mdp.edu.ar/tecnologia/archivos/TecFab/10.pdf>. [Último acceso: Octubre 2021].
- [56] THK, «Catálogo. Descripción General,» [En línea]. Available: [https://tech.thk.com/es/products/pdf/es\\_b00\\_001.pdf](https://tech.thk.com/es/products/pdf/es_b00_001.pdf). [Último acceso: 2021].
- [57] Siemens, «Motores Siemens,» Siemens, [En línea]. Available: <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:782b04d0-82f4-488a-936b-514cd8bb5d5f/version:1580149154/arteimpresioncatalogosimotics.pdf>. [Último acceso: 15 Noviembre 2021].
- [58] Ferrepat, «Motor Monofásico Siemens Electromex 1/2 Hp 115/230v,» Mercado Libre, [En línea]. Available: [https://articulo.mercadolibre.com.mx/MLM-891141138-motor-monofasico-siemens-electromex-12-hp-115230v-\\_JM#position=1&search\\_layout=grid&type=item&tracking\\_id=46eabd4f-2760-4952-9ce6-30fb46923f89](https://articulo.mercadolibre.com.mx/MLM-891141138-motor-monofasico-siemens-electromex-12-hp-115230v-_JM#position=1&search_layout=grid&type=item&tracking_id=46eabd4f-2760-4952-9ce6-30fb46923f89). [Último acceso: 15 Noviembre 2021].
- [59] Ingemecánica, «Transmisión por Cadenas Cálculo y Diseño,» Ingemecánica, [En línea]. Available: <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn127.html>. [Último acceso: 26 11 2021].
- [60] Anónimo, «Cadenas de Transmisión ejes prolongados,» STUDYLIB, [En línea]. Available: <https://studylib.es/doc/4835942/cadenas-de-transmisi%C3%B3n>.
- [61] Cadarsa, «Cadenas de transmisión,» Cadarsa, [En línea]. Available: <https://www.cadarsa.es/cadenas-de-transmision-segun-iso-606-e-din-8188-y-ansi-b-29-1/>.
- [62] Ingemecánica, «Propiedades de los materiales,» Ingemecánica, [En línea]. Available: <https://ingemecanica.com/tutoriales/materiales.html>.
- [63] H. A. S, Diseño de maquinas, México: McGraw-Hill, 1971.
- [64] R. L. Mott, Diseño de elementos de maquinas, México: PEARSON Educación, 2006.
- [65] Mouser Electronics, «Omron Electronics G4W-2214P-US-T130-DC24,» Mouser Electronics, [En línea]. Available:

<https://www.mouser.mx/ProductDetail/Omron/G4W-2214P-US-T130-DC24?q=sGAEpiMZZMtZ661ya8CuXa4mj0AI8O50>. [Último acceso: 29 Noviembre 2021].

- [66] Carrod Electrónica, «CD4001BDG CMOS Cuatro Compuertas NOR de 2 Entradas MC14001BDG,» Carrod Electrónica, [En línea]. Available: <https://www.carrod.mx/products/cd4001-cmos-cuatro-nand-de-2-entradas-mc14001bdg>. [Último acceso: 03 Diciembre 2021].
- [67] Conermex, «Tabla consumos CFE,» Conermex, [En línea]. Available: <https://www.conermex.com.mx/webinar/tabla-consumos-CFE.pdf>. [Último acceso: 03 Diciembre 2021].