

PROTOTIPO FUNCIONAL DE UN SISTEMA DE CLASIFICACIÓN PARA LAS
CEREZAS DE CAFÉ CASTILLO, EN FUNCIÓN DE SU ETAPA DE MADURACIÓN.

JOHANN ANDRÉS CRUZ CHÁVEZ
JUAN DAVID CASTRO FIERRO

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES
BOGOTÁ D.C
2021

PROTOTIPO FUNCIONAL DE UN SISTEMA DE CLASIFICACIÓN PARA LAS
CEREZAS DE CAFÉ CASTILLO, EN FUNCIÓN DE SU ETAPA DE MADURACIÓN.

JOHANN ANDRÉS CRUZ CHÁVEZ
JUAN DAVID CASTRO FIERRO

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Electrónico y de Telecomunicaciones

Director
MSc. José León León

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES BOGOTÁ D.C
2021



Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0 Internacional (CC BY-NC-ND 4.0)

This is a human-readable summary of (and not a substitute for) the [license](#). [Advertencia](#).

Usted es libre de:

Compartir — copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato

La licenciante no puede revocar estas libertades en tanto usted siga los términos de la licencia

Bajo los siguientes términos:



Atribución — Usted debe dar [crédito de manera adecuada](#), brindar un enlace a la licencia, e [indicar si se han realizado cambios](#). Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que usted o su uso tienen el apoyo de la licenciante.



NoComercial — Usted no puede hacer uso del material con [propósitos comerciales](#).



SinDerivadas — Si [remezcla, transforma o crea a partir](#) del material, no podrá distribuir el material modificado.

No hay restricciones adicionales — No puede aplicar términos legales ni [medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otras a hacer cualquier uso permitido por la licencia](#).

Nota de aceptación:

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, queremos agradecerle a Dios y a nuestra familias, quienes sin su apoyo el terminar esta etapa de nuestras vidas no hubiera sido posible. En segundo lugar, a nuestro director de trabajo José León León, a los docentes Edwin Octavio Gómez González, Yury Andrea Jiménez y al ingeniero Diego Aguilar, quienes con su guía y motivación nos brindaron la confianza y las herramientas para llevar a cabo este proyecto. Por último, a la Universidad Católica de Colombia, quien a lo largo de estos cinco años nos brindó los recursos académicos para formarnos como futuros ingenieros.

Los Autores.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	13
1. GENERALIDADES	15
1.1. ANTECEDENTES	15
1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	25
1.3. OBJETIVOS	27
1.3.1. Objetivo general.....	27
1.3.2. Objetivos específicos	27
1.4. JUSTIFICACIÓN	27
1.5. ALCANCES Y LIMITACIONES	29
1.5.1. Alcances	29
1.5.2. Limitaciones	29
1.6. MARCO DE REFERENCIA.....	29
1.6.1. MARCO TEÓRICO	29
1.6.1.1 Automatización.	29
1.6.1.2 Agricultura industrial.	30
1.6.1.3 El café (Coffea).....	30
1.6.1.4 La fenología del café.....	31
1.6.1.5 Trazabilidad del café en el beneficio húmedo.....	33
1.6.1.6 Sensor de color.....	33
1.6.1.8. Electroimán.....	35
1.6.2. MARCO CONCEPTUAL.....	36
1.6.2.1 Café Arábica y Café Robusta.	36

1.6.2.2 Sistemas embebidos.....	36
1.6.2.3 Microcontrolador.	37
1.6.2.4 Circuito impreso (PCB).	38
2. METODOLOGÍA.....	39
2.1. COMPILACION DE LA INFORMACIÓN	39
2.2. DISEÑO DEL PROTOTIPO	40
2.2.1 Requerimientos del prototipo	40
2.2.1.1 Requerimientos técnicos.....	40
2.2.1.2 Requerimientos de usuario.	41
2.2.2 Selección de dispositivos tecnológicos	41
2.2.3. Experimentación del sensor.....	46
2.2.4. Diagrama de flujo del funcionamiento del prototipo	49
2.2.5. Diseño Estructural.....	50
2.2.6. Diseño electrónico	54
2.3. IMPLEMENTACION.....	57
2.3.1. Implementación electrónica	57
2.3.2. Implementación estructural.....	58
2.3.3. Programación del microcontrolador	65
2.3.3.1. Programa primera versión	65
2.3.3.1. Programa segunda versión.....	66
2.4. VALIDACIÓN DEL SISTEMA.....	73
3. DESCRIPCIÓN ECONÓMICA DEL PROYECTO	86
4. CONCLUSIONES.....	87
5. RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS.....	89

BIBLIOGRAFIA	90
ANEXOS	93

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Density Visualization con "LingLog/Modularity"	16
Figura 2. Posición de las barras evaluadas a lo largo del cilindro oscilador (a) y posición de fijación del sensor en la punta de la barra (b).....	17
Figura 3. Sensado cebolla grande.....	20
Figura 4. Diagrama General del sistema de clasificación.....	22
Figura 5. Sistema de adquisición de imágenes. (a) Posición de las cámaras. (b) Iluminación.....	22
Figura 6. Montaje experimental desarrollado para caracterizar el color sobre los frutos de café.	23
Figura 7. Maquina clasificadora de café tostado.	25
Figura 8. Curva de desarrollo del fruto de café después de floración.....	32
Figura 9. Estados de maduración de la cereza del café, (1) inmaduro, (2) pintón, (3) maduro, (4) sobre-maduro.....	32
Figura 10. Gráfico de luces incidentes sobre el objeto conjunto con las reflejadas.....	34
Figura 11. Variación de la luz reflejada acorde al color del objeto.....	35
Figura 12. Esquema de funcionamiento de un electroimán.....	36
Figura 13. Partes de un microcontrolador	37
Figura 14. Diagrama de bloques metodología.....	39
Figura 15. Sensor TCS3200.....	47
Figura 16. Diagrama de flujo.	50
Figura 17. Primer bosquejo del prototipo.....	51
Figura 18. Esquema del funcionamiento de un electroimán.....	52
Figura 19. Diseño 3D de la tolva vibratoria.....	53
Figura 20. Diseño 3D del prototipo ideal a implementar.....	53
Figura 21. Simulación de la parte electrónica del sistema de clasificación	54
Figura 22. Diseño de la PCB en 2D.....	55
Figura 23. Diseño de la PCB en 3D.....	55
Figura 24. Simulación del montaje electrónico la versión 3 del programa.....	56

Figura 25. Diseño 3D de la PCB para la versión 3 del programa.	57
Figura 26. Fuente DC.	58
Figura 27. Vista frontal de la tolva.	58
Figura 28. Vista superior de la tolva.	59
Figura 29. Primera versión de la banda.....	59
Figura 30. Prueba de la banda junto con el sensor, los M&M's y los sparkies.	60
Figura 31. Segunda versión de la banda trasportadora.....	61
Figura 32. Diseño 3D de los rodillos de la banda trasportadora.	61
Figura 33. Estructura básica del mecanismo de desviación.	63
Figura 34. Base utilizada para la estructura de desviación	63
Figura 35. Resultado final del mecanismo de clasificación.	64
Figura 36. Unificación de la banda junto con el sistema de clasificación y el sensor.	65
Figura 37. Sumas RGB de cerezas de café	68
Figura 38. Diagrama de flujo del programa.	69
Figura 39. Diagrama de flujo de la función inicioCal.....	70
Figura 40. Diagrama d flujo de la función autoCal.....	71
Figura 41. Diagrama de flujo de la función clasificación.....	72
Figura 42. Cuadros de papel utilizados para la segunda prueba.	74
Figura 43. Sparkies junto con cerezas de café genuinas.	75
Figura 44. Cerezas de café recién recolectadas.	77
Figura 45. Condición de las cerezas de café al llegar a Bogotá.....	78
Figura 46. Cantidad de café que llego en buen estado.	79
Figura 47. Arboles ubicados en el norte de Bogotá.....	82
Figura 48. Granos obtenidos a partir de los árboles encontrados en la ciudad.	83
Figura 49. Falsos positivos captados por el sistema	84

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Valores medios del desplazamiento horizontal de los clavos.	18
Tabla 2. Tabla comparativa entre máquinas clasificadoras de café.	24
Tabla 3. Comparación de sensores.	42
Tabla 4. Comparación de microcontroladores.	43
Tabla 5. Comparación de motorreductores.	44
Tabla 6. Comparación de servomotores.	45
Tabla 7. Comparación de pantallas LCD.	46
Tabla 8. Resultados de las mediciones con el sensor.	48
Tabla 9. Sumas RGB M&M y Sparkies.	67
Tabla 10. Valores RGB cerezas de café.	67
Tabla 11. Valores RGB tomados para el papel iris.	73
Tabla 12. Valores de las mediciones realizadas a los tres cuadros de papel.	75
Tabla 13. Valores RGB obtenidos con los M&M's y Sparkies.	76
Tabla 14. Valores RGB obtenidos para las cerezas de café castillo.	79
Tabla 15. Efectividad del sistema con M&M's y sparkies.	80
Tabla 16. Efectividad del sistema a partir de la validación con cerezas de café genuinas.	83
Tabla 17. Eficiencia del sistema en términos de tiempo y peso.	85
Tabla 18. Costos del proyecto	86

LISTA DE ANEXOS

Anexo A. Resultados de mediciones en la semana con SPARKIES Y M&M (COLOR ROJO).....	93
Anexo B. Resultados de mediciones en la semana con SPARKIES Y M&M (COLOR VERDE).....	94
Anexo C. Resultados de mediciones en la semana con SPARKIES Y M&M (COLOR AZUL).....	95
Anexo D. MANUAL DEL USUARIO.....	96
Anexo E. Datasheet del sensor (Archivo externo)	
Anexo F. Excel con datos tomados por el sensor (archivo externo)	
Anexo G. Video del funcionamiento del prototipo (archivo externo)	
Anexo H. Código del prototipo (archivo externo)	

INTRODUCCIÓN

Colombia en su mayoría es un país agrícola, y el café es uno de sus productos más importantes. Este representa según la revista Mitsubishi Motors y los datos de la federación nacional de cafeteros el 22% del PIB agrícola y el 12% del agropecuario del país. A su vez, la industria alrededor de este producto genera más o menos 730 mil empleos directos¹.

Debido a la gran importancia del sector cafetero, el Estado en conjunto con la Federación Nacional de Cafeteros están buscando promover la industrialización del sector. Esto se puede evidenciar en la agenda estratégica que firmaron estas dos partes para el sector cafetero en el periodo 2020-2030, donde se habla de tecnificar los cultivos para aumentar la producción y mejorar la calidad del café².

Dentro de los procesos para producir cafés especiales, es decir cafés con un valor agregado y de mejor calidad, es necesario hacer un proceso donde se clasifique la cereza del café (fruto de la planta Coffea), en frutos maduros y sobre maduros, debido a que la cereza de café, en estos estados de maduración, es la que permite obtener estos denominados cafés especiales. Pero la realización de este proceso que resulta extenso y tedioso para los productores, por la gran cantidad de cerezas (kilos), que los recolectores de café deben clasificar manualmente.

Cuando no se realiza el proceso manual, se emplea una técnica llamada método de flote. Este método lo realizan los caficultores de forma artesanal, introducen en un recipiente las cerezas de café con agua, así las cerezas en buen estado se hundirán y las malas flotarán, esto en términos de maduración. Sin embargo, este método contamina el agua, haciendo que este proceso sea omitido por los caficultores.

¹Mitsubishi Motors, La importancia del café en Colombia, El Día del Café en Colombia se celebra el 27 de junio pues tal día en el año 1927 se creó la Federación Nacional de Cafeteros, [sitio web] Julio 8 de 2020, [consultado el: 13 de septiembre de 2020], Disponible en. <https://mitsubishi-motors.com.co/blog/2020/07/08/dia-del-cafe-en-colombia/#:~:text=Adem%C3%A1s%2C%20en%20cifras%20de%20la,mejor%20caf%C3%A9%20suave%20del%20mundo>.

² Federación Nacional de Cafeteros. Federación Nacional de Cafeteros: Gobierno Nacional y Federación Nacional de Cafeteros firman agenda 2030 para el sector cafetero [En línea]. [Consultado: 14 de abril de 2020]. Disponible en: <https://cutt.ly/iynM8xs>

Por todo lo anteriormente mencionado, en este documento se plantea el desarrollo de un prototipo que realice la clasificación automatizada de la cereza del café, en función de su etapa de maduración por medio de un sensor de color, esto aplicado a la variedad castillo ya que esta es la que se cultiva mayormente en Colombia.

1. GENERALIDADES

1.1. ANTECEDENTES

La estrategia usada para buscar antecedentes del tema de investigación abordado en este proyecto es la definición de una ecuación de búsqueda, compuesta de las palabras más relevantes del tema, en el software VosViewer. Este software identifica las tendencias que se están manejando en el mundo en un tema específico. La búsqueda se realizó en dos bases de datos, Scopus y ScienceDirect y en Google académico.

Para este análisis, la búsqueda se realizó con una ventana de 5 años y se utilizó la ecuación de búsqueda que se muestra a continuación.

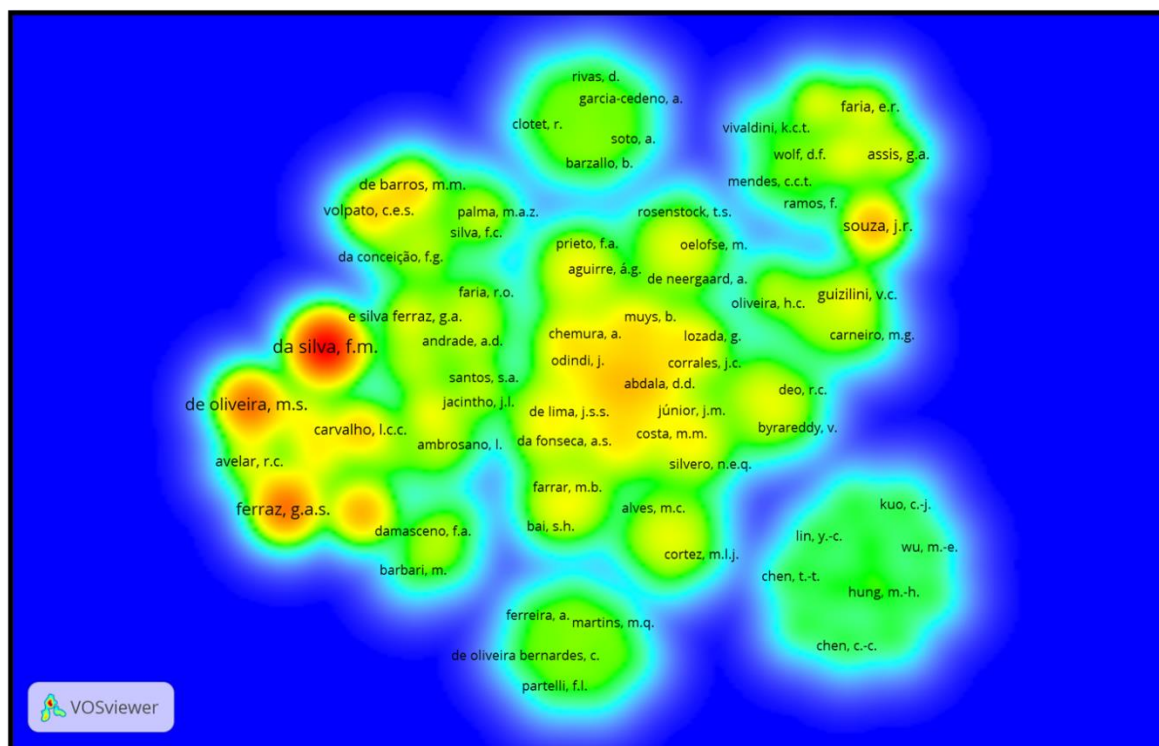
```
((Agriculture AND Precision) AND (applied AND coffee AND classification AND (ordinary OR special)) AND (using AND sensors AND (infrared OR color)) AND (instrumentation AND (pneumatic AND hydraulic))) AND ( LIMIT-TO ( PUBYEAR , 2020 ) OR LIMIT-TO ( PUBYEAR , 2019 ) OR LIMIT-TO ( PUBYEAR , 2018 ) OR LIMIT-TO ( PUBYEAR , 2017 ) OR LIMIT-TO ( PUBYEAR , 2016 ) )
```

Teniendo en cuenta esto se modificó la ecuación de búsqueda hasta encontrar el resultado esperado. La ecuación final con la que se realizó el análisis fue la siguiente:

```
(( precision AND agriculture ) AND ( coffee ) ) AND ( LIMIT-TO ( PUBYEAR , 2020 ) OR LIMIT-TO ( PUBYEAR , 2019 ) OR LIMIT-TO ( PUBYEAR , 2018 ) OR LIMIT-TO ( PUBYEAR , 2017 ) OR LIMIT-TO ( PUBYEAR , 2016 ) )
```

Se organizaron los documentos de tal manera, que primero aparecieran los documentos con más citas. A partir de esto se descargaron 3 extensiones según la base de datos, "CSV", ". EndNote", ". RIS". Extensiones usadas para hacer el análisis en VOSviewer, en donde se evidenciaron 3 apreciaciones que arroja el software. Cabe resaltar que la base de datos que se escogió al final para hacer el análisis fue Scopus con la extensión ". RIS". (Ver figura 1).

Figura 1. Density Visualization con "LingLog/Modularity".



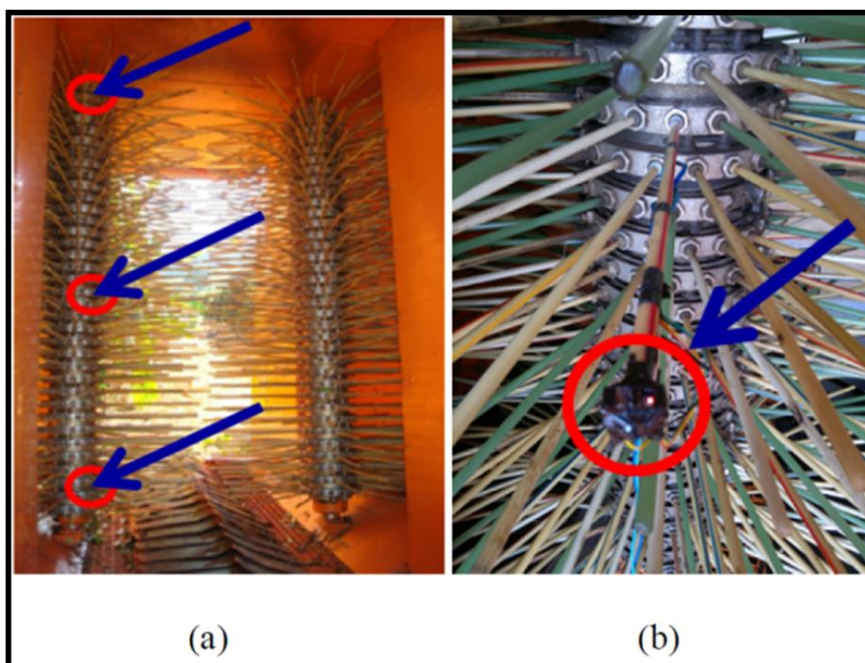
Fuente. Los autores.

A partir de estas gráficas arrojadas por el software se escoge uno de los autores con más publicaciones. Se opta por elegir el documento que tiene como título “Recomendación para la cosecha mecánica de café basada en el comportamiento vibratorio de los tallos”. Este es un artículo científico realizado en la Universidad Federal de Lavras en Brasil y escrito por varios autores entre ellos Fabio Moreira da Silva. El artículo trata de la aplicación de la mecanización en una cosecha de café variedad arábica. Esto debido a la necesidad de los productores de reducir los costos de la producción del café para poder satisfacer la demanda y mantenerse competitivos en el mercado.

Se centró en esta parte debido a que es un proceso costoso y requiere alta demanda de mano de obra, que al pasar de los días se está volviendo más escasa. Un tema importante para recalcar es que la migración de cosecha manual a semi-mecanizada o super-mecanizada hizo que salieran nuevas tecnologías y surgieran, por lo tanto, diversos modelos de estas máquinas. Por lo cual la investigación tuvo como objetivo analizar la vibración de las barras de cosechadora de café. Se tuvieron en cuenta diferentes ajustes, para poder comprender su comportamiento dinámico en términos de amplitud y frecuencia de vibración y a partir de esto, deducir las recomendaciones de ajuste para una cosecha de este tipo.

Los resultados de este estudio mostraron que el cultivo que se analizó presentó mayores amplitudes de vibración en los tallos verticalmente cuando se fijó la máquina para 8 y 10 kg con una vibración de 950 ciclos por minuto y con los tallos de 570 mm de longitud. La mayor eficiencia ocurrió cuando las barras vibraron verticalmente, promoviendo un mayor contacto entre ellas, las ramas laterales y el fruto del café.³ A continuación, se mostrarán una imagen de la máquina y una tabla con los resultados obtenidos con el estudio, donde se logra evidenciar que las varillas de 640 mm de longitud, presentaron diferencias bastante relevantes bajo la influencia de la regulación de los frenos para las vibraciones de 750 y 950 ciclos min (ver figura 2 y tabla 1).

Figura 2. Posición de las barras evaluadas a lo largo del cilindro oscilador (a) y posición de fijación del sensor en la punta de la barra (b)



Fuente. Ferreira Júnior, L. G., da Silva, F. M., Ferreira, D. D., & Sales, R. S. Recommendation for mechanical harvesting of coffee based on vibration behavior settings rods harvesters. [Recomendação para colheita mecânica do café baseado no comportamento de vibração das hastes derriçadoras] [en línea]. En: Revista Ciencia

³ Ferreira Júnior, L. G., da Silva, F. M., Ferreira, D. D., & Sales, R. S. Recommendation for mechanical harvesting of coffee based on vibration behavior settings rods harvesters. [Recomendação para colheita mecânica do café baseado no comportamento de vibração das hastes derriçadoras] [en línea]. En: Revista Ciencia Rural. 2016, Volumen 46. P. 273-278 [Consultado: 28 de marzo de 2020] Disponible en: doi:10.1590/0103-8478cr20141679

Rural. 2016, Volumen 46. P. 273-278 [Consultado: 28 de marzo de 2020] Disponible en: doi:10.1590/0103-8478cr20141679

Tabla 1. Valores medios del desplazamiento horizontal de los clavos.

Longitud del vástago (mm)	Freno (kgf)	Vibración (ciclos / min)	Desplazamiento vertical (mm)
640	12	750	2,7 a
	10	750	3,0 a
	8	750	10,0 b
	12	850	5,0 a
	8	850	5,7 a
	10	850	7,0 a
	12	950	8,0 a
	10	950	16,0 b
	8	950	19,7 b
600	12	750	7,0 a
	10	750	14,0 b
	8	750	22,7 c
	12	850	9,0 a
	10	850	16,3 b
	8	850	28,0 c
	12	950	11,7 a
	10	950	29,3 b
	8	950	32,3 b
570	10	750	3,7 a
	12	750	13,0 b
	8	750	35,3 c
	10	850	3,3 a
	8	850	7,7 b
	12	850	14,0 c
	12	950	16,0 a
	8	950	44,3 b
	10	950	45,3 b

Fuente: Ferreira Júnior, L. G., da Silva, F. M., Ferreira, D. D., & Sales, R. S. Recommendation for mechanical harvesting of coffee based on vibration behavior settings rods harvesters. [Recomendação para colheita mecânica do café baseado no comportamento de vibração das hastes derriçadoras] [en línea]. En: Revista Ciencia

Rural. 2016, Volumen 46. P. 273-278 [Consultado: 28 de marzo de 2020] Disponible en: doi:10.1590/0103-8478cr20141679

Posterior a esto se realizó una búsqueda en la biblioteca de la Universidad Católica de Colombia con el fin de tomar referencias locales, debido a que es allí en donde se va a realizar el proyecto. Cabe resaltar que los siguientes dos documentos de los cuales se va a hablar fueron realizados en la facultad de ingeniería y por el programa de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones.

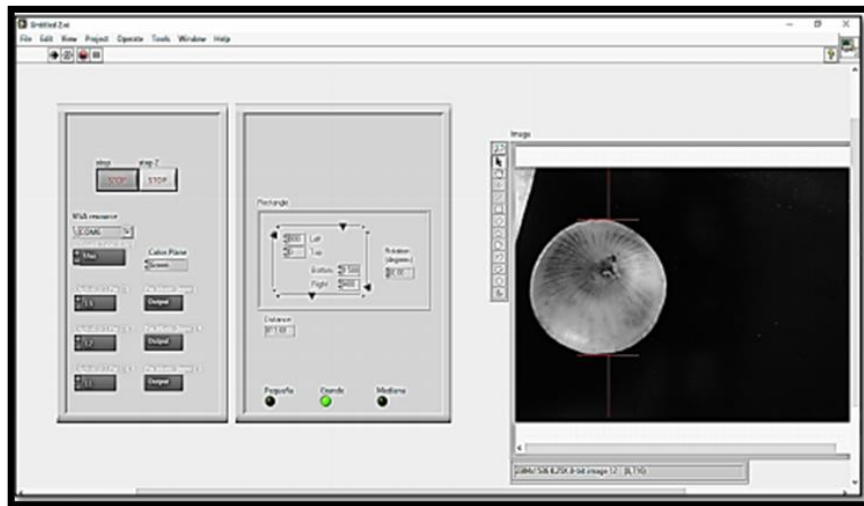
El primer documento elegido tiene como título “sistema semiautomatizado de clasificación de la cebolla cabezona” realizado por Fredy Alexander Palacios Caicedo y John Jairo Lizarazo Cruz. Los autores plantean el diseño e implementación de un sistema semiautomatizado de clasificación de cebolla cabezona implementando una HMI (Human machine Interface). Se desarrolló en el software LabView 2013, debido a que este facilitaba efectuar reconocimiento de imágenes y comunicación con el arduino, que recibía información de los sensores que componían el hardware del sistema.

El dispositivo clasificaba en 3 categorías acorde con su tamaño (Pequeña, mediana y grande) esto por medio de reconocimiento imágenes y los pixeles que arrojaba el software.⁴

Este trabajo de grado se escogió, ya que va muy de la mano con el proyecto que se planteó, la clasificación de la cereza del café, por lo tanto, elementos que utilizaron estos autores pueden ser utilizados en el prototipo que se planteó realizar, por lo cual es de vital importancia. A continuación, se mostrará la interfaz gráfica del sistema (Ver figura 3).

⁴ PALACIOS CAICEDO, Fredy alexander y LIZARAZO CRUZ, John Jairo. Sistema semiautomatizado de clasificación de la cebolla cabezona [en línea]. Trabajo de Grado para optar por el título de Ingeniero Electrónico y de Telecomunicaciones. Bogotá D.C. Universidad Católica de Colombia. Facultad de Ingeniería. 2017. 68 p. [Consultado: 28 de marzo de 2020] Disponible en: <https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/14677/1/Documento%20clasificaci%C3%B3n%20cebolla%20%28Tesis%29.pdf>

Figura 3. Sensado cebolla grande.



Fuente. PALACIOS CAICEDO, Fredy alexander y LIZARAZO CRUZ, John Jairo. Sistema semiautomatizado de clasificación de la cebolla cabezona [en línea]. Trabajo de Grado para optar por el título de Ingeniero Electrónico y de Telecomunicaciones. Bogotá D.C. Universidad Católica de Colombia. Facultad de Ingeniería. 2017. 68 p. [Consultado: 28 de marzo de 2020] Disponible en: <https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/14677/1/Documento%20clasificaci%3f%b3n%20cebolla%20%28Tesis%29.pdf>

En el tema de clasificación de la cereza del café, acorde a su estado de madurez, se han trabajado varias cosas, tales como manejo de sensores y reconocimiento de imagen, a continuación, se describen los documentos más relevantes en este campo.

Entre estos documentos se encuentra una tesis escrita por Zulma Liliana Sandoval, estudiante de maestría en automatización industrial de la Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales, que habla sobre un sistema de visión artificial creado con el fin de clasificar la cereza del café en 11 categorías de acuerdo con su estado de madurez. Se usaron tres métodos de selección: Bayesiano, redes neuronales y clustering difuso. Dando como resultado que el método Bayesiano tenía un error en la clasificación del 5,43%, el de redes neuronales un error del 7,46% y el clustering difuso tuvo un error de 19,46%⁵.

⁵ SANDOVAL NIÑO, Zulma Liliana y PRIETO ORTIZ, Flavio Augusto. CARACTERIZACIÓN DE CAFÉ CEREZA EMPLEANDO TÉCNICAS DE VISIÓN ARTIFICIAL [en línea]. Tesis presentada para obtener el título de Magister en automatización industrial. Manizales, Caldas. Universidad Nacional de Colombia, sede manizales.

Así mismo, en la Universidad Autónoma del Caribe, el grupo de investigación en ingeniería mecatrónica (GIIM), desarrolló dos algoritmos, uno para el reconocimiento de los frutos de café a partir de su estado madurez y otro para la detección de broca mediante métodos que relacionan el procesamiento de imágenes. En la parte del reconocimiento de color se tienen 5 etapas, una es un banco de imágenes, en donde se tienen imágenes de frutos maduros y verdes. En otra, se limpia de imperfecciones y se filtra el ruido de la imagen. Después se extraen solo los elementos importantes de esta y en la parte final, se da el reconocimiento y la interpretación, mediante una red neuronal que clasifica si los frutos están verdes o maduros. Al final este tuvo una garantía del 97% al detectar los frutos que estaban maduros, por lo que se dice que es un método que puede brindar alta efectividad.⁶

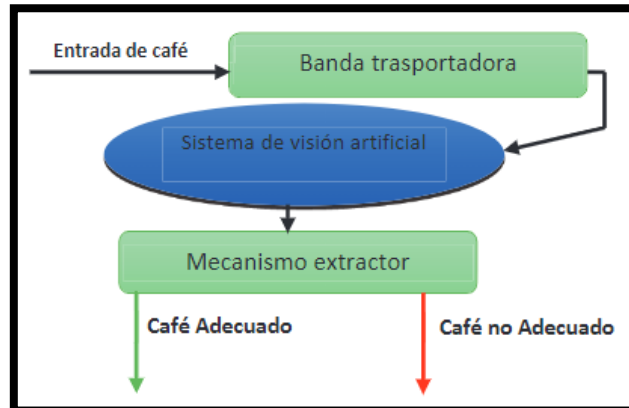
En otro documento, se encuentra la continuación del anterior proyecto. Se propone diseñar un sistema automático de selección de frutos de café mediante técnicas de visión artificial, en compañía de un ingeniero mecánico. El funcionamiento de este sistema consiste en una banda transportadora que se encarga de llevar los frutos del café hacia el sistema de visión artificial en donde se hace el proceso mencionado en el trabajo preliminar. Después se llevan a un mecanismo extractor, que separa el café en buenas condiciones (el café maduro y sin broca) y el café en malas condiciones. Al final consigue una efectividad de clasificación del 87%.⁷ A continuación, se mostrarán dos imágenes, la primera el diagrama de funcionamiento general del sistema (figura 4) y la segunda muestra como están ubicadas las cámaras utilizadas para la obtención de la información junto con el conjunto de iluminación que tiene el sistema. (figura 5).

Facultad de Ingeniería y arquitectura. 2007. 12 p. [Consultado: 13 de septiembre de 2020] Disponible en: <http://www.scielo.org.co/pdf/rfnam/v60n2/a15v60n2.pdf>

⁶ HERRERA PERÉZ, Jean Carlos, MEDINA ORTIZA, Silfiri Manuel. Classification of coffee fruits based on ripeness and broca detection using image processing techniques [en línea]. Barranquilla, Colombia, Universidad autónoma del Caribe. Facultad de Ingeniería y arquitectura. 2015. 8 p. [Consultado: 14 de septiembre de 2020] Disponible en: <http://www.scielo.org.co/pdf/prosp/v14n1/v14n1a02.pdf>

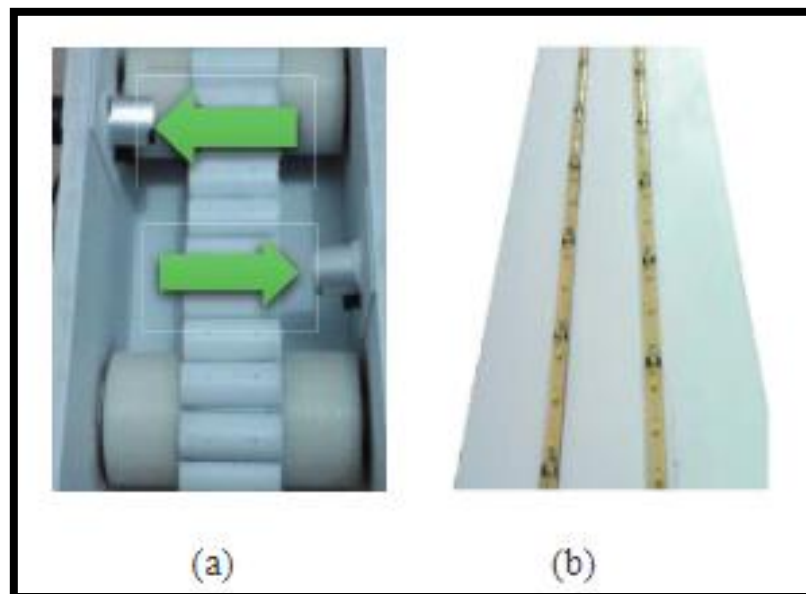
⁷ HERRERA PERÉZ, Jean Carlos, MEDINA ORTIZA, Silfiri Manuel, GUALDRON, Oscar. Design of an Automated Coffee Selection System by Means of Computer Vision Techniques [en línea]. UIS Ingenierías. 2016. 8 p. [Consultado: 14 de septiembre de 2020] Disponible en: <http://revistas.uis.edu.co/index.php/revistauisingenierias/article/view/5572/5758>

Figura 4. Diagrama General del sistema de clasificación.



Fuente. HERRERA PERÉZ, jean Carlos, MEDINA ORTIZA, silfiri manuel. GUALDRON, oscar. Design of an Automated Coffee Selection System by Means of Computer Vision Techniques [en línea]. UIS Ingenierias. 2016. 8 p. [Consultado: 14 de septiembre de 2020] Disponible en: <https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistausingenierias/article/view/5572/5758>

Figura 5. Sistema de adquisición de imágenes. (a) Posición de las cámaras. (b) Iluminación.



Fuente. HERRERA PERÉZ, jean Carlos, MEDINA ORTIZA, silfiri manuel. GUALDRON, oscar. Design of an Automated Coffee Selection System by Means of Computer Vision Techniques [en línea]. UIS Ingenierias. 2016. 8 p. [Consultado: 14 de septiembre de 2020]

2020]

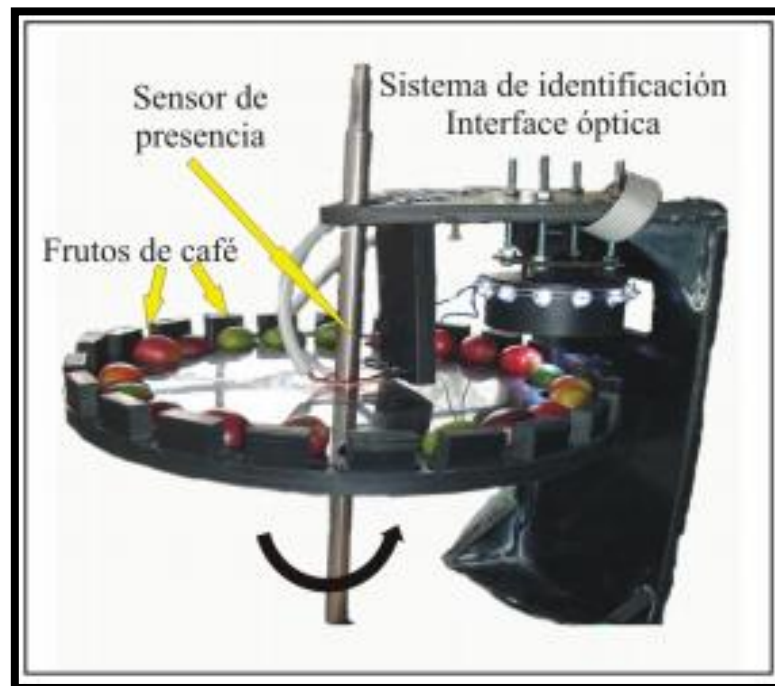
Disponible

en:

<https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistauisingenierias/article/view/5572/5758>

Por otro lado, los autores Paula Ramos y Juan Sanz presentan un método utilizado para identificar 4 estados de maduración de la cereza del café, con su respectiva implementación en un circuito. Se hizo por medio de un módulo AXE045 que trae un sensor de colores RGB el cual era el encargado de identificar los colores, además de un montaje mecánico para movilizar las cerezas. El sistema de clasificación logró una eficacia superior al 95% para todos los estados de maduración seleccionados (Sobre maduro, Maduro, pintón e inmaduro). En la figura 6 se puede observar cómo quedó conformado el sistema de clasificación.⁸

Figura 6. Montaje experimental desarrollado para caracterizar el color sobre los frutos de café.



Fuente. RAMOS GIRALDO, Paula Jimena, SAENZ URIBE, Juan Rodrigo, OLIVEROS TASCÓN, Carlos Eugenio, IDENTIFICACIÓN Y CLASIFICACIÓN DE FRUTOS DE CAFÉ EN TIEMPO REAL, A TRAVÉS DE LA MEDICIÓN DE COLOR [en línea].

⁸ RAMOS GIRALDO, Paula Jimena, SAENZ URIBE, Juan Rodrigo, OLIVEROS TASCÓN, Carlos Eugenio, IDENTIFICACIÓN Y CLASIFICACIÓN DE FRUTOS DE CAFÉ EN TIEMPO REAL, A TRAVÉS DE LA MEDICIÓN DE COLOR [en línea]. Cenicafé. 2010. 12 p. [Consultado: 14 de septiembre de 2020] Disponible en. <https://www.cenicafe.org/es/publications/arc061%2804%29315-326.pdf>

Cenicafé. 2010. 12 p. [Consultado: 14 de septiembre de 2020] Disponible en. <https://www.cenicafe.org/es/publications/arc061%2804%29315-326.pdf>

Por otra parte, dentro de las búsquedas que se realizaron se encontró que actualmente en el mercado existen máquinas para clasificar los granos de café por color, pero estas máquinas están aplicadas hacia otro segmento de la trazabilidad del café en este caso para el beneficio seco. Se encuentran máquinas que clasifican el grano del café acorde a su color, pero ya después de los procesos de tostión o trillado. Algunas de ellas, logran clasificar de 1 a 2 toneladas por hora, su funcionamiento es a 220v, y tienen precios bastante elevados. Uno de los fabricantes da una descripción de la máquina expresando que la máquina inteligente lo hace a través de reconocimiento de color y pone los granos en seis canales, siendo capaz de eliminar granos muertos, granos negros, sin cáscara y diferentes colores de granos en los granos de café.⁹

Teniendo en cuenta esto, la empresa clasifica su máquina acorde con ciertos parámetros de funcionalidad, mostrando la siguiente tabla (ver tabla 2).

Tabla 2. Tabla comparativa entre máquinas clasificadoras de café.

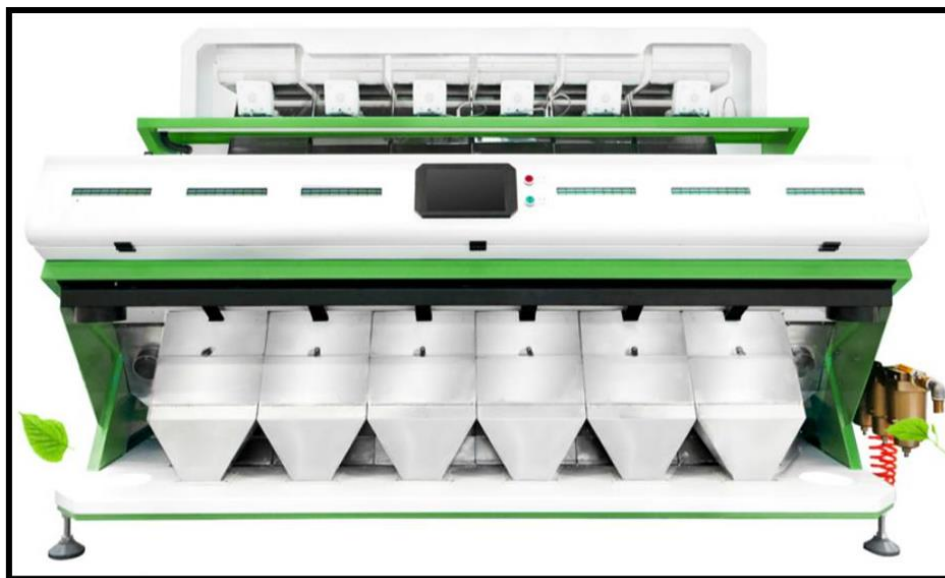
Modelo	6SXZ-68	6SXZ-136	6SXZ-272	6SXZ-408	6SXZ-612	6SXZ-680
Precisión de clasificación (%)	≥99	≥99	≥99	≥99	≥99	≥99
Voltaje (v / Hz)	220V 50HZ	220V 50HZ	220V 50HZ	220V 50HZ	220V 50HZ	220V 50HZ
Fuente de alimentación (Kw)	1.0-1.3	1.4-1.8	2.5-2.9	4.8-5.2	4.8-5.2	8.5-10.9
Presión (Mpa)	0.4-0.6	0.5-0.7	0.6-0.8	0.6-0.8	0.6-0.8	0.6-0.8
Peso (Kg)	260	440	820	1180	1620	2200
Dimensión (mm)	950 * 1510 * 1428	1290 * 1510 * 1770	2010 * 1530 * 2100	2680 * 1530 * 2100	3710 * 1530 * 2100	4200 * 1530 * 2250

Fuente. Ne Fuente. New Belt. Máquina de clasificación de color de grano de café [En línea]. [Consultado: 22 de abril de 2020]. Disponible en <https://cutt.ly/8ynMJey>

La máquina mostrada tiene seis ductos, por donde se clasifica el grano de café ya tostado para al final tener una clasificación de casi 99%. (ver figura 7).

⁹ Fuente. New Belt. Máquina de clasificación de color de grano de café [En línea]. [Consultado: 22 de abril de 2020]. Disponible en <https://cutt.ly/8ynMJey>

Figura 7. Máquina clasificadora de café tostado.



Fuente New Belt. Máquina de clasificación de color de grano de café [sitio web]. [Consultado: 22 de abril de 2020]. Disponible en: <https://cutt.ly/iynMFRp>

1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El Tolima es el tercer departamento que más produce café en Colombia representando el 12,8% de la producción total nacional. Por otra parte, Planadas es el primer productor a nivel departamental¹⁰. El municipio cuenta, con gran cantidad de asociaciones de caficultores, es por esto por lo que es líder en asociatividad. Según la Asociación Café Tolima Suave el año 2019 vendió alrededor de 25 contenedores a la exportadora de café del municipio que equivalen a 625.000 kilos de café pergamino seco.

Actualmente los caficultores del municipio están interesados en mejorar la calidad de su café, ya que esto les permitirá ofrecer cafés especiales, los cuales representan mayor ingreso económico que oscila entre 50.000 y 200.000 pesos versus una carga de café convencional, es decir, 125 kilos de café pergamino seco, cuyo precio actualmente ronda sobre 1'200.000 a 1'300.000 pesos colombianos. Cabe resaltar que este precio varía constantemente acorde a la bolsa de Nueva York.

¹⁰ EL CRONISTA. Tolima tercer productor de café en Colombia, 03 de febrero de 2020, [En línea]. [consultado: 14 de septiembre de 2020]. Disponible en. <https://www.elcronista.co/destacadas/tolima-tercer-productor-de-cafe-en-colombia->

Para obtener café de una mayor calidad, se deben escoger los mejores frutos (maduros y sobre maduros), a través de un proceso de clasificación del fruto del café y es allí donde surge la problemática, ya que actualmente, lo mejor sería realizar esta clasificación desde el proceso de recolección.

En la actualidad, en el municipio hay escasez de mano de obra agrícola lo cual lleva a que los productores no le puedan exigir a los recolectores que recojan los frutos maduros y sobre maduros. La razón es que esto conllevaría a que recojan menos kilos de café, lo que representaría una disminución de ingresos para los recolectores, debido a que ellos se les paga por kilo recogido.

Además, se evidenció una problemática ambiental en el proceso de la clasificación de la cereza (fruto) del café, debido a que actualmente las fincas que realizan este tipo de clasificación lo hacen a través del llamado “método de flotes” o “tanque sifón”. En donde, en vez de revisar los granos individualmente, se llena un tanque de agua y de cerezas de café. Los granos que están en óptimas condiciones, es decir, los granos sobre-maduros y maduros se quedan en el fondo y el resto, flotan. Los granos flotantes se sacan y son vendidos como carga comercial o pasilla y lo que se queda en el tanque, es el café de mejor calidad. Sin embargo, por experiencias de familiares cafeteros, se sabe que este método exige un consumo elevado de agua que no puede ser reutilizada debido a que ya queda contaminada con los lixiviados que bota la cereza del café y el mucílago. El agua utilizada no es apta para ningún uso, por lo tanto, debe ser desechada.

Estas problemáticas por lo general afectan a los pequeños productores de café (es decir fincas de 3 hectáreas o menos). Familias que dependen directa y exclusivamente, de su unidad productiva.

En este sentido, lo que plantea el proyecto, es desarrollar un prototipo de bajo costo que permita clasificar la cereza del café, acorde con su color, de tal manera que identifique los frutos sobre maduros y maduros y el resto. A futuro, este desarrollo puede ser mejorado y usado por los caficultores para que tengan una opción para seleccionar su café. Esto puede llevar a que el caficultor genere ingresos adicionales, y además reduzca el desperdicio de recursos naturales como el agua. De esta manera, esta propuesta se plantea resolver la pregunta de investigación:

¿Cómo desarrollar un prototipo funcional de bajo costo que se encargue de la clasificación de la cereza del café castillo?

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. Objetivo general

Desarrollar un prototipo funcional de bajo costo que realice la separación de las cerezas de café sobre maduras y maduras del resto para la variedad de café Castillo.

1.3.2. Objetivos específicos

1. Comparar los diferentes métodos que permitan realizar la clasificación de las cerezas de café castillo.
2. Definir los requerimientos del prototipo para la clasificación automatizada de la cereza de café castillo.
3. Definir e implementar la(s) tecnología(s) del sistema de reconocimiento de cerezas sobre maduras y maduras, para la variedad castillo.
4. Diseñar e implementar el sistema para la separación de las cerezas (de café castillo), sobre maduras y maduras del resto.
5. Validar el funcionamiento del prototipo implementado.

1.4. JUSTIFICACIÓN

El sector cafetero es de gran importancia para Colombia, ya que, este representa una gran fuente de ingreso del país. Según Portafolio, en el año 2019, los ingresos obtenidos por los 540.000 cafeteros del país fueron de 7,2 billones de pesos. En este mismo año, la industrialización del sector creció 10,3%. Esto confirma el aporte que realizan los cafés con un mayor valor agregado, que ayudo a que la actividad cafetera tuviera una participación del 12,5% en el sector agropecuario, que, a su vez, tuvo una participación del 17,6% en el producto interno bruto (PIB) del país.¹¹

En cuanto a la producción de cafés especiales (cafés con un valor agregado y de mejor calidad), se emplean los frutos (cerezas de café), sobre maduros y maduros. Los expertos recomiendan que la clasificación se haga en el momento de la recolección, tomando solo las cerezas de café que se encuentren en estas etapas de maduración. En Planadas, Colombia, esto no ocurre, ya que los caficultores, con fincas con un área menor a tres hectáreas (caficultores pequeños), realizan la clasificación de las cerezas de café después de su recolección. Ellos contratan recolectores de café a quienes les

¹¹ Federación Nacional de Cafeteros. Caficultura crece 9,5% en 2019, tres veces más que la economía nacional [sitio web]. [Consultado: 9 de octubre de 2020]. Disponible en: <https://federaciondecafeteros.org/wp/listado-noticias/caficultura-crece-95-en-2019-tres-veces-mas-que-la-economia-nacional/>

pagan por kilos recogidos, es decir, un recolector que solo recolecte frutos maduros y sobre maduros, va a tener menos ingresos que uno que recoja todas las cerezas de café que pueda. Lo anterior, junto con la escasez de mano de obra en el municipio, hace que los caficultores no puedan pedir una clasificación en la recolección por parte de los recolectores. Si se exigiera, se le dificultaría al caficultor encontrar recolectores para su finca.

Esto hace que los caficultores se apoyen en dos métodos para realizar la clasificación de las cerezas de café. Uno es realizarlo de forma manual y la otra con un método denominado de flote. Dicho método, consiste en introducir las cerezas de café en un recipiente con agua. De esta manera las cerezas sobre maduras y maduras se hunden y las otras flotan. Este método a pesar de servir para la clasificación, después de emplearse el agua ya no puede consumirse ni regar con ella. Esto, genera contaminación orgánica, debido a los desechos sólidos como la pulpa y el mucílago, entre otros componentes de la cereza del café¹². Además, los procesos toman bastante tiempo, por lo que generalmente no se realiza la clasificación de las cerezas de café.

En la agenda estratégica para el sector cafetero 2020-2030, denominada “Por la Sostenibilidad Cafetera”¹³, firmada por el Gobierno Nacional y la Federación Nacional de Cafeteros, se plantean puntos como tecnificar más el sector, esto en busca de aumentar la producción y la calidad del café. Se busca suplir la creciente demanda mundial de cafés de calidad y también, reducir los costos a los caficultores. En el punto dos de esta agenda, se encuentra un subpunto titulado “Fortalecer prácticas ambientales”, el cual habla de que se deben adaptar tecnologías que contribuyan a la reducción del uso de agua en los procesos de clasificación del café.

En este orden de ideas, en este proyecto se plantea, como una alternativa, el desarrollo de un prototipo que pueda separar las cerezas de café castillo sobre maduras y maduras del resto. De esta manera, los caficultores pequeños de Planadas, Tolima, podrían realizar la clasificación de las cerezas de café castillo sobre maduras y maduras, lo que permitirá la producción de cafés especiales.

¹² Beneficiado húmedo del café, ergomix, 15 de marzo de 2013, [en línea]. [consultado: 8 de octubre de 2020] Disponible en: <https://www.engormix.com/agricultura/articulos/beneficiado-humedo-cafe-t30188.htm>

¹³ Federación Nacional de Cafeteros. Federación Nacional de Cafeteros: Gobierno Nacional y Federación Nacional de Cafeteros firman agenda 2030 para el sector cafetero [En línea]. [Consultado: 14 de abril de 2020]. Disponible en: <https://cutt.ly/iynM8xs>

1.5. ALCANCES Y LIMITACIONES

1.5.1. Alcances

1. Este trabajo va dirigido a los caficultores pequeños del municipio de Planadas, Colombia. Debido a que un integrante del grupo trabaja en la Asociación Café Tolima Suave, ubicada en el municipio, esto permite adquirir fácilmente información de importancia para el proyecto.
2. El prototipo es capaz separar las cerezas sobre maduras y maduras, esto para la variedad de café castillo.
3. Aunque el proyecto está dirigido a los caficultores pequeños del municipio de Planadas, Colombia; este proyecto podrá usarse en cualquier lugar, siempre y cuando sea para clasificar cerezas, cuyo estado de maduración óptimo, en términos de colorimetría, sea similar al del café castillo.
4. La validación se realizó con cerezas de café auténticas.

1.5.2. Limitaciones

1. Todos los componentes con los que se construyó el prototipo fueron conseguidos en Bogotá, ya que los componentes importados no solo representaban más costos, sino que, la pandemia actual se podía ampliar los tiempos de las importaciones.
2. El prototipo se implementó y validó en Bogotá, Colombia. Gracias a que en esta ciudad fue posible conseguir los componentes y equipos necesarios para el desarrollo de este.
3. El prototipo resultado de este trabajo, es una versión de prueba, es decir, la cantidad de granos a seleccionar es baja, y servirá como prueba de concepto.

1.6. MARCO DE REFERENCIA.

1.6.1. MARCO TEÓRICO

1.6.1.1 Automatización. La automatización es un sistema donde se cambian tareas de producción, que son realizadas por operadores humanos a un conjunto de elementos tecnológicos.

La función de un sistema de Automatización es manipular los valores de un proceso. El objetivo es poner en función dicho proceso sin que el operador intervenga sobre sus elementos. El operador controla al sistema de automatización mas no interviene como tal en el proceso industrial.

Un sistema de automatización tiene dos partes principales.

- Parte de mando.
- Parte operativa.

La parte operativa es la parte que interviene directamente sobre la máquina. Son los elementos que hacen que la máquina se ponga en movimiento y realice la operación que se requiera. Algunos de los componentes que conforman la parte operativa son los accionadores de las máquinas como motores, cilindros, compresores, los captadores como fotodiodos, finales de carrera, etc.

La Parte de Mando suele ser un autómata programable (Microcontrolador o PLC), tarjetas electrónicas o módulos lógicos neumáticos (tecnología cableada). En un sistema de fabricación automatizado el autómata programable está en el centro del sistema, este debe ser capaz de comunicarse con todos los elementos que conforman el sistema automatizado.¹⁴

1.6.1.2 Agricultura industrial. La agricultura industrial se refiere más que todo a un tipo de producción agropecuaria industrializada y más moderna de ganado, aves, peces y cultivos. Este tipo de agricultura emplea métodos técnico-científicos, políticos y económicos tales como, innovación en maquinaria, métodos en la producción agropecuaria y búsqueda de mercado internacional. Estas metodologías son generalizadas en países desarrollados y cada vez más comunes en todo el mundo.¹⁵

1.6.1.3 El café (Coffea). El café pertenece a una familia de plantas llamadas Rubiáceas, teniendo más de 600 géneros y cerca de 10.000 especies. La palabra café surge del término “Kagua” un genérico que era utilizado para los vinos, esto debido a que así se trataba en esta época, como un vino, tiempo después se difundió con la palabra turca “kagüe”, que al final ya termino adaptándose a los diferentes idiomas, pero conservando su raíz.

El café procede del norte de Etiopía, probablemente de la provincia de Kaffa, esto hablando de la variedad “arábica” la cual representa el 60% de la producción mundial y es la que más se produce actualmente en Colombia, la cual es caracterizada por su suavidad. Por otra parte, está la variedad “robusta” que proviene de Uganda la cual tiene un mayor porcentaje de cafeína, y representa el 35% de la producción mundial.

¹⁴ Automatización. Autómatas programables. Curso básico de autómatas Programables. Diciembre 2001. [En línea]. [Consultado: 14 de abril de 2020]. Disponible en: <https://goo.gl/MGuQXg>

¹⁵ Boletín agropecuario. Agricultura industrial [En línea]. [Consultado: 14 de abril de 2020]. Disponible en: <https://cutt.ly/wynM9AO>

Como se mencionó anteriormente el consumo de café empezó en Etiopía, en donde no se le daba el uso que tiene hoy en día. Al principio solo se hacían infusiones con sus hojas y su fruto, además se masticaban los granos, costumbre que aun hoy se conserva en ciertas partes de África, pero fueron los árabes los principales responsables de la difusión del consumo del café en el mundo. En el siglo XV ya consumían café de manera regular y lograron expandirlo por todo el mundo musulmán llegando incluso a Turquía en 1554. De allí, el café entro a Europa por el puerto de Venecia en el siglo XVII, expandiéndose por el continente y alcanzando a Estados Unidos a finales de este siglo. Los responsables la expansión por estos nuevos continentes, fueron los holandeses en su búsqueda de independización de los árabes. Así, a principios del XVIII, Holanda fue líder en la producción mundial de café. De hecho, una de las teorías sobre cómo llegó el café a Latinoamérica, es que fueron los mismos holandeses, quienes lo introdujeron, por lo que se conoce hoy en día como Surinam.

Para el siglo XIV el café se convirtió en un cultivo de suma importancia en el continente, claro está que, en esto, influyó que la roya del cafeto arrasó con todos los cultivos de Selan, hoy Sri Lanka, quienes eran los mayores productores en ese momento.

Algunos indicios históricos, señalan que fueron los jesuitas. los responsables de traer la semilla del café a la Nueva Granada alrededor del año 1730. Los primeros cultivos de café en Colombia crecieron en la zona oriental del país, y en 1835 se exportaron los primeros sacos desde Cúcuta. Para 1850, el café ya había llegado a Cundinamarca, Antioquia y Caldas. En 1870, la producción paso de unos 60.000 sacos a más de 600.000 y para finales del siglo XIX, el café era el principal producto de exportación del país.¹⁶

1.6.1.4 La fenología del café. El investigador Víctor Hugo Ramírez en la revista de Cenicafé define la fenología como:

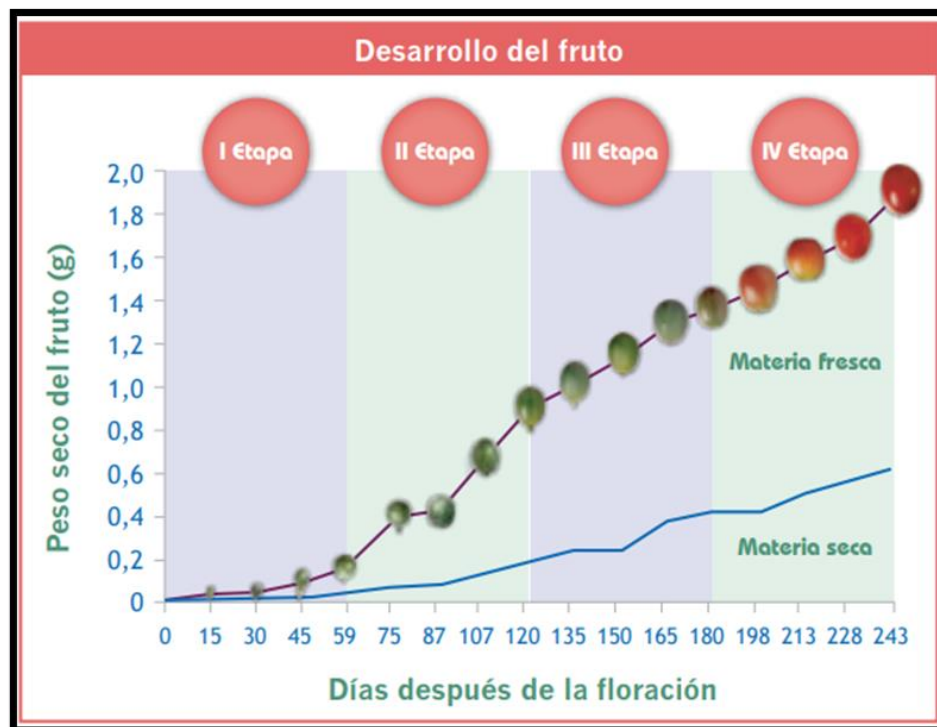
La fenología se refiere al desarrollo, diferenciación e inicio de formación de los órganos de las plantas, también conocido como el estudio de fenómenos biológicos periódicos. El conocimiento de la fenología de cualquier cultivo sirve para desarrollar modelos de crecimiento y desarrollo de los cultivos, además de ser útil para apoyar la toma de decisiones a nivel de sistema de producción. El conocimiento de la fenología es muy

¹⁶ Café de Colombia. real academia del café [sitio web]. [Consultado: 14 de abril de 2020]. Disponible en: <https://realacademiadelcafe.com/modulo1.php>

importante para la apropiada planeación y manejo de prácticas como la fertilización, control de enfermedades, insectos y arvenses, entre otras.¹⁷

De acuerdo con esto se puede hacer un estudio de cómo evoluciona la maduración de la cereza del café con lo cual se desarrolla una gráfica (figura 8) que muestra dicha evolución, donde las semanas optimas de recolección son entre la semana 228 y 243 después de floración.

Figura 8. Curva de desarrollo del fruto de café después de floración.

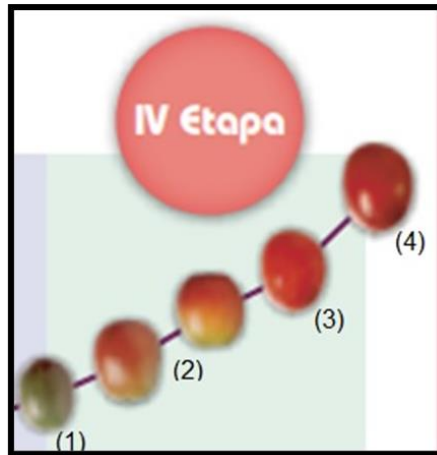


Fuente: Avances técnicos Cenicafé [en línea]. Manizales, Caldas, ISSN - 0120 – 0178, marzo de 2014, Vol. nro. 441, [Consultado: 14 de abril de 2020]. Disponible en <https://cutt.ly/EynM0DE>

Teniendo en cuenta esto y analizando la gráfica, para la cosecha, se toma el grano de la IV etapa en donde se clasifican en 4 los frutos, inmaduros, pintones, maduros y sobre-maduros, estos se muestran en la figura 9.

Figura 9. Estados de maduración de la cereza del café, (1) inmaduro, (2) pintón, (3) maduro, (4) sobre-maduro.

¹⁷ Avances técnicos Cenicafé [en línea]. Manizales, Caldas, ISSN - 0120 – 0178, marzo de 2014, Vol. nro. 441, [Consultado: 14 de abril de 2020]. Disponible en <https://cutt.ly/EynM0DE>



Fuente: Avances técnicos Cenicafé [en línea]. Manizales, Caldas, ISSN - 0120 – 0178, marzo de 2014, Vol. nro. 441, [Consultado: 14 de abril de 2020]. Disponible en <https://cutt.ly/EynMODE>

1.6.1.5 Trazabilidad del café en el beneficio húmedo. El proceso completo del café se divide en dos etapas de beneficio, el beneficio húmedo y el beneficio seco. Este proyecto se centra en el beneficio húmedo del café. El beneficio húmedo comprende la recolección, la clasificación, el despulpado, la fermentación, el lavado y el secado del grano.¹⁸ La recolección es el proceso en donde se toman los frutos del cultivo. Lo ideal es solo tomar los frutos maduros y sobre maduros. Después, se procede a hacer la clasificación, proceso que no todos los productores realizan debido a lo tedioso que es. Posteriormente, el despulpado, que es cuando se le retira la cáscara al fruto para luego ser lavado, con el fin de quitar el mucílago por completo, acorde al proceso que se le quiera realizar al grano. Por último, se lleva a los secaderos o marquesinas, en donde se pone en proceso de secado hasta alcanzar la humedad deseada.¹⁹

1.6.1.6 Sensor de color. Un sensor de color es un tipo de "sensor fotoeléctrico" que emite luz desde un transmisor, luego, con un receptor, detecta la luz que se refleja desde el objeto que se detecta.

Un sensor de color puede detectar la intensidad de luz recibida de los colores rojo, azul y verde (RGB), lo cual permite determinar el color del objeto que se está analizando.

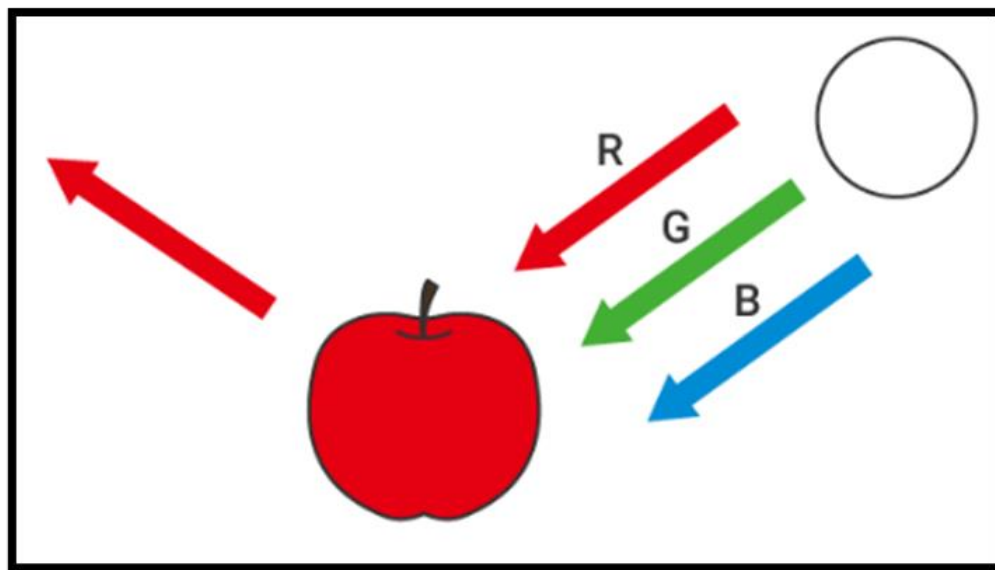
¹⁸ COMSA, beneficio húmedo [En línea]. [Consultado: 13 de septiembre de 2020]. Disponible en: <https://www.comsa.hn/beneficio-humedo/>

¹⁹ Avances técnicos cenicafé, Como garantizar la buena calidad de la bebida del café y evitar los defectos, [En línea]. Febrero de 2001, [consultado: 14 de septiembre de 2020]. Disponible en: <https://www.cenicafe.org/es/publications/avt0284.pdf>

Actualmente existen dos tipos de sensor de color. Uno de ellos ilumina el objeto con luz de longitud de onda amplia y así mismo detecta los tres tipos de colores en el receptor. El otro tipo de sensor ilumina el objeto con los tres tipos de luz (Roja, Azul y Verde) de manera independiente. Una característica que tienen en común, es que ambos detectan la intensidad de luz recibida del color rojo, azul y verde y se calcula la relación de la luz recibida.

Idealmente, si se muestra luz que contenga las longitudes de onda de la luz roja, verde o azul en un objeto rojo, solo se reflejara la luz roja, como se muestra en la figura 10.

Figura 10. Gráfico de luces incidentes sobre el objeto conjunto con las reflejadas

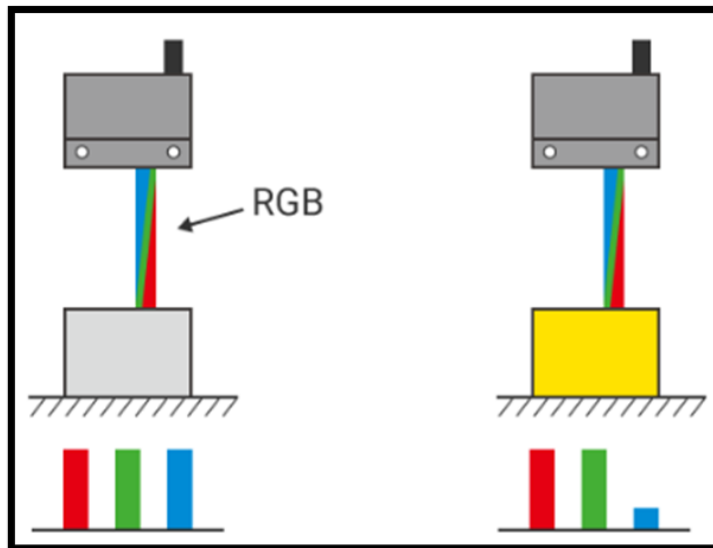


Fuente. Keyence. Guía de sensores para fábricas clasificados por principios, Fundamentos del sensor, ¿Qué es un sensor de color? [En línea]. [Consultado: 22 de abril de 2020]. Disponible en: <https://www.keyence.com.mx/ss/products/sensor/sensorbasics/color/info>

La relación de los reflejos de la luz incidente varía según el color del objeto, Al calcular la relación de la intensidad de la luz roja, verde o azul, es posible distinguir diferencias en el color o el aspecto del objeto un ejemplo de esto se puede apreciar en la figura 11.²⁰

²⁰ Keyence. Guía de sensores para fábricas clasificados por principios, Fundamentos del sensor, ¿Qué es un sensor de color? [En línea]. [Consultado: 22 de abril de 2020]. Disponible en: <https://www.keyence.com.mx/ss/products/sensor/sensorbasics/color/info>

Figura 11. Variación de la luz reflejada acorde al color del objeto.



Fuente. Keyence. Guía de sensores para fábricas clasificados por principios, Fundamentos del sensor, ¿Qué es un sensor de color? [En línea]. [Consultado: 22 de abril de 2020]. Disponible en: <https://www.keyence.com.mx/ss/products/sensor/sensorbasics/color/info>

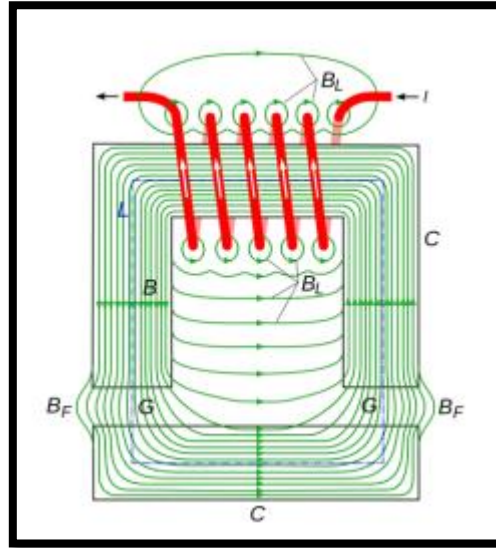
1.6.1.8. Electroimán. Los electroimanes se componen a partir de un gran número de espiras muy próximas entre sí de alambre que crean el campo magnético. Las espiras se enrollan alrededor de un núcleo magnético hecho de un material ferromagnético, mayormente el hierro. Cuando una carga eléctrica pasa alrededor del núcleo de metal, dicho núcleo absorbe el campo eléctrico generado por la corriente, el núcleo magnético concentra el flujo magnético y hace un imán más potente.

La principal ventaja de un electroimán sobre un imán permanente es que el campo magnético se puede cambiar de forma rápida mediante el control de la cantidad de corriente eléctrica en el devanado. Sin embargo, a diferencia de un imán permanente que no necesita de alimentación, un electroimán requiere un suministro continuo de corriente para mantener los campos, si se deja de alimentar con esta carga pierde sus propiedades magnéticas en un lapso de tiempo.²¹

En la figura 12 se muestra el esquema del funcionamiento básico de un electroimán, se puede ver que el flujo de campo magnético y el flujo de corriente que circula por el embobinado.

²¹ ALVAREZ PULIDO, Manuel. Electroimanes. Ebook. 2010. Editorial club Universitario. [En línea]. Recuperado el 28 de abril de 2021. Disponible en. <https://cutt.ly/xbxnTkm>

Figura 12. Esquema de funcionamiento de un electroimán.



Fuente. Wikipedia. Electroimán. Fuerza sobre los materiales ferromagnéticos. [En línea]. Recuperado el 15 de abril de 2021. Disponible en. <https://cutt.ly/4bxnSyR>

1.6.2. MARCO CONCEPTUAL.

1.6.2.1 Café Arábica y Café Robusta. El café arábica y el café robusta, proceden de la planta de café *Coffea arábica* y *Coffea canephora* respectivamente. Estas plantas pertenecen a la misma familia de plantas rubiáceas, pero a pesar de esto poseen características diferentes. La arábica posee más aroma, es más suave y ácida, esto se debe a que posee un máximo de cafeína del 1.7%. Por el contrario, el café canephora (robusta), puede poseer hasta un 4% de cafeína, dando como resultado un sabor amargo y un cuerpo fuerte. En cuanto a producción mundial la arábica representa más del 60% de esta.²²

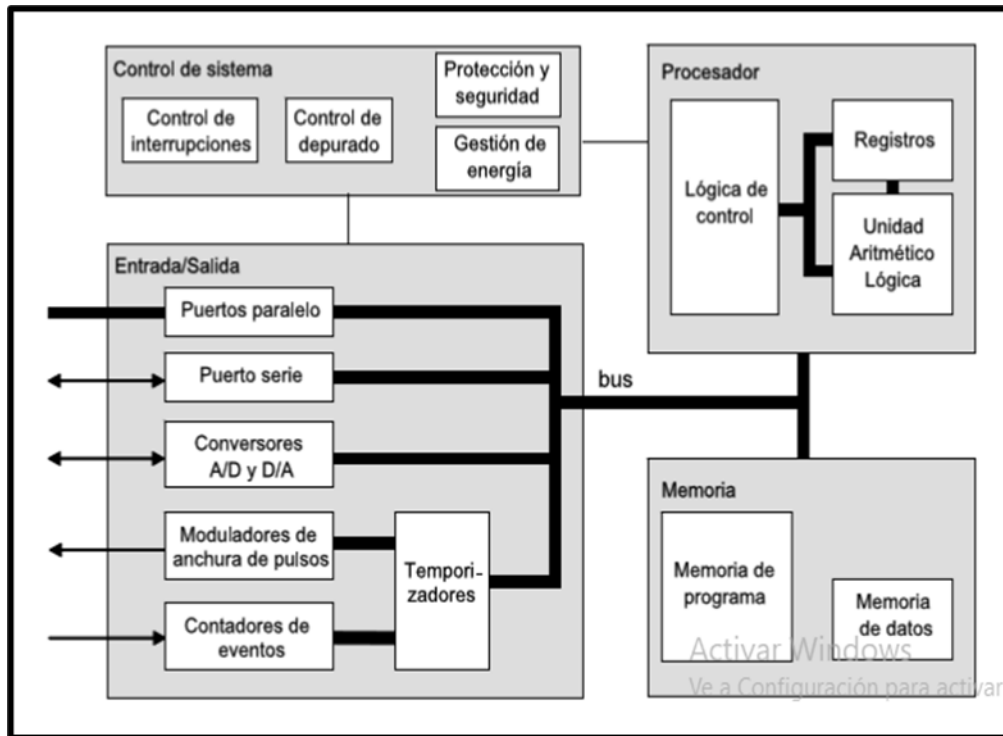
1.6.2.2 Sistemas embebidos. En el libro *Todo sobre sistemas embebidos: arquitectura, programación y diseño de aplicaciones prácticas con el PIC18F*, Sergio Salas define los sistemas embebidos como cualquier circuito electrónico digital capaz de realizar en tiempo real operaciones de cómputo. Estos, no deben confundirse con los sistemas de

²² PREUSS, Arne. *Coffeeness: Café arábica y café robusta: rasgos comunes, diferencias y calidad* [En línea]. [Consultado: 14 de abril de 2020]. Disponible en: <https://www.coffeeness.de/es/arabica-y-robusta/>

cómputo que poseen los computadores, ya que los sistemas embebidos cuentan con recursos limitados y se emplean para cumplir funciones específicas.²³

1.6.2.3 Microcontrolador. Un microcontrolador es un circuito digital integrado en un chip, compuesto básicamente por cuatro unidades, el procesador, la memoria, los módulos de entrada y salida y el control del sistema (ver figura 13). Los microcontroladores son empleados para procesar y controlar eventos de la vida real. Estos, están diseñados para reducir el tamaño de los circuitos electrónicos y reducir el consumo energético de los sistema. Es importante recalcar que ayudan a reducir el costo de los circuitos electrónicos. Hoy día, los microcontroladores se encuentran en la mayoría de los dispositivos electrónicos, tales como: automóviles, electrodomésticos, aviones, sistemas de alarma, smartphones, entre otros.²⁴

Figura 13. Partes de un microcontrolador



²³ Salas, AS, 2015. Todo sobre sistemas embebidos: Arquitectura, programación y diseño de aplicaciones prácticas con el pic18f. [En línea]. [Consultado: 16 de abril de 2020]. Disponible en: <https://ebookcentral.proquest.com>

²⁴ Teoría y diseño con microcontroladores de freescale: Familia flexis de 32 bits mcf5iqe., 2008. [En línea]. [Consultado: 18 de abril de 2020]. Disponible en: <https://ebookcentral.proquest.com>

Fuente: Teoría y diseño con microcontroladores de freescale: Familia flexis de 32 bits mcf5iqe., 2008. [En línea]. [Consultado: 18 de abril de 2020]. Disponible en: <https://ebookcentral.proquest.com>

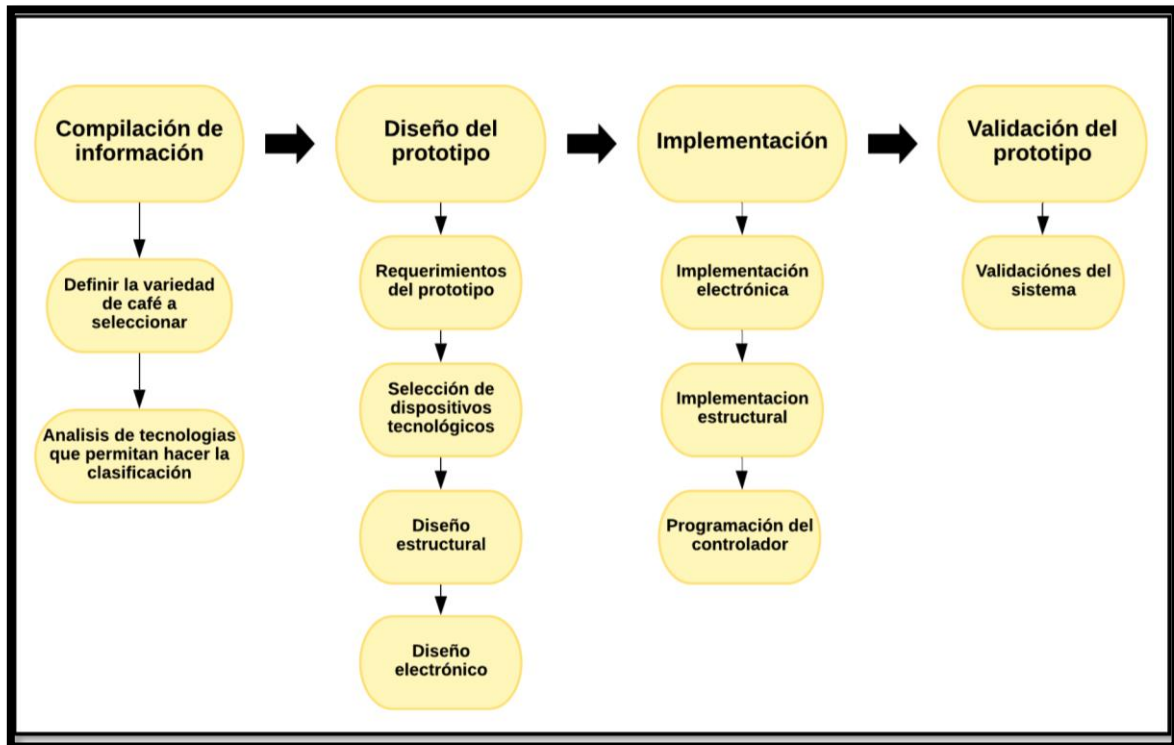
1.6.2.4 Circuito impreso (PCB). En el libro Electrónica para la educación secundaria, David Arboledas explica que los circuitos impresos son placas elaboradas de un material aislante, las cuales tienen sobre ellas, líneas de cobre denominadas pistas. Estas últimas, cumplen la función de un cable físico, en los extremos de estas, hay orificios, en los que se introducen los terminales de los componentes electrónicos del circuito y es allí, donde estos se sueldan.²⁵

²⁵ Arboledas Brihuega, David. Electrónica para la educación secundaria. Madrid: Bubok Publishing SL, 2010. [Consultado: 20 de mayo de 2020]. Disponible en. ProQuest Ebook Central.

2. METODOLOGÍA

Con el propósito de lograr los objetivos planteados en este proyecto, se plantea una metodología compuesta por cuatro (4) etapas, las cuales son: compilación de información, diseño del prototipo, implementación y validación del prototipo, estas se muestran en el diagrama de bloques en la figura 14.

Figura 14. Diagrama de bloques metodológica.



Fuente. Los Autores.

En las siguientes secciones se explica las actividades realizadas en cada uno de los apartados de la metodología mostrada en la figura 14.

2.1. COMPILACION DE LA INFORMACIÓN

En esta primera etapa, se definió la variedad de café a clasificar y se consultó sobre las tecnologías para realizar la clasificación. En primer lugar, se hizo una búsqueda entorno al café, sus variedades y su fenología. Todo, con el fin de conocer cuál variedad es la que más se cultiva en el municipio de Planadas, Tolima. Para esto el grupo de trabajo se apoyó en la información consultada, la cual indicaba que principalmente se trataba

de las variedades “castillo” y “tabi”²⁶. Gracias a que uno de los integrantes del grupo se encontraba trabajando en la Asociación Café Tolima Suave, ubicada en el municipio de interés, se pudo establecer que la más cultivada es la variedad “castillo”. Entonces, se definió que el prototipo clasificaría esta.

Con la variedad de café que se iba a clasificar definida, se analizaron sus características, para poder precisar en función de cuál de ellas, se iba a realizar la clasificación. En otras palabras, cuál permitía diferenciar mejor las etapas de maduración. La fenología evidenció que el color, en cada una de las etapas de maduración de la cereza del café, es diferente (ver la 9).

Figura 9. Estados de maduración de la cereza del café, (1) inmaduro, (2) pintón, (3) maduro, (4) sobre-maduro. Otras características, como por ejemplo el tamaño y la forma, no varían de forma significativa entre las diferentes etapas de maduración.

Para finalizar esta etapa, posterior a la selección de la variable a medir, se hizo un análisis de las tecnologías que estuvieran relacionadas con la clasificación de la cereza del café por color (capítulo de antecedentes). De igual manera, en el marco de referencia, de manera resumida, se referencia que esta, se ha hecho, mediante sensores de color o con reconocimiento de imagen.

2.2. DISEÑO DEL PROTOTIPO

El desarrollo de esta etapa estuvo dividido en cuatro (4) partes. La primera, fue la definición de requerimientos del prototipo, en donde se establecieron los requerimientos técnicos y de usuario. Después, se seleccionaron los dispositivos. Con esto, se procedió a hacer el diseño estructural y para finalizar la etapa, se realizó el diseño eléctrico.

2.2.1 Requerimientos del prototipo

Para el diseño del prototipo se dividen los requerimientos dos, los técnicos y del usuario. Los primeros, orientaron la selección de dispositivos tecnológicos. Los segundos, son los que el usuario esperaba del prototipo.

2.2.1.1 Requerimientos técnicos Entre los requerimientos técnicos más importantes se definieron los siguientes:

²⁶ EL TIEMPO. Planadas, Tolima, recibe la paz sembrando café. 20 DE Julio de 2016. [En línea]. [Consultado: 16 de marzo de 2021]. Disponible en. <https://cutt.ly/SxVjZui>

- A pesar de que el prototipo está dirigido al municipio de Planadas debe poder operar en cualquier lugar de Colombia.
- Las medidas de las variables deben ser tomadas en el menor tiempo posible.
- La clasificación debe ser lo más automatizada posible.
- Será un prototipo a escala que clasificará un estimado de 8 Kg por hora, pero escalable.

2.2.1.2 Requerimientos de usuario. Desde el punto de vista del usuario hacia el prototipo, se tiene que los principales requerimientos para su uso son:

- Un prototipo que sea de fácil uso.
- Que la clasificación de la cereza de café sea correcta.

Cabe resaltar que por los motivos de la crisis sanitaria actual no se pudo aplicar la encuesta que se planteó en un principio, que tenía como objetivo conocer estos requisitos. Es por ello por lo que estos requisitos se definieron a partir de una charla telefónica que se tuvo con el productor Faiber Lasso Caicedo (propietario de la finca perales ubicada en la vereda los Andes, del municipio de Planadas, Tolima), donde manifestó que las principales características que debía tener el prototipo eran, que no fuera difícil de utilizar y que hiciera la clasificación del café correctamente.²⁷

2.2.2 Selección de dispositivos tecnológicos


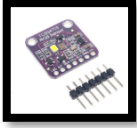
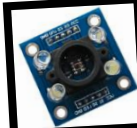


Una vez definidos los requerimientos del prototipo, se revisaron los métodos para la clasificación de la cereza del café encontrados en la consulta, realizada previamente en la etapa de recopilación de información. Entre ellos está el reconocimiento de imagen y los sensores de color. Al momento de analizar los requerimientos técnicos, se estableció que los sensores de color son una mejor opción, debido a que los autores entendían mejor el funcionamiento de este, y en términos económicos representaba un bajo costo de implementación. Es decir, el haber querido implementar una solución con visión artificial, hubiera representado más gastos en términos de tiempo para entender este mecanismo y por otro lado económicos, debido a sus costos elevados de implementación con referencia a el sensor de color.

Luego, se compararon los componentes que se encontraron en el mercado, con el fin de decidir cuál era el más adecuado para el desarrollo del prototipo.

El primer componente que se evaluó fue el sensor de color. Se realizó una tabla comparativa de las características más importantes de este tipo de sensor (Tabla 3)

²⁷ (*) LASSO CAICEDO, Faiber (Entrevista vía telefónica, Planadas, Tolima, Colombia, 2021)

Tabla 3. Comparación de sensores.

SENSORES DE COLOR					
FACTOR DE COMPARACION	SENSOR DE COLOR RGB, GESTOS Y LUZ AMBIENTE APDS-9960	SENSOR DE COLOR RGB TCS34725	SENSOR DE COLOR TCS3200 RGB	SENSOR DE COLOR CSM-WN1124P	SENSOR DE COLOR (RGB) TCS34725
					
Voltaje de funcionamiento	3.3. V DC	3.3 v DC	3v - 5v DC	12 V DC ... 24 V DC	3v - 5v DC
Rango de detección	100 mm - 200 mm	3mm -10 mm	10 mm	12.5 mm	3mm -10 mm
Interface	I2C	I2C	I2C	Sistema binario	I2C
Entrada de luz	LED RGB	LED RGB	LED RGB	LED RGB	LED RGB
Iluminación externa	NO	SI	SI	NO	SI
Consumo de corriente	200 μ A	235 μ A	25 mA	< 50 mA	65 μ A
Precio	\$ 20,000.00	\$ 24,000.00	\$ 28,000.00	\$ 984,000.00	\$ 40,500.00

Fuente. Los Autores.

En la tabla 3, se pueden ver 5 sensores, la mayoría de ellos módulos. Luego de analizar cada una de las características, se escogió el **SENSOR DE COLOR GY-3 TCS3200 RGB**, debido a que era el que más cumplía con los parámetros requeridos para el desarrollo del prototipo. Las características que más influyeron en la selección de este sensor fueron: su rango de detección, su iluminación externa y su precio. Además, sus características de Sensado comprenden cuatro grupos de detección (RGB y luz blanca), gracias a su arreglo de 64 fotodiodos ubicados de manera intercalada.

El siguiente componente que se analizó fue el microcontrolador. También se elaboró una tabla comparativa entre los principales microcontroladores que ofrece el mercado y que puedan ser utilizados en este tipo de aplicaciones. En la tabla 4 se pueden ver las características principales de 3 microcontroladores.

Tabla 4. Comparación de microcontroladores.

MICROCONTROLADORES			
	ATMEL ATMEGA328P	MICROCHIP PIC16F877A	ATMEL ATiny85- 20pu
FACTOR DE COMPARACION			
RAM	1024	368	512 bytes
Lenguaje de prog.	Lenguaje Arduino	Lenguaje C	Lenguaje C
EEPROM	512 bytes	256 bytes	512 bytes
Puertos I/O	32	33	8
Oscilador	Interno 8MHz Externo 16MHz	Externo 20MHz	Interno 16MHz
Tiempos de instrucción	1-5 Cicl. Reloj	4/8 Cicl. Reloj	-
Registros de trabajo	32	1	32 x 8
Arquitectura	RISC	RISC	RISC
USART	✓	✓	✓
I2C	✓	✓	✓
ADC	8 canales 10 bits	8 canales 10 bits	4 canales 10 Bits
JTAG	✓	X	X
MULTIPLICADOR	✓	X	X

Fuente. Los Autores.





Luego de analizar las características y prestaciones que tenía cada microcontrolador expresado en la tabla 4, se decidió escoger el microcontrolador **ATMEL ATMEGA328P**. Las principales características por las cuales se escogió este microcontrolador fue su cantidad de puertos o pines que lo componen que se ajustan de manera correcta a las necesidades del proyecto.

Otro parámetro que se tiene en cuenta para la selección de este microcontrolador es la facilidad de programación para los desarrolladores. Y la programación del dispositivo se puede realizar a través de la interfaz de Arduino, lenguaje que era conocido por los desarrolladores de este proyecto de grado.

Posteriormente, se seleccionaron los motores. Esto a partir de las dos necesidades que tiene el prototipo. Uno para mover la banda transportadora y otro que se encargara de desviar los granos verdes o pintones. Con el fin de realizar un análisis similar al que se hizo con el microcontrolador, se realizaron dos tablas comparativas.

Para el movimiento de la banda se optó por utilizar un motorreductor, la tabla 5 muestra las características más importantes de los motorreductores encontrados en el mercado.

Tabla 5. Comparación de motorreductores.

MOTORREDUCTORES				
FACTOR DE COMPARACIÓN	MOTORREDUCTOR N20 1,5 KG-CM 100RPM	Motorreductor recto 2 Ejes 40:1	MR1230	XD-37GB555
				
Voltaje Nominal	3V - 9V DC	6V - 9V DC	12V DC	12V DC
Torque	1,5 kg/cm	2 kg/cm	6 kg/cm	13 kg/cm
Engranaje	Metálico	Plástico	Metálico	Metálico
Velocidad Nominal	100 rpm	5V=120 rpm - 9V=300 rpm	30 rpm	128 rpm
Corriente de consumo	360 mA	250 mA	5A	1 ^a
Precio	\$ 15,000.00	\$ 6,000.00	\$ 40,000.00	\$ 105,000.00

Fuente. Los Autores.

Al analizar las características de estos motores se escogió **MOTORREDUCTOR N20 1,5 KG-CM 100RPM** debido a su relación calidad precio. Además, tiene un torque que se puede adaptar al movimiento de la banda puesto que esta no va a mover mucho peso y cuenta con una velocidad nominal baja.

La cuarta tabla comparativa (tabla 6) muestra las características principales de los servomotores disponibles en el mercado que más se adecuaban a los requerimientos del prototipo. El servomotor se eligió para encargarse de separar las cerezas verdes o pintonas.

Tabla 6. Comparación de servomotores.

SEVOMOTORES				
	MG995	Servomotor SG90	FS5103R	FT5335M
FACTOR DE COMPARACION				
Voltaje Nominal	3 - 7.2V DC	4.8V DC	4.8 - 6V DC	6V DC
Torque	15 kg/cm	1.8 Kg/cm	3 kg/cm	35 kg/cm
Engrane	metálicos	Plástico	plástico	Metálico
Angulo de rotación	180°	180°	360°	180°
Corriente de consumo	250 mA	100 mA	500 mA	1 ^a
Precio	\$ 25,000.00	\$ 7,000.00	\$ 33,000.00	\$ 105,000.00

Fuente. Los Autores.

Al comparar estos 4 servomotores se optó por la referencia **Servomotor SG90**, ya que es un motor que es de bajo costo y se acomoda de manera adecuada a las necesidades del prototipo, puesto que no va a realizar funciones que le pidan fuerza desmedida, sino más bien solo se encarga de desviar la cerezas dependiendo de su estado de maduración.

Para finalizar, se realizó una tabla comparativa en donde se analizaron las características de tres pantallas LCD. Como se puede observar en la tabla 7.

Tabla 7. Comparación de pantallas LCD.

Pantallas LCD			
	LCD 0.96 PULGADAS TFT 80X160	LCD 16x2 CON CONVERSION I2C	LCD 2004 20X4
FACTOR DE COMPARACION			
Voltaje de funcionamiento	3.3 V	5 V	5 V
Tamaño	24 x 30 mm	82 x 35 mm	98 x 60 mm
Interfaz	SPI	I2C	SPI
Numero de pines	7	4	16
Precio	\$ 15.000	\$13.000	\$ 22.000

Fuente. Los Autores.

De acuerdo con la tabla comparativa número 7, se decidió escoger la **Pantalla LCD 16x2 con conversión I2C** debido a su facilidad de implementación gracias a su interfaz, además de que es la más económica entre sus competidoras.

2.2.3. Experimentación del sensor

Este sensor tiene un rango de medición de 10mm y basa su funcionamiento, a partir de una matriz de 64 fotodiodos, de estos 64 fotodiodos, 16 tienen filtro para el color rojo, 16 para el color verde, 16 para el color azul y 16 para luz directa es decir sin ningún filtro, todos distribuidos de manera uniforme en el chip.

Los fotodiodos se encargan de captar la luz y filtrar los colores, generando una señal cuadrada de salida cuyo ancho de pulso indica la información sobre la intensidad del rojo (R), verde (G) y azul (B).²⁸

Los fotodiodos no funcionan de manera simultánea, sino que se activan por grupos de color, antes de realizar la medición de la intensidad de la luz que incide sobre ellos. Estos se pueden configurar a través de los pines s2 y s3. (para observar mejor distribución de pines y demás dirijase al anexo E, donde se encuentra la hoja de datos del sensor).

Obteniendo la lectura a partir de la iluminación que incide sobre el sensor, la corriente se convierte a frecuencia, formando una señal cuadrada con un ciclo de trabajo de 50%. Esto, debido a que enviar frecuencia a un microcontrolador es más estable y menos susceptible a interferencias que puedan existir en el trayecto del sensor al microcontrolador.

La frecuencia máxima que el sensor puede generar (sin llegar a saturar), en función de la intensidad de luz recibida puede ser de 600KHz. Pero para manejo con microcontroladores de velocidad baja, es posible regularla en tres niveles, siendo 100% la máxima, 20% la media y 2% la baja. Esto, se puede configurar a través de los pines S0 y S1.

Figura 15. Sensor TCS3200.



²⁸ ROBOTS DIDÁCTICOS. Automatización. reconocer colores con el módulo TCS3200. [En línea]. Recuperado el 15 de abril de 2021. Disponible en. <https://cutt.ly/gbXvLrO>

Fuente. ROBOTS DIDÁCTICOS. Automatización. reconocer colores con el módulo TCS3200. [En línea]. Recuperado el 15 de abril de 2021. Disponible en. <https://cutt.ly/gbXvLrO>

Para entender mejor el comportamiento del sensor seleccionado, se realizaron pruebas con sparkies y M&M, los cuales simulaban ser las cerezas de café que iba a clasificar el prototipo final. Cabe resaltar que esto se hizo debido a que estos productos se asemejan al tamaño de las cerezas de café, cuentan con diferentes colores y a diferencia de las cerezas no iban a cambiar su color en un tiempo cercano, como si lo hacen las cerezas genuinas debido a que estas no son frutos climatéricos, por ende, después de recolectadas hasta ahí avanza su proceso de maduración, e inmediatamente empieza el proceso de oxidación, cuya etapa final genera un color café. Esto permitió hacer varias pruebas con los mismos productos, mientras que con cerezas empezaban su proceso de oxidación de manera rápida, esto no resultaba viable, ya que estas debían ser transportadas desde el municipio de Planadas, Tolima hasta la ciudad de Bogotá.

De acuerdo con lo anterior, lo primero que se hizo fue medir el periodo en microsegundos de la frecuencia de la señal reflejada por los sparkies y los M&M rojos, verdes y azules que recibía el sensor, los resultados se aprecian en la tabla 8.

Tabla 8. Resultados de las mediciones con el sensor.

	R	G	B
SPARKIES Y M&M (COLOR ROJO)	360 - 400	590 - 610	460 - 490
SPARKIES Y M&M (COLOR VERDE)	448 - 450	300 - 295	360 - 380
SPARKIES Y M&M (COLOR AZUL)	410 - 415	402 - 415	325 - 330

Fuente. Los Autores.

Con base en los resultados anteriores, se pudo establecer lo siguiente para la detección del color de los sparkies y los M&M:

- Si el sensor detecta un valor menor de rojo (R), que de verde (G) y azul (B), el color del sparkie o M&M sensado es rojo.

- Si el sensor detecta un valor menor de verde (G), que de rojo (R) y azul (B), el color del sparkie o M&M sensado es verde.
- Si el sensor detecta un valor menor de azul (B), que de rojo (R) y verde (G), el color del sparkie o M&M sensado es rojo.

Para poder mirar la precisión de las medidas tomadas por el sensor se realizaron pruebas con los mismos productos en un periodo de una semana a diferentes horas del día, esto se puede ver en los anexos A, B y C, en estas pruebas se pudo evidenciar que los datos obtenidos no presentan una variación significativa, se sigue manteniendo que el color medido es el que presenta un periodo menor.

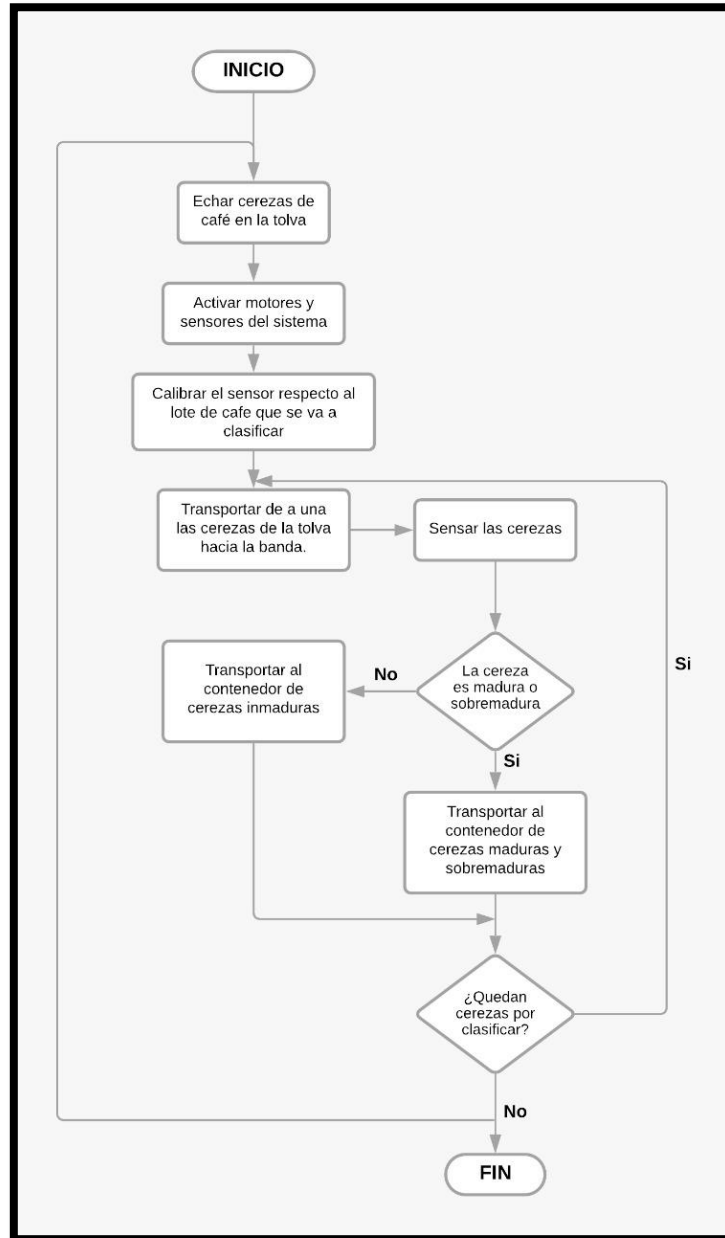
Estas pruebas se realizaron para saber qué tan eficiente era el sensor y qué tan confiables eran los datos obtenidos, ya que, la configuración real se hace más adelante con las cerezas de café castillo.

2.2.4. Diagrama de flujo del funcionamiento del prototipo

Con los requerimientos establecidos y los componentes elegidos, se procedió a elaborar un diagrama de flujo que ayudara a plasmar de una forma más gráfica los procesos y las decisiones que se deben ejecutar para el correcto funcionamiento del prototipo. Con esto también se buscaba tener mayor claridad para proceder al diseño estructural y electrónico del mismo.

El diagrama se inicia revisando que en la tolva haya cerezas de café para clasificar, esto con el objetivo de que el prototipo no opere en ausencia de estas. Una vez haya cerezas en la tolva, se inicia el desplazamiento de ellas hacia la banda, para su posterior clasificación. En la figura 16 se puede observar el diagrama de flujo del funcionamiento.

Figura 16. Diagrama de flujo.



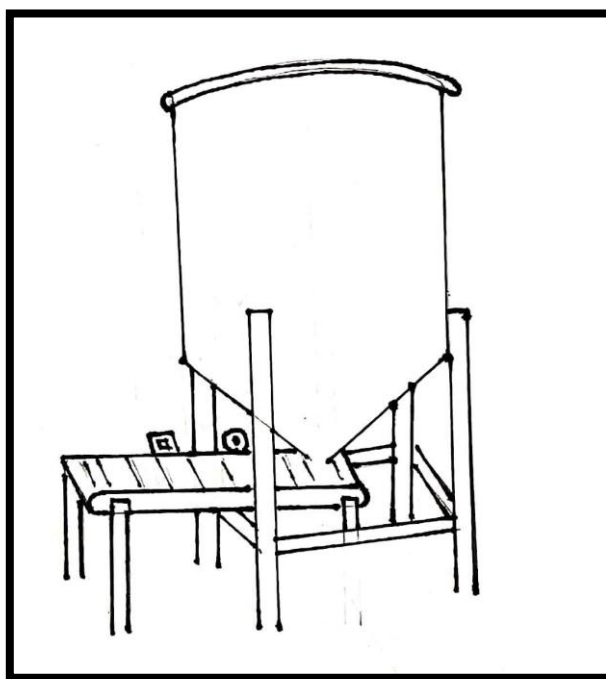
Fuente. Los Autores.

2.2.5. Diseño Estructural

Para la etapa del diseño estructural se optó por trabajar en compañía de expertos en el tema de diseño mecánico, debido que este no es el enfoque de este proyecto. En este caso, se buscó el apoyo de un ingeniero electromecánico y un experto en diseño de estructuras.

Con la ayuda de estas dos personas se pudo concretar el primer diseño que se tenía pensado, el cual se ve representado en la figura 17. Consta de un tolva en donde se introducen las cerezas del café que se van a clasificar. Posteriormente, las cerezas salen, una por una, hacia la banda transportadora, en donde se encuentra el sensor de color, que analiza el fruto, para dar la orden al actuador, que se encarga de desviar o permitir el paso de la cereza, según su estado de maduración. Así, maduro y sobre maduro siguen de forma normal por la banda hasta el recipiente y en caso contrario, se desvía hacia otro recipiente.

Figura 17. Primer bosquejo del prototipo.



Fuente. Los Autores.

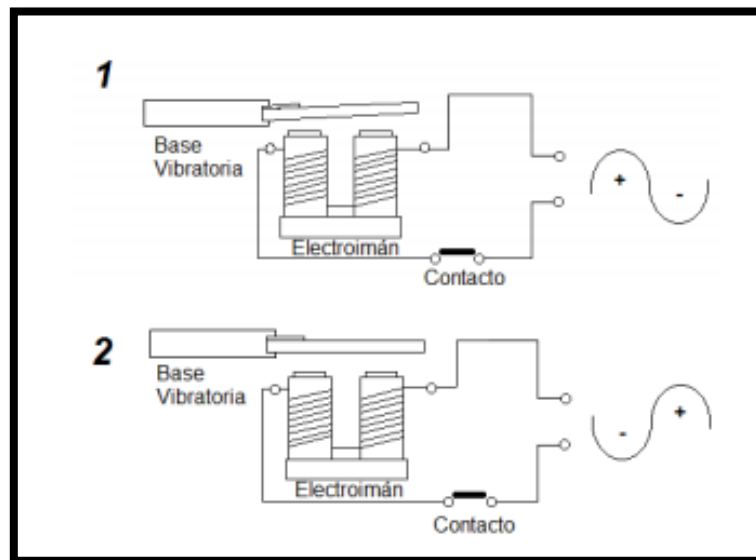
Al socializar esta idea con los consultores técnicos, hicieron la recomendación de utilizar una tolva vibratoria, debido a que ellos tenían parte de una y podría funcionar de manera adecuada para esta situación; ya que esta permitiría que los frutos salieran de uno a uno tipo “fila india”, solucionando la problemática más difícil y ahorrando costos.

La tolva está construida en aluminio, y su vibración se da por una bobina que tiene en la parte de inferior que está unida a la tolva a través de cuatro (4) platinas, por medio de las cuáles logra transmitir la vibración.

El funcionamiento de la base vibratoria por campo magnético se basa en la vibración un electroimán. Este cuenta con una pequeña placa de hierro que es atraído por un electroimán que es alimentado con fuente alterna.

En la figura 18 se muestra un ejemplo básico de la aplicación de un electroimán en un sistema vibratorio. En este se muestra cómo al encenderse el sistema, el electroimán cumple con la función de atraer el mecanismo que corta el flujo de corriente, desactivando el circuito y apagando el electroimán, solo para que el circuito se cierre de nuevo y fluya nuevamente la corriente, y el ciclo se repite. De esta manera, se efectúa un constante encendido y apagado en el electroimán que genera la vibración del sistema

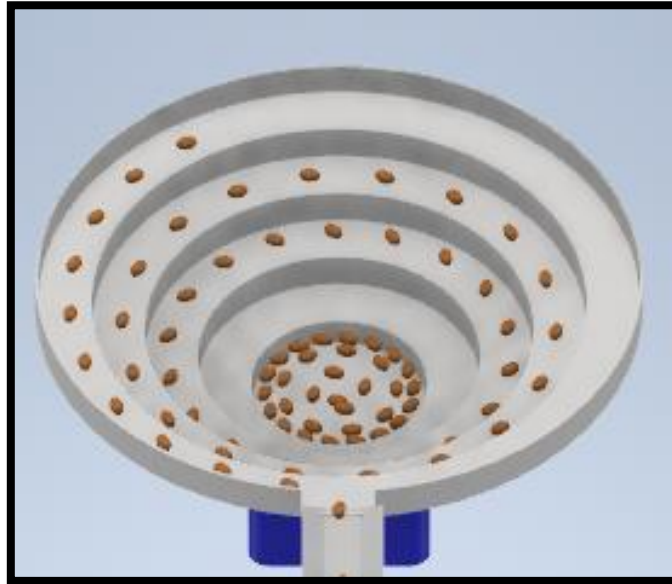
Figura 18. Esquema del funcionamiento de un electroimán.



Fuente. WikiWand. Timbre eléctrico. Funcionamiento. [En línea]. Recuperado el 03 de mayo de 2021. Disponible en. <https://cutt.ly/7bxbJZH>

Esta tolva tiene una forma de espiral ascendente o como se conoce por su nombre técnico una tolva vibratoria de tipo torbellino, que, a través de la vibración de la bobina o electroimán, proporciona una oscilación y elevación del material que rompe los puentes que lo forman ocasionando que los elementos que se depositen en ella vayan ascendiendo de manera ordenada. El diseño en 3D de esta tolva se puede observar en la figura 19.

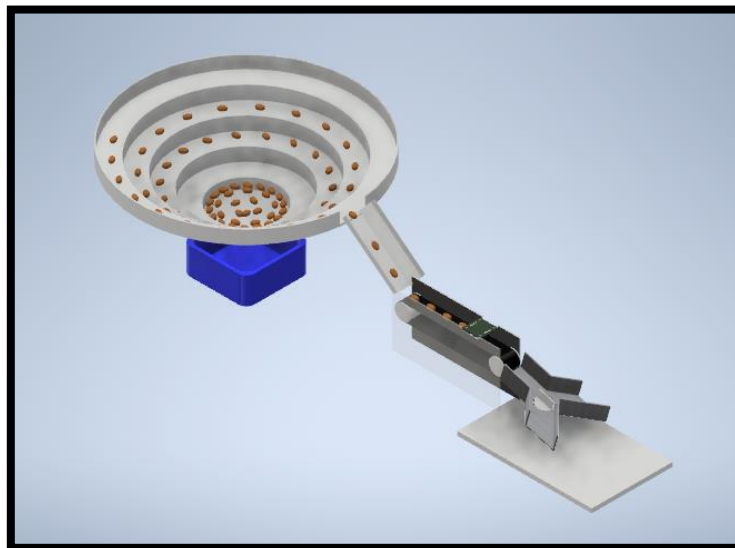
Figura 19. Diseño 3D de la tolva vibratoria



Fuente. Los Autores.

Teniendo clara en cierta medida, la idea de cómo iba a ser el prototipo, con ayuda del ingeniero electromecánico, se procedió a realizar el diseño 3D, del prototipo completo en el software de Autodesk Inventor, con el fin implementarlo más adelante. Este diseño se pudo observar en la figura 20.

Figura 20. Diseño 3D del prototipo ideal a implementar.



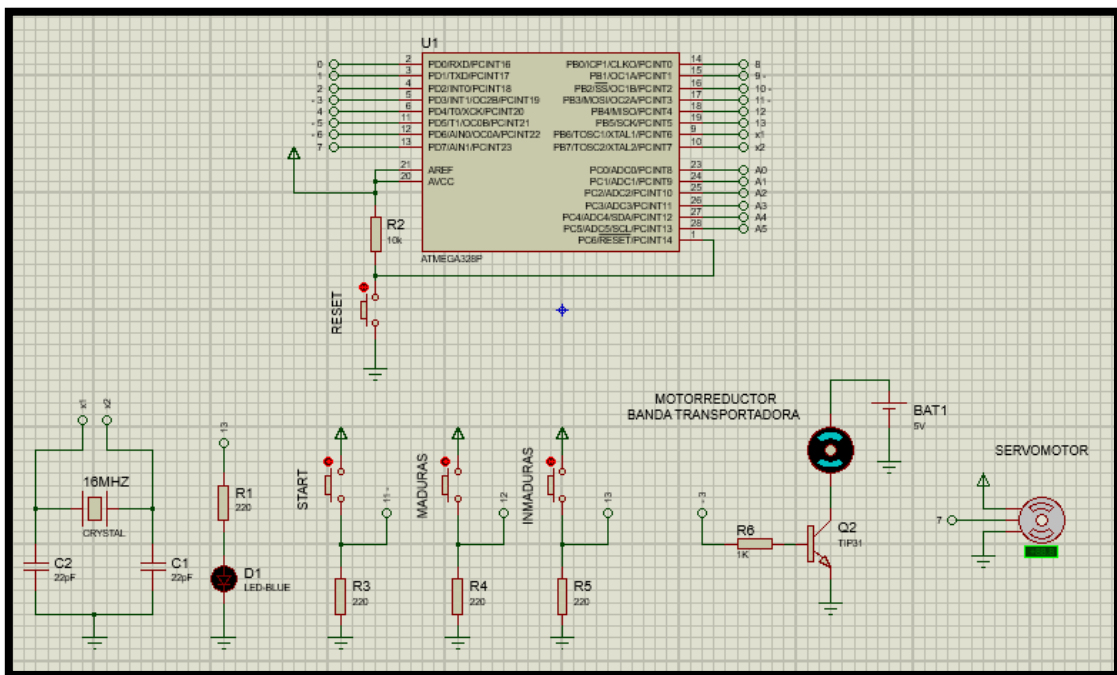
Fuente. Los Autores.

2.2.6. Diseño electrónico

En la primera parte del diseño electrónico se realizó una simulación en el software proteus (ver figura 21), realizando la estructura básica que requiere el microcontrolador ATMEGA328P para su correcto funcionamiento, con su respectivo cristal y fuente. Junto con ello se realizó el circuito de potencia para el motorreductor que tenía como función, mover la banda transportadora, que cuenta con un transistor que funciona, como conmutador, también, en esta simulación contaba con cuatro pulsadores, uno encargado del el reseteo del microcontrolador, el siguiente daba inicio al sistema de clasificación, y por último, otros dos que eran los hacían la función del del sensor, es por ello que cada uno tiene etiquetas de “inmaduro” o “maduro”.

La simulación funcionó correctamente, todos los circuitos que se plantearon dentro de la simulación funcionaron bien, en donde al oprimir el pulsador de inicio el motorreductor inmediatamente iniciaba su funcionamiento, poniendo en marcha la banda trasportadora, por otro lado, al dar las indicaciones de si era madura o inmadura, de igual manera, el servomotor respondía de manera correcta girando los grados necesarios Teniendo en cuenta esto el paso a seguir fue realizar el diseño de la PCB.

Figura 21. Simulación de la parte electrónica del sistema de clasificación

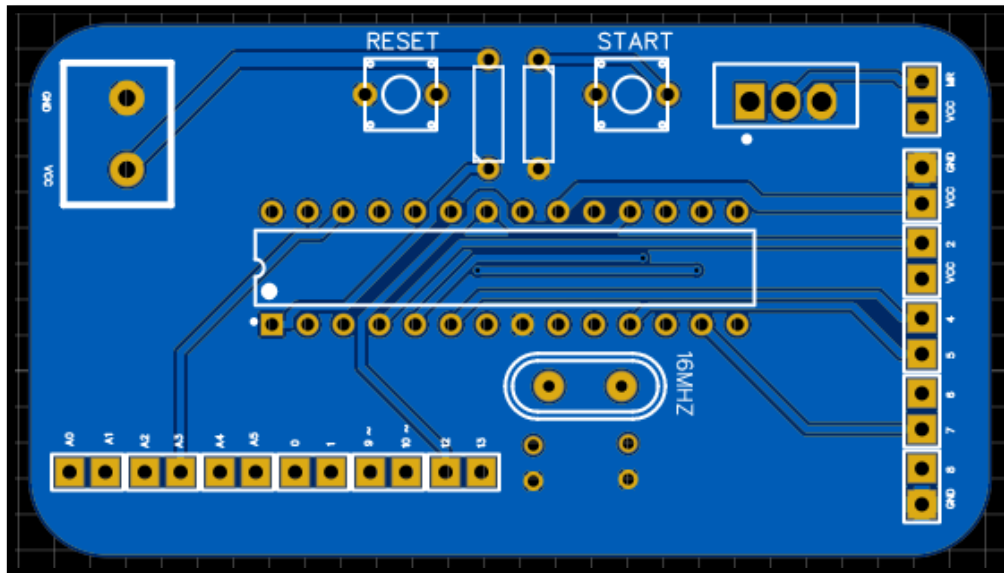


Fuente. Los Autores.

Para el diseño de la PCB se utilizó un software en línea llamado easyEDA, donde se plasmó el mismo circuito que se ve en la figura 21 en la simulación en proteus,

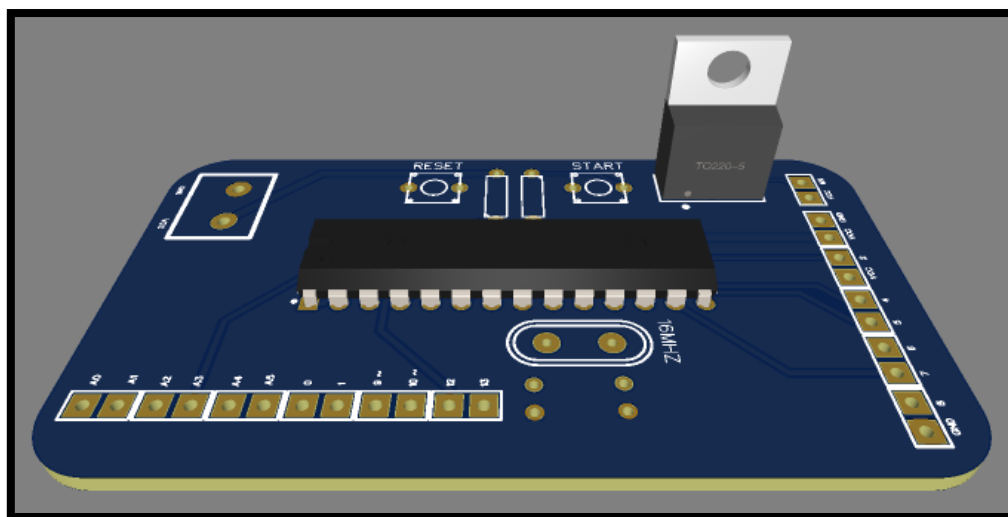
obteniendo como resultado el diseño final de la PCB, que se observa en la figura 22 y 23.

Figura 22. Diseño de la PCB en 2D.



Fuente. Los Autores.

Figura 23. Diseño de la PCB en 3D.

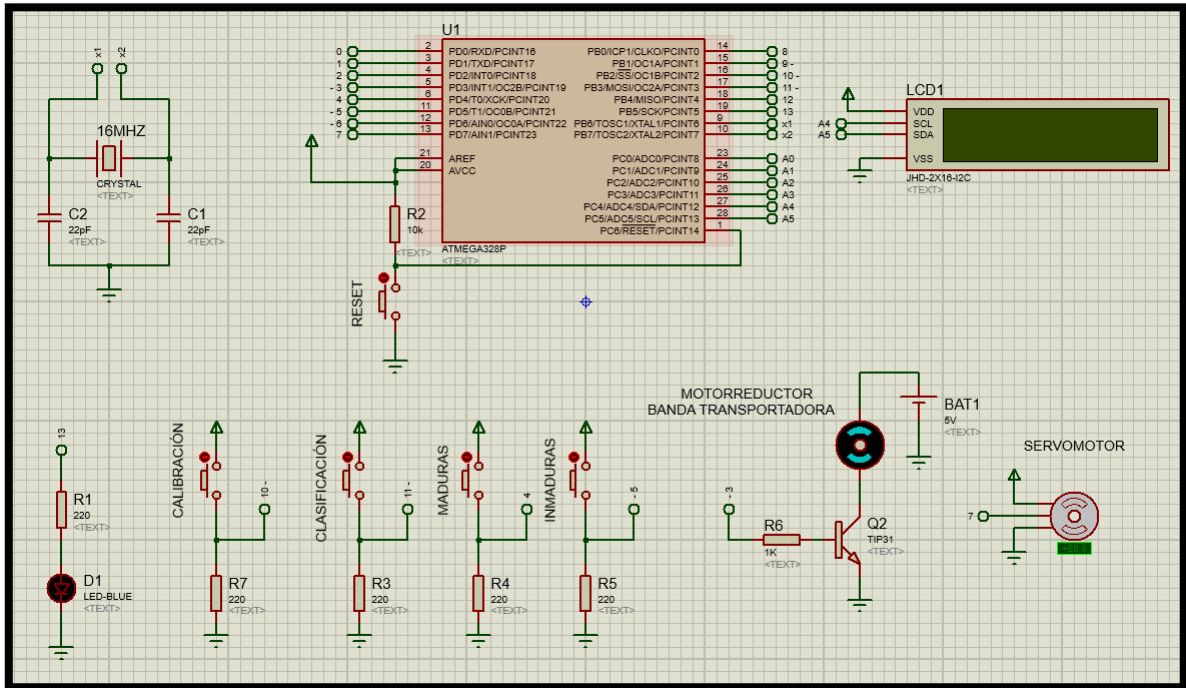


Fuente. Los Autores.

Debido al cambio en la tercera versión del programa, se debieron hacer unas modificaciones referentes a la simulación en proteus y por consiguiente en el diseño de

la PCB. A continuación, en la figura 24 se muestra la simulación del circuito electrónico para esta versión del programa.

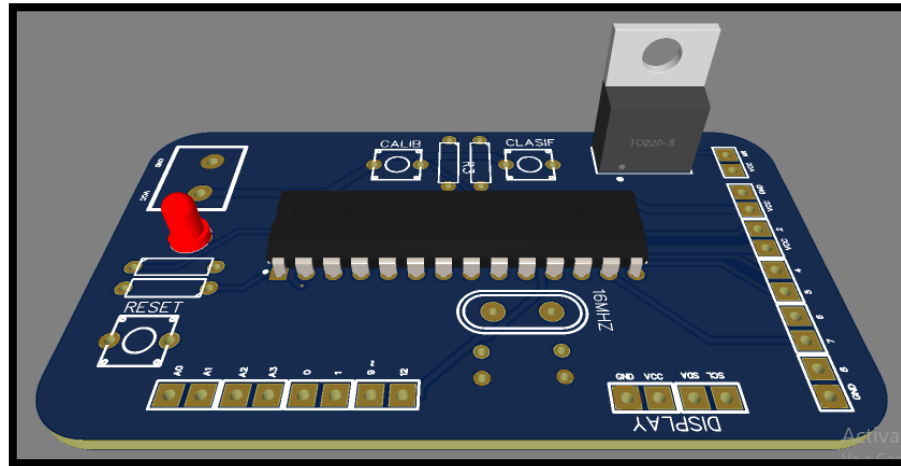
Figura 24. Simulación del montaje electrónico la versión 3 del programa.



Fuente. Los Autores.

Entre las modificaciones que se realizaron a este esquema se encuentran la adición de un pulsador que es el encargado de iniciar la auto calibración y la pantalla LCD I2C, donde aparecen los mensajes de aviso para el usuario. De igual manera sucede en el diseño de la PCB, se agregan las huellas de los nuevos componentes como se muestra en la figura 25.

Figura 25. Diseño 3D de la PCB para la versión 3 del programa.



Fuente. Los Autores.

2.3. IMPLEMENTACION

2.3.1. Implementación electrónica

En la parte de la implementación electrónica, las primeras pruebas para revisar el funcionamiento de la banda transportadora, pruebas de rutina con conmutadores, pulsadores y demás se realizaron con un ARDUINO UNO.

Después de hacer las primeras pruebas de cada componente se procedió a realizar el montaje propuesto en la figura 24, en una pequeña protoboard, y de esta manera comenzar a realizar pruebas con toda la parte electrónica correspondiente a al Sensado y clasificación de las cerezas. Con el fin de poder validar el sistema.

En este parte del desarrollo solo surgió un problema, y fue en la parte de potencia del motorreductor, ya que en un principio se realizó con un transistor 2n222, el cual a la hora de poner en funcionamiento el sistema con la carga de la banda presento recalentamientos y fallas en el sistema. A pesar de no tener que mover elementos pesados, esta carga causó que el motor generará un consumo de corriente mayor a la corriente de colector del 2n222 (600 mA), es por esto por lo que se optó por hacer el cambio por un TIP31C, que maneja una corriente de colector máxima de 3A. Con este cambio ya no se presentaron recalentamientos y el sistema funciono de manera correcta.

Como fuente de alimentación se utilizó una fuente Seventeam modelo ST-220FAB-05E (figura 26), debido a que ya se contaba con esta desde hace un tiempo y funcionaba de manera perfecta para este prototipo.

Figura 26. Fuente DC.



Fuente. Los Autores.

2.3.2. Implementación estructural

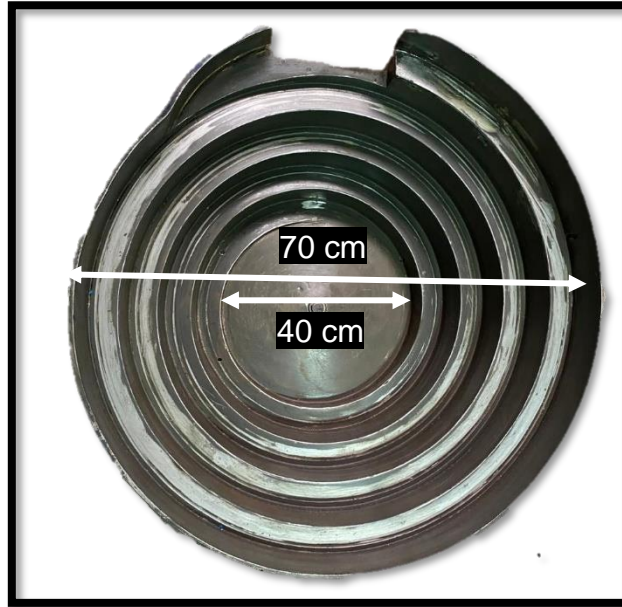
La tolva completa tiene una altura de 54 cm desde el piso hasta la última parte del espiral (figura 27). La circunferencia mayor de la espiral tiene un diámetro de 70 cm y la menor, un diámetro de 40 cm, tal como se puede observar en la figura 28.

Figura 27. Vista frontal de la tolva.



Fuente. Los Autores.

Figura 28. Vista superior de la tolva.



Fuente. Los Autores.

Para la banda transportadora se decidió partir de una banda que los autores habían realizado en antiguos proyectos, esta versión de 52 cm de largo por 10 cm de ancho, en la cual se utilizó mdf para su estructura, un neumático para la banda como tal, dos tubos de aluminio con diámetro de 3 cm y 12 cm de largo para sus ejes. A uno de los ejes, se le puso un engranaje, encajando con el motorreductor que mueve la banda transportadora. La banda transportadora se puede ver en la figura 29.

Figura 29. Primera versión de la banda.



Fuente. Los Autores.

Esta primera versión sirvió para probar la función de control de la velocidad de la banda del código. Asimismo, se pudo ver el comportamiento del sensor al momento frente a los sparkies y los M&M, como se puede observar en la figura 21. Se notó que las medidas de la banda debían ser optimizadas acorde al diseño de la figura 30, ya que esta, era demasiado ancha y larga.

Figura 30. Prueba de la banda junto con el sensor, los M&M's y los sparkies.



Fuente. Los autores.

Al realizar la prueba del sensor con la banda en movimiento, se evidenció que a pesar de que se le podía disminuir la velocidad del motor, la banda como tal era muy ancha por lo que las cerezas tienden a cambiar de posición. Esto las alejaba de la posición en donde debía medir el sensor. Como consecuencia, las mediciones cambiaban de manera considerable, así que, se ajustaron las medidas, de tal manera que se ajustaran de manera adecuada a las características de la cereza del café.

Cabe resaltar que la banda se realizó con materiales económicos y que se obtenían a la mano, como lo fueron partes en impresión en 3D y láminas de mdf, debido a que el prototipo es una prueba de concepto. Las dimensiones de la banda transportadora finalmente fueron de largo 20 cm y ancho 2,5 cm, obteniendo el resultado que se puede apreciar en la figura 31.

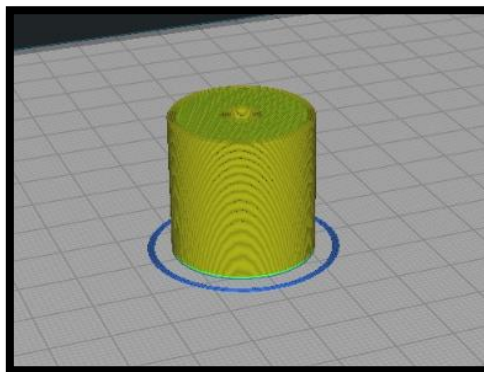
Figura 31. Segunda versión de la banda transportadora.



Fuente. Los autores

Al poner en funcionamiento esta primera versión surgieron un par de problemas, debido a que la banda no era lo suficientemente estable, además, debido a los materiales de los rodillos y los travesaños que los pasaban por en medio, sobre los cuales giraba la banda, tendían a torcerse a causa de la fuerza que esta ejercía a la hora de templarse. Esto como consecuencia causaba que la banda se remontara hacia un lado al ponerla en funcionamiento, así que se tomó la decisión de cambiar los palos de pincho por unas varillas de soldadura, que a la hora de ponerlas en acción eran más rígidas. En cuanto a los rodillos se realizó un diseño 3D, creando un cilindro con un diámetro de 2,5 cm y en el centro dejando un agujero por donde pasara la varilla de diámetro de 2,6 mm, el diseño de estos rodillos se muestra en la figura 32.

Figura 32. Diseño 3D de los rodillos de la banda transportadora.



Fuente. Los Autores.

Con estos cambios realizados se obtuvo un mejor funcionamiento de la banda debido a que, los rodillos no tenían ningún tipo de nivel de inclinación, lo que generaba que la banda no se remontara hacia ningún lado.

Después de tener la estructura básica de la banda en correcto funcionamiento, se acomodaron la base para el motor, junto con los piñones que se encargarían del movimiento de la banda.

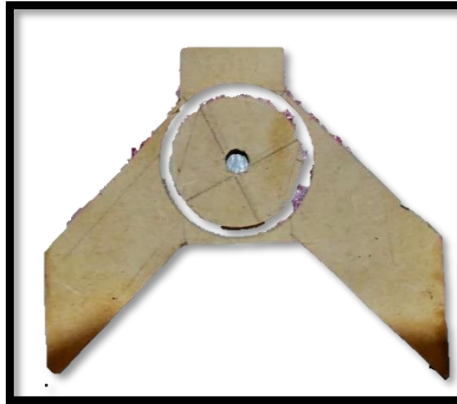
Lo que se hizo fue crear una base sólida con balsa que iba pegada a la banda en el costado derecho de ella. Para acomodar la piñonería se adhirió un piñón plástico de 40 dientes, a una de las varillas que van en medio de los rodillos que giran, también se adhirió otro piñón plástico de menor dimensión (30 dientes) al motorreductor que se escogió para esta acción.

El diseño de la base se realizó de tal manera que ambos piñones, tanto el del motorreductor como el de la varilla, engranaran de manera correcta.

Teniendo la banda funcionando de manera adecuada, se procedió a construir el sistema de separación, el cual se realizó también con mdf. En primeras instancias se pensó en hacer un sistema en donde el servomotor se encargará de golpear las cerezas de café de una manera suave y así generará la clasificación. Sin embargo, este sistema no tenía una reacción lo suficientemente rápida para realizar la acción propuesta. Entonces se optó por idear un mecanismo que se encargara de solo desviar las cerezas de café, en el momento que terminaran su recorrido por la banda transportadora.

Fue así como surgió la idea de crear un sistema mecánico que tuviera dos canales, pero que antes de él, tuviera una base que se encargara de encausar las cerezas según su clase. La base iba a ser movida por el servomotor que se escogió. La estructura del mecanismo de desvío se muestra en la figura 33.

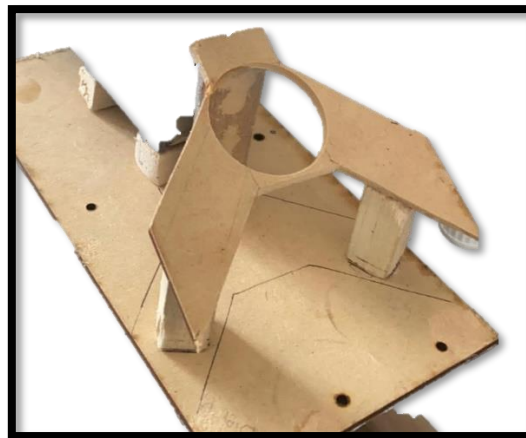
Figura 33. Estructura básica del mecanismo de desviación.



Fuente. Los Autores.

Con esta estructura debidamente cortada se procede a realizar Los soportes que se encargaban de elevar esta estructura de tal manera que se pueda acoplar a la caída de las cerezas, después del recorrido por la banda transportadora, tal y como se muestra en la figura 34.

Figura 34. Base utilizada para la estructura de desviación



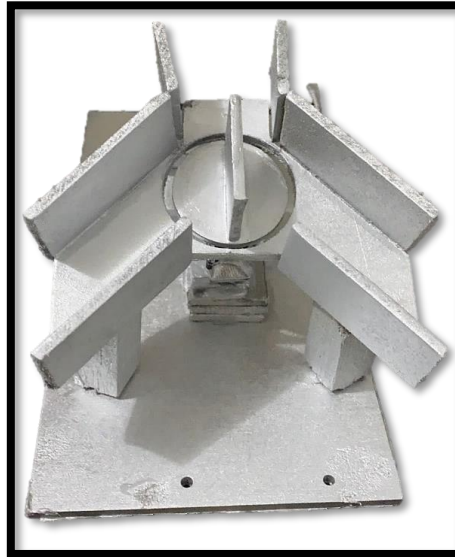
Fuente. Los Autores.

Para lograr un buen encause, se colocan las paredes de las canales, y la pared movediza encargada de desviar las cerezas, que va pegada en el círculo central de la estructura, además de la base para el servomotor, el cual tendrá adherida la pared movediza junto con el círculo.

Dicha base, igual que gran parte de la estructura, fue construida con pequeños cuadros de mdf, buscando que el círculo quedara justo en medio del hueco que tiene la

estructura, el resultado final de la estructura mecánica encargada de la clasificación se muestra en la figura 35.

Figura 35. Resultado final del mecanismo de clasificación.



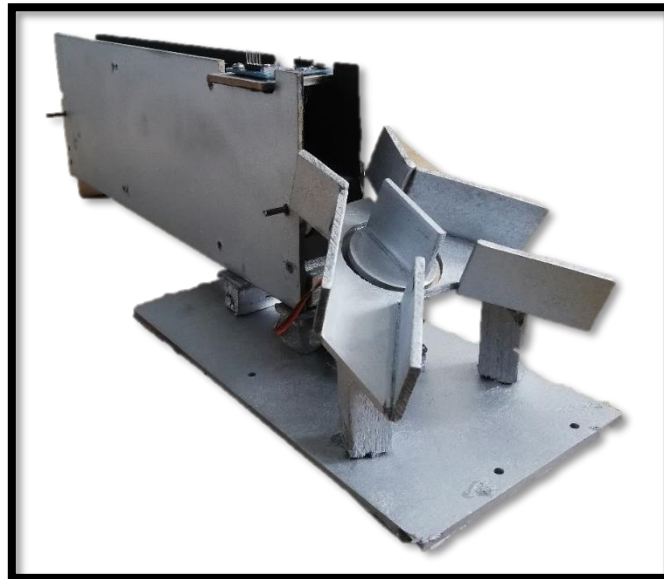
Fuente. Los Autores.

En esta parte del desarrollo del sistema se acoplaron las partes correspondientes al sensor y clasificación, es decir la banda transportadora, el sensor y la parte de desviación de cerezas, donde surgieron varias problemáticas.

Una de ellas ocurrió a la hora de colocar el sensor sobre la banda, ya que la banda estaba al borde de las paredes, había que crear un tipo de base para el sensor, así que se optó por bajar la banda alrededor de 4 centímetros, teniendo en cuenta el tamaño del sensor y el tamaño aproximado que podía tener una cereza de café, logrando una distancia entre el sensor y la cereza de 1 centímetro. A su vez, se pudo introducir el sensor en medio de ambas paredes y evitando que la luz externa fuera un problema importante a la hora de realizar la clasificación. De esta manera se creó un pequeño espacio controlado para la medición del sensor.

Por otra parte, surgió un problema a la hora de acoplar la banda con el sistema de desviación, ya que la altura de esta última parte estaba a nivel con la parte superior de banda. Debido a morfología de las cerezas del café estas no rodaban de la manera correcta y tendían a atascarse y ocasionar problemas a la hora de la calificación. Esto se solucionó subiendo un poco la banda de tal manera que quedara 1cm más alta que la base del sistema de desviación. Al final se logró obtener el resultado que se muestra en la figura 36.

Figura 36. Unificación de la banda junto con el sistema de clasificación y el sensor.



Fuente. Los Autores.

Otro de los problemas que surgieron a la hora de unir todas las partes anteriormente mencionadas, fue cuando se realizaron las primeras pruebas, debido a que la banda se pintó toda de color plateado, a excepción del neumático. Esto trajo problemas, a la hora de poner en funcionamiento el sistema, ya que este color reflejaba de manera excesiva la luz y causaba variaciones a la hora de realizar las mediciones. Por ende había problemas en la clasificación de las cerezas. Por esto, se optó por pintar las paredes internas de la banda junto con la parte interna de las canales correspondientes al sistema de desviación de color negro, para evitar alteraciones de las medidas por reflexión de la luz.

2.3.3. Programación del microcontrolador

2.3.3.1. Programa primera versión

El programa se desarrolló en primera instancia empleando una placa de arduino UNO, esto porque resultaba más fácil ir modificando el código y probándolo, haciendo uso de esta, por otro lado, también se podía ir haciendo uso del monitor serial, el cual fue muy útil para poder observar los valores RGB que media el sensor y así determinar los rangos que correspondían a cada color.

A continuación, se explica el primer código realizado. Se inicia descargando las librerías necesarias para manejar el servo, después de esto, se declaran las variables globales que se emplearán en el programa. A continuación, se definen los pines que se usan

como entradas y los que son salidas, para finalizar se ponen los pines S0 y S1 del sensor de color en alto y bajo respectivamente. Lo anterior se hace para establecer la frecuencia de salida del módulo al 20%, de esta forma se garantiza que el microcontrolador pueda procesar dicha señal y que esta no sea muy rápida para él.

En la función principal del código se inicializa el sistema. Esta se ejecuta una única vez al ser encendido el prototipo o al ser reseteado. Comienza activando la banda transportada. Acto seguido, se activan los fotodiodos con filtro rojo, verde y azul. Para guardar los valores obtenidos, se emplea la función "pulseIn" y se crean las variables llamadas rojo, verde y azul. En estas últimas, se guarda el período de la señal de salida del sensor en microsegundos, el cual se obtiene gracias a la función mencionada anteriormente. En seguida, se realiza una función de control donde, dependiendo de los valores RGB detectados por el sensor, se puede saber si la cereza es madura, sobre madura o hace parte del grupo de las inmaduras, esto debido a que estas al ser rojas el valor de rojo es menor, ya que, el periodo de la señal de esta es menor, lo mismo para cuando las cerezas son verdes, pero con el valor de la variable verde. Para facilidad, al momento de programar, se asumió que todas las cerezas que no fueran maduras o sobre maduras serían inmaduras. Ya con esta información, se activa o no, el servomotor, para transportar la cereza a su respectivo contenedor.

2.3.3.1. Programa segunda versión

Para este punto se quería que el prototipo hiciera una calibración automatizada del sensor, esto porqué de lo contrario para poder calibrar el sensor siempre se debería programar el microcontrolador con ayuda de un computador, y esto complicaría el uso por parte de los caficultores, por otro lado, con la calibración automática se buscaba disminuir los errores humanos en este proceso. Otro aspecto que se tuvo en cuenta fue que al momento de recoger la cosecha las cerezas maduras y sobre maduras son mayoría con respecto a las demás.

Para el desarrollo del programa primero con ayuda del monitor serial de arduino y un tiempo de muestreo de 10ms se tomaron cincuenta (50), muestras de cada una de las etapas de maduración de las cerezas de café y la banda sola, las cuales se pasaron a Excel donde haciendo uso de las funciones "promedio", "mínimo" y "máximo" se promediaron los valores obtenidos en R, en G y en B de cada una de las etapas de las cerezas y la banda, de igual forma se obtuvieron los valores mínimos y máximos, Este proceso no solo se hizo con cerezas de café, en primer lugar se hizo el mismo procedimiento con M&M y Sparkies, estos valores los puede encontrar en el anexo F.

Gracias a esto se pudo evidenciar que la sumatoria de los valores RGB que se obtenían al sensar M&M y Sparkies rojos al igual que el de la banda sola era mayor que el de los demás colores, con las cerezas de café se obtuvo el mismo resultado siendo las

cerezas maduras y sobre maduras junto con la banda sola quienes tenían una sumatoria RGB mayor a la del resto de cerezas. Esto se puede evidenciar en las tablas 9 y 10.

Tabla 9. Sumas RGB M&M y Sparkies

SUMAS RGB M&N Y SPARKIES						
	M&M ROJO (µs)	SPARKIE ROJO (µs)	M&M NARANJA (µs)	M&M VERDE (µs)	M&M AMARILLO (µs)	BANDA (µs)
PROM	910,82	886,72	723,76	727,78	431,04	1238,4
MAX	928	975	729	747	436	1270
MIN	867	777	709	711	415	1203

Fuente. Los Autores.

Tabla 10. Valores RGB cerezas de café.

Valores RGB cerezas de café (µs)							
	SOBRE MADURAS		MADURAS		VERDES		
Sujeto de prueba	Cereza 1	Cereza 2	Cereza 1	Cereza 2	Cereza 1	Cereza 2	Cereza 3
PPROM	1359	1257	1106	1069	929	854	858
MAX	1369	1272	1115	1078	951	824	920
MIN	1346	1241	1092	1056	916	799	900

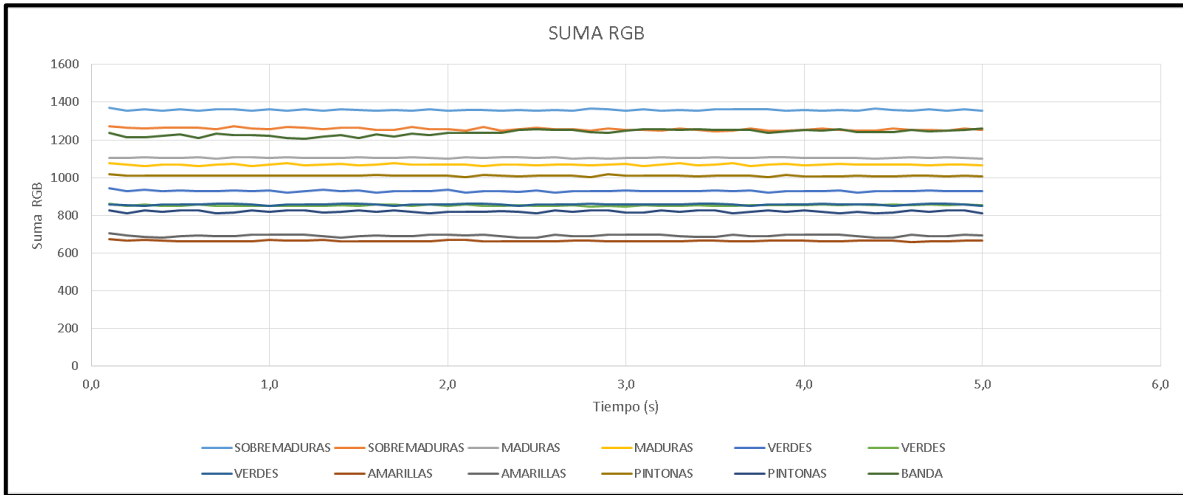
Valores RGB cerezas de café (µs)				
AMARILLAS		PINTONAS		BANDA
Cereza 1	Cereza 2	Cereza 1	Cereza 2	Banda
665	692	1010	821	1238
676	706	1025	834	1270
649	677	996	806	1203

Fuente. Los Autores.

De igual forma con ayuda de Excel se realizó la suma del RGB de cada muestra, obteniendo como resultado que lo mencionado anteriormente se cumplía, (ver el anexo F). En la figura 37 se muestra la gráfica de la sumatoria del RGB de las muestras tomadas de las cerezas de café, en ella se puede evidenciar que efectivamente la suma

del RGB de las cerezas sobre maduras, maduras y la banda sola es mayor a la de las demás.

Figura 37. Sumas RGB de cerezas de café

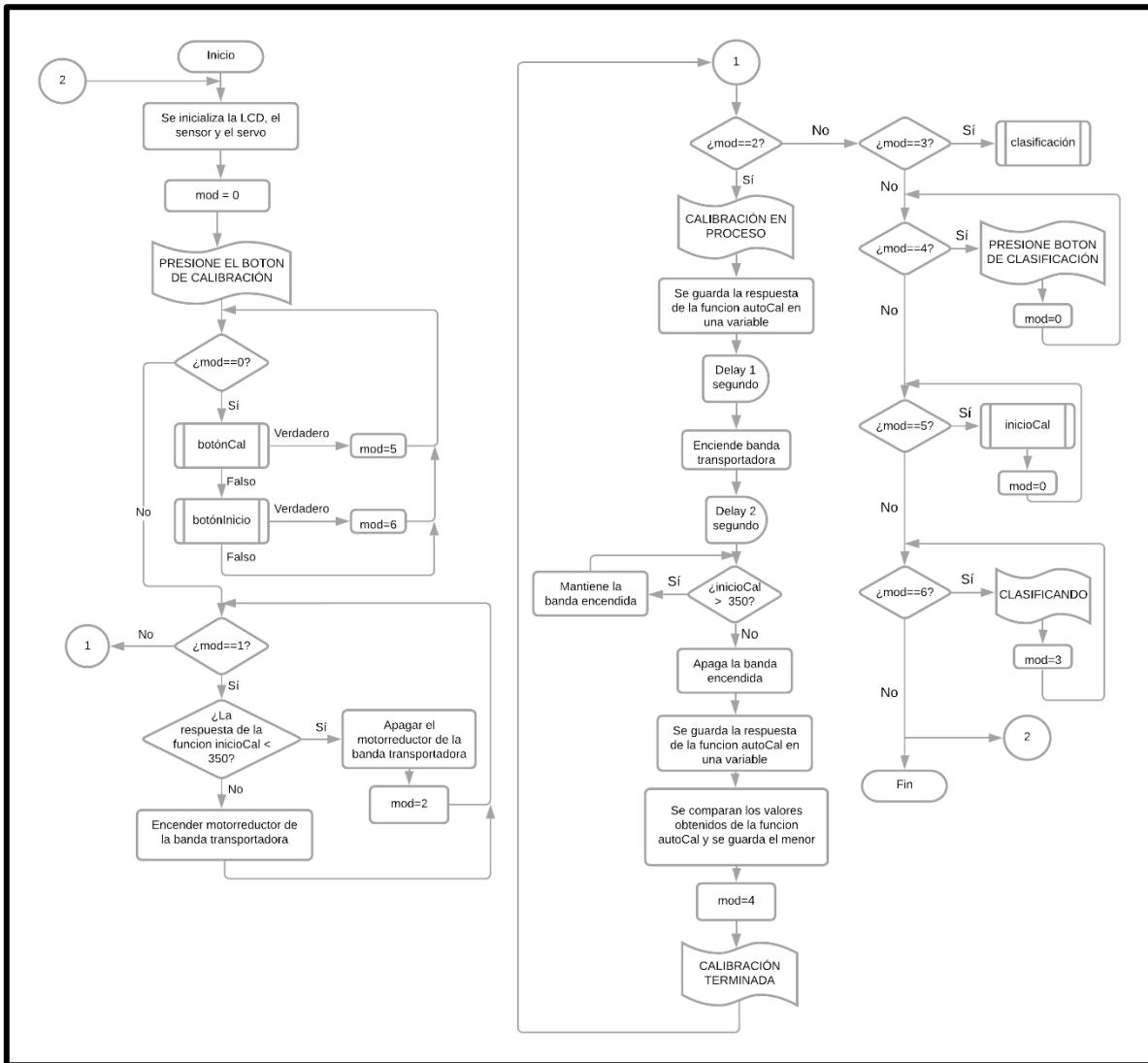


Fuente. Los Autores.

Con base en esto, se reemplazó el rango para saber cuándo una cereza era madura, sobre madura o inmadura, por una nueva función de control, donde comparaba la sumatoria de los valores RGB tomados por el sensor, con el establecido en la calibración. Se optó por la suma debido a que de esta forma se garantizaba que el servo solo girara cuando detectara algo diferente a las cerezas maduras o sobre maduras.

En la figura 38 se observa el diagrama de flujo del programa con el nuevo método de clasificación, la calibración automática y la incorporación de una pantalla LCD 2x16 la cual sirve como ayuda grafica para la interacción del usuario con el prototipo.

Figura 38. Diagrama de flujo del programa.

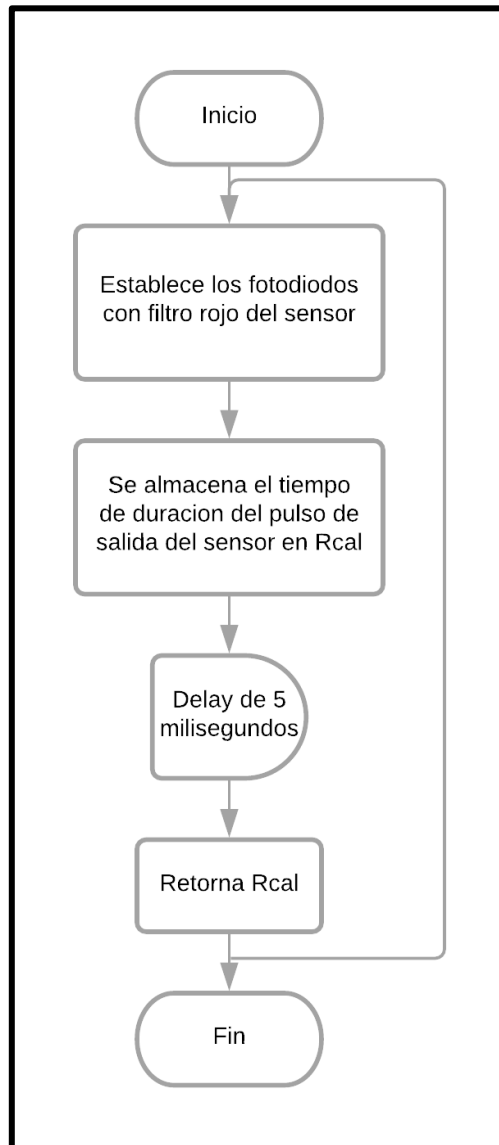


Fuente. Los Autores.

En las figuras 39 y 40, se muestran los diagramas de flujo de las funciones que ayudan a realizar la calibración automatizada. Esta se realiza con dos cerezas maduras que el usuario escoge y debe colocar en la banda. Al oprimir el botón de calibración, la banda empezará a andar y se detendrá cuando la primera cereza esté debajo del sensor, en ese momento el sensor tomara 50 muestras de la cereza que este debajo de él, a la vez se obtendrán los valores mínimos RGB sensados y se sumaran. Después de esto, se activará la banda hasta que la segunda cereza se posicione bajo el sensor. Entonces se repetirá el mismo proceso y la banda se activará hasta que la cereza sea expulsada de

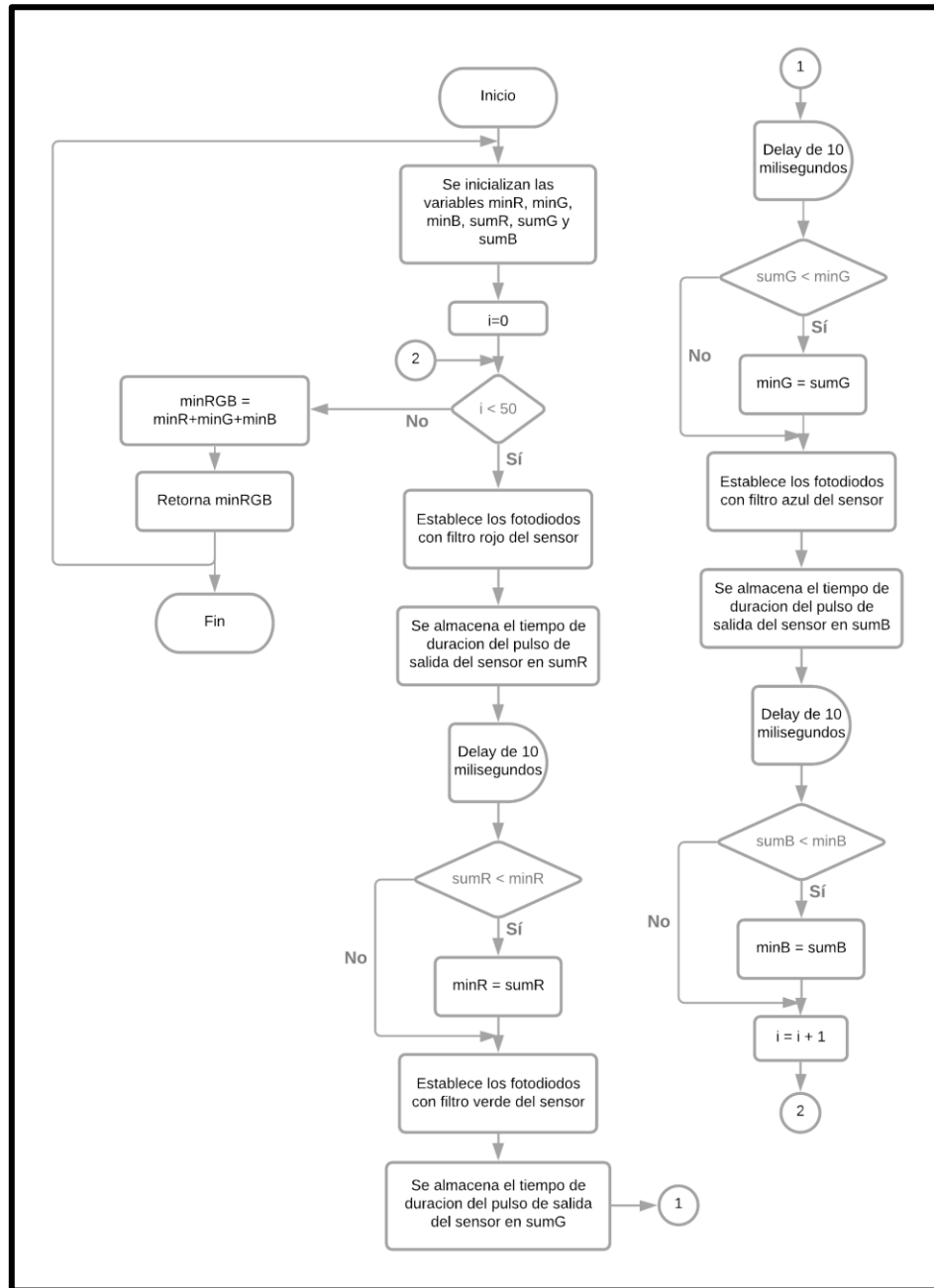
esta. Por último, se compararán las dos sumatorias obtenidas de las cerezas y la menor se tomará para la función de control en la clasificación.

Figura 39. Diagrama de flujo de la función inicioCal.



Fuente. Los Autores.

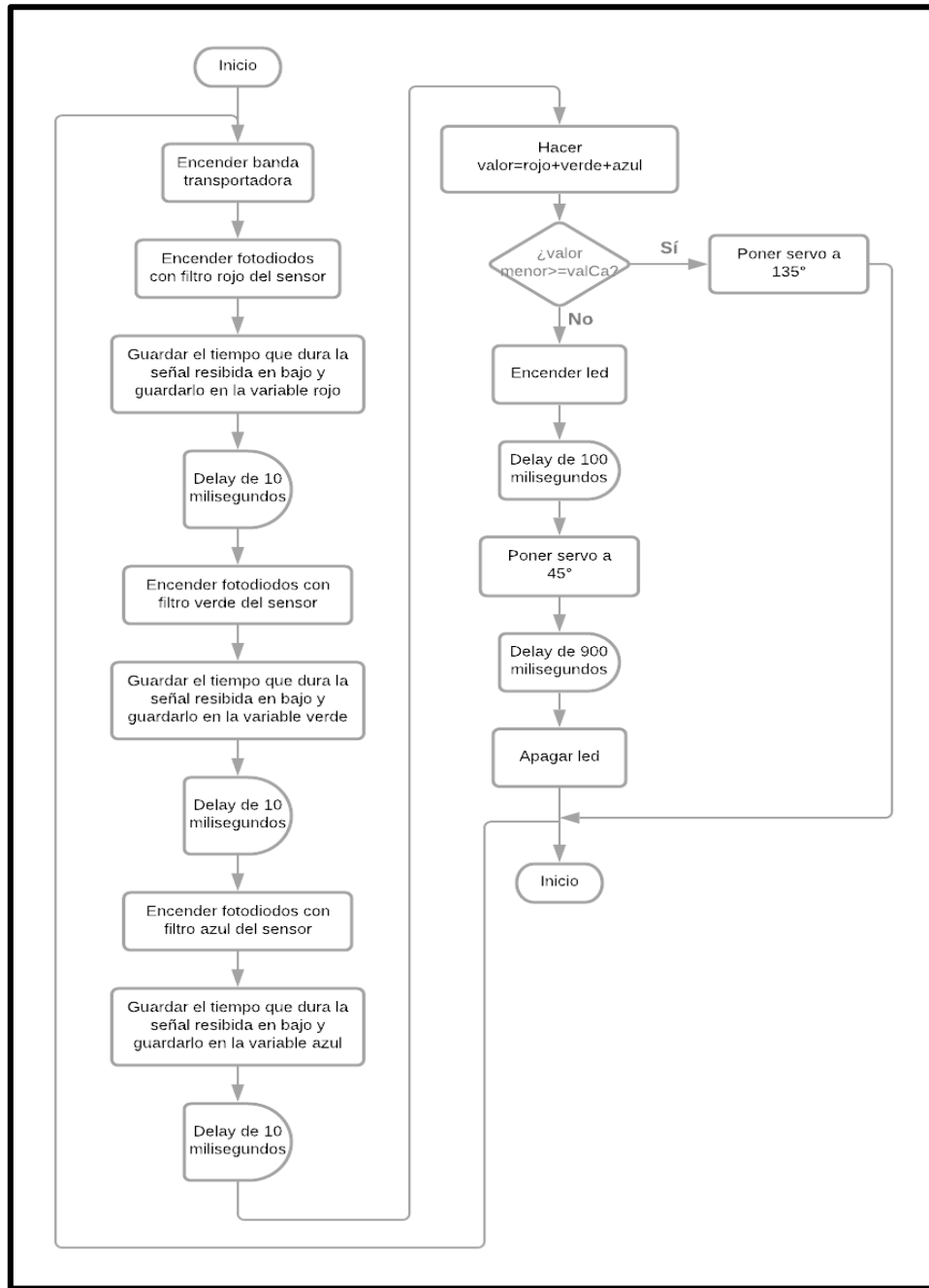
Figura 40. Diagrama de flujo de la función autoCal.



Fuente. Los Autores.

A continuación, se observa el diagrama de flujo de la función clasificación en la figura 41.

Figura 41. Diagrama de flujo de la función clasificación.



Fuente. Los Autores.

Para finalizar, una vez se tuvo el programa probado validado, con el arduino uno, el paso a seguir fue quemarlo en el ATMEGA328P.

2.4. VALIDACIÓN DEL SISTEMA

Es este apartado se mostrarán las pruebas que se realizaron a lo largo del desarrollo del prototipo, incluyendo algunos cambios que se tuvieron que realizar sobre la marcha y cuál fue el resultado final de toda esta práctica.

Teniendo la parte más importante del prototipo completa, se procedió a realizar pruebas en conjunto de la parte estructural conformada por el sistema de desviación y la banda transportadora con todo el montaje electrónico mencionado anteriormente.

La primera prueba que se realizó fue con papel iris, para ello, se cortaron pequeños cuadros de color verde y rojo, con el fin de observar cómo se comportaba el sistema con este elemento. Para estas pruebas se realizó una previa configuración del sensor.

Esta configuración se hizo por medio de lecturas tomadas por el sensor durante 5 segundos, a cada uno de los colores. Durante este periodo se tomaron datos de forma manual a través del monitor serial. Posteriormente se revisaban los datos y se tomaba el menor valor RGB para el color verde y rojo, tal como se muestra en la tabla 11.

Tabla 11. Valores RGB tomados para el papel iris.

		R (μs)	G (μs)	B (μs)
PAPEL ROJO	Valor tomado en monitor	91	253	169
	Rango en programa	< 101	> 243	> 159
PAPEL VERDE	Valor tomado en monitor	207	138	130
	Rango en programa	> 197	< 148	> 120

Fuente. Los Autores.

En la tabla 11 se puede observar que el color que se sensaba, era la base para tomar el valor más alto observado en el monitor serial y dar el rango. Es decir, en el caso del color rojo se tomó el valor más alto en R y los más bajos en G y B, de igual manera, en el caso del color verde, se tomó el valor más alto en G y los más bajos en R y B.

A partir de esto, se definieron los rangos que se iban introducir en el programa, de acuerdo con el color medido. Cabe resaltar que, con el fin de brindar un poco de tolerancia al sistema, se le aumentaron o disminuyeron 10 μ s al valor tomado del

monitor serial. Es decir, al valor correspondiente al color que se midió se le aumento y a los otros se les disminuyó.

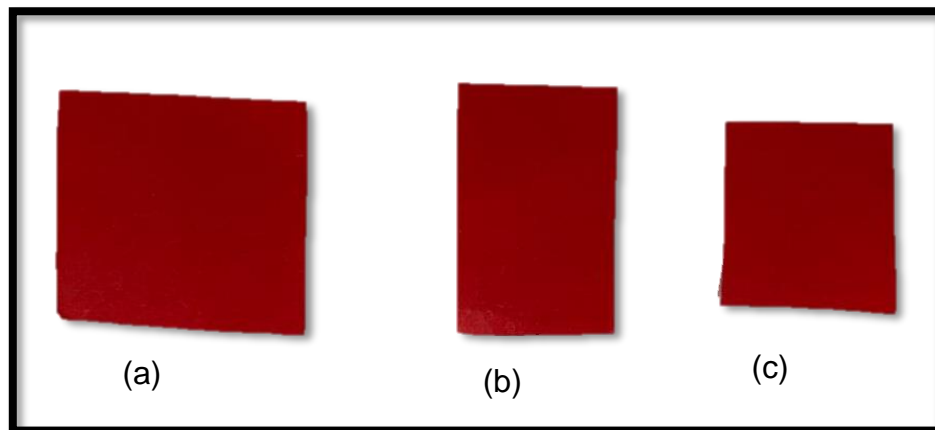
Con la configuración del sensor hecha, se hicieron pruebas con 10 papeles de color rojo y 10 papeles de color verde. Estas arrojaron una efectividad del reconocimiento del 100%, ya que todos los identifico del color que era. Para este caso, los papeles color rojo los identifico como frutos maduros y los verdes como frutos inmaduros.

Ya en la segunda prueba, se optimizó el código de tal manera que este sólo trabajara reconociendo el color rojo, tal como se mencionó anteriormente en la etapa de programación del microcontrolador. Para esta prueba se hicieron mediciones a tres cuadros de papel iris de diferente tamaño (ver figura 42), con el fin de ver los cambios que esto representaba, puesto que el café no siempre va a ser del mismo tamaño.

Esta vez las lecturas del monitor serial solo se hacen para el papel de color rojo, ya que este programa se encarga de reconocer si es rojo (fruto maduro) o no, y en caso de no serlo, identificarlo como inmaduro. Los cuadros tuvieron las siguientes medidas:

- Cuadro (a): 2cm x 2cm
- Cuadro (b): 2cm x 1.5cm
- Cuadro (c): 1.5cm x 1.5cm

Figura 42. Cuadros de papel utilizados para la segunda prueba.



Fuente. Los Autores.

Los valores de las mediciones realizadas para estos tres cuadros se muestran en la tabla 12.

Tabla 12. Valores de las mediciones realizadas a los tres cuadros de papel.

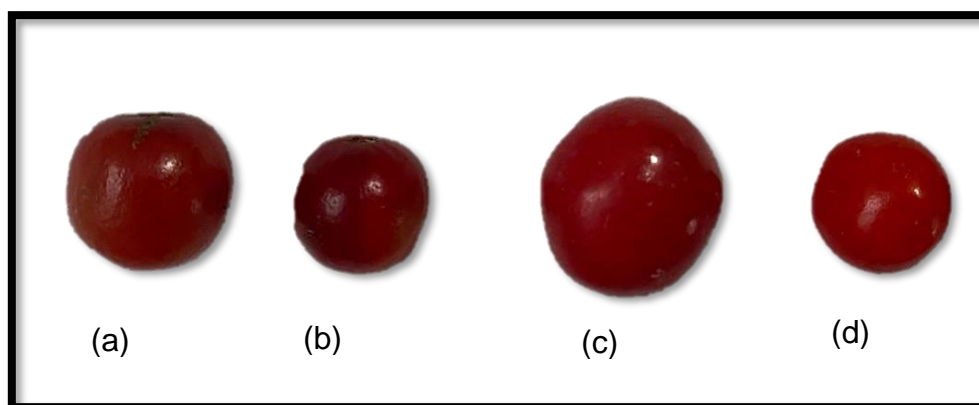
	R (μs)	G (μs)	B (μs)
Cuadro (a)	126	338	225
Cuadro (b)	157	370	246
Cuadro (c)	178	262	251
Promedio	154	356	240

Fuente. Los Autores.

Posterior a esto se realiza la prueba del sistema pasando por la banda 15 distintos cuadros de papel, de color rojo, naranja, verde y amarillo de distintos tamaños. Donde se obtuvo un 100% de efectividad, tomando solo los papeles rojos como frutos maduros y todos los demás como inmaduros.

La siguiente prueba que se realizó, se hizo con M&M's tipo maní, y con dulces sparkies, esta gracias a que tienen una morfología y colores muy similares a la de las cerezas del café tal como se puede apreciar en la figura 43.

Figura 43. Sparkies junto con cerezas de café genuinas.



Fuente. Los Autores.

En la figura 43 se puede ver la similitud entre las cerezas sobre maduras, maduras (a y b de la figura 43) y los sparkies y los M&M's (c y d de la figura 43).

Teniendo en cuenta esto se procedió a hacer el mismo procedimiento que con los cuadros de papel, pero esta vez con 4 M&M's y 5 Sparkies, ambos de color rojo. Las medidas obtenidas se muestran en la tabla 13.

Tabla 13. Valores RGB obtenidos con los M&M's y Sparkies.

	R (μs)	G (μs)	B (μs)
M&M 1	380	639	461
M&M 2	306	551	391
M&M 3	404	577	423
M&M 4	390	509	369
Sparkie 1	376	569	411
Sparkie 2	469	400	290
Sparkie 3	490	431	312
Sparkie 4	420	451	317
Sparkie 5	490	486	354
Promedio	413	512	369

Fuente. Los Autores.

En la tabla 13 se puede observar la influencia que tiene el tamaño del fruto, sobre las lecturas del sensor, muestra de ello se evidencia en las lecturas del "R" de los M&M's, debido a que este es de mayor tamaño por ende el R tiende a ser menor. De igual manera sucede con los Sparkies, que al ser más pequeños arrojan un valor de R mayor.

Por último, se probó el sistema con una muestra compuesta por 20 sparkies y 20 M&M's, de colores variados entre naranja, verde, amarillo y rojo. Con esta prueba, el sistema se comportó de manera correcta, clasificando los elementos de prueba de color rojo como maduros y el resto como inmaduros, sin errores.

Después de esta prueba, se planteó realizar el primer ensayo con cerezas de café genuinas, pero fue allí donde comenzaron a surgir las complicaciones. Primero se intentó traer una cantidad aproximada de 4 kilogramos de cereza de café de la finca perales ubicada en la vereda Los Andes del municipio de Planadas Tolima. Estas cerezas en su mayoría eran pintonas y maduras (ver figura 44). Al momento de recolectarlas, inmediatamente se introdujeron en un termo con gel térmico para refrigerarlas, con el fin de que, al día siguiente, en el tramo Planadas-Bogotá estas estuvieran refrigeradas y mantuvieran su tonalidad.

Figura 44. Cerezas de café recién recolectadas.



Fuente. Los Autores.

Pero debido a la condición actual de la carretera, causada por las lluvias frecuentes, se encuentra en mal estado por lo cual el viaje duró aproximadamente 11 horas, lastimosamente a la hora de destapar el termo que venía previamente sellado para evitar fugas de frío, las cerezas llegaron de un color oscuro (ver figura 45), lo cual las dejaba totalmente inservibles para probar el sistema de clasificación, ya que todas estaban café.

Figura 45. Condición de las cerezas de café al llegar a Bogotá.



Fuente. Los Autores.

Afortunadamente para comprobar el funcionamiento de la tolva vibratoria no se necesitaba que tuvieran un color específico, entonces esta cantidad de café se utilizó para observar el rendimiento de la tolva con el producto.

La tolva demostró un excelente comportamiento con las cerezas, tal como se puede ver en el anexo G. El único problema que surge es en la salida, por lo que se requiere encañar unos centímetros antes el último espiral, buscando que a la salida salga grano por grano.

Semanas después, se intentó traer otra cantidad similar a la comentada anteriormente. Esta vez, los granos se congelaron en agua durante 24 horas aproximadamente, y posteriormente se empacaron en un termo, para ser transportadas. Para este caso se logró que una parte de esta cantidad de café llegara medianamente bien, alrededor de un 10% (ver figura 46), las demás se oxidaron, al momento de sacarlas del bloque de hielo. Cabe resaltar que en esta pequeña muestra de café venían variedad Colombia amarillo y Variedad castillo, las cuales se pueden identificar de manera sencilla, por su estado final de maduración, puesto que el estado final de maduración de la cereza de variedad Colombia es amarillo y el de la variedad castillo es rojo, de esta manera, como se deseaba clasificar café castillos se tomaron los granos de variedad Colombia amarillo como frutos inmaduros.

Figura 46. Cantidad de café que llego en buen estado.



Fuente. Los Autores.

Con este pequeño porcentaje de cerezas en buen estado se procedió a realizar una prueba igual a la que se hizo con los sparkies y M&M's. En este caso se tomó la lectura del sensor para 6 cerezas de café maduras distintas, donde se obtuvieron los resultados expresados en la tabla 14.

Tabla 14. Valores RGB obtenidos para las cerezas de café castillo.

	R (μs)	G (μs)	B (μs)
Cereza 1	667	764	562
Cereza 2	464	556	426
Cereza 3	455	523	410
Cereza 4	483	592	442
Cereza 5	491	566	430
Cereza 6	545	691	506
Promedio	518	615	462

Fuente. Los Autores.

De acuerdo con esto, se procedió a hacer la introducción de los valores promedio obtenidos a el programa, para cuadrar los correspondientes rangos, y proceder con la prueba del sistema.

Para este caso, el sistema se probó con 10 cerezas de café. Esto debido a que las cerezas que estaban en buen estado, al perder temperatura, de inmediato comenzaron su proceso de oxidación, por ello a la hora de realizar las pruebas del sistema, ya quedaban pocas cerezas en buen estado.

De estas 10 cerezas el sistema logro clasificar 9 correctamente, el error surgió en una cereza que estaba pintonada y el sistema la identifico como madura.

Cabe resaltar que el sistema funcionaba de manera correcta con las optimizaciones que se le aplicaron al código, siempre y cuando la configuración del sensor se hiciera de la forma adecuada, esto debido a que la ubicación del Sparkie o el M&M debajo del sensor, se debía hacer de manera manual, lo que representaba posibles errores humanos y como causante una mala recepción de información por parte del sensor, que conllevaría a errores en la parte de la clasificación.

Para finalizar y teniendo en cuenta la falencia que se expuso anteriormente, se planteó la solución que expresa la segunda versión del programa explicada de mejor manera en el apartado de programación del microcontrolador. Donde se propone una auto calibración, en la cual, el usuario pone dos cerezas de café maduras, buscando que estas tengan el rojo menos intenso que se desee clasificar en la banda. Posterior a esto, se iniciaría la auto calibración en donde el sensor detecta cuando la cereza esta debajo de él, toma los datos respectivos y avanza realizando el mismo procedimiento con la siguiente cereza. Teniendo la auto calibración realizada, se inicia la clasificación.

Con este programa se realizaron dos pruebas, la primera de ellas con M&M's y Sparkies, en donde se hizo una validación del sistema completo con 40 elementos de prueba, entre ellos 20 M&M's y 20 Sparkies. La calibración se realizó con un M&M rojo y con un sparkie rojo. Arrojando los siguientes resultados (ver tabla 15).

Tabla 15. Efectividad del sistema con M&M's y sparkies.

VERDADEROS POSITIVOS	14
FALSOS POSITIVOS	1
FALSOS NEGATIVOS	0
VERDADEROS NEGATIVOS	25
TOTAL	40

Fuente. Los Autores.

En este caso el error se presentó debido a un problema con el servomotor, que era el encargado del desvío, es decir al momento en el que el M&M naranja paso por debajo del sensor él lo capto como inmaduro e inmediatamente la pestaña de desvió hacia la canal de los inmaduros, pero en el tiempo que ella se mantiene ahí el M&M no tuvo tiempo de llegar por lo que el servo volvió a la posición de maduro y este elemento de muestra termino cayendo en el recipiente de los maduros. Aun así, con este error el sistema obtuvo una efectividad del 97,5%.

Sin embargo, después de esta prueba se cambió el tiempo de devolución del servomotor, aumentándolo con el fin de solucionar esta falencia en el prototipo. Después de realizar esta modificación se volvió a realizar la misma prueba en donde el prototipo mostró una efectividad del 100%.

Ya para realizar las pruebas finales del prototipo se presentaron algunas complicaciones debido a la situación por la que pasaba el país, frente a la crisis sanitaria causada por el COVID-19 y el paro nacional que se presentó desde el 28 de abril del presente año.

hacer las pruebas de la versión final del sistema de clasificación con el café castillo fue imposible, debido a la situación del paro nacional, ya que se cerraron varias de la vías de acceso al municipio de Planadas. Así que se optó por buscar otra solución. Fue allí donde, con la ayuda de un docente, se lograron encontrar dos árboles de café, en un parque ubicado al oriente de la avenida Boyacá con calle 163, en el norte de la ciudad de Bogotá. Los árboles se pueden evidenciar en la figura 47.

Figura 47. Árboles ubicados en el norte de Bogotá.



Fuente. Los Autores.

El problema fue que, de acuerdo con consultas con familiares caficultores, donde se preguntó que variedad eran estos árboles de café, estos afirmaron que era variedad Colombia. Pero luego de analizar se observó que este café de igual manera pertenece a la familia de los arábigos y su color óptimo de maduración es rojo.²⁹ Por lo que se tomó como opción para la validación final del sistema. Los granos obtenidos para realizar las pruebas se muestran en la figura 48.

²⁹ CENICAFE. CARTILLA 1. Variedades de café sembradas en Colombia. Pág. 14. [En línea]. Recuperado el 10 de mayo de 2021. Disponible en. <https://www.cenicafe.org/es/publications/C1.pdf>

Figura 48. Granos obtenidos a partir de los árboles encontrados en la ciudad.



Fuente. Los Autores.

En esta prueba se realizó el mismo procedimiento narrado anteriormente con los Sparkies y M&M's, pero con una muestra de 100 cerezas de café, conformada por 50 cerezas madura y sobre maduras y 50 pintonas e inmaduras. Esta prueba arrojó los resultados que se muestran en la tabla 16.

Tabla 16. Efectividad del sistema a partir de la validación con cerezas de café genuinas.

VERDADEROS POSITIVOS	49
FALSOS POSITIVOS	4
FALSOS NEGATIVOS	1
VERDADEROS NEGATIVOS	46
TOTAL	100

Fuente. Los Autores.

Al finalizar esta prueba se pudo evidenciar que se presentaron 5 errores, entre ellos 4 falsos positivos, de los cuales 2 granos eran pintones y 2 verdes. Los granos que se presentaron como falsos positivos por el sistema se pueden apreciar en la figura 49.

Figura 49. Falsos positivos captados por el sistema



Fuente. Los Autores.

En la tabla 16 también se puede evidenciar que se presentó un falso negativo, para este caso, este error fue de una cereza sobre madura.

Como dato final se puede decir que el sistema de clasificación, para una muestra de 100 cerezas clasifico 95 cerezas bien y 5 mal, lo que representa a su vez un 95% de efectividad del sistema.

Con el fin de determinar el tiempo de clasificación, para este caso, cuantas cerezas logra clasificar el producto en un minuto, se tuvo que hacer una aproximación a través de la ubicación del máximo de cerezas que cabían en la banda transportadora.

Todo esto se debió a que en la etapa final no se logró implementar el prototipo completo junto con la tolva. Esto se debió en principio a que en el momento que se logró conseguir el café, por cuestión de la crisis sanitaria causada por el COVID-19, a partir del 10 de abril de 2021, por medio del decreto 135 del 5 de abril de 2021 se decretó la restricción completa de la movilidad durante ese fin de semana. Esto tuvo un impacto negativo en desarrollo de la parte de la implementación y validación completa del prototipo, debido a que los días en los que se tenía permitido el acceso a la empresa en donde se encontraba la tolva, era en los fines de semana, puesto que entre semana se llevaban a cabo las labores cotidianas de la empresa y representaba un peligro, que los autores estuvieran allí. Esta situación se siguió repitiendo durante los tres fines de semana siguientes.

Por otro lado, en el momento en que se levantaron este tipo de cuarentenas, el país ya se encontraba en situación de paro nacional, por lo que se dificultaba la movilidad hacia la empresa en donde se encontraba la tolva. Se debe aclarar que la banda transportadora y el montaje electrónico se encontraban en el noroccidente de la ciudad y la empresa metalmeccánica, está ubicada en el sur.

Otro aspecto que impidió el desarrollo fue que la tolva funcionaba a una alimentación de 220 voltios, lo que impedía que cualquiera de los autores pudiera transportar la tolva hacia sus lugares de residencia.

Al final, para poder observar la eficacia del dispositivo en términos de tiempo, se ubicaron 8 cerezas de café sobre la banda transportadora, y estas fueron clasificadas en un tiempo de 6 segundos. Dando como resultado un tiempo de clasificación de 80 cerezas por 1 minuto.

Que, a su vez, en peso representaría 144 gramos por minuto o en unidades más universales, 8,64 kilogramos por hora, teniendo en cuenta que una cereza de café en maduración óptima tiene un peso de 1,8 gramos.³⁰ En la tabla 17 se puede observar mejor la eficiencia del prototipo en términos de tiempo y peso.

Tabla 17. Eficiencia del sistema en términos de tiempo y peso.

N° DE CEREZAS	TIEMPO	PESO
1	0,75 seg	1,8 g
80	60 seg	144 g
4800	1 h	8,64 kg
38400	8h	69,12 kg

Fuente. Los Autores.

³⁰ MARTINEZ, Jorge Luis. La importancia del corte selectivo de café cereza. Centro ecológico del café A.C. [En línea]. Recuperado el 14 de mayo de 2021. Disponible en. <https://cutt.ly/zbCrUYj>

3. DESCRIPCIÓN ECONÓMICA DEL PROYECTO

Tabla 18. Costos del proyecto

ITEM	CANTIDAD	VALOR UNITARIO (COP)	VALOR TOTAL (COP)
ATmega328P	1	\$ 10.000	\$ 10.000
Sensor de Color TCS3200	1	\$ 28.000	\$ 28.000
Motorreductor RN20	1	\$ 15.000	\$ 15.000
Servomotor SG90	1	\$ 7.000	\$ 7.000
PCB	1	\$ 20.000	\$ 20.000
Pantalla LCD	1	\$13.000	\$13.000
Elementos electrónicos (transistores, condensadores, resistencias, pulsadores y cableado)	-	\$ 8.000	\$ 8.000
Lamina de mdf 50 cm x 50 cm – 3 mm	2	\$ 8.000	\$ 16.000
Rodillos en impresión 3D	2	\$5.000	\$ 10.000
Otros materiales de estructura (varillas, pegamentos, pinturas, balsa)	-	\$15.000	\$ 15.000
Fuente DC	1	\$ 70.000	\$ 70.000
Neumático Banda transportadora	1	\$ 11.000	\$11.000
Engranajes	2	\$ 2.000	\$ 4.000
Tolva vibratoria	1	\$ 600.000	\$ 600.000
TOTAL			\$ 827.000

Fuente. Los Autores.

4. CONCLUSIONES

Gracias a la vigilancia tecnológica realizada, se pudo concluir que existen distintos métodos y tecnologías que se pueden emplear para clasificar cerezas de café acorde al color que poseen en su estado de maduración. Entre las tecnologías encontradas están el reconocimiento de imágenes y sensado por color. Al momento de comparar ambas se optó por emplear un sensor de color ya que, su programación e implementación era más familiar y económico que el reconocimiento de imagen.

A pesar de que no se pudo ensamblar el prototipo completo para su validación, se realizaron pruebas de la tolva y el sistema de clasificación por separado, lo cual permitió corroborar el correcto funcionamiento de estos por aparte. Para suplir esto se realizó una simulación del modelo 3D con ayuda del software Autodesk Inventor. De esta forma se brinda una idea más visual de como funcionaría el prototipo completo.

De igual forma, no se pudo implementar el diseño propuesto de la PCB debido a los inconvenientes presentados por la pandemia por COVID-19 y el paro nacional que se presenta en Colombia, pero el circuito se implementó en protoboard y el funcionamiento fue el esperado, ya que, operó bien en todas las pruebas realizadas.

En cuanto a la calibración del sensor, se logró que el prototipo la haga de manera automática y así reducir el error humano que puede generar el usuario. Sin embargo, la calibración sigue dependiendo del usuario, ya que, es el quien selecciona las cerezas de café con las cuales se va a calibrar el prototipo.

También se encontró que entre más aislado este el sensor de luces externas y de objetos refractivos serán mejores las mediciones tomadas por él.

Para la separación se empleó un servomotor el cual encamina las cerezas variando su posición entre 135° y 45° , en las pruebas se obtuvo un comportamiento satisfactorio siempre y cuando los tiempos empleados para que haga estos cambios estén bien configurados.

En la validación del sistema de clasificación del prototipo se pudo determinar que la velocidad de este proceso depende de la velocidad de la banda transportadora, ya que, esta es el elemento más lento dentro sistema.

De acuerdo con los resultados de la última prueba con las cereza de café, se pudo realizar una estimación de cuantos kilos de café clasificaría el prototipo en una hora, dando como resultado que serían más de 8 kilos en una hora, con una efectividad del 95%. Por otro lado, aunque en un principio el prototipo iba dirigido a la clasificación de la variedad de café castillo, en las pruebas se evidenció que este puede clasificar variedades de café cuyas etapas de maduración presenten colores similares a la

mencionada, cumpliendo así con el objetivo de desarrollar un prototipo funcional capaz de clasificar café.

Se evidenció que el café no es un fruto climatérico, es decir que no madura una vez es recolectado de la planta, sino que por el contrario comienza su proceso de descomposición, por lo cual lo mejor es hacer pruebas en el lugar donde se realiza la recolección de este o en su defecto lo más cerca posible.

Por último, se puede concluir que el desarrollo de este prototipo sirve como prueba de conceptos y de igual manera representa una posible alternativa eficiente para la clasificación de cerezas de café que tengan colores en sus etapas de maduración similares a la variedad castillo.

El prototipo resulta ser una opción económica en comparación a las maquinas que existen actualmente para realizar este proceso en el mercado, ya que estas pueden fácilmente superar el costo de 100 millones de pesos colombianos, mientras el estimado del costo del prototipo no supera el millón de pesos colombianos. Aunque las maquinas existentes clasifican una mayor cantidad de cerezas (toneladas por hora), al prototipo estar dirigido a pequeños caficultores no va a tener que clasificar esta misma cantidad.

5. RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Para futuros trabajos teniendo como base este trabajo de grado, se recomienda hacer las pruebas en campo, lo cual facilitaría mucho más las mediciones y validaciones, brindando más solidez al desarrollo del prototipo.

Como se mencionó en un principio, esta fue una prueba de concepto, por lo que a futuro se puede realizar todo en mejores materiales, reemplazando el mdf por acero inoxidable o aluminio. De igual manera, el motor de la banda transportadora se puede reemplazar por un motor más veloz, lo que conllevaría a cambiar el sistema de desvío. Una opción para ello puede ser por medio de una electroválvula o una válvula neumática.

También se le podrían adicionar conceptos de IOT, en donde se pueda llevar un control de cuantas cerezas inmaduras, se están recolectando, y que estos datos puedan ser subidos a la nube, con el fin de poder evaluar recolectores. Todo esto pensando en abarcar grandes caficultores, que muchas veces están en lugares distintos a sus unidades productivas y necesitan llevar este tipo de controles.

BIBLIOGRAFIA

1. ALVAREZ PULIDO, Manuel. Electroimanes. Ebook. 2010. Editorial club Universitario. [En línea]. Recuperado el 28 de abril de 2021. Disponible en: <https://cutt.ly/xbxnTkm>
2. Arboledas Brihuega, David. Electrónica para la educación secundaria. Madrid: Bubok Publishing SL, 2010. [Consultado: 20 de mayo de 2020]. Disponible en: ProQuest Ebook Central.
3. Automatización. Autómatas programables. Curso básico de autómatas Programables. Diciembre 2001. [En línea]. [Consultado: 14 de abril de 2020]. Disponible en: <https://goo.gl/MGuQXg>
4. Avances técnicos Cenicafé [en línea]. Manizales, Caldas, ISSN - 0120 – 0178, marzo de 2014, Vol. nro. 441, [Consultado: 14 de abril de 2020]. Disponible en <https://cutt.ly/EynMODE>
5. Avances técnicos cenicafé, Como garantizar la buena calidad de la bebida del café y evitar los defectos, [En línea]. Febrero de 2001, [consultado: 14 de septiembre de 2020]. Disponible en: <https://www.cenicafe.org/es/publications/avt0284.pdf>
6. Beneficiado húmedo del café, ergomix, 15 de marzo de 2013, [en línea]. [consultado: 8 de octubre de 2020] Disponible en. <https://www.engormix.com/agricultura/articulos/beneficiado-humedo-cafe-t30188.htm>
7. Boletín agropecuario. Agricultura industrial [En línea]. [Consultado: 14 de abril de 2020]. Disponible en: <https://cutt.ly/wynM9AO>
8. Café de Colombia. real academia del café [sitio web]. [Consultado: 14 de abril de 2020]. Disponible en: <https://realacademiadelcafe.com/modulo1.php>
9. CENICAFE. CARTILLA 1. Variedades de café sembradas en Colombia. Pág. 14. [En línea]. Recuperado el 10 de mayo de 2021. Disponible en. <https://www.cenicafe.org/es/publications/C1.pdf>
10. COMSA, beneficio húmedo [En línea]. [Consultado: 13 de septiembre de 2020]. Disponible en: <https://www.comsa.hn/beneficio-humedo/>
11. EL CRONISTA. Tolima tercer productor de café en Colombia, 03 de febrero de 2020, [En línea]. [consultado: 14 de septiembre de 2020]. Disponible en. <https://www.elcronista.co/destacadas/tolima-tercer-productor-de-cafe-en-colombia->

12. EL TIEMPO. Planadas, Tolima, recibe la paz sembrando café. 20 DE Julio de 2016. [En línea]. [Consultado: 16 de marzo de 2021]. Disponible en: <https://cutt.ly/SxVjZui>
13. Federación Nacional de Cafeteros. Federación Nacional de Cafeteros: Gobierno Nacional y Federación Nacional de Cafeteros firman agenda 2030 para el sector cafetero [En línea]. [Consultado: 14 de abril de 2020]. Disponible en: <https://cutt.ly/iynM8xs>
14. Federación Nacional de Cafeteros. Caficultura crece 9,5% en 2019, tres veces más que la economía nacional [sitio web]. [Consultado: 9 de octubre de 2020]. Disponible en: <https://federaciondecafeteros.org/wp/listado-noticias/caficultura-crece-95-en-2019-tres-veces-mas-que-la-economia-nacional/>
15. Ferreira Júnior, L. G., da Silva, F. M., Ferreira, D. D., & Sales, R. S. Recommendation for mechanical harvesting of coffee based on vibration behavior settings rods harvesters. [Recomendação para colheita mecânica do café baseado no comportamento de vibração das hastes derrçadoras] [en línea]. En: Revista Ciencia Rural. 2016, Volumen 46. P. 273-278 [Consultado: 28 de marzo de 2020] Disponible en: doi:10.1590/0103-8478cr20141679
16. New Belt. Máquina de clasificación de color de grano de café [En línea]. [Consultado: 22 de abril de 2020]. Disponible en <https://cutt.ly/8ynMJey>
17. HERRERA PERÉZ, jean Carlos, MEDINA ORTIZA, silfiri manuel. Classification of coffee fruits based on ripeness and broca detection using image processing techniques [en línea]. Barranquilla, Colombia, Universidad autónoma del Caribe. Facultad de Ingeniería y arquitectura. 2015. 8 p. [Consultado: 14 de septiembre de 2020] Disponible en: <http://www.scielo.org.co/pdf/prosp/v14n1/v14n1a02.pdf>
18. HERRERA PERÉZ, jean Carlos, MEDINA ORTIZA, silfiri manuel. GUALDRON, oscar. Design of an Automated Coffee Selection System by Means of Computer Vision Techniques [en línea]. UIS Ingenierias. 2016. 8 p. [Consultado: 14 de septiembre de 2020] Disponible en: <https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistausingenierias/article/view/5572/5758>
19. Keyence. Guía de sensores para fábricas clasificados por principios, Fundamentos del sensor, ¿Qué es un sensor de color? [En línea]. [Consultado: 22 de abril de 2020]. Disponible en: <https://www.keyence.com.mx/ss/products/sensor/sensorbasics/color/info>
20. MARTINEZ, Jorge Luis. La importancia del corte selectivo de café cereza. Centro ecológico del café A.C. [En línea]. Recuperado el 14 de mayo de 2021. Disponible en: <https://cutt.ly/zbCrUYj>

21. Mitsubishi Motors, La importancia del café en Colombia, El Día del Café en Colombia se celebra el 27 de junio pues tal día en el año 1927 se creó la Federación Nacional de Cafeteros, [sitio web] Julio 8 de 2020, [consultado el: 13 de septiembre de 2020], Disponible en. <https://mitsubishi-motors.com.co/blog/2020/07/08/dia-del-cafe-en-colombia/#:~:text=Adem%C3%A1s%2C%20en%20cifras%20de%20la,mejor%20caf%C3%A9%20suave%20del%20mundo.>
22. PALACIOS CAICEDO, Fredy alexander y LIZARAZO CRUZ, John Jairo. Sistema semiautomatizado de clasificación de la cebolla cabezona [en línea]. Trabajo de Grado para optar por el título de Ingeniero Electrónico y de Telecomunicaciones. Bogotá D.C. Universidad Católica de Colombia. Facultad de Ingeniería. 2017. 68 p. [Consultado: 28 de marzo de 2020] Disponible en: <https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/14677/1/Documento%20clasificaci%C3%B3n%20cebolla%20%28Tesis%29.pdf>
23. PREUSS, Arne. Coffeeness: Café arábica y café robusta: rasgos comunes, diferencias y calidad [En línea]. [Consultado: 14 de abril de 2020]. Disponible en: <https://www.coffeeness.de/es/arabica-y-robusta/>
24. RAMOS GIRALDO, Paula Jimena, SAENZ URIBE, Juan Rodrigo, OLIVEROS TASCÓN, Carlos Eugenio, IDENTIFICACIÓN Y CLASIFICACIÓN DE FRUTOS DE CAFÉ EN TIEMPO REAL, A TRAVÉS DE LA MEDICIÓN DE COLOR [en línea]. Cenicafé. 2010. 12 p. [Consultado: 14 de septiembre de 2020] Disponible en. <https://www.cenicafe.org/es/publications/arc061%2804%29315-326.pdf>
25. ROBOTS DIDÁCTICOS. Automatización. reconocer colores con el módulo TCS3200. [En línea]. Recuperado el 15 de abril de 2021. Disponible en. <https://cutt.ly/gbXvLrO>
26. Salas, AS, 2015. Todo sobre sistemas embebidos: Arquitectura, programación y diseño de aplicaciones prácticas con el pic18f. [En línea]. [Consultado: 16 de abril de 2020]. Disponible en: <https://ebookcentral.proquest.com>
27. SANDOVAL NIÑO, Zulma Liliana y PRIETO ORTIZ, Flavio Augusto. CARACTERIZACIÓN DE CAFÉ CEREZA EMPLEANDO TÉ CARACTERIZACIÓN DE CAFÉ CEREZA EMPLEANDO TÉ EMPLEANDO TÉCNICAS DE VISIÓN ARTIFICIAL [en línea]. Tesis presentada para obtener el título de Magister en automatización industrial. Manizales, Caldas. Universidad Nacional de Colombia, sede manizales. Facultad de Ingeniería y arquitectura. 2007. 12 p. [Consultado: 13 de septiembre de 2020] Disponible en: <http://www.scielo.org.co/pdf/rfnam/v60n2/a15v60n2.pdf>
28. Teoría y diseño con microcontroladores de freescale: Familia flexis de 32 bits mcf5iqe., 2008. [En línea]. [Consultado: 18 de abril de 2020]. Disponible en: <https://ebookcentral.proquest.com>

ANEXOS

Anexo A. Resultados de mediciones en la semana con SPARKIES Y M&M (COLOR ROJO).

SPARKIES Y M&M (COLOR ROJO)									
	LUNES			MARTES			MIERCOLES		
	R (μs)	G (μs)	B (μs)	R (μs)	G (μs)	B (μs)	R (μs)	G (μs)	B (μs)
MAÑANA	360 - 400	590 - 610	460 - 490	361 - 400	589 - 608	460 - 490	360 - 400	590 - 610	460 - 490
TARDE	358 - 402	592 - 612	460 - 480	358 - 401	594 - 610	460 - 480	358 - 402	592 - 612	460 - 480
TARDE-NOCHE	361 - 399	588 - 600	459 - 485	360 - 399	589 - 603	459 - 485	361 - 399	588 - 600	459 - 485

SPARKIES Y M&M (COLOR ROJO)						
	JUEVES			VIERNES		
	R (μs)	G (μs)	B (μs)	R (μs)	G (μs)	B (μs)
MAÑANA	361 - 400	589 - 608	460 - 490	360 - 400	590 - 610	460 - 490
TARDE	358 - 401	594 - 610	460 - 480	358 - 402	592 - 612	460 - 480
TARDE-NOCHE	360 - 399	589 - 603	459 - 485	361 - 399	588 - 600	459 - 485

Fuente. Los Autores.

Anexo B. Resultados de mediciones en la semana con SPARKIES Y M&M (COLOR VERDE).

SPARKIES Y M&M (COLOR VERDE)									
	LUNES			MARTES			MIERCOLES		
	R (μ s)	G (μ s)	B (μ s)	R (μ s)	G (μ s)	B (μ s)	R (μ s)	G (μ s)	B (μ s)
MAÑANA	300 - 295	448 - 450	360 - 380	300 - 295	448 - 450	360 - 380	300 - 295	448 - 450	360 - 380
TARDE	448 - 450	300 - 295	360 - 380	448 - 450	300 - 295	360 - 380	448 - 450	300 - 295	360 - 380
TARDE-NOCHE	299 - 300	439 - 450	359 - 361	299 - 300	439 - 450	359 - 361	302 - 292	439 - 450	359 - 361

SPARKIES Y M&M (COLOR VERDE)						
	JUEVES			VIERNES		
	R (μ s)	G (μ s)	B (μ s)	R (μ s)	G (μ s)	B (μ s)
MAÑANA	300 - 295	448 - 450	360 - 380	300 - 295	448 - 450	360 - 380
TARDE	448 - 450	300 - 295	360 - 380	448 - 450	300 - 295	360 - 380
TARDE-NOCHE	299 - 300	439 - 450	359 - 361	299 - 300	439 - 450	359 - 361

Fuente. Los Autores.

Anexo C. Resultados de mediciones en la semana con SPARKIES Y M&M (COLOR AZUL).

SPARKIES Y M&M (COLOR AZUL)									
	LUNES			MARTES			MIERCOLES		
	R (μs)	G (μs)	B (μs)	R (μs)	G (μs)	B (μs)	R (μs)	G (μs)	B (μs)
MAÑANA	410 - 415	402 - 415	325 - 330	411 - 405	402 - 415	325 - 331	410 - 415	402 - 415	325 - 330
TARDE	358 - 402	592 - 612	320 - 330	358 - 403	592 - 614	320 - 330	357 - 404	592 - 612	320 - 330
TARDE-NOCHE	361 - 399	588 - 600	325 - 331	361 - 399	588 - 600	325 - 331	361 - 399	588 - 600	325 - 331

SPARKIES Y M&M (COLOR AZUL)						
	JUEVES			VIERNES		
	R (μs)	G (μs)	B (μs)	R (μs)	G (μs)	B (μs)
MAÑANA	410 - 415	402 - 415	325 - 330	411 - 405	402 - 415	325 - 331
TARDE	358 - 402	592 - 612	320 - 330	358 - 403	592 - 614	320 - 330
TARDE-NOCHE	361 - 399	588 - 600	325 - 331	361 - 399	588 - 600	325 - 331

Fuente. Los Autores

Anexo D. MANUAL DEL USUARIO.

En el siguiente manual del usuario se muestran las instrucciones para un buen uso del dispositivo.

ASPECTOS PARA TENER EN CUENTA ANTES DE USAR EL SISTEMA

- Recuerde que por cada vez que reinicie o apague el sistema, deberá recalibrar el sensor.
- Se recomienda mantener el dispositivo bajo techo, recuerde que es un dispositivo electrónico y no es resistente al agua, cualquier contacto con agua en la parte electrónica puede causar daños irreversibles.

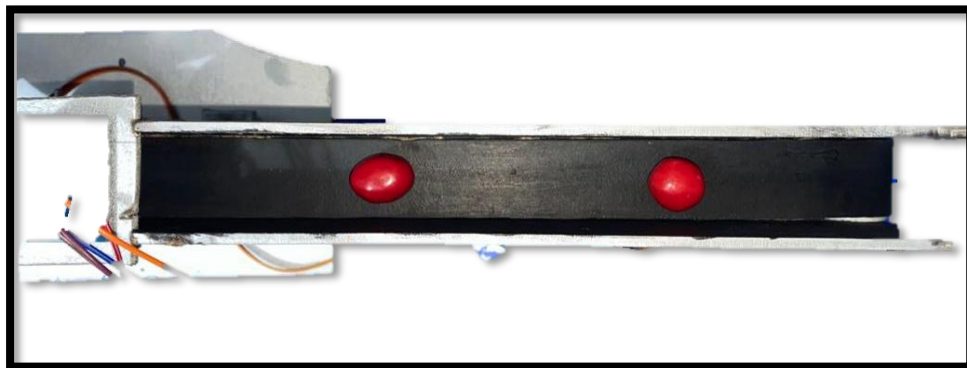
PASO A PASO PARA REALIZAR LA CLASIFICACIÓN DE CAFÉ.

1. El primer paso para conseguir una buena clasificación de su café, es elegir dos cerezas maduras dentro del lote que desea clasificar.

NOTA: recuerde que estas cerezas van a dar el rango de clasificación, por ende, estas van a delimitar desde que punto va a considerar una cereza madura, se recomienda tomar una cereza de tamaño grande y una pequeña, acorde con las condiciones de los frutos de su lote.

2. El siguiente paso es colocar estas dos cerezas tal y como se muestra en la figura 1.

Figura 1 . Posicionamiento correcto de las cerezas escogidas para la calibración.



Fuente. Los Autores.

3. Teniendo las cerezas de calibración en posición, el paso a seguir es conectar el dispositivo a la corriente, donde en la pantalla le deberá aparecer el siguiente aviso (ver figura 2):

Figura 2. Primer mensaje emergente al energizar el dispositivo.



Fuente. Los Autores.

4. El paso a seguir es oprimir el botón de calibración, e inmediatamente cambiara el mensaje de la pantalla LCD a “calibración iniciada” tal como se muestra en la figura 3, y simultáneamente la banda comenzara a ponerse en movimiento.

Figura 3. Mensaje emergente a la hora de oprimir el botón de calibración



Fuente. Los Autores.

5. En este punto, el sistema iniciará la auto calibración y aparecerá en pantalla el mensaje de “Calibración en proceso” tal y como se muestra en la figura 4. En este punto NO MUEVA NADA esta calibración no durará más de 7 segundos.

Figura 4. Mensaje que indica que la calibración está en proceso



Fuente. Los Autores.

6. Pasados 7 segundos aproximadamente la banda transportadora se detendrá, y en la pantalla aparecerá un mensaje indicando “calibración terminada” (ver figura 5). Y por consiguiente aparecerá un mensaje indicando que oprima el botón de clasificación (ver figura 6).

Figura 5. Mensaje que indica que la calibración finalizo.



Fuente. Los Autores.

Figura 6. Mensaje que indica que oprima el botón para iniciar la clasificación de su café.



Fuente. Los Autores.

7. Como último paso presione el botón de clasificación para que el dispositivo se ponga en marcha y comience a hacer la clasificación de su lote de café. Además, aparecerá un aviso que indicará que el dispositivo ya está listo para clasificar. (ver figura 7)

Figura 7. Indicador de que el dispositivo está listo para clasificar.



Fuente. Los Autores.

NOTA: En caso de querer parar la clasificación para hacer una nueva calibración o por cualquier otra eventualidad, presione el botón "RESET", este reiniciará toda la configuración del dispositivo y lo pondría en el paso 1 de nuevo.