



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS CÓRDOBA

POSTGRADO EN INNOVACIÓN AGROALIMENTARIA SUSTENTABLE

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO
DE SELECCIONADORA POR COLOR PARA CAFÉ
CEREZA**

ARISEL JUÁREZ BRAVO

T E S I S

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE**

MAESTRA EN CIENCIAS

AMATLÁN DE LOS REYES, VERACRUZ, MÉXICO

MARZO, 2017


LA PRESENTE TESIS, TITULADA: **DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE SELECCIONADORA POR COLOR PARA CAFÉ CEREZA**, REALIZADA POR EL ALUMNO: **ARISEL JUÁREZ BRAVO**, BAJO LA DIRECCIÓN DEL CONSEJO PARTICULAR INDICADO, HA SIDO APROBADA POR EL MISMO Y ACEPTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS

EN INNOVACIÓN AGROALIMENTARIA SUSTENTABLE

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO:



DR. VICTORINO MORALES RAMOS

ASESOR:



DR. HÉCTOR DEBERNARDI DE LA VEQUIA

ASESOR:



DR. ABEL QUEVEDO NOLASCO

ASESOR:



M.I.E. FERNANDO MALAGÓN GONZÁLEZ

Amatlán de los Reyes, Veracruz, México, 22 de marzo de 2017

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE SELECCIONADORA POR COLOR PARA CAFÉ CEREZA

Arisel Juárez Bravo, M.C.

Colegio de Postgraduados, 2017

Debido a que la planta de café presenta varias floraciones al año, los frutos del cafeto presentan poca uniformidad de maduración en una misma rama, lo que dificulta la cosecha. El producto cosechado es entonces una mezcla de frutos inmaduros, pintones, maduros y secos. El tener frutos inmaduros y secos en el producto cosechado es factor del deterioro de la calidad del café. Con el fin de separar al menos el 50 % del grano inmaduro y seco presente en las muestras a procesar, se diseñó y construyó una seleccionadora por color para café cereza. En el diseño del prototipo se definieron las especificaciones del usuario, los criterios de evaluación y las especificaciones del producto (densidad aparente, ángulo de reposo, masa y dimensiones de los frutos y el color de la epidermis del fruto de café), a estas últimas se les realizó un análisis de varianza y se corrió una prueba de Tukey para separar medias ($\alpha=0.05$). Posteriormente se propusieron dos conceptos de diseño (A y B) para el prototipo, se validaron y se eligió el óptimo (B). Se completó el diseño detallado del concepto óptimo, sus piezas se fabricaron y ensamblaron junto con sus dispositivos (sensor reflectivo, sensor de color basado en filtros (convertidor de luz a frecuencia), motor a pasos, servomotor de rotación estándar, hardware Arduino UNO, PCB, cable USB, dos eliminadores y software Arduino). En Arduino se generó un código que permite controlar el motor a pasos por medio del sensor reflectivo, obtener las variables de color de la epidermis del fruto (R, G, B) y clasificar cada fruto de acuerdo a su estado de maduración bajo las siguientes condiciones: inmaduros $R < G < B$, pintones-maduros $R < B < G$ y secos $B \leq R < G$. Finalmente se evaluó la fiabilidad del prototipo con una muestra de granos de café compuesta por frutos inmaduros, pintones-maduros y secos (12 %, 80 % y 8 %, respectivamente). El concepto óptimo, B, se eligió por su menor precio de producción (\$3, 170.00) y volumen (604 cm³) con respecto al concepto A. El prototipo (concepto B) muestra una fiabilidad de 0.93, asegurando la separación de más del 50 % de los frutos indeseables (inmaduros y secos).

Palabras clave: café cereza, clasificación por color, diseño en ingeniería, máquina seleccionadora de café cereza.

DESIGN AND CONSTRUCTION OF A PROTOTYPE OF SORTING BY COLOR TO COFFEE CHERRY

Arisel Juárez Bravo, M.C.

Colegio de Postgraduados, 2017

The coffee plants have several flowering per year; due to this fact, the plant fruits present little ripening uniformity in the same branch, this makes the harvest difficult. Thus, the harvested product is a mixture of underripe, semiripe, ripe and dry fruits. To have underripe and dry fruits in the harvested coffee deteriorates/diminishes its quality. In order to separate at least 50 % of the underripe and dry grains present in the samples to process, a sorting by color to coffee cherries was designed and constructed. In the prototype design, the user specifications, evaluation criteria and product specifications (bulk density, angle of repose, mass and dimensions of the fruits and the color of the epidermis of the coffee fruit) were defined. A variance analysis was performed to the product specifications and a Tukey test ($\alpha=0.05$) was run to separate means to the specifications of the product specifications. Later two design concepts were proposed (A and B), these were validated and the optimum one was chosen (B). The detailed design of the optimal design was completed, its parts were manufactured and assembled with the devices (reflective sensor, color sensor based on filters (light to frequency converter), stepper motor, standard rotation servomotor, Arduino UNO hardware, PCB, USB wire, two AC adapters and Arduino software). In Arduino a code was generated that allows to control the stepper motor by the reflective sensor, obtain the color variables of the fruit epidermis (R, G, B) and classify each fruit according to its ripening stage under the following conditions: underripe $R < G < B$, semiripe-ripe $R < B < G$ and dried $B \leq R < G$. Finally, the reliability of the prototype was evaluated with a coffee beans sample composed of underripe, semiripe-ripe and dry fruits (12%, 80% and 8%, respectively). The optimum concept, B, was chosen for its lower production price (\$3, 170.00) and volume (604 cm^3) with respect to concept A. The chosen prototype shows a reliability of 0.93, ensuring separation of more than 50 % of undesirable fruits (underripe and dry).

Keywords: coffee cherry, color classification, engineering design, coffee cherry sorting machine.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por haberme otorgado una beca para realizar mis estudios de maestría.

Al Colegio de Postgraduados, por darme la oportunidad de realizar mis estudios de maestría y por el financiamiento para llevar a cabo la investigación.

Al Dr. Victorino Morales Ramos por la dirección de la presente tesis, su apoyo, estímulo y facilidades que me brindó.

Al Dr. Hector Debernardi de la Vequia por sus atinadas observaciones en la fase experimental, por su apoyo, comprensión y consejos.

Al Dr. Abel Quevedo Nolasco por sus valiosas contribuciones y apoyo para la culminación del proyecto.

Al M.I.E. Fernando Malagón González por su apoyo incondicional y aportaciones a esta investigación.

Al personal académico y administrativo del postgrado en Innovación Agroalimentaria Sustentable del Colegio de Postgraduados, por las facilidades y apoyo brindados durante mi estancia.

A la Universidad Tecnológica Veracruzana y a Talleres y Servicios Agroindustriales Gómez S. A. de C. V. por su apoyo en la fabricación del prototipo.

A mis compañeros y amigos de la maestría por los momentos compartidos y apoyo incondicional.

Dedico esta tesis a Dios por darme vida y estar conmigo en cada paso que doy. También por poner en mí camino a personas valiosas que me han brindado su amistad.

A mi padre y madre que día a día me brindaron su apoyo, amor y consejos, fortaleciéndome para cumplir con mis objetivos.

A mi hermana y amiga Eliud por su apoyo, aliento, comprensión y amor en los momentos de incertidumbre.

A mis hermanas Aremi, Anahi, Emelia y hermano Santiago por su apoyo y palabras de aliento.

A mis sobrinos Emmanuel, Marely, Dayra, Melani, Emilio, Joan, Diego, Wenceslao y Angel Gabriel por la alegría y el amor que me dan.

A Jesús por su apoyo incondicional, palabras de aliento, comprensión y amor que me demuestra día con día. Por vivir a mi lado esta experiencia y no dejarme caer en los momentos difíciles. Gracias amor.

A la maestra Ana Tiscareño por su apoyo y amistad invaluable.

A Fabricio, José Manuel, Mario Alberto, Amauri Luciano, Luis Fernando y Ronaldo por su apoyo en la elaboración del proyecto.

A mis amigos y amigas que me alentaron y apoyaron durante esta etapa de mi vida.

Arisel Juárez Bravo

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. REVISIÓN DE LITERATURA	3
2.1. Taxonomía.....	3
2.2. Origen.....	3
2.3. El Café en México.....	3
2.4. Fenología del fruto	4
2.4.1. Floración	4
2.4.2. Crecimiento y desarrollo del fruto	5
2.4.3. Cambios químicos en el grano.....	6
2.5. Cosecha	7
2.5.1. Grado de madurez y defectos.....	8
2.5.2. Cosecha mecanizada	9
2.5.3. Madurez y calidad en taza.....	11
2.6. Colorimetría	12
2.7. Sensores de color.....	13
2.8. Motor a pasos	15
2.9. Servomotor de rotación estándar.....	15
2.10. Arduino.....	16
2.11. Tarjeta de circuito impreso (PCB).....	17
2.12. Innovación y desarrollo	17
2.13. Proceso del diseño en ingeniería	18
3. JUSTIFICACIÓN.....	21
4. HIPOTESIS	22
5. OBJETIVOS.....	22

5.1.	Objetivo general	22
5.2.	Objetivos particulares.....	22
6.	MATERIALES Y MÉTODOS.....	23
6.1.	Proceso de diseño del prototipo de seleccionadora por color para café cereza.....	23
6.1.1.	Definición de especificaciones	23
6.1.2.	Creación de los conceptos de diseño	25
6.1.3.	Toma de decisiones.....	25
6.1.4.	Diseño detallado.....	25
6.2.	Proceso de impresión	27
6.3.	Construcción y ensamble	27
6.4.	Dispositivos.....	27
6.4.1.	Sensor reflectivo	28
6.4.2.	Sensor convertidor de luz a frecuencia	28
6.4.3.	Motor a pasos.....	29
6.4.4.	Servomotor de rotación estándar	30
6.4.5.	Cable USB de tipo A/B.....	31
6.4.6.	Eliminadores	31
6.4.7.	Tarjeta de circuito impreso (PCB)	32
6.4.8.	Hardware Arduino UNO.....	33
6.5.	Software Arduino	34
6.6.	Evaluación de la fiabilidad del prototipo	34
7.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	36
7.1.	Proceso de diseño del prototipo seleccionadora por color para café cereza	36
7.1.1.	Definición de especificaciones	36
7.1.2.	Creación de los conceptos de diseño	41

7.1.3.	Toma de decisiones.....	45
7.1.4.	Diseño detallado.....	45
7.2.	Piezas elaboradas con la impresora 3D	48
7.3.	Ensamble de piezas	48
7.4.	Hardware	49
7.5.	Evaluación de la fiabilidad del prototipo	50
8.	CONCLUSIONES.....	51
9.	REFERENCIAS	52
10.	ANEXOS	59

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Yemas florales en las hojas axilares.....	5
Figura 2. Inflorescencias del café (glomérulos) en la antesis.....	5
Figura 3. Frutos de café inmaduros variedad Oro Azteca.....	6
Figura 4. Composición de un fruto de café (Ramos <i>et al.</i> , 2010).....	6
Figura 5. Frutos de café en diferente estado de maduración.....	8
Figura 6. Vibrador portátil de tallo Cifarelli SC700®, vista general del equipo y acople de la lanza al tallo del cafeto (Oliveros <i>et al.</i> , 2005a).....	10
Figura 7. Actuador IMFRA-3DC, diseñado para la cosecha manual de café (Álvarez <i>et al.</i> , 2013).....	10
Figura 8. Prototipo CAVAUTO para cosechar café aplicando vibración al follaje, construido en CENACAFE (Oliveros <i>et al.</i> , 2005b).....	11
Figura 9. Espacio de color RGB, como un cubo.....	13
Figura 10. Sensor de color basado en filtros.....	14
Figura 11. Infrarrojo por reflexión (Serna <i>et al.</i> , 2010).....	15
Figura 12. Vista frontal y posterior de Arduino UNO.....	16
Figura 13. Montaje de una PCB sobre Arduino UNO.....	17
Figura 14. Pasos en el proceso de diseño (Mott, 2006).....	20
Figura 15. Estado de maduración: inmaduro (verde), pintón-maduro y seco en frutos de café... ..	23
Figura 16. Cono formado por frutos secos, donde op =radio, ady =altura y α =ángulo de reposo. ..	24
Figura 17. Medición de largo y ancho en frutos de café.....	24
Figura 18. Diagrama de bloques del funcionamiento del sistema.....	26

Figura 19. Sensor reflexivo QRD1114.	28
Figura 20. Sensor convertidor de luz a frecuencia TCS230.	29
Figura 21. Motor a pasos 17HS4401.	30
Figura 22. Servo motor TOWER PRO MG995.....	30
Figura 23. Cable USB de tipo A/B.	31
Figura 24. Eliminador DC-0910.	32
Figura 25. Eliminador Sagemcom.	32
Figura 26. Diseño de la PCB y montaje sobre Arduino UNO.....	33
Figura 27. Vista frontal de la tarjeta Arduino UNO.	33
Figura 28. Software Arduino.	34
Figura 29. Muestra de frutos de café evaluada por el prototipo.	35
Figura 30. Conceptos de diseño A y B.	41
Figura 31. Sistema de dosificación con corte horizontal, concepto A.....	42
Figura 32. Sistema de dosificación con corte vertical, concepto B.	42
Figura 33. Mecanismo lector del color, concepto A y B.	43
Figura 34. Mecanismo de separación de los frutos indeseables, concepto A.	44
Figura 35. Mecanismo de separación de frutos indeseables, concepto B.	44
Figura 36. Piezas fabricadas con la impresora 3D.....	48
Figura 37. Prototipo de seleccionadora por color para café cereza ensamblada.	48
Figura 38. Hardware del prototipo de seleccionadora por color para café cereza.	49
Figura 39. Diagrama eléctrico.....	49

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Características físicas de frutos de café cosechados de la parcela del COLPOS, Córdoba (2014).	38
Cuadro 2. Dimensiones de frutos de café cosechados de la parcela del COLPOS, Córdoba (2014).	39
Cuadro 3. Color de frutos de café cereza por variedad cosechados de la parcela del COLPOS, Córdoba (2014).	39
Cuadro 4. Límites y medias de color en frutos de café cosechados de la parcela del COLPOS, Córdoba (2014).	40
Cuadro 5. Validación de los conceptos de diseño A y B.	44
Cuadro 6. Parámetros de evaluación del prototipo.	50

1. INTRODUCCIÓN

En el mundo existen máquinas capaces de clasificar frutas por tamaño, color y peso, pero el mercado requiere constantemente productos de mayor calidad y, en consecuencia, se han desarrollado características adicionales para mejorar los sistemas de inspección de visión artificial (por ejemplo para determinar el color de la piel, detectar defectos, etc.) (Amer Eissa y Abdel Khalic, 2012).

Para determinar el color se han usado sensores como el convertidor de luz a frecuencia, donde éste convierte la luz captada a pulsos de luz RGB (red, green and blue) (TAOS, 2003). La información obtenida del sensor convertidor es analizada por un microcontrolador, el cual ya tiene un código o algoritmo para que se realicen las acciones que se quieran, pudiendo manipular otros dispositivos como servomotores, sensores de presión, sensores de luz, etc. La implementación de un algoritmo en visión por microcontroladores tiene ventajas en procesos de clasificación, pudiendo producir un resultado rápido y exacto (Su TL *et al.*, 2008).

El color juega un papel muy importante en la maduración de diferentes frutos, como es el café. El color en el fruto del café es la principal característica en su maduración, al pasar de un color verde a un rojo cereza. Por tanto, la cosecha del café cereza, se realiza cuando éste ha alcanzado las características deseadas de color y textura, es decir, al final de la madurez fisiológica del fruto (antes de la senescencia), proceso durante el cual se tienen una serie de transformaciones físicas, bioquímicas y fisiológicas, determinantes de la calidad y vida en poscosecha (Marín *et al.*, 2003b).

La cosecha del café se realiza generalmente de manera manual y se paga al colector por los kilogramos de fruto cosechado. Esto ocasiona que el colector no ponga suficiente cuidado en seleccionar únicamente frutos maduros (Winston *et al.*, 2005). Además, de manera general, no hay una consecuencia por la cantidad de granos inmaduros, pintones, sobremaduros, secos y hojas que lleve el grano recolectado por una persona.

Se sabe que un grano de café cosechado en su etapa de madurez fisiológica puede rendir un grano de café oro o verde de excelente calidad física, además de que la bebida con él preparada exhibirá los mejores atributos que la variedad, el suelo y el ambiente producen (Batista y

Chalfoun, 2014). La presencia de granos inmaduros y secos en el café cosechado demerita la calidad física del grano y sensorial en la bebida, entre mayor sea la cantidad de estos tipos de granos mayor será el daño causado. Por lo anterior, es importante disponer de un mecanismo para remover los frutos inmaduros y secos del grano que se va a procesar (Marín *et al.*, 2003b; Sandoval *et al.*, 2005; Farah *et al.*, 2006).

En éste trabajo de investigación se tiene la hipótesis de que es posible diseñar y construir, mediante el empleo de sensores ópticos, un prototipo de seleccionadora por color para frutos de café, que separe al menos el 50 % del grano inmaduro y seco presente en las muestras procesadas. El objetivo fue diseñar y construir una seleccionadora por color para café cereza, aplicando la tecnología usada por los sensores ópticos, para eliminar los frutos indeseables, antes del proceso de despulpado.

La investigación se inició con la toma de datos sobre las siguientes propiedades físicas del fruto del café: densidad aparente, ángulo de reposo, la masa de los granos de café cereza, dimensiones máximas (largo y ancho), color (R, G y B). Para cada característica estudiada se realizó un análisis de varianza y se corrió la prueba de Tukey con un nivel de confianza del 95 % para separar medias por estado de maduración. A las variables de dimensión (de las tres variedades y estados de maduración) y color (por estado de maduración) de la epidermis del fruto se les determinó intervalos de confianza con un nivel de confianza del 95 %. Con base al análisis de las características físicas del café cereza, se procedió al diseño de un prototipo físico de la maquina seleccionadora usando el software AutoCAD. Los diseños en AutoCAD se convirtieron a formato STL (Standard Tessellation Language) para ser impresos en una maquina 3D. La tolva y el chasis de la estructura fueron fabricados en acero inoxidable. Las piezas fueron ensambladas y se procedió a la elaboración del código (algoritmo) para interpretar las lecturas del sensor óptico.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1.Taxonomía

El género *Coffea* pertenece a la familia Rubiaceae, este género comprende aproximadamente 70 especies. Las dos principales especies de café cultivadas a nivel mundial son *Coffea arabica* y *Coffea canephora* var. *Robusta*. Las especies que se cultivan en menor escala son *Coffea liberica* y *Coffea excelsa*; las cuales están distribuidas principalmente en África Occidental y Asia, y representan el 1-2% de la producción mundial (Wintgens, 2012).

2.2.Origen

El centro de origen de *C. arabica* son las tierras altas, de más de 1000 m.s.n.m., de Etiopía y Sudán. En los años 575 y 890, los persas y los árabes lo llevaron a Arabia y Yemen, en tanto que los nativos africanos lo extendieron a Mozambique y Madagascar. De aquí los holandeses y los portugueses, entre los años 1600 y 1700, lo trasladaron a Ceylán, posteriormente a Java y a la India, así como a otras regiones de Asia y África (Alvarado y Rojas, 2007). Por otra parte, los orígenes de *C. canephora* son ampliamente dispersos en el África tropical en altitudes por debajo de 100 m.s.n.m. (Wintgens, 2012).

En México, el cultivo del café se inició en la Hacienda “La Guadalupe”, en Amatlán de los Reyes, Veracruz, después de diversos intentos de plantaciones que sucedieron a finales del siglo XVIII y principios del XIX. Se dice que el café introducido fue a través de semillas obtenidas en la Habana, Cuba (Gutiérrez, 2016).

2.3.El Café en México

El café mexicano es reconocido en el mundo por su calidad y se encuentra entre los mejores a nivel internacional. Productores y catadores de los Estados de Chiapas, Oaxaca y Veracruz cuentan con la Certificación “Q” grader de la Specialty Coffee Association of America (SCAA), que les brinda oportunidades en los crecientes mercados nacionales e internacionales (SAGARPA, 2014).

Del total de la producción en México en 2016 el 75.9 % (2,354 miles de sacos de 60 kg) se destinó para consumo nacional (OIC, 2016b). El consumo per cápita en México fue de 1.7 kg al año (SAGARPA, 2015).

La producción de café en el 2014 fue de 3,600 miles de sacos de 60 kg de café verde, esto posiciona a México en el 9° lugar en la producción mundial, asimismo ocupa el 2° lugar en producción de café orgánico y es uno de los principales productores de café gourmet (SAGARPA, 2015).

El café es el 7° cultivo con mayor superficie cultivada en México. Los principales estados productores son: Chiapas aporta el 37.3 %, Veracruz con el 26.9 %, Puebla el 16.7 % y Oaxaca con el 8 %, los estados restantes suman el 11.1 % de la producción nacional (SIAP, 2015).

México en el 2016 exportó el 19.3 % de su producción nacional, lo que lo ubica en el 8° lugar como exportador de café a nivel mundial, con la cantidad de 599 miles de sacos de 60 kg de café verde (OIC, 2016a).

2.4.Fenología del fruto

2.4.1. Floración

La floración comienza durante el segundo o tercer año de vida de la planta del café. Se considera como primera floración, el momento en que por lo menos el 50% de las plantas hayan florecido. La fase reproductiva continúa luego con el desarrollo del fruto y culmina con la maduración (Arcila *et al.*, 2007).

Una inflorescencia normal consiste en cuatro yemas florales en un entrenudo, cada yema produce un glomérulo o generalmente conocido como cima, racimo floral o anthela. En la mayoría de los casos, el glomérulo consta de cuatro flores. Para Arabica, el número de flores por inflorescencia puede variar de dos a nueve. Tomando como base que un glomérulo tenga cuatro flores y que en la base de cada hoja haya de cuatro a 12 glomérulos por nudo, estos finalmente generaran de 16-48 flores (Wintgens, 2012).



Figura 1. Yemas florales en las hojas axilares.



Figura 2. Inflorescencias del café (glomérulos) en la antesis.

La yema que produce un glomérulo se demora aproximadamente 12 semanas para dar origen a los botones florales (Arcila *et al.*, 2007).

2.4.2. Crecimiento y desarrollo del fruto

El ovario, que contiene los dos óvulos fecundados, comienza a desarrollarse inmediatamente después de la fecundación. Del segundo al tercer mes de desarrollo, el ovario aumenta de tamaño más rápidamente y el tegumento ocupa casi todo el espacio de cada óvulo. El saco embrionario crece y se llena con endospermo.



Figura 3. Frutos de café inmaduros variedad Oro Azteca.

Entre el sexto y el octavo mes después de la fecundación, el fruto alcanza su madurez. El tegumento es ahora sólo representado por la piel plateada. Durante el último mes de maduración, la fruta completa su crecimiento y, dependiendo de la variedad, adquiere un color rojo o amarillo. Cada fruto contiene dos "granos" revestidos en mucílago (Wintgens, 2012).

2.4.3. Cambios químicos en el grano

Físicamente el fruto de café maduro o cereza es una drupa elipsoidal constituida por el exocarpio o epidermis; el mesocarpio o mucilago, el endocarpio o pergamino, la película plateada (tegumento seminal) y el endospermo o semilla (Duicela *et al.*, 2004).

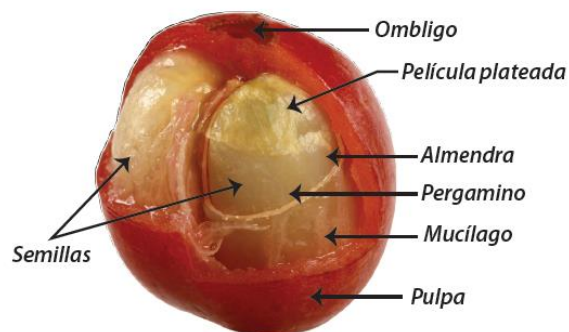


Figura 4. Composición de un fruto de café (Ramos *et al.*, 2010).

El tiempo que se tarda desde la floración hasta la maduración de los frutos de café varía según la variedad, las condiciones climáticas, las prácticas agrícolas y varios otros factores. Como regla general (Wintgens, 2012):

C. arabica tarda 6-9 meses.

C. canephora toma de 9-11 meses.

C. excelsa toma 11-12 meses.

C. liberica toma 12-14 meses.

La maduración es más lenta en las zonas altas ya que la temperatura del aire disminuye en 1 ° C por cada 180 m de altitud (Wintgens, 2012).

Durante la maduración existen cambios notables a través del tiempo en el color de la pulpa, debido al aumento de las antocianinas; aumento de los sólidos solubles, la acidez titulable; disminución del pH; disminución de la rigidez estructural de la pulpa a compresión y disminución de la fuerza para desprender los frutos a tracción pura (Marín *et al.*, 2003a). Estos cambios físico químicos permiten el beneficio adecuado de los frutos y obtener una mejor calidad del café pergamino seco.

Según Smrke *et al.* (2015) la separación entre los diferentes grados de madurez (inmaduro, medio-maduro y maduro) se puede atribuir a un aumento de 3-CQA (ácido 3-cafeoilquinico) y una disminución de 5 CQA (ácido 5-cafeoilquinico) y di-CQAs (ácido di-cafeoilquinico). De acuerdo con Toci y Farah (2008), 2-metilpiridina y acetato de 2-furilmetanol mostraron ser potenciales marcadores de granos inmaduros defectuosos.

2.5.Cosecha

Los frutos de café no maduran todos a un mismo tiempo. Esto se debe a que el arbusto florece varias veces durante el año. Por tanto, es necesario hacer una selección juiciosa y hábil de los granos que han madurado en un determinado tiempo.



Figura 5. Frutos de café en diferente estado de maduración.

La cosecha del café consiste en la acción de recolectar los frutos maduros o cerezas. En la época de cosecha se pueden realizar de una a cinco, o más, según el estado de madurez de los frutos. Los frutos inmaduros no deben cosecharse; ya que dificultan el proceso de beneficio, incrementan el número de granos partidos y causan un deterioro de la bebida (Duicela *et al.*, 2004).

La cosecha de los frutos maduros se realiza manualmente desprendiendo los frutos de color rojo brillante (maduros) en forma individual, evitando la destrucción de las yemas. Nunca desprender todos los granos de la rama con un solo movimiento de la mano porque de esa manera se destruye gran parte de las yemas florales y evitar la defoliación de los cafetos que causan un envejecimiento prematuro de las plantaciones (IICA, 2010).

Una vez cosechado el grano debe evitarse exponerlo al sol; así como el amontonamiento por periodos prolongados; ya que la exposición a altas temperaturas causa una sobre fermentación, mancha el pergamino y deteriora la calidad de la bebida (Duicela *et al.*, 2004).

La cosecha del café es la actividad que requiere la mayor cantidad de mano de obra. La cosecha mecanizada ha sido considerada como una alternativa para aumentar la eficiencia, como lo reportan Barbosa *et al.*, (2005) que observaron un aumento del 251 % de la eficiencia operativa de cosechadoras portátiles con respecto a la cosecha manual.

2.5.1. Grado de madurez y defectos

Según Marín *et al.* (2003b) cuando los frutos se encuentran alrededor de los 210 (pintón), 217 (maduro) y 224 (sobremaduro) días después de la floración (ddf), el café beneficiado presenta

mejor calidad física, mostrando mayor porcentaje de café pergamino y menor cantidad de frutos sin despulpar, almendras peladas, defectos y pulpa, debido a que en éstos se ha desarrollado plenamente el mucílago lo que facilita el desprendimiento de la pulpa.

Cuando el café oro proviene de grano inmaduro, éste tiene un color ligeramente verde o gris claro. La película plateada que envuelve al grano frecuentemente no se desprende en el trillado. Este defecto se encuentra cuando el café ha sido cosechado antes de su estado de madurez (NTE INEN 0285:06).

2.5.2. Cosecha mecanizada

Dentro de los costos de producción del café cereza, la mano de obra invertida en la cosecha representa más del 25 %, reportándose datos de costos del proceso de cosecha de hasta 70 % del costo de producción total (Monroe and Wang, 1968). Por tanto, lo que se pretende al mecanizar la cosecha es reducir costos e incrementar la productividad del trabajo de los cosechadores.

Los métodos de cosecha mecanizados reportados en diferentes investigaciones, son los siguientes:

- Los vibradores portátiles del tallo (VPT's) son empleados en las parcelas con mayor producción (más de 800 g·cafeto⁻¹) y concentración de frutos maduros por planta (más del 60 %). La recolección debe realizarse en equipos constituidos por dos VPT's y cuatro personas, dos para operar los vibradores y dos para manejar las mallas de captura de los frutos desprendidos. El rendimiento efectivo, incluyendo el tiempo para recoger el café con mallas, varía en el rango 53 a 67 kg·h⁻¹·operario⁻¹. A pesar de esto, la eficiencia global de recolección (rendimiento efectivo/rendimiento potencial) es muy baja (0.13) y la cantidad de frutos inmaduros en la cosecha varía de 8.6 - 13.1 % (Oliveros *et al.*, 2005a).



Figura 6. Vibrador portátil de tallo Cifarelli SC700®, vista general del equipo y acople de la lanza al tallo del cafeto (Oliveros *et al.*, 2005a).

- La herramienta IMFRA-3DCD es operada con baterías, accionada por un motor de 84.7 W, con un peso total de 8 kg; los frutos de café se desprenden al ser golpeados por dos impactadores, fabricados en teflón, que giran a 1,100 rpm; el rendimiento neto obtenido fue $33.7 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$, tres veces el observado en cosecha manual y la recolección es de 4.3 % de frutos inmaduros en la masa. Este mecanismo de cosecha fue probado en Cauca, Colombia.



Figura 7. Actuador IMFRA-3DC, diseñado para la cosecha manual de café (Álvarez *et al.*, 2013).

- Cosechadora mecanizada de café en Colombia. Se colecta café con el equipo en arbustos sembrados a 2.0 m x 0.7 m, un tallo por sitio, en terreno plano. Rendimiento: $129.5 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$, desprendiendo el 71.7 % de los frutos maduros, con 52.3 % de frutos inmaduros en la masa cosechada. Se utilizan en terrenos planos y en grandes plantaciones para reducir costos y hacer la cosecha más corta. Esta máquina utiliza un sistema de vibración de las ramas que hace que los granos vayan cayendo en una tolva de almacenamiento.



Figura 8. Prototipo CAVAUTO para cosechar café aplicando vibración al follaje, construido en CENACAFE (Oliveros *et al.*, 2005b).

Los avances obtenidos en la mecanización de la cosecha del café, sólo han podido ser aplicados por grandes productores en condiciones particulares de clima, orografía y con condiciones de infraestructura de regadío, que posibilitan aplicar técnicas que hacen posible la obtención de café cereza con determinada uniformidad en la maduración (Kuhn, 2004).

Después de la cosecha, los frutos recolectados de café son transportados al beneficio, para ser procesados (beneficiados) por uno de los tres métodos distintos para obtener granos de café pergamino: los cafés naturales son por vía seca, los cafés lavados son procesadas por vía húmeda y recientemente se ha introducido un tercero, un proceso intermedio denominado semi-seco (Brando, 2012).

2.5.3. Madurez y calidad en taza

La calidad del café se evalúa con base en sus características físicas; tales como apariencia, color y olor del café en pergamino, almendra y tostado; así como por medio de sus características organolépticas, como son aroma, acidez, amargor, cuerpo y sabor de la bebida (Sandoval *et al.*, 2005)

La calidad de la bebida es muy afectada por la composición de la masa recolectada, especialmente cuando el porcentaje de frutos inmaduros es superior al 2.5 % en peso (Barboza, 1996; Puerta, 2000). También, cosechar los frutos secos en el árbol perjudica la calidad de la taza porque a medida que aumentan los frutos secos en el beneficio, aumenta la cantidad de almendras con defectos.

Según Marín *et al.* (2003b), en términos de calidad de la bebida, los perfiles sensoriales para los estados pintón, maduro y sobremaduro son similares y característicos de buena calidad en taza, por tanto las cerezas óptimas para la recolección son las pintonas (210 ddf), las maduras (217 ddf) y las sobremaduras (224 ddf), debido a que presentan las mejores calificaciones de intensidad del aroma del café molido, aroma de la bebida, acidez, amargo e impresión global. Un cambio físico evidente entre los diversos grados de madurez es el color, por lo que se puede usar la colorimetría para determinar el momento exacto de cosecha.

2.6.Colorimetría

El objetivo de la colorimetría es caracterizar numéricamente el color de un objeto, bien aislado (colores no relacionados) o formando parte de una escena (colores relacionados), por tanto, los números asignados a un color deben describir el color percibido. La percepción del color de un objeto no depende sólo de la luz que nos llega al ojo procedente del propio objeto, sino que, en general, depende de la luz que percibimos del objeto y de su entorno (Artigas *et al.*, 2002). A pesar de que el color sea una percepción subjetiva, se ha estandarizado la medición del color a través de diferentes representaciones, como RGB (por sus siglas en inglés Red, Green y Blue), YUV (Luminancia y crominancia), CMYK (Cian, Magenta, Yellow, Black) y CIE L*h*C* (Luminosidad, Hue y Croma).

Una de las representaciones comúnmente utilizadas es la RGB, con ella se recrea la medición fisiológica humana del color, imitando la percepción del componente rojo, verde y azul, de las células llamadas conos en el ojo humano (González y Woods, 2008). Los colores primarios rojo, verde y azul se utilizan mezclando de forma aditiva para representar una gama de colores diferentes, los valores de cada color están dentro del rango [0,1], y para la resolución típica de 8 bits por canal de color los valores se multiplican por $2^8-1=255$ y se cuantifican los valores enteros. En la Figura 9, la línea diagonal punteada representa la escala de grises, que se extiende desde el blanco (1,1,1), hasta el negro (0,0,0) (Beyerer *et al.*, 2016).

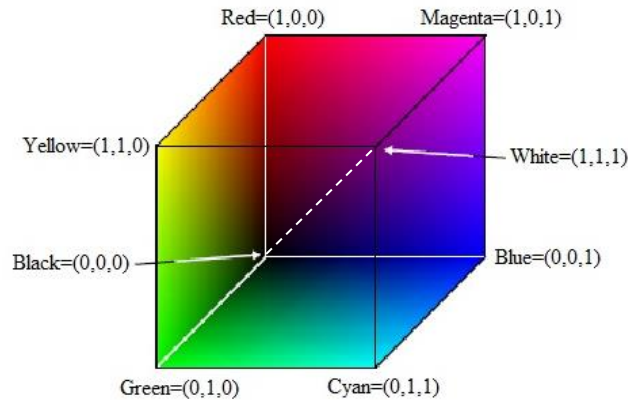


Figura 9. Espacio de color RGB, como un cubo.

La visión artificial es el estudio de los principios de la percepción visual, y los intentos de proporcionar un sistema cámara-computadora con las capacidades visuales de los seres humanos. En el sistema ojo-cerebro el ojo humano recibe la luz de un objeto y la convierte en señales eléctricas. El ojo humano no interpreta estas señales, ni realiza decisiones basadas en la naturaleza de la imagen. La interpretación de la imagen y la toma de decisiones son hechas por el cerebro. Del mismo modo, un sistema de visión artificial tiene un ojo, que puede ser una cámara o un sensor. La interpretación de la imagen y toma de decisión son hechas por un software y hardware apropiados.

Los sistemas de visión artificial y sistemas de inspección de infrarrojo cercano, se han introducido en mecanismos para la inspección de frutas y hortalizas. La clasificación de los productos agrícolas es realizada en base a la apariencia, textura, forma y tamaño (Amer Eissa y Abdel Khalic, 2012).

2.7.Sensores de color

Los sensores de color tienen aplicaciones comunes en el ámbito de ajuste de color en impresiones, sistemas de control con base en el color de los objetos, juguetes y video juegos, entre otros. Estos sensores tienen dos vertientes básicas: una basada en el uso de filtros de color y la otra en la irradiación de luz y cómo esta se refleja en el objeto a detectar. Ambas manejan componentes básicos de color; rojo, verde y azul, conocido como componente RGB o espacio de color RGB.

Sensores de color basados en filtros. Este tipo de sensores proporciona una salida en voltaje directamente proporcional a la irradiación, al ser lineales por completo. Consiste en un grupo de tres tipos de fotodiodos, cada uno con filtros de color: rojo, verde y azul. La salida de cada canal corresponde a la irradiación en cada uno de los fotodiodos. En general, incluyen un pin adicional que permite ajustar la ganancia en los amplificadores para cambiar la sensibilidad del sensor (Corona *et al.*, 2014).

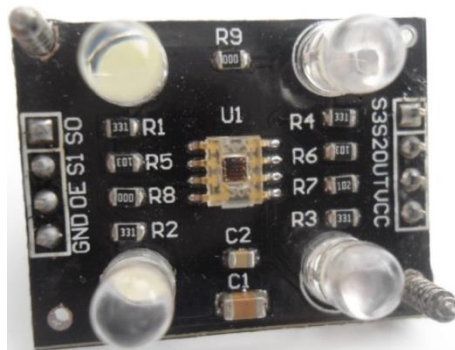


Figura 10. Sensor de color basado en filtros.

Un ejemplo de los sensores de color basados en filtros es el convertidor de luz a frecuencia TCS230, éste puede filtrar los datos RGB de la luz fuente y convertirlos a una onda cuadrada con frecuencia directamente proporcional a la intensidad de luz irradiada. Las entradas y salidas digitales permiten una interfaz directa con un microcontrolador (Editronikx, 2014).

El convertidor de luz a frecuencia lee una matriz 8 x 8 fotodiodos, 16 fotodiodos tienen filtros azules, 16 fotodiodos tienen filtros verdes, 16 fotodiodos tienen filtros rojos y 16 fotodiodos son claros sin filtros. Los cuatro tipos de fotodiodos están distribuidos por toda la matriz para minimizar el efecto de la no-uniformidad. La salida de frecuencia es a través de los pines S0 y S1 (TAOS, 2003).

Sensor reflectivo. El sensor reflectivo, trabaja a distancias pequeñas, de 3 a 5 mm, consta de tres pines (uno de 5 V, uno de tierra (GND) y uno de señal (OUT)). Suelen integrar el emisor (fotodiodo) y el receptor (fototransistor) en disposición paralelo, de manera que el haz de luz infrarroja emitida al chocar en una superficie podrá producir una reflexión o no, dependiendo del color (blanco o negro) de la misma, que será captada por el receptor (Serna *et al.*, 2010).

Los sensores generalmente envían una señal a un procesador, éste interpreta la señal y envía otra a un actuador, tal como un motor a pasos.

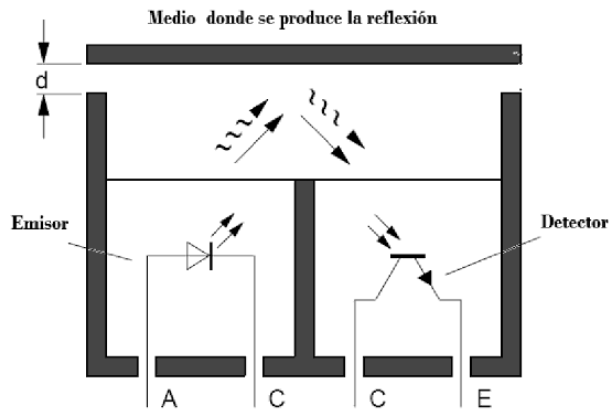


Figura 11. Infrarrojo por reflexión (Serna *et al.*, 2010).

2.8.Motor a pasos

Los motores a pasos rotan un número específico de grados en respuesta a pulsos de control. El número de grados en cada paso depende el motor, éste puede ser desde 1 a 30 grados o más. Existen dos tipos de motores a pasos comúnmente usados con Arduino, bipolar (con cuatro cables conectados a dos bobinas) y unipolar (cinco o seis cables conectados a dos bobinas) (Margolis, 2011).

El motor a pasos bipolar, al energizar las bobinas, se mueve primero en una dirección y luego invirtiéndola cuando el eje es girado. Un motor a pasos bipolar siempre será más fuerte que uno unipolar del mismo tamaño. En un motor unipolar, los cables adicionales están conectados internamente al centro de las bobinas (Roberts, 2011).

2.9.Servomotor de rotación estándar

Éste tipo de servomotores estándar se caracterizan por controlar con precisión el movimiento físico, en rangos entre 60° y 270° (típicamente 180°) (Roberts, 2011). Los servos responden a los cambios en la duración del pulso (PWM por sus siglas en inglés-Pulse Width Modulation). Para posicionar el servomotor, hay que aplicar una señal periódica de 50Hz (20 ms de período), donde la anchura del pulso determina la posición del servo. Un pulso corto de 1 ms o menos hace que el servo gire a un extremo y si el pulso es de 2 ms o más se sitúa en el opuesto.

Los pulsos que van entre estos valores harán girar el servo a una posición proporcional a la anchura del pulso (Margolis, 2011).

2.10. Arduino

Con Arduino se pueden crear algoritmos para controlar la luz, el sonido, el tacto y el movimiento. Arduino ha sido utilizado para crear una amplia variedad de cosas, incluyendo instrumentos musicales, robots, esculturas de luz, juegos, muebles interactivos e incluso la ropa interactiva (Margolis, 2011).

La plataforma Arduino se basa en microcontroladores Atmel ATmega168 o ATmega328 (AREXX, 2012). El sistema ha sido equipado con un compilador para un lenguaje de programación estandarizado y un sistema de arranque. El lenguaje de programación se basa en C++, el que sigue un conjunto de reglas que rigen la sintaxis, la estructura y le dicen a la tarjeta de interfaz qué hacer. Como requisito de la biblioteca Arduino todos los códigos a generar deben tener al menos una función de `setup ()` y una de `loop ()`, cada una contienen declaraciones que realizan acciones específicas realizadas en orden de arriba a abajo (Evans, 2011; AREXX, 2012; Bayle, 2013).



Figura 12. Vista frontal y posterior de Arduino UNO.

El Arduino UNO es una tarjeta de desarrollo basada en el microcontrolador ATmega328. Tiene 14 entradas y salidas digitales, de las cuales 6 pueden ser utilizadas como PWM, además tiene 6 entradas analógicas, corre con un resonador a 16 Mhz, tiene conexión USB, un Jack para alimentación externa, un conector ICSP y un botón de reset (HEPTRO, 2016).

2.11. Tarjeta de circuito impreso (PCB)

Una tarjeta de circuito impreso (PCB, por sus siglas en inglés-Printed Circuit Board), de una o varias capas, es un dispositivo compuesto por pistas de cobre que están grabadas sobre varias capas delgadas de fibra de vidrio, las cuales están laminadas formando una sola tarjeta (Wakerly, 2001). Las PCBs se usan para conectar eléctricamente, a través de los caminos conductores, diferentes componentes y una de sus ventajas es que tiene conexiones fijas, evitando que algún componente se desconecte (Evans, 2011).

Las tarjetas de circuito impreso en conjunto con las plataformas Arduino son de utilidad en la automatización de procesos y en la innovación y desarrollo de productos.

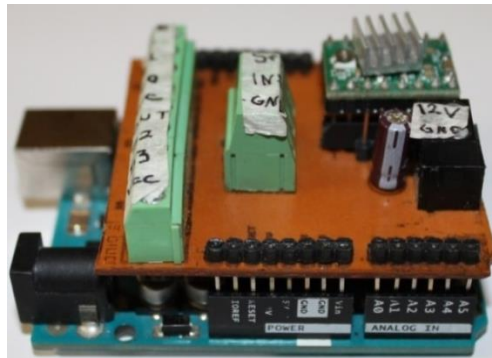


Figura 13. Montaje de una PCB sobre Arduino UNO.

2.12. Innovación y desarrollo

Una innovación es la implementación de un nuevo o significativamente mejorado producto (bien o servicio), proceso, método de comercialización u organizativo en las prácticas comerciales, organización del lugar de trabajo o relaciones exteriores. Las mejoras significativas de productos existentes pueden ser en cambios en los materiales, componentes u otras características que hacen que estos productos tengan un mejor rendimiento (OECD, 2005).

La innovación representa una alternativa de prosperidad, tanto individual como colectiva, producto de la investigación y el desarrollo experimental (I+D) (Ulate, 2010).

La I+D comprenden el trabajo creativo llevado a cabo de forma sistemática para incrementar los conocimientos, y el uso de esos conocimientos para crear nuevas aplicaciones (OCDE, 2003). El desarrollo experimental consiste en trabajos sistemáticos que aprovechan los conocimientos

existentes obtenidos de la investigación y/o la experiencia práctica, y está dirigido a la producción de nuevos materiales, productos o dispositivos, así como a la puesta en marcha de novedosos procesos, sistemas y servicios, o a la mejora sustancial de los ya existentes (Herrera, 2011).

La ciencia, la tecnología y la innovación se han convertido en un triple factor esencial para el desarrollo de las sociedades (Herrera, 2011). El éxito en el camino de desarrollo de los países depende en buena medida de la capacidad de gestionar el cambio tecnológico y aplicarlo a la producción, explotación racional de recursos naturales, salud, alimentación, educación y otros requerimientos sociales (OEI, 2012).

En México se ha vivido una economía basada en la explotación de los recursos naturales, donde el factor más importante para una actividad competitiva ha sido el bajo costo de la mano de obra intensiva, y se encuentra ante el compromiso de transitar hacia una economía que demanda un soporte en una sociedad del conocimiento, en la que el mayor impacto para la competitividad es el valor agregado del producto o servicio derivado de una innovación (FCCyT, 2008).

Algunos países han aprovechado la oportunidad de implementar nuevas políticas de innovación y desarrollo, materializados en procesos de diseño o rediseño en ingeniería. No obstante, estos esfuerzos aún son considerados inadecuados por algunos, especialmente en lo relacionado a su capacidad de vincular la ciencia y la tecnología a la inclusión social y a la sustentabilidad del ambiente (Arond *et al.*, 2012).

2.13. Proceso del diseño en ingeniería

El diseño es un procedimiento que se utiliza en el desarrollo de la solución de un problema. El proceso del diseño es el resultado de un tratamiento organizado y sistemático de un problema hasta lograr la mejor y más conveniente de las soluciones, es decir, obtener un producto funcional, seguro, confiable, competitivo, útil, que pueda fabricarse y comercializarse (Villeta, 2000).

El diseño es un proceso innovador y altamente iterativo. También es un proceso de toma de decisiones. Algunas veces las decisiones se toman de manera tentativa, por lo cual es conveniente hacer ajustes a medida que se obtengan más datos (Budynas y Nisbett, 2008).

De acuerdo con Mott (2006), es importante identificar las necesidades y las expectativas del cliente, antes de comenzar el diseño de un aparato mecánico. Se deben producir definiciones claras y completas de las funciones, los requisitos de diseño y los criterios de evaluación, que se refieren a las especificaciones para el diseño:

- Las funciones indican lo que debe hacer el dispositivo, mediante afirmaciones generales no cuantitativas.
- Los parámetros de diseño son declaraciones detalladas, cuantitativas, de los valores esperados de funcionamiento, condiciones ambientales en las que debe trabajar el dispositivo, las limitaciones de espacio, peso o materiales y componentes disponibles que pueden usarse.
- Los criterios de evaluación son declaraciones, características cualitativas deseables en un diseño, que ayudan a que el diseñador decida que opción de diseño es la óptima; es decir, el diseño que maximice las ventajas y minimice las desventajas.

La mayor parte de los diseños pasan por un ciclo de actividades como se muestra en la Figura 14. Comúnmente el diseñador debe proponer más de un concepto de diseño posible como alternativa, siendo éste el momento donde se plantea la creatividad para producir diseños novedosos. Para cada diseño debe hacerse una evaluación crítica de las propiedades deseables, las ventajas y desventajas, para decidir cuál concepto de diseño es el óptimo y, en consecuencia, viable para producir.

En el proceso de diseño se llega a la etapa de evaluación, realizando los planos definitivos, cálculos, especificaciones y detalles que le darán la forma final al proyecto. Los operarios y técnicos deben recibir en los planos y dibujos una información detallada y clara, con precisión, para facilitar su construcción (Villeta, 2000).

Una manera de evaluar cada alternativa propuesta es obteniendo el diseño en físico a través de una impresora 3D. La impresora 3D construye objetos tridimensionales a partir de modelos digitales. La impresora 3D crea un objeto mediante el depósito de material capa por capa. A éste proceso se le llama “manufactura aditiva” (Jarauta y Medina, 2014).

Un producto se dice que es manufacturable cuando es realizable utilizando los componentes, equipos, materiales y tecnología disponibles en el momento. La manufacturabilidad en sí misma

es una cualidad que pretende dar una idea de la facilidad con que un producto ha sido pensado y desarrollado para obtener la mayor productividad posible, y que ello redunde en un mayor beneficio, visto de ambos lados: del productor y del consumidor (Villamil y García, 2003).

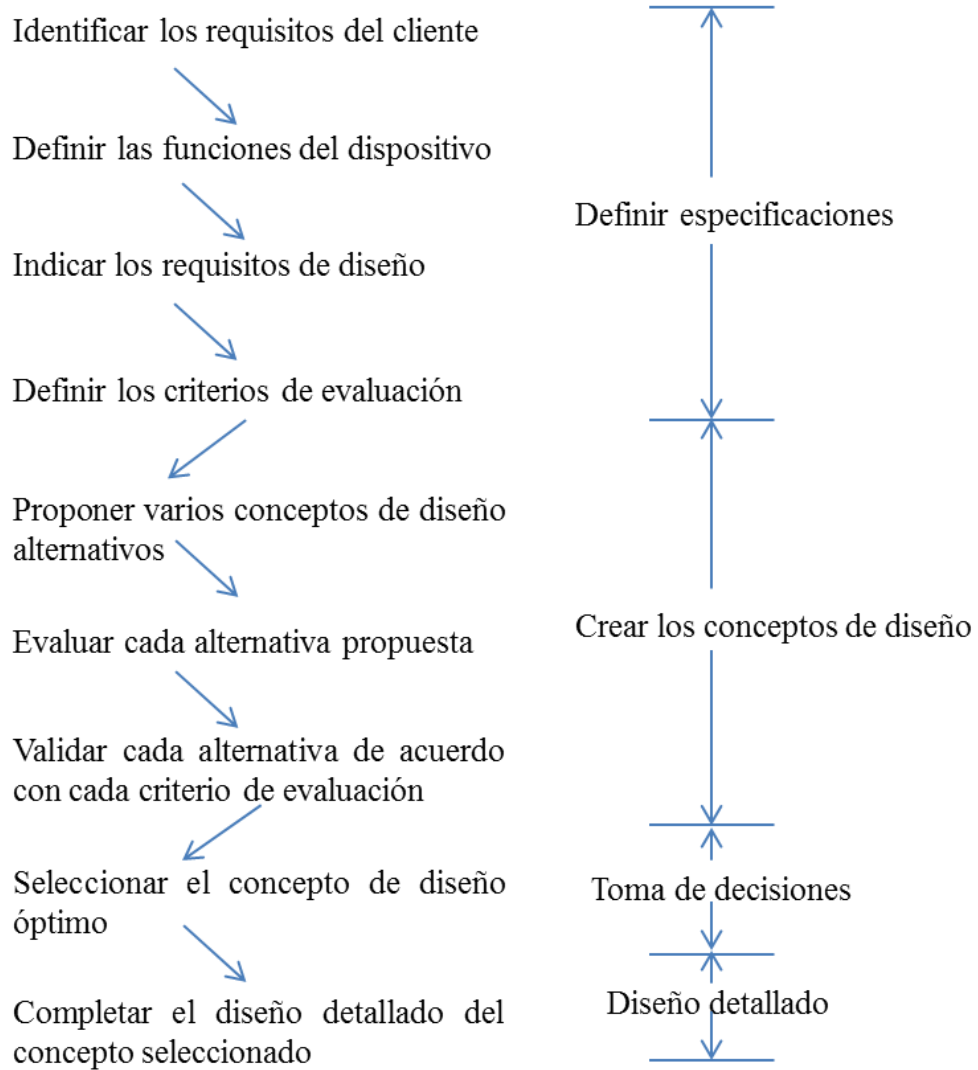


Figura 14. Pasos en el proceso de diseño (Mott, 2006).

3. JUSTIFICACIÓN

Debido a que las condiciones climáticas en las zonas cafetaleras son muy variadas, y que la planta de café tiene varias floraciones al año, los frutos de café presentan poca uniformidad de maduración en una misma rama, pudiendo encontrar frutos con distintos estados de desarrollo fisiológico en el café cosechado, que al someterlos al proceso de beneficio originan problemas como ruptura del grano, desprendimiento parcial o nulo de la pulpa; o la despulpadora puede llegar a detenerse por la congestión de frutos inmaduros y secos (Puerta, 2000).

La cosecha del café es en su mayoría manual y se paga por kilogramo de cereza cosechado, propiciando que se ponga poco cuidado en la selección de los frutos a cosechar en aras de obtener la mayor cantidad de café al final del día. El producto cosechado es entonces una mezcla de frutos inmaduros, pintones, maduros y secos. Esta heterogeneidad en la materia prima es el factor causante del deterioro de la calidad del café (Winston *et al.*, 2005), siendo más visible al obtener el café verde u oro, donde se pueden detectar granos negros, fermentados, agrios, con pulpa pegada, enteros, etc. (DESCO, 2013).

Puerta (2000) demostró que a contenidos superiores al 2.5% en peso de fruto inmaduro en la cosecha, ya sea procesada por desmucilaginado mecánico o por fermentación natural, se rechazan desde el 30% de las tazas por defectos sucio, fermento, *stinker* (sabor a podrido), tierra y sabores desagradables. Por lo anterior, es importante disponer de mecanismos para remover el grano inmaduro o seco del grano que se va a procesar.

4. HIPOTESIS

Es posible diseñar y construir, utilizando sensores ópticos, un prototipo de seleccionadora por color para frutos de café, que separe al menos el 50 % del grano inmaduro y seco presente en las muestras a procesar.

5. OBJETIVOS

5.1.Objetivo general

Diseñar y construir una seleccionadora por color para café cereza, que separe al menos el 50 % del grano inmaduro y seco presente en las muestras a procesar.

5.2.Objetivos particulares

- Definir las especificaciones del usuario y del producto.
- Proponer conceptos de diseño alternativo para la tolva de materia prima, el mecanismo de dosificación, el mecanismo lector del color y el mecanismo de separación de los frutos indeseables.
- Seleccionar el concepto de diseño óptimo y construir el prototipo seleccionado.
- Evaluar la fiabilidad de la máquina seleccionadora.

6. MATERIALES Y MÉTODOS

En el diseño de la seleccionadora por color para café cereza se siguieron los cuatro pasos para el diseño que describe Mott (2006), y para la construcción del prototipo de maquina seleccionadora por color para café cereza se utilizó el modelado en un taller y a través de impresoras 3D.

6.1. Proceso de diseño del prototipo de seleccionadora por color para café cereza

6.1.1. Definición de especificaciones

Especificaciones del usuario. Las necesidades y expectativas del cliente se formularon a partir de las funciones, los requisitos de diseño y los criterios de evaluación. Estos se determinaron con los miembros del equipo de trabajo.

Especificaciones del producto. Para su determinación se usaron muestras de 1.5 kg de café cereza de las variedades Colombia, Costa Rica y Oro azteca, con tres grados de madurez: inmaduros, pintones-maduros y secos; cosechadas en la parcela experimental del Campus Córdoba en diciembre de 2014. A cada muestra se le determinaron las características físicas: densidad aparente, ángulo de reposo, masa, dimensiones y color de la epidermis del fruto.



Figura 15. Estado de maduración: inmaduro (verde), pintón-maduro y seco en frutos de café.

Densidad aparente. En un recipiente de 1 L se llenó con cada muestra de café, con tres repeticiones cada una, y se obtuvo su masa (con una balanza electrónica VELABTM, Max=5000 g, d=100 mg). A partir del parámetro obtenido se calculó la densidad aparente, de acuerdo a la siguiente ecuación expresada en kilogramos por litro.

$$D. A. = \frac{kg \text{ de café}}{1 L} \quad (1)$$

Ángulo de reposo. Una muestra de café contenida en un recipiente de 1 L se vertió sobre una base con pendiente de 0°. Donde se formó un cono de granos, al cual se midió el radio (op) y la altura (ady), en tres repeticiones con un vernier (TRUPER[®], STAINLESS STEEL de 200 mm) (Figura 16). A partir de las medidas, se calculó el ángulo de reposo (α), de acuerdo a la ecuación 2 (Swokowski y Cole, 2011).

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{op}{ady} \right) \quad (2)$$

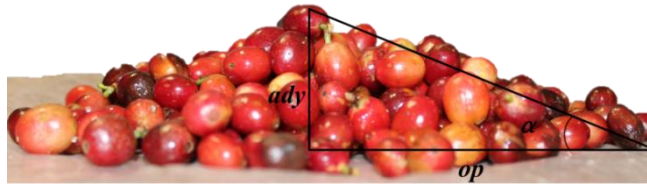


Figura 16. Cono formado por frutos secos, donde op =radio, ady =altura y α =ángulo de reposo.

Masa. Se tomaron al azar 50 granos de café cereza de cada muestra, y se obtuvo su masa (con una balanza electrónica VELAB[™], Max=5000 g, d=100 mg), en tres repeticiones.

Dimensiones. A 150 granos de café tomados al azar de cada variedad y grado de madurez, se les midió el largo y ancho utilizando un vernier (TRUPER[®], STAINLESS STEEL de 200 mm).

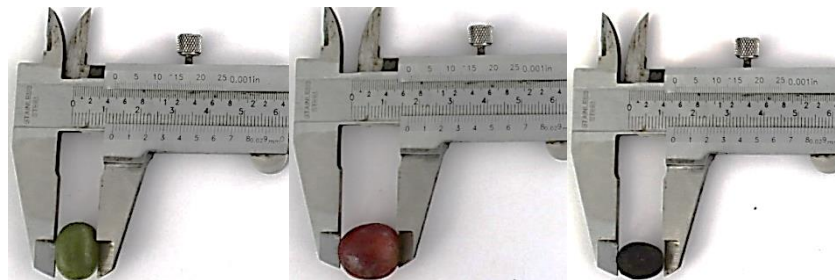


Figura 17. Medición de largo y ancho en frutos de café.

Color de la epidermis de fruto. A 50 granos de café tomados al azar de cada variedad y grado de madurez se les midió el color, tomando tres lecturas por fruto, usando un sensor de color basado en filtros, Modelo TCS230, obteniendo datos de RGB.

Análisis estadístico. Para cada característica física estudiada en los tres estados de maduración y variedades se realizó un análisis de varianza y se corrió la prueba de Tukey con un nivel de confianza del 95 % para separar medias por estado de maduración. A las variables de dimensión

(de las tres variedades y estados de maduración) y color (por estado de maduración) de la epidermis del fruto se les determinó intervalos de confianza con un nivel de confianza del 95 %.

6.1.2. Creación de los conceptos de diseño

En base a las especificaciones del usuario y del producto se crearon dos conceptos de diseño de la tolva de materia prima, el mecanismo de dosificación, el mecanismo lector del color y el mecanismo de separación de los frutos indeseables. Cada concepto se sometió a una validación con respecto a cada criterio de evaluación.

6.1.3. Toma de decisiones

Se seleccionó el concepto de diseño óptimo en base a la validación de cada diseño propuesto.

6.1.4. Diseño detallado

Se realizó el diseño detallado de la propuesta del prototipo de la seleccionadora por color para café cereza, en el programa AutoCAD, versión 2011.

Tolva de materia prima. En base al promedio de la densidad aparente y el ángulo de reposo de los granos de café cereza se determinaron las dimensiones y ángulo de caída de la tolva de alimentación.

Mecanismo de dosificación. De acuerdo a las dimensiones máximas (largo y ancho) de los frutos de café, se propuso un diseño para el sistema de dosificación.

Mecanismo lector del color. En base al análisis de las lecturas tomadas con el convertidor de luz a frecuencia TCS230, se plantearon condiciones correspondientes a cada estado de maduración.

Mecanismo de separación de los frutos indeseables. De acuerdo a las dimensiones máximas (largo y ancho) de los frutos de café, se diseñó el tubo de salida.

Software. Se usó Arduino, que consiste en un entorno de desarrollo integrado (IDE) que permite escribir y editar el código y convertir éste en instrucciones comprensibles por el hardware Arduino. El código se escribió en el lenguaje C++.

Para la selección de la placa y el puerto, primero se conectó la placa Arduino a la computadora mediante un cable USB tipo A/B. Posteriormente se seleccionó el modelo de la placa Arduino (Arduino/Genuino Uno) en el menú “Herramientas”. Por último, se seleccionó el puerto en el menú “Herramientas”, para Windows el puerto es COM. Para iniciar el código, primero se importaron las librerías a utilizar (Servo), seleccionando “Programa”-> “Incluir Librería”-> “Servo”.

El código fue generado con el objetivo de dar las siguientes indicaciones:

- Control del motor a pasos (17HS4401). El sensor reflectivo (QRD1114), al detectar un área de color blanco (infra=0), detiene al motor a pasos (500 ms) que mueve a la ruleta.
- Obtención de variables de color de la epidermis del fruto de café. El sensor convertidor de luz a frecuencia (TCS230) obtiene los datos de color de la epidermis del fruto de café.
- Clasificación del fruto de café. La información obtenida por el sensor convertidor de luz a frecuencia indica el giro al servomotor de rotación estándar (MG995) (0°-seco, 90°-pintón-maduro y 145°-inmaduro), el cual mueve al tubo de salida para frutos de café.

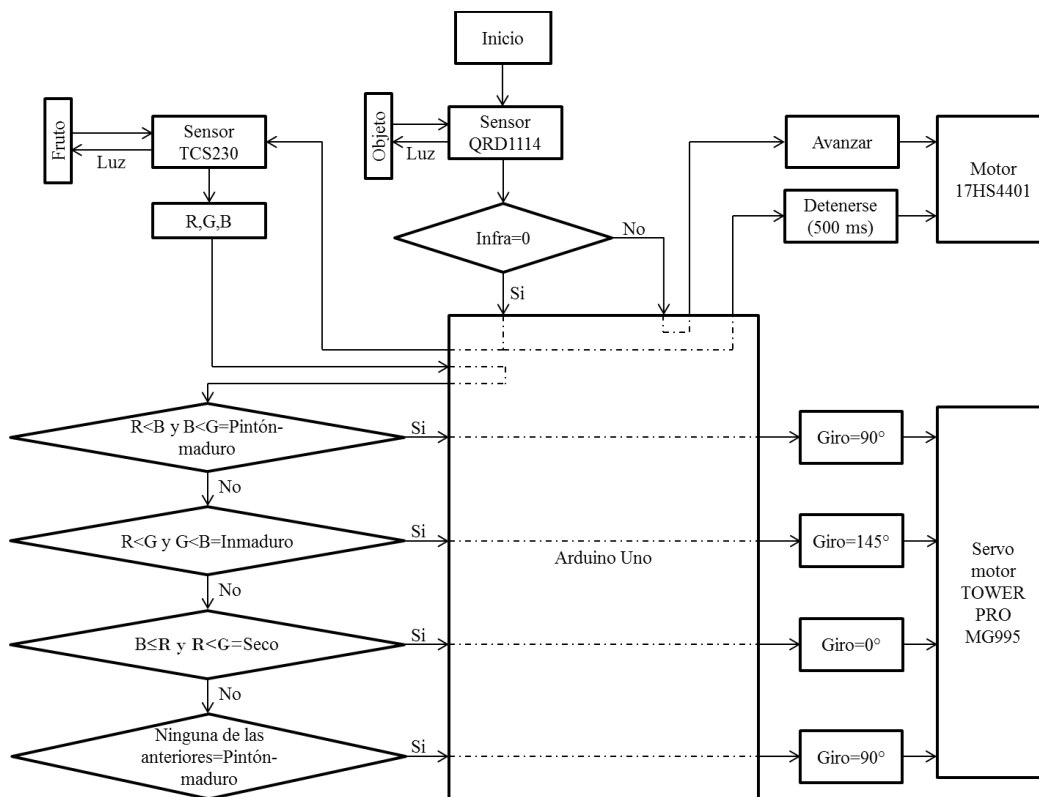


Figura 18. Diagrama de bloques del funcionamiento del sistema.

6.2. Proceso de impresión

Conversión a STL. El archivo del diseño final detallado, se convirtió a formato STL (“Standard Tessellation Language”), que es un formato de archivo creado por “3D Systems” para impresoras 3D.

Transferencia del archivo STL a la maquina AM (Additive manufacturing). Se transmitió el archivo STL al ordenador conectado a la impresora 3D ROBO Y PRUSA, donde se determinó el tamaño (escala 1:1) y orientación de la pieza.

Preparación de la máquina. Se preparó la maquina con un filamento PLA (ácido poli-láctico) negro de 1.75 mm, para la impresión.

Impresión. Se imprimió cada pieza diseñada en la impresora 3D.

Obtención del objeto. Se retiraron los objetos al finalizar su elaboración.

Post-procedimiento. Con ayuda de una lija de agua se perfeccionó la pieza. Cada objeto se sumergió en agua para facilitar el lijado de los bordes.

6.3. Construcción y ensamble

Los diseños finales de la máquina, la tolva de materia prima, mecanismo de dosificación y mecanismo de separación de los frutos indeseables fueron mandados a construir a un taller de construcción de maquinaria para el procesamiento de alimentos y a través de impresoras 3D. La tolva se construyó con acero inoxidable calibre 14, las cuatro paredes de la base de la tolva de acrílico y forradas de negro para disminuir el paso de luz al sistema y las piezas elaboradas por la impresora 3D de PLA.

Finalmente se ensamblaron las piezas fabricadas por la impresora 3D y las elaboradas en el taller.

6.4. Dispositivos

El prototipo de maquina seleccionadora por color de café cereza cuenta con los siguientes dispositivos: sensor reflectivo, sensor de color basado en filtros (convertidor de luz a frecuencia),

motor a pasos, servomotor de rotación estándar, Arduino UNO, PCB, cable USB para alimentar/programar la tarjeta y dos eliminadores.

6.4.1. Sensor reflectivo

Características del dispositivo (FAIRCHILD, 2013):

- Distancia de detección 3 a 5 mm
- Voltaje de funcionamiento de 5 V
- Consumo de corriente de 50 mA
- Cuatro pines (uno de 5 V, uno de tierra (GND), un colector y uno de señal (OUT))
- Montado junto con tres resistencias (220 Ω , 4.7 k Ω y 220 Ω) y un LED emisor de luz blanca, en una placa perforadora de 1.7 x 3.1 x 0.17 cm



Figura 19. Sensor reflexivo QRD1114.

6.4.2. Sensor convertidor de luz a frecuencia

Características del dispositivo (TAOS, 2003):

- Convertidor de alta resolución de intensidad luminosa a frecuencia
- Color programable y frecuencia de salida a escala completa
- Se comunica directamente con un microcontrolador
- Distancia de detección de 1 cm
- Voltaje de funcionamiento 2.7 V a 5.5 V
- Consumo de corriente de 30 mA

- Ocho pines (uno de 5 V, dos entradas de selección de tipos de fotodiodos (S2 y S3), dos selección de escala de frecuencia de salida (S0 y S1), uno de señal (OUT), uno de habilitación de salida (OE) y uno de tierra (GND))
- Error de no linealidad de 0.2 % a 50 kHz
- Coeficiente de temperatura estable de 200 ppm/°C
- Distancia de detección de 1 cm
- Dimensiones de 3.1 x 2.4 x 0.15 cm



Figura 20. Sensor convertidor de luz a frecuencia TCS230.

6.4.3. Motor a pasos

Características del dispositivo (MotionKing, 2010):

- Voltaje de funcionamiento de 12 V
- Consumo de corriente de 1.7 A
- Cuatro pines (azul (B-), verde (A-), rojo (A+) y amarillo (B+))
- Angulo de paso de 1.8°
- 200 pasos por revolución
- Torque de 4 kg/cm
- Resistencia de 1.5 Ω
- Dimensiones de 4 x 4.2 x 4 cm



Figura 21. Motor a pasos 17HS4401.

6.4.4. Servomotor de rotación estándar

Características del dispositivo (MPJA, 2017):

- Voltaje de funcionamiento de 4.8 a 7.2 V
- Consumo de corriente de 100 mA
- Tres pines (uno de alimentación (+5 V), uno de señal de control (PWM) y uno de tierra (GND))
- Angulo de rotación de 180°
- Torque de 8.5 kgf/cm (4.8 V) a 10 kgf/cm (6 V)
- Velocidad de giro de 0.2 s/60° (4.8 V) a 0.16 s/60° (6V)
- Temperatura de trabajo de 0 a 55°C
- Dimensiones de 40.7 x 19.7 x 42.9 cm



Figura 22. Servo motor TOWER PRO MG995.

6.4.5. Cable USB de tipo A/B

El cable USB de tipo A/B proporciona energía, comunicación y conectividad, para cargar el software en la placa Arduino desde una computadora o una fuente de alimentación de 5 V (Faludi, 2011).

Características del dispositivo:

- 1.5 m de longitud
- Color negro



Figura 23. Cable USB de tipo A/B.

6.4.6. Eliminadores

Características del eliminador para alimentar al Arduino:

- Voltaje de salida de 9 V a 1 A
- Voltaje de alimentación 100 a 240 V
- Conector plug de 0.55 x 0.21 cm
- Longitud del cable 70 cm
- Color negro



Figura 24. Eliminador DC-0910.

Características del eliminador para alimentar al motor a pasos:

- Voltaje de salida de 12 V a 2 A
- Voltaje de alimentación 100 a 240 V
- Longitud del cable 145 cm
- Color negro



Figura 25. Eliminador Sagemcom.

6.4.7. Tarjeta de circuito impreso (PCB)

Características del dispositivo:

- PCB de una cara
- Pistas de cobre
- 4 bancos
- Un capacitor
- Un driver A4998
- 13 pines (I/O)
- 2 voltajes de alimentación (5 V y 12 V)

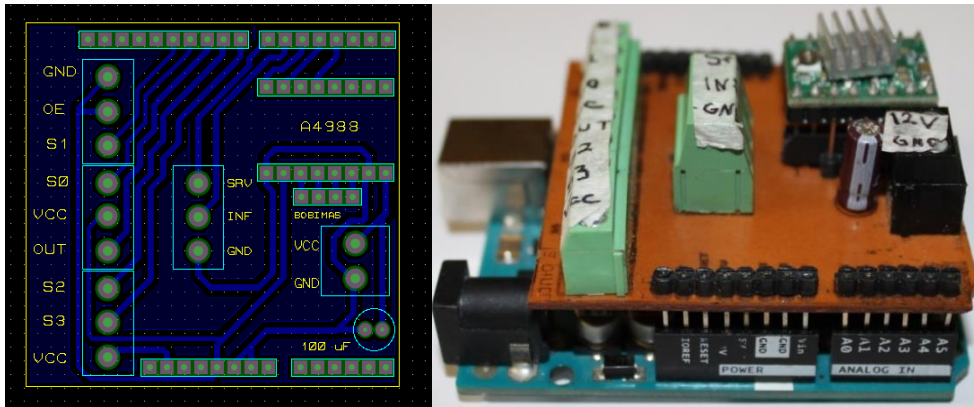


Figura 26. Diseño de la PCB y montaje sobre Arduino UNO.

6.4.8. Hardware Arduino UNO

Características del dispositivo:

- Microcontrolador ATmega328
- Voltaje de operación de 5V
- Voltaje de entrada recomendado de 7 a 12V
- Rango de voltaje de entrada de 6 a 20V
- Corriente por pin I/O de 40 mA
- 14 pines digitales I/O
- 6 pines de entrada analógicos (A0)
- Memoria Flash de 32KB (0.5 KB usados en el gestor de arranque)
- Memoria estática de acceso aleatorio (SRAM) de 2KB
- Memoria eléctricamente programable y borrable (EEPROM) de 1KB



Figura 27. Vista frontal de la tarjeta Arduino UNO.

6.5. Software Arduino

El entorno de desarrollo integrado (IDE) se descargó de forma gratuita desde la página web de Arduino, donde se encuentran varias versiones disponibles. Para el proyecto se descargó la versión para Windows.

El IDE de Arduino se divide en tres zonas. El área azul en la parte superior de la ventana cuenta con una barra de herramientas de botones que controlan el comportamiento del programa. El área blanca en el medio es donde puede introducir y modificar el código. La sección de negro en la parte inferior de la ventana es donde aparecen los mensajes de estado, y donde se debe buscar mensajes de error que pueden ayudar a depurar el código (Faludi, 2011).

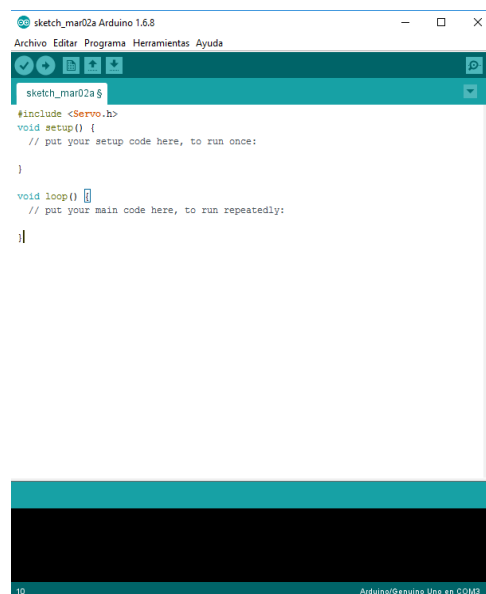


Figura 28. Software Arduino.

6.6. Evaluación de la fiabilidad del prototipo

Se obtuvo una muestra de 100 frutos de café, compuesta por el 80 % de pintones-maduros, el 12 % de inmaduros y el 8 % de secos (Figura 29), esta muestra fue clasificada por el prototipo 10 veces. La información obtenida, por cada evaluación, se representó en una matriz de confusión, donde cada columna representa una categoría resultado de la clasificación y cada fila hace referencia a una clase real.



Figura 29. Muestra de frutos de café evaluada por el prototipo.

A partir de la matriz de confusión, se calcularon los siguientes parámetros: fiabilidad del muestreo (F_m), fiabilidad por omisión (FO), fiabilidad por comisión (FC), error por omisión (EO) y error por comisión (EC). F_m mide la correspondencia entre la sumatoria de los puntos asignados correctamente por clase y el total de puntos a clasificar, FO mide la correspondencia entre los puntos asignados a una clase cuando pertenecen a esta y la sumatoria de los puntos que pertenecen a la misma clase, y FC es la correspondencia entre los puntos clasificados en una clase cuando pertenecen a esta y la sumatoria de los puntos asignados a la misma clase. FO, FC, EO y EC se calcularon por cada clase (inmaduro, pintón-maduro y seco) (Sobrino *et al.*, 2000).

$$F_m = \frac{\sum_i x_{ii}}{\sum_i \sum_j x_{ij}} \quad (3)$$

$$FO_i = \frac{x_{ii}}{\sum_j x_{ij}} \quad (4)$$

$$FC_j = \frac{x_{jj}}{\sum_i x_{ji}} \quad (5)$$

$$EO_i = 1 - FO_i \quad (6)$$

$$EC_j = 1 - FC_j \quad (7)$$

7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Con éste trabajo de investigación y desarrollo tecnológico se logró diseñar y construir un prototipo de seleccionadora por color para frutos de café, que logra separar al menos el 50 % de los frutos inmaduros y secos presentes en una muestra.

7.1. Proceso de diseño del prototipo seleccionadora por color para café cereza

El prototipo construido satisface las siguientes especificaciones.

7.1.1. Definición de especificaciones

Especificaciones del usuario:

Funciones del dispositivo:

- Dosificar los frutos de café uno por uno.
- Leer el color (R, G y B) de la epidermis de cada fruto.
- Identificar estados de maduración inmaduro, pintón-maduro y seco.
- Separar frutos inmaduros y secos de una muestra de café cereza.

Requisitos de diseño:

- Separar al menos el 50 % de los frutos inmaduros y secos de una muestra de café cereza.
- El sistema eléctrico debe estar protegido contra la intemperie.

Criterios de evaluación:

- Seguridad.
- Facilidad de manufactura.
- Facilidad de operación.
- Bajo costo de producción.
- Tamaño pequeño.
- Uso de materiales y componentes disponibles en el mercado.

Especificaciones del producto:

Densidad aparente. Los valores promedio mayores fueron para el fruto inmaduro (0.69 kg L^{-1}) y el pintón-maduro (0.67 kg L^{-1}) de la variedad Colombia.

En el Cuadro 1 se aprecia que en los tres estados de maduración, la variedad Colombia tuvo una densidad aparente mayor, siendo estadísticamente diferente ($p < 0.05$) con Oro Azteca en seco, y con Costa Rica y Oro Azteca en inmaduro y pintón-maduro. También se observa una diferencia estadística significativa ($p < 0.05$) por estados de maduración en las variedades Costa Rica y Oro Azteca, resultados opuestos a lo reportado por Chandrasekar y Viswanathan (1999) y Mutua (2000), donde no encuentran una diferencia significativa por estados de maduración reportando valores (0.92 kg L^{-1} y 0.80 kg L^{-1} , respectivamente) por arriba de los aquí encontrados.

Ángulo de reposo. En estados de madurez de pintón-maduro y seco el ángulo de reposo del fruto de café no presentó diferencias significativas ($p > 0.05$) entre las variedades estudiadas; mientras que el fruto inmaduro de la variedad Costa Rica permitió un ángulo de reposo significativamente mayor que Oro Azteca (Cuadro 1), posiblemente debido al menor tamaño de los frutos de Costa Rica.

Masa. Esta variable evidencia la importancia de cosechar fruto maduro. Si 100 kilogramos de fruto pintón-maduro se dejaran secar en la planta, al final se cosecharían solo 25 kilogramos de café seco; mientras que si esos mismos frutos se cosecharan inmaduros, se obtendrían solo 60 kilogramos de café. Dado que el café cereza es un producto que se paga por kilo, es del mayor interés para el productor cosechar sólo fruto pintón-maduro. Marín *et al.*, (2003a) reportan valores mayores a los encontrados en este trabajo para la masa de frutos en diferentes estados de maduración, pero con la misma tendencia [secos=33 g, inmaduros (66.5-87 g) y maduros=99.5 g]. Montilla-Pérez *et al.*, (2008) también reportan una masa mayor (102 g) en frutos maduros de la variedad Colombia, aunque esta variable depende también de la cantidad de frutos que tienen los cafetos (mayor cantidad generalmente implica menor tamaño y menor peso) y de las condiciones del clima que prevalecen al momento de la evaluación (frutos húmedos o frutos secos), entre otros factores.

Dimensiones. El estado de madurez afectó significativamente ($p < 0.05$) las dimensiones del fruto en las tres variedades evaluadas. Los frutos de mayor tamaño fueron los pintones-maduros

(largo=16.31 mm y ancho=14.88 mm) y los de menor dimensión correspondieron a los frutos secos (largo= 12.32 mm y ancho=9.14 mm). En el estado de pintón-maduro los frutos de Oro Azteca son significativamente ($p<0.05$) más anchos y pesados que en el resto de las variedades evaluadas. Similarmente, Carvajal *et al.*, (2012) reportaron las dimensiones más altas de largo (16.53 mm) y ancho (14.84 mm) en frutos maduros, encontrando diferencias estadísticas significativas ($p<0.05$) entre frutos maduros e inmaduros.

Cuadro 1. Características físicas de frutos de café cosechados de la parcela del COLPOS, Córdoba (2014).

Variedad	Estado de maduración	Densidad aparente (kg L ⁻¹)	Angulo de reposo (°)	Masa de 50 frutos (g)	Dimensiones	
					Largo (mm)	Ancho (mm)
Colombia	Inmaduro	0.69 ^f	18.85 ^{cd}	56.33 ^c	14.51 ^c	11.16 ^c
Costa Rica	Inmaduro	0.64 ^e	20.18 ^d	61.00 ^d	15.39 ^d	11.75 ^d
Oro Azteca	Inmaduro	0.64 ^e	15.09 ^{ab}	59.33 ^d	14.64 ^c	12.15 ^e
Colombia	Pintón-maduro	0.67 ^f	17.35 ^{bc}	94.66 ^f	16.31 ^e	14.25 ^f
Costa Rica		0.60 ^c	15.98 ^{ab}	90.66 ^e	16.14 ^e	14.10 ^f
Oro Azteca		0.62 ^d	16.29 ^{ab}	99.33 ^g	16.03 ^e	14.88 ^g
Colombia	Seco	0.49 ^b	17.45 ^{bc}	24.33 ^a	12.43 ^a	9.14 ^a
Costa Rica	Seco	0.49 ^b	16.30 ^{ab}	30.00 ^b	13.59 ^b	10.24 ^b
Oro Azteca	Seco	0.419 ^a	15.24 ^{ab}	22.00 ^a	12.32 ^a	10.00 ^b

Promedios con letra diferente en una columna presentan diferencia estadística (Tukey, $\alpha=0.05$).

En el Cuadro 2 se observa que las dimensiones de largo y ancho, contemplando los tres estados de maduración y variedades, variaron en intervalos de 14.51-14.69 mm y 11.85-12.08 mm, con valores extremos de 9.48-18.86 mm y 6.78-18.84 mm respectivamente.

Cuadro 2. Dimensiones de frutos de café cosechados de la parcela del COLPOS, Córdoba (2014).

Dimensión	Límites de confianza (95 %) (mm)			Observaciones extremas (mm)	
	LI	Media	LS	Inferior	Superior
Largo	14.51	14.60	14.69	9.48	18.86
Ancho	11.85	11.96	12.08	6.78	18.84

LI = límite de confianza inferior y LS = límite de confianza superior.

Color de la epidermis del fruto. La variable red (R) de color varió significativamente ($p < 0.05$) por estado de maduración, mientras que para un mismo estado de madurez esta variable fue muy similar entre las variedades estudiadas. Las variables green (G) y blue (B) de color variaron significativamente ($p < 0.05$) en el estado de maduración inmaduro con respecto al pintón-maduro y seco. Mientras que para un mismo estado de madurez las variables R, G y B fueron muy similares entre las variedades estudiadas. También en las variables G y B de color en el estado de maduración seco de las variedades Costa Rica y Oro Azteca no hubo diferencia significativa ($p \leq 0.05$) con el estado de maduración pintón-maduro correspondiente a las variedades Colombia y Oro Azteca en R y Oro Azteca en G (Cuadro 3).

Cuadro 3. Color de frutos de café cereza por variedad cosechados de la parcela del COLPOS, Córdoba (2014).

Variedad	Estado de maduración	Color		
		R	G	B
Colombia	Inmaduro	49.53 ^a	59.65 ^a	66.92 ^a

Costa Rica	Inmaduro	45.95 ^a	54.57 ^a	63.27 ^a
Oro Azteca	Inmaduro	48.29 ^a	58.63 ^a	65.56 ^a
Colombia	Pintón-maduro	62.44 ^b	96.07 ^{cd}	79.17 ^{bc}
Costa Rica	Pintón-maduro	60.08 ^b	93.03 ^{bc}	78.56 ^{bc}
Oro Azteca	Pintón-maduro	62.19 ^b	99.76 ^d	81.74 ^{cd}
Colombia	Seco	90.43 ^c	104.80 ^e	86.89 ^e
Costa Rica	Seco	90.86 ^c	103.26 ^{de}	85.79 ^{de}
Oro Azteca	Seco	89.34 ^c	100.58 ^{de}	84.29 ^{de}

Promedios con letra diferente en una columna presentan diferencia estadística (Tukey, $\alpha=0.05$). Red (R), green (G) y blue (B).

Silva *et al.*, (2014) reportaron que la variable R de color varía de 51.17 a 55.22 en frutos maduros, datos menores a lo reportado en el Cuadro 4 (R=61.57). Carvajal *et al.*, (2011) encontraron diferencias significativas en color entre frutos con diferente estado de maduración (frutos verdes, pintones y sobremaduros). Congruente a lo reportado en el Cuadro 4, donde se aprecia que los valores de las variables de color (R, G y B) varían significativamente ($p<0.05$) por estado de maduración.

Cuadro 4. Límites y medias de color en frutos de café cosechados de la parcela del COLPOS, Córdoba (2014).

Estado de maduración	R			G			B		
	Límites de confianza (95 %) (mm)			Límites de confianza (95 %) (mm)			Límites de confianza (95 %) (mm)		
	LI	Media	LS	LI	Media	LS	LI	Media	LS
Inmaduro	46.90	47.92 ^a	48.94	56.36	57.62 ^a	58.87	63.88	65.25 ^a	66.61

Pintón- maduro	60.45	61.57 ^b	62.68	94.73	96.28 ^b	97.83	78.59	79.82 ^b	81.05
Seco	89.13	90.21 ^c	91.28	101.59	102.88 ^c	104.17	84.60	85.66 ^c	86.71

Medias con letra diferente en una columna presentan diferencia estadística (Tukey, $\alpha=0.05$). LI = límite de confianza inferior y LS = límite de confianza superior.

Analizando las lecturas de color obtenidas, se puede observar que obedecen a las siguientes condiciones: inmaduros $R < G < B$, pintones-maduros $R < B < G$ y secos $B \leq R < G$, donde solo el 3.33 % de las lecturas de frutos secos difieren de la condición.

7.1.2. Creación de los conceptos de diseño

Los conceptos de diseño A y B se describen a continuación:

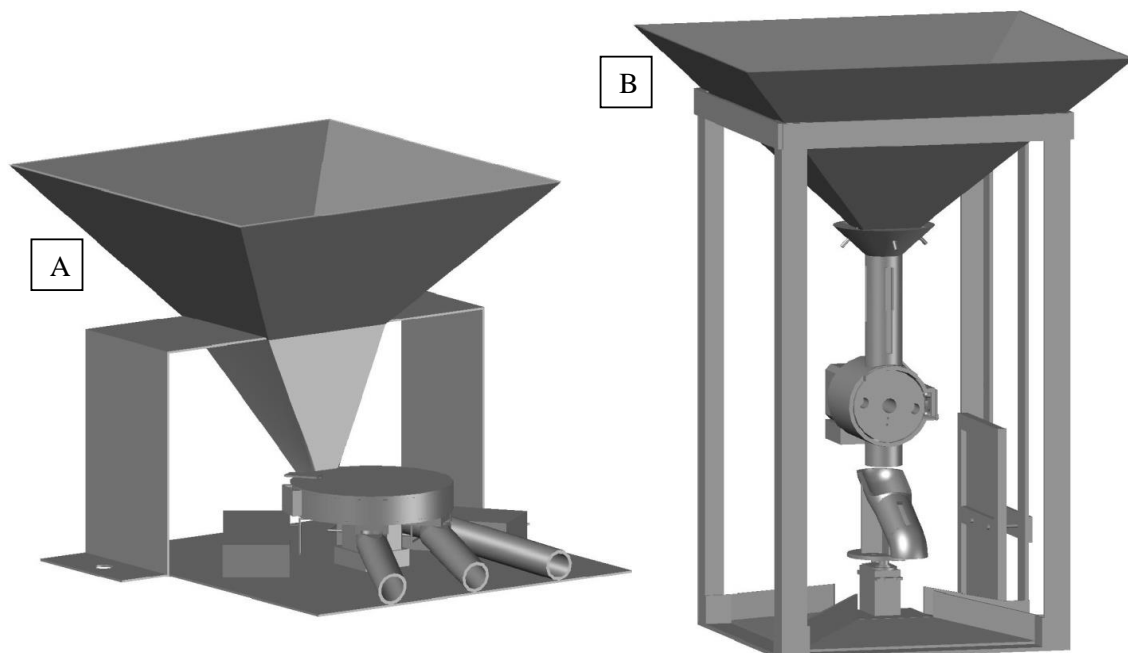


Figura 30. Conceptos de diseño A y B.

Tolva de materia prima. Concepto de diseño A: capacidad de 5.4 kg y una pendiente de 50 °; concepto B: capacidad de 3 kg y una pendiente de 47°. Capacidad determinada en base a la media de la densidad aparente de frutos pintones-maduros (0.63 kg L^{-1}); asignación del ángulo de la pendiente en base al dato mayor del ángulo de reposo (20.18°) y pendiente de una despulpadora comercial PENAGOS DH4 (45°).

Mecanismo de dosificación

El sistema de dosificación A es una ruleta con cinco orificios de 20 mm de ancho, de acuerdo a la lectura extrema superior de las dimensiones de los frutos de café (18.86 mm), separados cada 72°. La ruleta va conectada a un motor para hacer giros de 72°, y así tomar fruto por fruto proveniente de la tolva de materia prima.

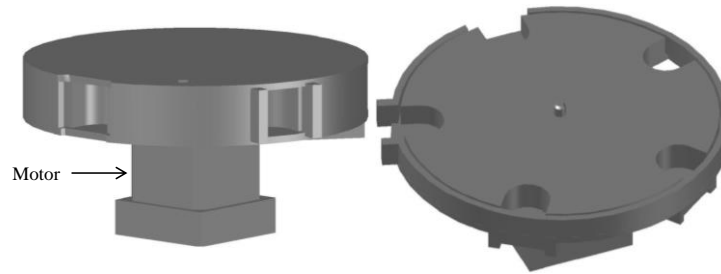


Figura 31. Sistema de dosificación con corte horizontal, concepto A.

El sistema de dosificación B comienza por un conducto vertical de 22 mm de diámetro, el cual desemboca en una ruleta de cuatro orificios de 20 mm de diámetro, separados cada 90°. La ruleta va ensamblada en un motor dando giros de 90°, para ir moviendo un fruto por orificio.

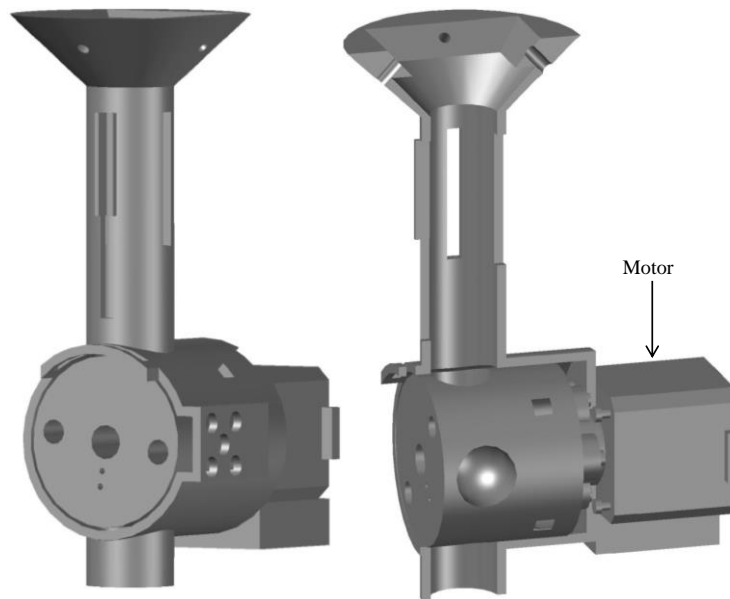


Figura 32. Sistema de dosificación con corte vertical, concepto B.

Mecanismo lector del color

En el concepto A, la ruleta se encuentra dando giros de 72° hacia la izquierda y se detiene cuando el sensor infrarrojo, posicionado en la parte superior de la ruleta, detecta un color blanco. Posteriormente el sensor convertidor de luz a frecuencia obtiene la lectura de color (R, G y B) de la epidermis del fruto que se encuentre en el orificio.

En el concepto B, la ruleta se encuentra dando giros de 90° hacia la derecha y se detiene por un sensor infrarrojo, al detectar un color blanco, para que el sensor convertidor de luz a frecuencia obtenga las variables de color (R, G y B) correspondientes a la epidermis del fruto presente en el orificio frente al sensor.

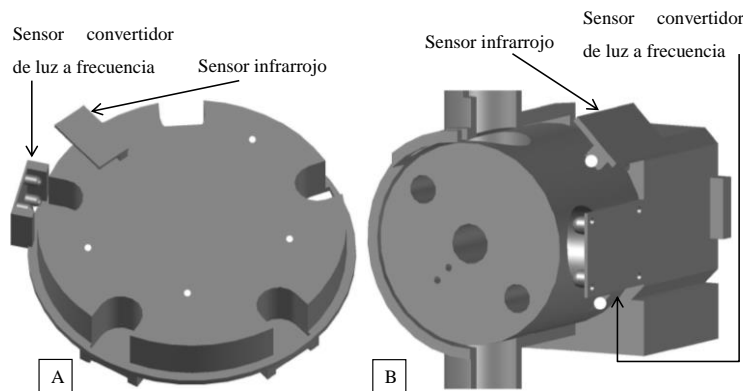


Figura 33. Mecanismo lector del color, concepto A y B.

Mecanismo de separación de los frutos indeseables

En el concepto A, la base inferior de la ruleta tiene tres salidas, dos con sistema de cierre posteriores a la lectura del color para inmaduros y secos, y una para pintones-maduros. Después de la lectura de color, la ruleta continúa girando cada 72° y el fruto, de acuerdo al estado de maduración, activa el sistema de cierre deslizándose una placa permitiendo su paso al conducto de salida de 22 mm de diámetro. El sistema de cierre es por medio de un motor para seguros.

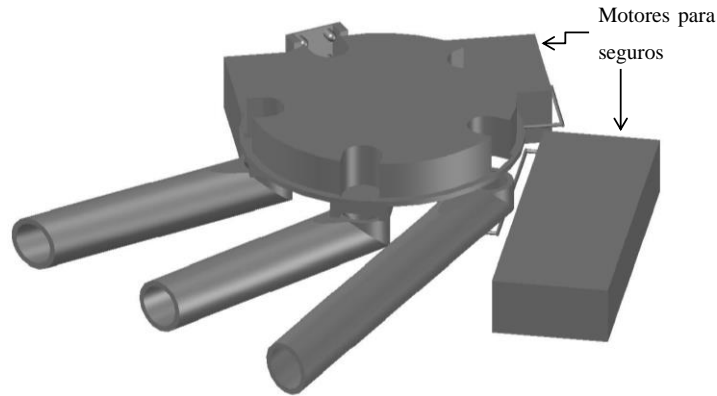


Figura 34. Mecanismo de separación de los frutos indeseables, concepto A.

El concepto A cuenta con un conducto de salida de 28 mm de diámetro, unido a un servomotor de rotación estándar, y tres rampas (una para cada estado de maduración). El servomotor permanece ubicado con un giro de 90° (pintón-maduro), pero cuando se obtienen datos correspondientes a frutos secos e inmaduros se ubica en un giro de 0° y 145°, respectivamente.

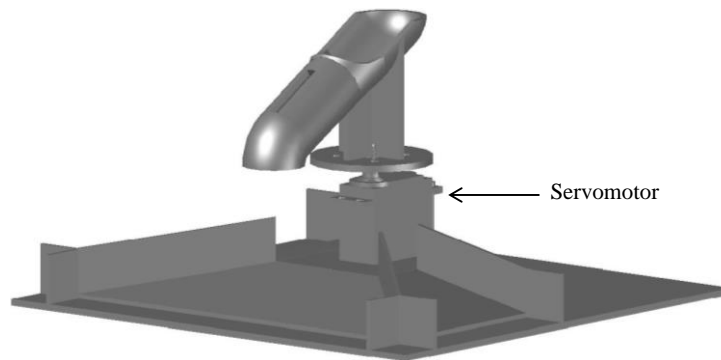


Figura 35. Mecanismo de separación de frutos indeseables, concepto B.

Validación de cada alternativa propuesta:

Ambos conceptos de diseño A y B cumplen con los cinco criterios de evaluación, son seguros, fáciles de operar, pequeños y los materiales y dispositivos están disponibles en el mercado. Sin embargo para el concepto A el costo de producción es menor en \$1, 358 y su volumen es menor por 26, 096 cm³.

Cuadro 5. Validación de los conceptos de diseño A y B.

Criterio de evaluación	Concepto A	Concepto B
------------------------	------------	------------

	No tiene piezas	No tiene piezas
Seguridad	punzocortantes y el sistema eléctrico se encuentra aislado.	punzocortantes y el sistema eléctrico se encuentra aislado.
Facilidad de operación	Se conectan los dos eliminadores y se vierten uno a uno los frutos de café.	Se conectan los dos eliminadores y se vierten uno a uno los frutos de café.
Bajo costo de producción	\$4, 528.00	\$3, 170.00
Tamaño pequeño	45 cm x 46.8 cm x 34 cm=71, 604 cm ³	30.4 cm x 30.8 cm x 45.4 cm=45, 508 cm ³
Uso de materiales y componentes disponibles en el mercado	Si	Si

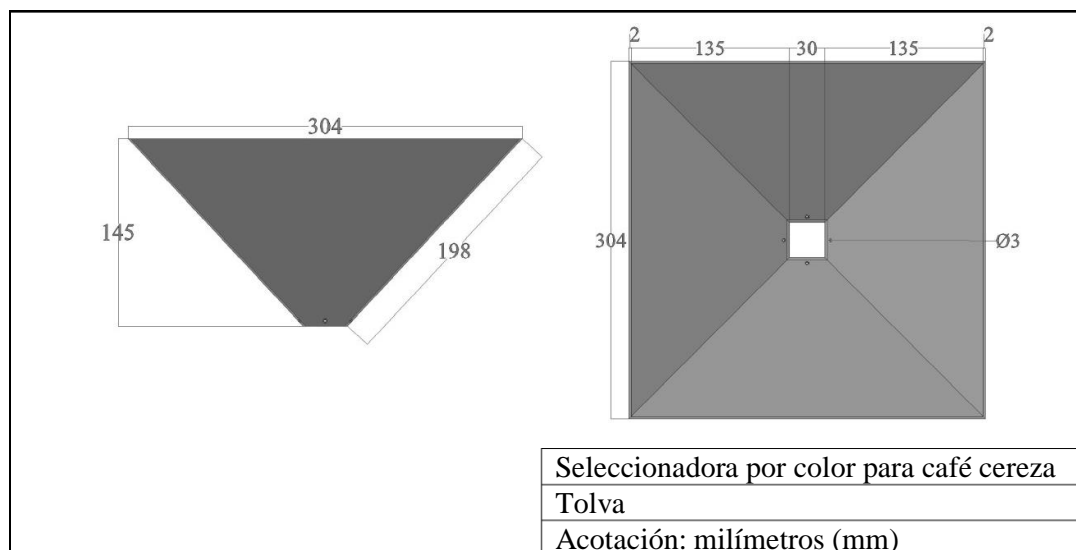
7.1.3. Toma de decisiones

En base a la validación de cada alternativa, se decidió por la propuesta B por el costo de producción y volumen menor.

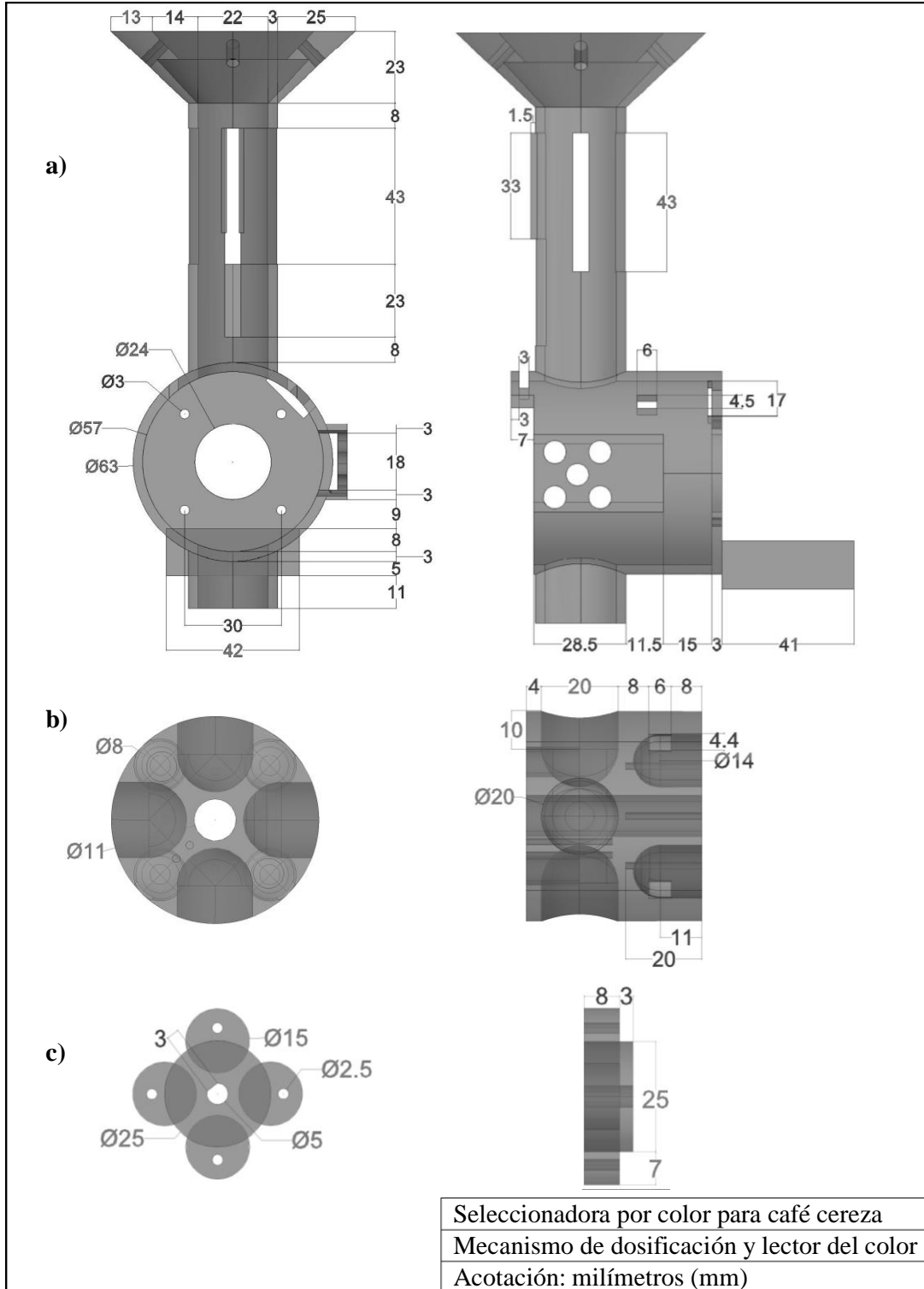
7.1.4. Diseño detallado

A continuación se detalla cada elemento del diseño de la propuesta B.

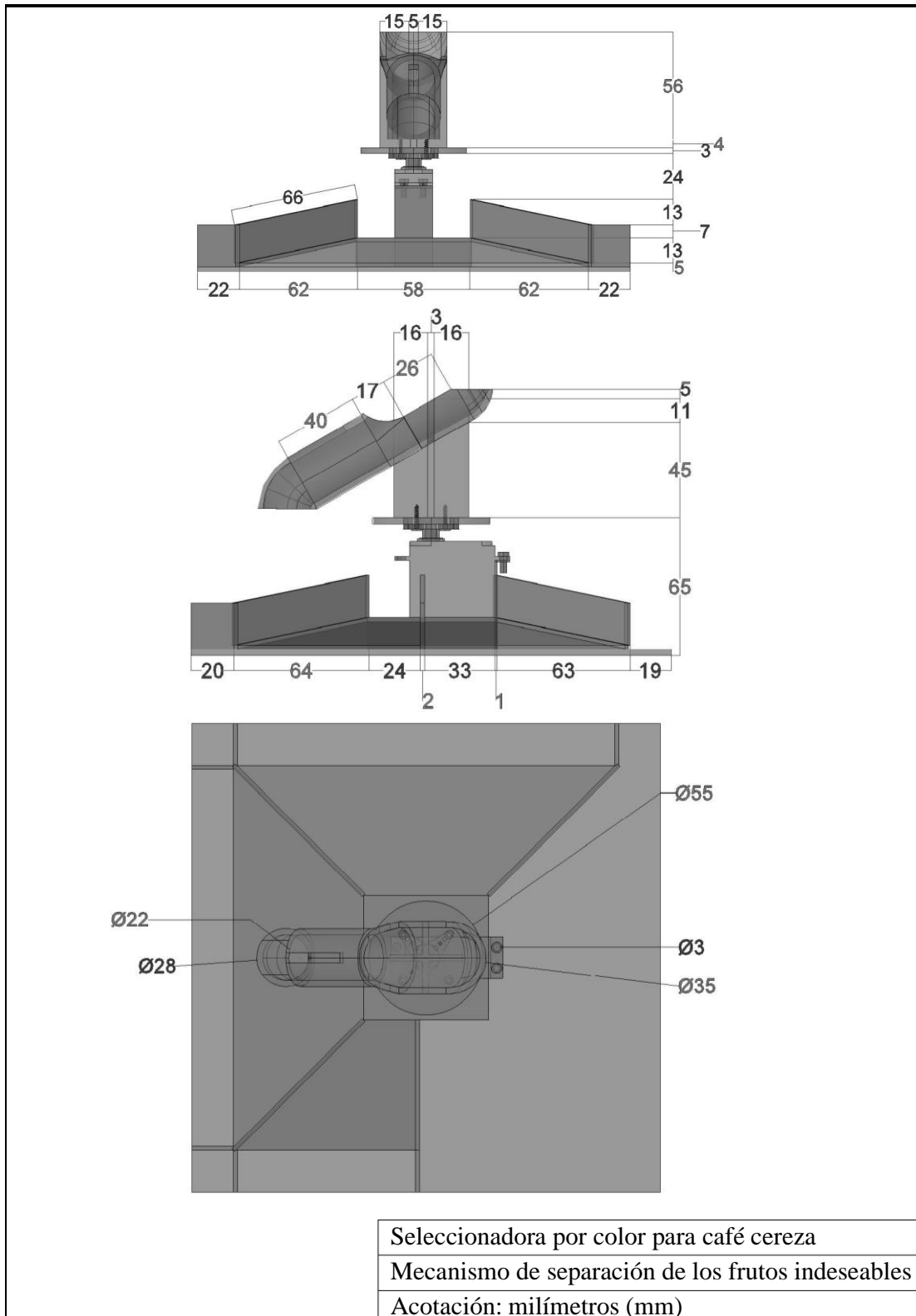
Tolva de materia prima



Mecanismo de dosificación y lector del color. El mecanismo de dosificación y lector de color está conformado por 3 piezas, a) el conducto que conecta con la tolva y da soporte a la ruleta, b) la ruleta vertical y c) el conector que va fijo sobre la ruleta y conecta con el motor a pasos.



Mecanismo de separación de los frutos indeseables



Software. El código generado en el software Arduino con el lenguaje C++, se muestra en el Anexo 1.

7.2. Piezas elaboradas con la impresora 3D

Las piezas fabricadas con la impresora 3D se muestran en la Figura 36.



Figura 36. Piezas fabricadas con la impresora 3D.

7.3. Ensamble de piezas

La tolva, las paredes de la base de la tolva, las piezas fabricadas con la impresora 3D y los dispositivos (sensor reflectivo, sensor convertidor de luz a frecuencia, motor a pasos, servomotor de rotación estándar, PCB y eliminadores) se presentan ensamblados en la Figura 37.

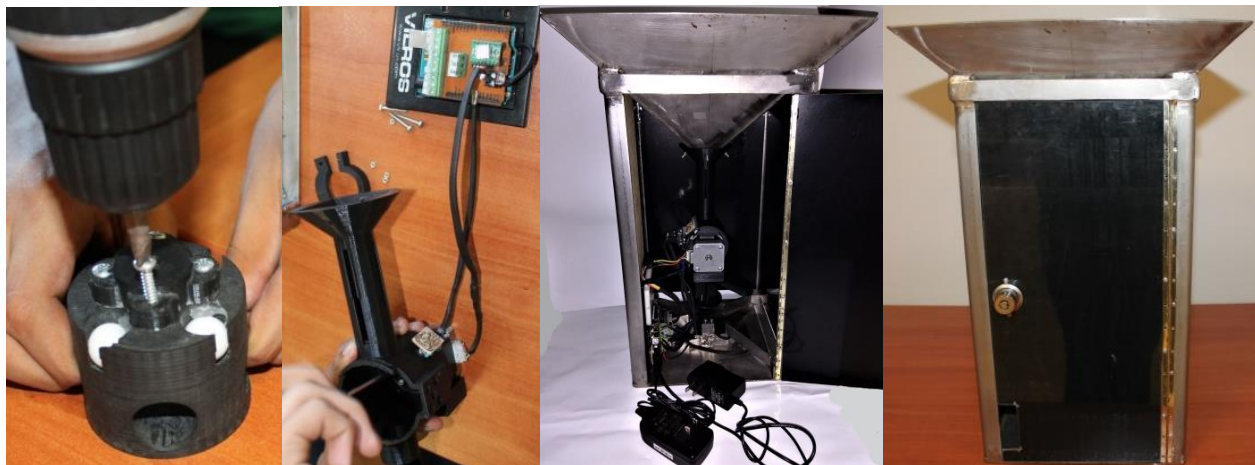


Figura 37. Prototipo de seleccionadora por color para café cereza ensamblada.

7.4. Hardware

El hardware consta de una placa Arduino UNO, una PCB, un sensor reflectivo, un motor a pasos, un sensor convertidor de luz a frecuencia, dos eliminadores, el mecanismo de dosificación, el mecanismo de separación de frutos indeseables, la tolva y las placas de acrílico (Figura 38).

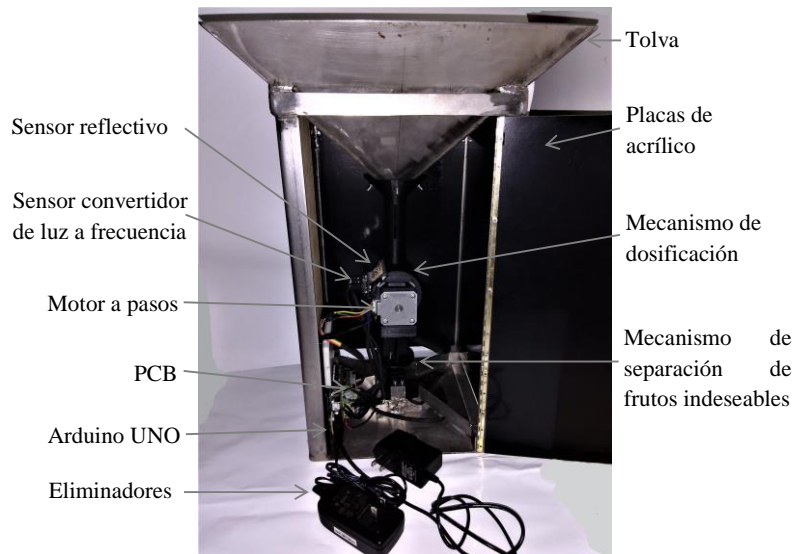


Figura 38. Hardware del prototipo de seleccionadora por color para café cereza.

Los dispositivos utilizados para el prototipo están conectados mediante el siguiente sistema eléctrico (Figura 39):

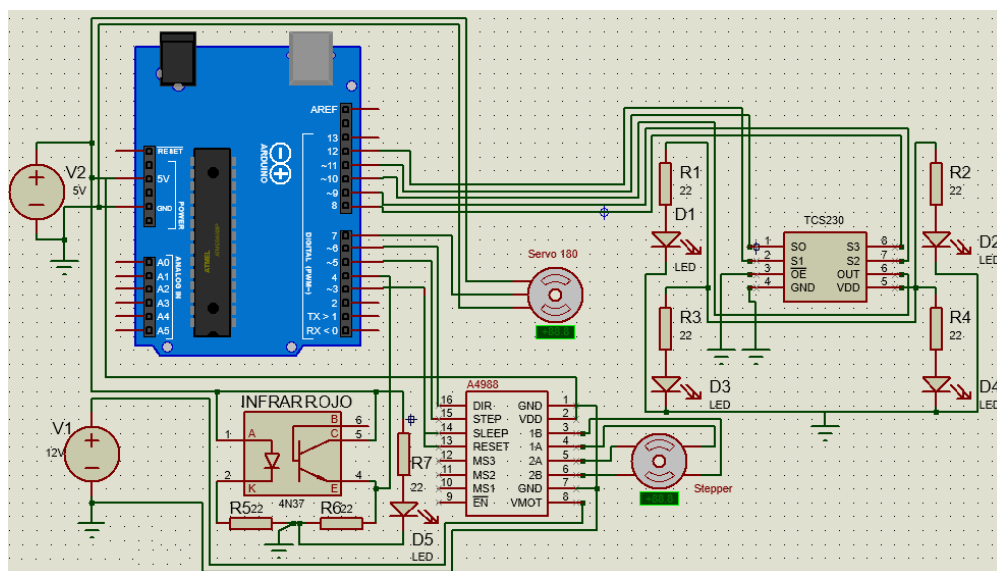


Figura 39. Diagrama eléctrico.

7.5. Evaluación de la fiabilidad del prototipo

En la puesta en marcha del prototipo se obtuvieron parámetros (Cuadro 6) de utilidad para su evaluación. El prototipo muestra una alta fiabilidad ($F_m=0.93$) de identificación, por tanto tiene un error de 0.07, lo que significa que de 100 frutos a 7 clasifica erróneamente. Sandoval y Prieto (2007) y Herrera *et al.*, (2016) reportan un rendimiento mayor (0.97) con respecto al prototipo en estudio.

La fiabilidad por omisión de frutos inmaduros y secos es mayor a 0.5, es decir, que más del 50 % de los frutos indeseables son separados correctamente. También se aprecia que el prototipo presenta menos error al clasificar a los frutos pintones-maduros ($EO=0.03$), confunde más los inmaduros ($EO=0.28$) y clasifica más frutos erróneos en la clase de secos ($EO=0.27$), pudiendo deberse a que la lectura de color se realizó en un área de diferente tonalidad a su clase, ya que un mismo fruto puede presentar regiones de diferentes tonalidades (verde, amarillo, rojo, violeta, etc.) (Arcila *et al.*, 2007).

La velocidad de clasificación del prototipo es de 0.8 frutos s^{-1} , de acuerdo con la masa de un fruto (1.9 g) el tiempo en clasificar 1 kg de café cereza es de 10.9 minutos.

Cuadro 6. Parámetros de evaluación del prototipo.

Clase	FO	EO	FC	EC
Inmaduro	0.72	0.28	0.95	0.05
Pintón-maduro	0.97	0.03	0.96	0.04
Seco	0.83	0.17	0.73	0.27
F_m	0.93			
Velocidad	0.8 frutos s^{-1}			

8. CONCLUSIONES

Las especificaciones del usuario para el prototipo fueron: dosificar fruto por fruto, obtener las variables de color (R, G y B) de la epidermis por fruto, poder identificar tres estados de maduración (inmaduro, pintón-maduro y seco), separar al menos el 50 % de frutos inmaduros y secos de los pintones-maduros, contar con sistema eléctrico protegido de la intemperie, ser seguro, fácil de manufacturar y operar, de bajo costo de producción y usar materiales y componentes disponibles en el mercado.

Las especificaciones del producto son: densidad aparente (0.63 kg L^{-1}), ángulo de reposo (20.18°), masa (1 fruto=1.9 g), dimensiones (largo=18.86 y ancho=18.84) y el color de la epidermis (R, G y B). Las variables de color mostraron diferencia significativa entre estados de maduración, sin embargo menos del 1.55 % de las lecturas realizadas se encuentran dentro de los intervalos de confianza obtenidos.

El 100 % de las lecturas de color de inmaduros y pintones-maduros obedecen a las siguientes condiciones: inmaduros $R < G < B$, pintones-maduros $R < B < G$. El 3.33 % de las lecturas correspondientes a frutos secos no corresponde a la condición $B \leq R < G$.

De los conceptos de diseño A y B propuestos, el segundo fue el óptimo al cumplir con las especificaciones del usuario y producto, además de tener un menor precio de producción (\$3, 170.00) y volumen (604 cm^3).

El prototipo de seleccionadora de cereza de café por color, se puede usar para clasificar frutos inmaduros, pintones-maduros y secos, con una fiabilidad de 0.93, asegurando la separación de más del 50 % de los frutos indeseables (inmaduros y secos).

9. REFERENCIAS

- Alvarado S., M. y Rojas C., G. (2007). Cultivo y beneficiado del café. San José, Costa Rica: EUNED. 184 p.
- Álvarez M., F., Oliveros T., C. E. y Sanz U., J. R. (2013). Diseño, construcción y evaluación de un equipo para la cosecha mecanizada de café en Colombia. Facultad de Ingeniería, Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente, Universidad del Valle, Cali, Colombia, 12, 11-22.
- Aron, E., Rodríguez, I., Arza, V., Herrera, F. F. y Sánchez-Mejía, M. (2012). Innovación, sustentabilidad, desarrollo e inclusión social: lecciones desde América Latina. Reino Unido: STEPS Centre. 94 p.
- Arcila P., J., Farfán V., F., Moreno B., A., Salazar G., L. F. y Hincapié G., E. (2007). Sistemas de producción de café en Colombia. Colombia: FNC-Cenicafé. 309 p.
- AREXX, Engineering. (2012). Manual: AAR-04 Arexx arduino robot. The Netherlands. 30 p.
- Artigas, J. M., Capilla, P. y Pujol, J. (2002). Tecnología del color. Valencia: Universidad de Valencia. 428 p.
- Amer Eissa, A. H. y Abdel Khalic, A. A. (2012). Understanding Color Image Processing by Machine Vision for Biological Materials. En Amer Eissa, A. H., Structure and Function of Food Engineering (pp. 229-274), Giza, Egipto: In Tech.
- Barbosa, J. A., Salvador, N. y Silva, F. M. (2005). Desempenho operacional de derricadoras mecánicas portáteis, em diferentes condições de lavouras cafeeiras. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, 9(1), 129-132.
- Barboza H., C.A. y Amaya L., F. L. (1996). Análisis de la calidad del grano y de la bebida del café var. Caturra en función de la maduración y tiempo de fermentación. Agronomía Tropical, 46(3), 289-311.

- Batista, L. R. y Chalfoun, S. M. (2014). Quality of coffee beans. En Schwan R. F. y Graham H., F., Cocoa and coffee fermentations (pp. 477-508), New York, EE. UU: CRC Press of Taylor & Francis Group.
- Bayle, J. 2013. C programing for Arduino. Reino Unido: PACKT. 488 p.
- Beyerer, J., Puente L., F. y Frese, C. (2016). Machine Vision. Automated visual inspection: theory, practice and applications. Alemania: Springer. 798 p.
- Brando, C. H. J. (2012). Part III: Harvesting & Processing. 2. Harvesting and Green Coffee Processing. En Wintgens, J. N., Coffee: Growing, Processing, Sustainable Production (pp. 601-723). 2a ed. Boschstr, Alemania: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
- Budynas, R. G. y Nisbett, J. K. (2008). Diseño de ingeniería mecánica de Shigley. 8a ed. México: McGraw-Hill Companies. 1059 p.
- Carvajal H., J. J., Aristizábal T., I. D., Oliveros T., C. E. y Mejía M., J. W. (2011). Colorimetría del fruto (*Coffea arabica* L.) durante su desarrollo y maduración. Revista Facultad Nacional Agronomía-Medellín, 64 (2), 6229-6240.
- Carvajal H., J. J., Aristizábal T., I. D. y Oliveros T., C. E. (2012). Evaluación de propiedades físicas y mecánicas del fruto de café (*Coffea arabica* L. var. Colombia) durante su desarrollo y maduración. Dyna, 73 (173), 116-124.
- Chandrasekar, V. y Viswanathan, R. (1999). Physical and Thermal Properties of Coffee. Journal of Agricultural Engineering Research, 73(3), 227-234.
- Corona R., L. G., Abarca J., G. S. y Mares C., J. (2014). Sensores y actuadores. Aplicaciones con Arduino®. México D. F.: Instituto Politécnico Nacional. 305 p.
- DESCO (Centro de Estudios y Promoción del Desarrollo). (2013). Marín C., G. Manual técnico. Control de calidad del café. Perú: Roble Rojo Grupo de Negocios del Perú S.A.C. 48 p.
- Duicela G., L. A., Farfán T., D. S., García R., J., Corral C, R. y Chilán V., W. (2004). Boletín Técnico: Post-cosecha y Calidad del Café Árabe. Ecuador: Impregcol. 56 p.

- Editronikx (Servicios Integrales en Ingeniería Electronica Editronikx). (2014). Sensor detector de color TCS3210/3200 y arduino. Recuperado de: <http://www.editronikx.com/2014/01/sensor-detector-de-color-tcs32103200-y.html#links>.
- Evans, B. (2011). Beginning Arduino programming. Writing code for the most popular microcontroller board in the world. New York: Apress. 252 p.
- Farah, A., Monteiro, M. E., Calabo, V., Franca A. S. y Trugo, L. C. (2006). Correlation between cup quality and chemical attributes of Brazilian coffee. Food Chemistry, 98, 373-380.
- FAIRCHILD (Fairchild Semiconductor Corporation). (2013). Ficha técnica: QRD1113/QRD1114-Reflective object sensor. Recuperado de: www.fairchildsemi.com.
- FCCyT (Foro Consultivo Científico y Tecnológico). (2008). Ciencia, tecnología e innovación: el desarrollo sustentable alrededor de oportunidades basadas en el conocimiento. 1a ed. México: FCCyT. 84 p.
- González, R. C. y Woods, R. E. (2008). Digital image processing. 3 ed. New Jersey, EE. UU.: Pearson Prentice Hall. 954 p.
- Gutiérrez, D. (2016). El Libro Café de México, Origen y Destino. Su llegada a México. Recuperado de: <http://www.mexicocafe.mx/blog-cafe-de-mexico/origen/su-llegada-a-mexico>.
- HEPTRO (Herramientas Tecnológicas Profesionales). (2016). Arduino UNO R3 A000066. Recuperado de: <https://hetpro-store.com/arduino-uno-r3-original/>.
- Herrera G., R. (2011). Parte 1: Conocimiento, innovación y desarrollo. En Herrera G., R y J. M. Gutiérrez G., Conocimiento, innovación y desarrollo (292 p.). 1a ed. Costa Rica: I. G. E.
- Herrera P., J. C., Medina O., S. M., Martínez L., G. E., Beleño S., K. J. y Berrio P., J. S. (2016). Clasificación de los frutos de café según su estado de maduración y detección de la broca mediante técnicas de procedimiento de imágenes. Prospect, 14(1), 15-22.

- IICA (Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura). (2010). Guía técnica para el beneficiado de café protegido bajo una indicación geográfica o denominación de origen. Guatemala: IICA. 210 p.
- Jarauta, F. y Medina, P. (2014). Cuadernos de Diseño 4. Diseño de Procesos. Madrid: IED. 184 p.
- Kuhn, D. (2004). “Mareeba”, the town with the world’s most diverse collection of coffee harvesters. Tee & Coffee, Asia. Recuperado de: www.teacoffeeasia.com.
- Margolis, M. (2011). Arduino Cookbook. EE. UU.: O’Reilly Media. 633 p.
- Marín, S.M., Arcila, J., Montoya, E. y Oliveros, C. (2003a). Cambios físicos y químicos durante la maduración del fruto de café (Coffe arabica L. var. Colombia). *Cenicafé* 54(3), 208-225.
- Marín, S.M., Arcila, J., Montoya, E. y Oliveros, C. (2003b). Relación entre el estado de madurez del fruto del café y las características de beneficio, rendimiento y calidad de la bebida. *Cenicafé*, 54(4), 297-315.
- Montilla-Pérez, J., Arcila-Pulgarín, J., Aristizábal-Loaiza, M., Montoya-Restrepo, E. C., Puerta-Quintero, G. I., Oliveros-Tascón, C. E. y Cadena-Gómez, G. (2008). Caracterización de algunas propiedades físicas y factores de conversión del café durante el proceso de beneficio húmedo tradicional. *Cenicafé*, 59(2), 120-142.
- Monroe, G. E. y Wang, J. K. (1968). Systems for mechanically harvesting coffee. *Transactions of the ASAE*, 11(2), 270-278.
- MotionKing (MotionKing Motor Industry Co., Ltd.). (2010). HB Stepper motor catalog. Recuperado de: <http://www.datasheet-pdf.com/PDF/17HS4401-Datasheet-MotionKing-928661>.
- Mott, R. L. (2006). Diseño de elementos de máquinas. México: PEARSON EDUCATION. 944 p.
- MPJA (Marlin P. Jones & Assoc., Inc.). (2017). Ficha técnica: 31150-MP, MG995 High speed servo actuador. Recuperado de: <https://www.mpja.com/download/31150mp.pdf>.

- Mutua, J. (2000). Post harvest handling and processing of coffee in African countries. Rural Infraestructure and Agro-Industries Division. Agriculture and Consumer Protection. FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). Rome, Italy. Recuperado de: <http://www.fao.org/3/a-x6939e/index>.
- NTE INEN 0285:06 (Norma Técnica Ecuatoriana). (2006). Green coffee beans. Classification and specifications. Republica de Ecuador. 10 p.
- OCDE (Organización para la Cooperación y Desarrollo Económicos). (2003). Manual de Frascati: Propuesta de norma práctica para encuestas de investigación y desarrollo experimental. España: FECYT (Fundación Española de Ciencia y Tecnología). 276 p.
- OECD (Organisation for Economic Co-operation and Development Statistical Office of the European Communities). (2005). Oslo manual: Guidelines for collecting and interpreting innovation data. 3a ed. Francia: OECD. 163 p.
- OEI (Organización de los Estados Iberoamericanos para la Educación, la Ciencia y la Cultura). (2012). Ciencia, tecnología e innovación para el desarrollo y la cohesión social. España: OEI. 95 p.
- OIC (International Coffee Organization). (2016a). Monthly export statistics - December 2016. Recuperado de: <http://www.ico.org/prices/m1-exports.pdf>.
- OIC (International Coffee Organization). (2016b). World coffee consumption. Recuperado de: <http://www.ico.org/prices/new-consumption-table.pdf>.
- Oliveros T., C.E., Ramírez G., C. A., Acosta A., R. y Álvarez M., F. (2005a). Equipo portátil para asistir la cosecha manual de café. Revista Facultad Nacional de Agronomía-Medellín, 58(2), 3003-3013.
- Oliveros T., C.E., Benítez M., R., Álvarez M., F., Aristizábal T., I. D., Ramírez G., C. A. y Sanz U., J. R. (2005b). Cosecha del café con vibradores portátiles del tallo. Revista Facultad Nacional de Agronomía-Medellín, 58(1), 2697-2708.
- Puerta Q., G. I. (2000). Influencia de los granos de café cosechados verdes, en la calidad física y organoléptica de la bebida. Cenicafé, 51(2), 136-150.

- Ramos G., P. J., Sanz U., J. R. y Oliveros T. C. E. (2010). Identificación y clasificación de frutos de café en tiempo real, a través de la medición de color. *Cenicafé*, 61 (4), 315-326.
- Roberts, D. (2011). *Making things move. DIY Mechanisms for inventors, hobbyists, and artists*. EE. UU.: McGraw-Hill. 350 p.
- SAGARPA (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación). (2014). Infografía: Café Mexicano. Aumenta consumo de café mexicano. Recuperado de: <http://www.sagarpa.gob.mx/saladeprensa/infografias/Paginas/cafe.aspx>.
- SAGARPA (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación). (2015). Convención Internacional del Café en México. Carpeta de difusión. Recuperado de: <http://www.sagarpa.gob.mx/Delegaciones/oaxaca/Documents/2015/Difusi%C3%B3n%20y%20Eventos/Convencion%20Internacional%20del%20Cafe%202015.pdf>.
- Sandoval N., Z. L. y Prieto O., F. A. (2007). Caracterización de café cereza empleando técnicas de visión artificial. *Revista Facultad Nacional de Agronomía-Medellín*, 60(2), 4105-4127.
- Sandoval, Z., Prieto, F. y Ortega, O. (2005). Caracterización y clasificación de café cereza por medio de visión artificial. En *Memorias del VIII Simposio de Tratamiento de Señales, Imágenes y Visión Artificial*. Colombia: Universidad: Pontificia Bolivariana. pp. 5-7.
- Serna R., A., Ros G., F. A. y Rico N. J. C. (2010). *Guía práctica de sensores*. España: Creaciones Copyright, S. L. 228 p.
- SIAP (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera). (2015). Cierre de la producción agrícola por estado. Producción nacional de café cereza. Recuperado de: http://infosiap.siap.gob.mx/aagricola_siap_gb/icultivo/index.jsp.
- Silva, S. de A., de Quiroz, D. M., Pinto, F. de A. C. y Santos, N. T. (2014). Coffee quality and its relationship with Brix degree and colorimetric information of coffee cherries. *Precision Agric*, 15, 543-554.
- Smrke, S., Kroslovakova, I., Gloess, A. N. y Yeretzián, C. (2015). Differentiation of degrees of ripeness of Catuai and Tipica green coffee by chromatographical and statistical techniques. *Food Chemistry*, 174, 637-642.

- Sobrino, J. A., Raissouni, N., Kerr, Y., Oliosio, A., López-García, M. J., Belaid, A., El Kharraz, M. H., Cuenca, J. y Dempere, L. (2000). Teledetección. España: Ed. Sobrino, J. A., Servicio de Publicaciones, Universidad de Valencia. 469 p.
- Su TL, Kung FC y Kuo YL. (2008). Application of Back-Propagation Neural Network Fuzzy Clustering in Textile Texture Automatic Recognition System. Hong Kong: International Conference on Wavelet Analysis and Patern Recognition.
- Swokowski, E. W. y Cole, J. A. (2011). Álgebra y trigonometría con geometría analítica. 13a ed. México: CENGAGE. pp. 378.
- TAOS (Texas Advanced Optoelectronic SolutionsTM). (2003). Ficha técnica: TCS230 Programable color light-to-frequency converter. Recuperado de: http://www.pobot.org/IMG/pdf/tcs230_datasheet.pdf.
- Toci, A. T. y Farah, A. (2008). Volatile compounds as potential defective coffee beans' markers. Food Chemistry, 108, 1133-1141.
- Ulate S., I. (2010). La innovación que potencia el desarrollo. Revista Nacional de Administración, 1 (2), 79-86.
- Villamil G., E. y García H., M. J. (2003). Introducción al proyecto de ingeniería. Buenos Aires: Universidad de Buenos Aires. 262 p.
- Villeta M., J. (2000). Diseño de Proyectos de Ingeniería. Santo Domingo, R. D.: Editora Búho. 445 p.
- Wakerly, J. F. (2001). Diseño digital: principios y prácticas. México: Pearson Educación. 976 p.
- Winston, E., De Laak, J., Marsh, T., Lempke, H., Aung, O., Nyunt, T. y Chapman, K. (2005). Arabica coffee manual for Myanmar. Recuperado de: <http://www.fao.org>.
- Wintgens, J. N. 2012. Part I: Growing. 1. The Coffee Plant. En Wintgens, J. N., Coffee: Growing, Processing, Sustainable Production (pp. 3-24) 2a ed. Boschstr. Alemania: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.

10. ANEXOS

Anexo 1. Código para la seleccionadora por color para café cereza.

<code>#include <Servo.h></code>	Librería del servomotor.
<code>#define VELOCIDAD 1800;</code>	Declara a la velocidad del motor a pasos como una constante.
<code>const int s3 = 8;</code>	Se declaran las constantes de tipo entero (int) asignándoles valores.
<code>const int s2 = 9;</code>	
<code>const int out = 10;</code>	
<code>const int s0 = 11;</code>	Se declaran las variables de tipo entero (int) asignándoles nombre (red, green y blue).
<code>const int s1 = 12;</code>	
<code>int red;</code>	
<code>int green;</code>	Se declaran las constantes de tipo entero (int) asignándoles valores.
<code>int blue;</code>	
<code>int reset=3;</code>	
<code>int steps=4;</code>	Se declara la variable de tipo boolean (bool). Indica el nombre de la variable “ser18”, para el servomotor de 180°.
<code>int direccion=5;</code>	
<code>int infrarrojo=6;</code>	
<code>bool volorinfrarrojo;</code>	Función creada con la palabra void (función vacía). Inicio del primer bloque de instrucciones.
<code>Servo serv18;</code>	
<code>void color()</code>	
<code>{</code>	Asigna un estado bajo a la variable s2 para capturar los valores red.
<code>digitalWrite(s2, LOW);</code>	
<code>digitalWrite(s3, LOW);</code>	Asigna un estado bajo a la variable s3 para capturar los valores red.
<code>red = pulseIn(out, digitalRead(out) == HIGH</code>	Asigna el valor capturado a la variable out para red.
<code>? LOW : HIGH);</code>	
<code>digitalWrite(s3, HIGH);</code>	Asigna un estado alto a la variable s3 para

	capturar los valores blue.
<code>blue = pulseIn(out, digitalRead(out) == HIGH ? LOW : HIGH);</code>	Asigna el valor capturado a la variable out para blue.
<code>digitalWrite(s2, HIGH);</code>	Asigna un estado alto a la variable s2 para capturar los valores green.
<code>green = pulseIn(out, digitalRead(out) == HIGH ? LOW : HIGH);</code>	Asigna el valor capturado a la variable out para green.
<code>}</code>	Fin del primer bloque de instrucciones.
<code>void setup()</code>	Parte encargada de recoger la configuración, es decir, la declaración de las variables.
<code>{</code>	Inicio del segundo bloque de instrucciones.
<code>Serial.begin(9600);</code>	Inicia la comunicación serial a una velocidad de 9600 bps (número de unidades de señal por segundo).
<code>pinMode(s0, OUTPUT);</code>	Se declaran las variables de salida (s0, s1, s2 y s3).
<code>pinMode(s1, OUTPUT);</code>	
<code>pinMode(s2, OUTPUT);</code>	
<code>pinMode(s3, OUTPUT);</code>	
<code>pinMode(infrarrojo, INPUT);</code>	Se declaran las variables de entrada (infrarrojo y out).
<code>pinMode(out, INPUT);</code>	
<code>pinMode(reset, OUTPUT);</code>	Se declaran las variables de salida (reset, steps y direccion).
<code>pinMode(steps, OUTPUT);</code>	
<code>pinMode(direccion, OUTPUT);</code>	
<code>digitalWrite(s0, HIGH);</code>	Pone en estado alto el convertidor de corriente a frecuencia (100 %).
<code>digitalWrite(s1, HIGH);</code>	
<code>}</code>	Fin del segundo bloque de instrucciones.
<code>void loop()</code>	Contiene el código que se ejecutara cíclicamente.
<code>{</code>	Inicio del tercer bloque de instrucciones.
<code>valorinfrarrojo = digitalRead(infrarrojo);</code>	Asigna el valor digital leído a valor infrarrojo.


```

color();
Serial.print("R Intensity:");
Serial.print(red, DEC);
Serial.print(" G Intensity: ");
Serial.print(green, DEC);
Serial.print(" B Intensity : ");
Serial.println(blue, DEC);
serv18.attach(7);
if(valorinfrarrojo == 0)

{
Serial.println("infra 0");
delay(500);

if (red < blue && blue < green)

{
Serial.println(" - (Pinton-maduro)");
serv18.write(90);
}
else if (red < green && green < blue)

{
Serial.println(" - (Inmaduro)");
serv18.write(145);
}
else if (blue <= red && red < green)

{
Serial.println(" - (Seco)");
serv18.write(0);
}
}

```

Manda llamar a la función color().

Imprime el texto entre comillas en el monitor.

Imprime el valor decimal de la variable red.

Imprime el texto entre comillas en el monitor.

Imprime el valor decimal de la variable green.

Imprime el texto entre comillas en el monitor.

Imprime el valor decimal de la variable blue.

Indica el pin que controla al servo de 180°.

Si el valorinfrarrojo es 0 continua con la ejecución de las siguientes líneas.

Inicio del cuarto bloque de instrucciones.

Imprime el texto entre comillas en el monitor.

Tiempo que tarda el infrarrojo en volver a hacer lecturas.

Si se cumple la condición entre paréntesis, procede a ejecutar la instrucción siguiente.

Inicio del quinto bloque de instrucciones.

Imprime el texto entre comillas en el monitor.

Indica un giro de 90° del servomotor.

Fin del quinto bloque de instrucciones.

Si se cumple la condición entre paréntesis, procede a ejecutar la instrucción siguiente.

Inicio del sexto bloque de instrucciones.

Imprime el texto entre comillas en el monitor.

Indica un giro de 145° del servomotor.

Fin del sexto bloque de instrucciones.

Si se cumple la condición entre paréntesis, procede a ejecutar la instrucción siguiente.

Inicio del séptimo bloque de instrucciones.

Imprime el texto entre comillas en el monitor.

Indica un giro de 0° del servomotor.

```

}
else

{
Serial.println(" - (Pinton-maduro)");
serv18.write(90);
}
delay(400);
digitalWrite(reset, LOW);

delay(100);
digitalWrite(reset, HIGH);

digitalWrite(direccion,LOW);
for (int i = 0; i <= 20; i++)
{
digitalWrite(steps, HIGH);
digitalWrite(steps, LOW);
delayMicroseconds(VELOCIDAD);
}}

else

{
if(valorinfrarrojo == 1)

{

Serial.println("infra 1");
digitalWrite(reset, HIGH);

```

Fin del séptimo bloque de instrucciones.

Si lo anterior no se cumple, procede a ejecutar la siguiente instrucción.

Inicio del octavo bloque de instrucciones.

Imprime el texto entre comillas en el monitor.

Indica un giro de 145° del servomotor.

Fin del octavo bloque de instrucciones.

Tiempo que se detiene el motor a pasos.

Indica que la variable reset está en estado bajo, es decir, el motor está apagado.

Tiempo que tarda el motor en estar apagado.

La variable reset está en estado alto, indicando que el motor vuelve a funcionar.

La variable dirección está en estado bajo.

Indica el número de pasos por evento.

Inicio del noveno bloque de instrucciones.

La variable steps está en estado alto.

La variable steps está en estado bajo.

Tiempo de espera de 1.8 milisegundos.

Fin del noveno y cuarto bloque de instrucciones.

Si lo anterior no se cumple, procede a ejecutar la siguiente instrucción.

Inicio del décimo bloque de instrucciones.

Si la condición entre paréntesis se cumple, procede a ejecutarse la siguiente instrucción.

Inicio del décimo primer bloque de instrucciones.

Imprime el texto entre comillas en el monitor.

La variable reset está en estado alto, indicando que el motor vuelve a funcionar.

```
digitalWrite(direccion, LOW);  
for (int i=0; i<=6; i++)  
{  
  
digitalWrite(steps, HIGH);  
digitalWrite(steps, LOW);  
delayMicroseconds(VELOCIDAD);  
}  
  
}}
```

La variable dirección está en estado bajo.

Indica el número de pasos por evento.

Inicio del décimo segundo bloque de instrucciones.

La variable steps está en estado alto.

La variable steps está en estado bajo.

Tiempo de espera de 1.8 milisegundos.

Fin del décimo segundo bloque de instrucciones.

Fin del décimo primer, decimo y tercer bloque de instrucciones.